

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB/T 50102-2014

工业循环水冷却设计规范

Code for design of cooling for industrial recirculating water

2014-12-02 发布

2015-08-01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

联合发布

中华人民共和国国家标准

工业循环水冷却设计规范

Code for design of cooling for industrial recirculating water

GB/T 50102-2014

主编部门：中国电力企业联合会

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2015年8月1日

中国计划出版社

2014 北京

中华人民共和国国家标准
工业循环水冷却设计规范

GB/T 50102-2014



中国计划出版社出版

网址：www.jhpress.com

地址：北京市西城区木樨地北里甲 11 号国宏大厦 C 座 3 层

邮政编码：100038 电话：(010) 63906433（发行部）

新华书店北京发行所发行

北京市科星印刷有限责任公司印刷

850mm×1168mm 1/32 7.5 印张 191 千字

2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷



统一书号：1580242 · 650

定价：45.00 元

版权所有 侵权必究

侵权举报电话：(010) 63906404

如有印装质量问题，请寄本社出版部调换

中华人民共和国住房和城乡建设部公告

第 622 号

住房城乡建设部关于发布国家标准 《工业循环水冷却设计规范》的公告

现批准《工业循环水冷却设计规范》为国家标准，编号为 GB/T 50102—2014，自 2015 年 8 月 1 日起实施。原国家标准《工业循环水冷却设计规范》GB/T 50102—2003 同时废止。

本规范由我部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2014 年 12 月 2 日

前　　言

本规范是根据住房城乡建设部《关于印发<2012年工程建设标准规范制订、修订计划>的通知》(建标〔2012〕5号)的要求,由中国电力工程顾问集团东北电力设计院会同有关单位,经广泛调查研究,认真总结实践经验,吸取最新研究成果,并参考有关国际标准和国外先进标准,在广泛征求意见的基础上修订了本规范。

本规范共分5章和2个附录,主要技术内容包括:总则、术语、冷却塔、喷水池和水面冷却。

本规范修订的主要技术内容是:

1. 增加了超大型冷却塔、海水冷却塔、排烟冷却塔的设计内容;
2. 删除了开放式冷却塔内容;
3. 根据近年科研和实践成果,对原条文中的一些数据做了修改;
4. 在修订条文的同时,对增加和修改的条文均相应增加和修改了条文说明。

本规范由住房城乡建设部负责管理,由中国电力企业联合会负责日常管理,由中国电力工程顾问集团东北电力设计院负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送至中国电力工程顾问集团东北电力设计院(地址:吉林省长春市人民大街4368号,邮政编码:130021),以供今后修订时参考。

本规范主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人:

主 编 单 位:中国电力工程顾问集团东北电力设计院

参 编 单 位:中国电力工程顾问集团西北电力设计院

中国电力工程顾问集团西南电力设计院

中国电力工程顾问集团华北电力设计院工程有限公司

中国能源建设集团广东省电力设计研究院

中国水利水电科学研究院

金坛市塑料厂

江苏海鸥冷却塔股份有限公司

北京玻璃钢研究设计院有限公司

主要起草人:王 威 李敬生 龙 健 王伟民 孟令国

钱永丰 姚友成 李元梅 侯宪安 吴浪洲

李绍仲 冯 璜 王宝福 龙国庆 赵顺安

纪 平 姜晓荣 包冰国 尹 证

主要审查人:李武全 高 玲 徐海云 李志悌 华钟南

刘 智 陆 瀛 王明韧 李武申 刘志刚

彭德刚 胡三季 孙 文 张开军 李学志

韩红琪 刘扬帆

目 次

1 总 则	(1)
2 术 语	(2)
3 冷却塔	(4)
3.1 一般规定	(4)
3.2 自然通风冷却塔工艺	(17)
3.3 机械通风冷却塔工艺	(19)
3.4 冷却塔结构设计基本要求及材料	(21)
3.5 自然通风冷却塔的荷载及内力计算	(23)
3.6 机械通风冷却塔的荷载及内力计算	(31)
3.7 淋水装置构架	(33)
3.8 构造要求	(34)
3.9 冷却塔耐久性	(37)
4 喷水池	(41)
4.1 喷水池工艺设计	(41)
4.2 喷水池结构设计	(42)
5 水面冷却	(44)
5.1 一般规定	(44)
5.2 冷却池	(46)
5.3 河道冷却	(48)
5.4 海湾冷却	(49)
附录 A 自然通风冷却塔通风筒内侧设计气温取值	(51)
附录 B 机械通风冷却塔风机和电动机当量 静荷载计算方法	(52)

本规范用词说明	(54)
引用标准名录	(55)
附:条文说明	(57)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms	(2)
3	Cooling tower	(4)
3.1	General requirement	(4)
3.2	Natural draft cooling tower	(17)
3.3	Mechanical draft cooling tower	(19)
3.4	Basic requirements and materials of cooling tower structural design	(21)
3.5	Load and internal force calculation of natural draft cooling tower	(23)
3.6	Load and internal force calculation of mechanical draft cooling tower	(31)
3.7	Water spray device structure	(33)
3.8	Construction requirement	(34)
3.9	Durability of cooling tower	(37)
4	Spray pond	(41)
4.1	Process design of spray pond	(41)
4.2	Structural design of spray pond	(42)
5	Water surface cooling	(44)
5.1	General requirement	(44)
5.2	Cooling pond	(46)
5.3	Channel cooling	(48)
5.4	Gulf cooling	(49)

Appendix A Design temperature value of the inner air

of the ventilator for natural draft cooling tower	(51)
Appendix B Equivalent static load calculation method of fan and motor for mechanical draft cooling tower	(52)
Explanation of wording in this code	(54)
List of quoted standards	(55)
Addition;Explanation of provisions	(57)

1 总 则

1. 0. 1 为了在工业循环水冷却设施设计中贯彻执行国家的技术经济政策,做到技术先进、安全适用、经济合理、节能环保、确保质量,制定本规范。

1. 0. 2 本规范适用于敞开式工业循环水冷却设施的工艺和结构设计。

1. 0. 3 工业循环水冷却设施的类型选择,应根据生产工艺对循环水的水量、水温、水质和供水系统的运行方式等使用要求,并结合下列因素,通过技术经济比较确定:

- 1 当地的水文、气象、地形和地质等自然条件;
- 2 材料、设备、电能和补给水的供应情况;
- 3 场地布置和施工条件;
- 4 工业循环水冷却设施与周围环境的相互影响;
- 5 建(构)筑物的安全可靠性。

1. 0. 4 工业循环水冷却设施的设计除应执行本规范外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 敞开式工业循环水冷却设施 open recirculating water cooling facilities

工业循环冷却水(以下简称循环水)直接暴露于大气的冷却设施。

2.0.2 蒸发损失 evaporation loss

由于液体表面汽化造成的循环水损失。

2.0.3 风吹损失 drift and blow-out loss

由于气流裹挟作用带走水滴造成的循环水损失。

2.0.4 排水损失 purge loss

从循环水系统中排放一定的水量以维持确定的循环水浓缩倍率,由此造成的循环水损失。

2.0.5 蒸发损失水率 rate of evaporation water loss

冷却塔、冷却池、喷水池等冷却设施的蒸发损失水量占进入这些冷却设施循环水量的百分比。

2.0.6 风吹损失水率 rate of drift and blow-out water loss

冷却塔、喷水池等冷却设施的风吹损失水量占进入这些冷却设施循环水量的百分比。

2.0.7 循环水浓缩倍率 concentration cycle of recirculating water

循环水含盐量与补充水含盐量的比值。

2.0.8 海水盐度 seawater salinity

海水中总溶解性固体质量与海水质量之比,单位为 g/kg。

2.0.9 导风装置 air deflector

安装于冷却塔进风口用于引导气流的装置。

- 2. 0. 10 超大型冷却塔** super large-scale cooling tower
淋水面积大于或等于 10000m^2 的自然通风逆流式冷却塔。
- 2. 0. 11 海水冷却塔** seawater cooling tower
循环水为海水的湿式冷却塔。
- 2. 0. 12 排烟冷却塔** flue gas discharged cooling tower
兼有排放烟气功能的自然通风冷却塔。
- 2. 0. 13 塔内烟道出口流速** velocity of flue gas at outlet pipe in cooling tower
烟气在塔内烟道出口处气流平均速度。
- 2. 0. 14 冷却塔出口流速** outlet velocity of cooling tower
混合气体在冷却塔出口处气流平均速度。
- 2. 0. 15 防腐体系** anticorrosion coating system
包含涂刷分区、采用防腐涂料品种、涂料分层及厚度、涂刷工艺要求等内容的防腐方案统称。
- 2. 0. 16 淋水面积** area of water drenching
逆流式冷却塔淋水填料顶部标高处的塔壁内缘包围的面积。
- 2. 0. 17 进风口面积** area of air inlet
以进风口上檐处控制半径计算出的周长乘以进风口垂直高度所得到的面积。

3 冷却塔

3.1 一般规定

3.1.1 冷却塔在厂区总平面规划中的位置应根据生产工艺流程的要求,结合冷却塔与周围环境之间的相互影响及工业企业的发展扩建规模等因素综合考虑确定,并应符合下列规定:

- 1 寒冷地区冷却塔宜布置在厂区主要建(构)筑物及露天配电装置的冬季主导风向的下风侧或侧风侧;
- 2 冷却塔宜布置在贮煤场等粉尘污染源的全年主导风向的上风侧或侧风侧;
- 3 冷却塔宜远离厂内露天热源;
- 4 冷却塔之间或冷却塔与其他建(构)筑物之间的距离除应满足冷却塔的通风要求外,还应满足管、沟、道路、建(构)筑物的防火和防爆要求,以及冷却塔和其他建(构)筑物的施工和检修场地要求;
- 5 冷却塔的位置宜远离对噪声敏感的区域;
- 6 冷却塔宜靠近主要用水车间;
- 7 排烟冷却塔宜布置于炉后区域,靠近脱硫吸收塔;
- 8 冷却塔布置时宜避开地质不均匀地段。

3.1.2 自然通风逆流式冷却塔的塔体规模可按表 3.1.2 规定划分。

表 3.1.2 自然通风逆流式冷却塔塔体规模划分表

淋水面积 $S(m^2)$	$S < 4000$	$4000 \leq S < 8000$	$8000 \leq S < 10000$	$S \geq 10000$
塔体规模	小型	中型	大型	超大型

3.1.3 冷却塔结构设计使用年限应为 50 年。

3.1.4 当需要降低冷却塔噪声影响时,可选用下列措施:

- 1 可在冷却塔外设隔声屏障;
- 2 可在进风口处设降噪装置;
- 3 机械通风冷却塔可选用低噪声型的电机、风机设备,可在塔顶设降噪装置;
- 4 可在集水池水面处设降噪装置。

3.1.5 冷却塔的集中或分散布置方案的选择,应根据使用循环水的车间数量、分布位置及各车间生产工艺的用水要求,通过技术经济比较后确定。

3.1.6 冷却塔可不设备用;冷却塔检修时应有不影响生产的措施。

3.1.7 冷却塔的热力计算宜采用焓差法或经验方法。

3.1.8 冷却塔的热力计算采用焓差法时,宜符合下列规定:

1 逆流式冷却塔热力计算宜按下列公式计算,公式(3.1.8-1)右侧可采用辛普森(Simpson)近似积分法或其他方法求解。当采用辛普森近似积分法求解时,对水温 t_2 至 t_1 的积分区域宜分为不少于 4 的等份;当水温差小于 15℃时,水温 t_2 至 t_1 的积分区域也可分为 2 等份:

$$\frac{KK_a V}{Q} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{C_w dt}{h'' - h} \quad (3.1.8-1)$$

$$K = 1 - \frac{C_w t_2}{r_{t2}} \quad (3.1.8-2)$$

式中: V —淋水填料的体积(m^3);

Q —进入冷却塔的循环水流量(kg/s);

K —计入蒸发水量散热的修正系数;

r_{t2} —与冷却后水温相应的水的汽化热(kJ/kg);

K_a —与含湿量差有关的淋水填料的散质系数 [$kg/(m^3 \cdot s)$];

C_w —循环水的比热 [$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$];

t_1 —进入冷却塔的水温($^\circ C$);

t_2 ——冷却后的水温(℃)；

h ——湿空气的比焓(kJ/kg)；

h'' ——与水温 t 相应的饱和空气比焓(kJ/kg)。

2 圆形横流式冷却塔可从圆形横流式冷却塔环形淋水填料中切取中心角为 θ 的填料单元，水从上面淋下，空气从周向进入，宜采用柱坐标系，坐标原点宜为塔的中轴线与淋水填料顶面延长线的交点， z 向下为正， r 向外为正。圆形横流式冷却塔热力计算宜按下式计算，下式可采用解析法或差分法求解：

$$C_w q \frac{\partial t}{\partial z} = g_i \frac{r_1}{r} \cdot \frac{\partial h}{\partial r} = -K_a (h'' - h) \quad (3.1.8-3)$$

式中： q ——淋水密度[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]；

g_i ——进风口断面的平均质量风速[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]；

r ——塔半径(m)；

r_1 ——塔进风口半径(m)；

h ——进入冷却塔的湿空气比焓(kJ/kg)。

注：式中边界条件为 $z=0, t=t_1; r=r_1, h=h_1$ 。

3 矩形横流式冷却塔可从矩形横流式冷却塔切取一填料单元。水从上面淋下，空气从进风口进入，进风口宜在左边。宜采用直角坐标系，坐标原点宜为淋水填料顶面与进风口的交点， z 向下为正， x 沿气流流向为正。矩形横流式冷却塔热力计算宜按下式计算，下式可采用解析法或差分法求解。矩形横流式冷却塔也可利用本规范公式(3.1.8-3)进行热力计算，此时可设塔的内半径为一极大的数值。

$$-C_w q \frac{\partial t}{\partial z} = g_i \frac{\partial h}{\partial x} = K_a (h'' - h) \quad (3.1.8-4)$$

注：式中边界条件为 $z=0, t=t_1; x=0, h=h_1$ 。

4 排烟冷却塔、海水冷却塔的热力计算可按本规范公式(3.1.8-1)与(3.1.8-2)计算。

3.1.9 冷却塔热力计算中的其他参数计算宜符合下列规定：

1 湿空气的比焓宜按下式计算：

$$h = C_d\theta + X(r_0 + C_v\theta) \quad (3.1.9-1)$$

式中： C_d ——干空气的比热，可取 $1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

C_v ——水蒸汽的比热，可取 $1.842 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

θ ——空气的干球温度($^\circ\text{C}$)；

r_0 ——水在 0°C 时的汽化热，可取 $2500.8 \text{ kJ}/\text{kg}$ ；

X ——空气的含湿量(kg/kg)。

2 饱和水蒸汽压力宜按下式计算：

$$\begin{aligned} \lg P'' &= 2.0057173 - 3.142305 \left(\frac{10^3}{T} - \frac{10^3}{373.16} \right) \\ &\quad + 8.2 \lg \frac{373.16}{T} - 0.0024804 (373.16 - T) \end{aligned} \quad (3.1.9-2)$$

式中： P'' ——饱和水蒸汽压力(kPa)；

T ——开尔文温度(K)。

3 湿空气密度宜按下式计算：

$$\rho = \frac{1}{T} (0.003483 P_A - 0.001316 \varphi P''_{v\theta}) \quad (3.1.9-3)$$

式中： ρ ——湿空气密度(kg/m^3)；

φ ——空气的相对湿度；

P_A ——大气压力(Pa)；

$P''_{v\theta}$ ——温度为 θ 时的饱和水蒸汽压力(Pa)。

4 出口的空气为饱和湿空气时，出塔空气干球温度宜按下式计算：

$$\theta_2 = \theta_1 + (t_m - \theta_1) \frac{h_2 - h_1}{h''_m - h_1} \quad (3.1.9-4)$$

式中： θ_2 ——出塔空气干球温度($^\circ\text{C}$)；

θ_1 ——进塔空气干球温度($^\circ\text{C}$)；

t_m ——进、出冷却塔水温的算术平均值($^\circ\text{C}$)；

h_2 ——排出冷却塔的湿空气比焓(kJ/kg)；

h''_m ——与水温 t_m 相应的饱和空气比焓(kJ/kg)。

5 出塔空气比焓宜按下式计算：

$$h_2 = h_1 + \frac{C_w \Delta t}{K\lambda} \quad (3.1.9-5)$$

式中: Δt ——进、出冷却塔的水温差(℃);

λ ——气水比,进入冷却塔的干空气和循环水的质量比。

3.1.10 淋水填料的热交换特性宜采用原型塔的实测数据。当缺乏原型塔的实测数据时,可采用模拟塔的试验数据,并应根据模拟塔的试验条件与设计的冷却塔的运行条件之间的差异,对模拟塔的试验数据进行修正。

3.1.11 海水冷却塔热力计算所采用的淋水填料热交换特性,应采用与工程情况相近的海水冷却塔实测数据。当缺乏海水冷却塔实测数据时,可利用淡水冷却塔淋水填料热交换特性按下式修正:

$$N_s = N \times A_s \quad (3.1.11)$$

式中: N_s ——海水冷却塔的冷却数;

N ——淡水冷却塔的冷却数;

A_s ——海水冷却塔热力计算时淋水填料热交换特性修正系数,宜通过试验确定。

3.1.12 海水循环水盐度可按下式计算:

$$C_s = C_0 \times n_1 \quad (3.1.12)$$

式中: C_s ——海水循环水盐度(g/kg);

C_0 ——海水补给水的盐度(g/kg);

n_1 ——海水循环水设计浓缩倍率。

3.1.13 计算海水冷却塔的冷却水温时,海水补给水设计盐度宜符合下列规定:

1 当计算最高冷却水温时,宜按近期连续不少于5年,每年最热3个月时期的月平均海水补给水盐度进行设计;

2 计算冷却塔各月的月平均水温时,宜采用近期连续不少于5年的相应各月的月平均气象条件及相应条件下海水补给水盐度进行设计。

3.1.14 冷却塔的通风阻力宜按下式计算：

$$H = \xi \rho_m \frac{v_m^2}{2} \quad (3.1.14)$$

式中： H ——冷却塔的全部或局部通风阻力(Pa)；

v_m ——计算风速。当计算全塔总阻力时， v_m 为淋水填料计算断面的平均风速；当计算冷却塔的局部阻力时， v_m 为该处的计算风速(m/s)；

ρ_m ——计算空气密度。当计算全塔总阻力时， ρ_m 为进、出冷却塔的湿空气平均密度；当计算冷却塔的局部阻力时， ρ_m 为该处的湿空气平均密度(kg/m³)；

ξ ——冷却塔的总阻力系数或局部阻力系数。

3.1.15 冷却塔的通风阻力系数应符合下列规定：

- 1 应采用与所设计的冷却塔相同的原型塔的实测数据。
- 2 当缺乏实测数据时，应采用与所设计的冷却塔相似的模型塔的试验数据。
- 3 当缺乏实测数据或试验数据时，可按经验方法计算。
- 4 自然通风逆流式冷却塔的总阻力系数宜按下列公式计算：

$$\xi = \xi_a + \xi_b + \xi_c \quad (3.1.15-1)$$

$$\xi_a = (1 - 3.47\epsilon + 3.65\epsilon^2)(85 + 2.51\xi_f - 0.206\xi_f^2 + 0.00962\xi_f^3) \quad (3.1.15-2)$$

$$\xi_b = 6.72 + 0.654D + 3.5q + 1.43v_m - 60.61\epsilon - 0.36v_mD \quad (3.1.15-3)$$

$$\xi_c = \left(\frac{F_m}{F_e} \right)^2 \quad (3.1.15-4)$$

式中： ξ ——总阻力系数；

ξ_a ——从塔的进风口至塔喉部的阻力系数(不包括雨区淋水阻力)；

ξ_b ——淋水时雨区阻力系数；

ξ_f ——淋水时的填料、收水器、配水系统的阻力系数；
 ϵ ——塔进风口面积与进风口上缘塔面积之比， $0.35 < \epsilon < 0.45$ ；
 D ——淋水填料底部塔内径(m)；
 v_m ——淋水填料计算断面的平均风速(m/s)；
 ξ_e ——塔筒出口阻力系数；
 F_m ——冷却塔淋水面积(m^2)；
 F_e ——塔筒出口面积(m^2)。

5 排烟冷却塔的总阻力系数宜按下列公式计算：

$$\xi = \xi_a + \xi_b + \xi_e + \xi_d \quad (3.1.15-5)$$

$$\xi_e = \left(\frac{F_m}{F_e} \right)^2 \left(\frac{G_3 + G}{G} \right)^2 \quad (3.1.15-6)$$

式中： ξ_d ——烟道的局部阻力系数，可通过物理模型试验给出，当无实验结果时可忽略不计；

G ——填料处的通风量(m^3/s)；

G_3 ——烟气量(m^3/s)。

6 冷却塔的外区配水总阻力系数宜按下列公式计算：

$$\xi = \xi_{al} + \xi_{bl} + \xi_e \quad (3.1.15-7)$$

$$\xi_{al} = (1 - 3.47\epsilon + 3.65\epsilon^2)(85 + 2.51\xi_{hl} - 0.206\xi_{hl}^2 + 0.00962\xi_{hl}^3) \quad (3.1.15-8)$$

$$\xi_{bl} = (6.72 + 0.654D + 3.5q + 1.43v_m - 60.61\epsilon - 0.36v_m D) \frac{F_0}{F_f} \quad (3.1.15-9)$$

$$\xi_h = \frac{G_h \xi_h + G_c \xi_c}{G_h + G_c} \quad (3.1.15-10)$$

式中： ξ_{al} ——外区淋水时从塔的进风口至塔喉部的阻力系数(不包括雨区淋水阻力)；

ξ_{bl} ——外区淋水时雨区阻力系数；

F_t ——冷却塔内外区淋水面积之和(m^2)；

F_0 ——外区淋水面积(m^2)；

ξ_n ——外区淋水时的填料、收水器、配水系统的阻力系数；

G_c ——内区通风量(m^3/s)；

G_b ——外区通风量(m^3/s)；

ξ_h ——外区填料淋水时阻力系数；

ξ_c ——内区填料不淋水时阻力系数。

7 海水冷却塔的总阻力系数可按本规范公式(3.1.15-1)、(3.1.15-2)、(3.1.15-3)、(3.1.15-4)计算。

8 机械通风冷却塔的总阻力系数计算应按现行国家标准《机械通风冷却塔工艺设计规范》GB/T 50392 的有关规定执行。

9 当有降噪措施时，应计入降噪措施对冷却塔阻力系数的影响。

3.1.16 冷却塔的冷却水温不应超过生产工艺允许的最高值；计算冷却塔的设计最高冷却水温的气象条件应符合下列规定：

1 根据生产工艺的要求，宜采用按湿球温度频率统计方法计算的频率为5%~10%的日平均气象条件；

2 气象资料应采用近期连续不少于5年，每年最热时期3个月的日平均值；

3 当产品或设备对冷却水温的要求极为严格或要求不高时，根据具体要求，可提高或降低气象条件标准。

3.1.17 计算冷却塔的各月的月平均冷却水温时，应采用近期连续不少于5年的相应各月的月平均气象条件。

3.1.18 气象资料应选用能代表冷却塔所在地气象特征的气象台、站的资料，必要时宜在冷却塔所在地设气象观测站。

3.1.19 冷却塔的水量损失应根据蒸发、风吹和排水各项损失水量确定。

3.1.20 冷却塔的蒸发损失水率计算应符合下列规定：

1 当不进行冷却塔的出口气态计算时，蒸发损失水率可按下式计算：

$$P_e = K_{ZF} \cdot \Delta t \times 100\% \quad (3.1.20-1)$$

式中: P_e ——蒸发损失水率;

K_{ZF} ——系数($1/^\circ C$), 可按表 3.1.20 规定取值; 当进塔干球空气温度为中间值时可采用内插法计算。

表 3.1.20 系数 K_{ZF}

进塔干球 空气温度 ($^\circ C$)	-10	0	10	20	30	40
$K_{ZF}(1/^\circ C)$	0.0008	0.0010	0.0012	0.0014	0.0015	0.0016

2 对进入和排出冷却塔的空气状态进行详细的计算时, 蒸发损失水率可按下式计算:

$$P_e = \frac{G_d}{Q} (X_2 - X_1) \times 100\% \quad (3.1.20-2)$$

式中: G_d ——进入冷却塔的干空气质量流量(kg/s);

X_1 ——进塔空气的含湿量(kg/kg);

X_2 ——出塔空气的含湿量(kg/kg)。

3.1.21 冷却塔的风吹损失水率, 应按冷却塔的通风方式和收水器的逸出水率以及横向穿越风从塔的进风口吹出的水损失率确定。当缺乏收水器的逸出水率等数据时, 可按表 3.1.21 规定取值。

表 3.1.21 风吹损失水率(%)

通风方式	机械通风冷却塔	自然通风冷却塔
有收水器	0.10	0.05
无收水器	1.20	0.80

3.1.22 循环冷却水系统排水损失水量应根据对循环水水质的要求计算确定, 可按下式计算:

$$Q_b = \frac{Q_e - (n-1)Q_w}{n-1} \quad (3.1.22)$$

式中： Q_b ——循环冷却水系统排水损失水量(m^3/h)；

Q_e ——冷却塔蒸发损失水量(m^3/h)；

Q_w ——冷却塔风吹损失水量(m^3/h)；

n ——循环水设计浓缩倍率。

3.1.23 淋水填料的型式和材料的选择应根据下列因素综合确定：

- 1 冷却塔的类型及冷却塔运行维护条件；
- 2 循环水的水温和水质；
- 3 填料的热力特性和阻力性能；
- 4 填料的物理力学性能、化学性能和稳定性；
- 5 填料的价格和供需情况；
- 6 施工和检修方便；
- 7 填料的支承方式和结构；
- 8 用于海水的填料宜采用海生物不易附着和积聚的填料类型。

3.1.24 机械通风冷却塔和自然通风冷却塔均应装设收水器。收水器应选用除水效率高、通风阻力小、经济、耐用的型式和材质。

3.1.25 冷却塔的配水系统应满足在同一设计淋水密度区域内配水均匀、通风阻力小和便于维修等要求，并应根据塔的类型、循环水质和水量等条件按下列规定选择：

- 1 逆流式冷却塔宜采用管式或管槽结合的配水型式；
- 2 横流式冷却塔宜采用池式或管式。

3.1.26 管式配水系统应符合下列规定：

- 1 配水干管起始断面设计流速宜为 $1.0m/s \sim 1.5m/s$ ；
- 2 可利用支管使配水干管连通成环网；
- 3 配水干管或压力配水槽的末端必要时应设通气管及排污措施。

3.1.27 槽式配水系统应符合下列要求：

1 主水槽的起始断面设计流速宜为 $0.8\text{m/s} \sim 1.2\text{m/s}$; 配水槽的起始断面设计流速宜为 $0.5\text{m/s} \sim 0.8\text{m/s}$;

2 配水槽夏季的正常设计水深应大于溅水喷嘴内径的 6 倍,且不应小于 0.15m ;

3 配水槽的超高不应小于 0.1m ; 在可能出现的超过设计水量工况下,配水槽不应溢流;

4 配水槽断面净宽不应小于 0.12m ;

5 主水槽、配水槽均宜水平设置,水槽连接处应圆滑,水流转弯角不应大于 90° 。

3.1.28 横流式冷却塔的配水池应符合下列要求:

1 池内水流应平稳,夏季正常设计水深应大于溅水喷嘴内径或配水底孔直径的 6 倍;

2 池壁超高不宜小于 0.1m ,在可能出现的超过设计水量工况下不应溢流;

3 池底宜水平设置,池顶宜设盖板或采取防止光照下滋长菌藻的措施。

3.1.29 喷溅装置应选用结构合理、流量系数适宜、喷溅均匀和不易堵塞的型式。

3.1.30 配水竖井或竖管应有放空措施。配水竖井内应保持水流平稳,不应产生旋流。同一单元循环水系统中各冷却塔的竖井水位或竖管水头高程应一致。

3.1.31 逆流式冷却塔的进风口高度应结合进风口空气动力阻力、塔内空气流场分布、冷却塔塔体的各部分尺寸及布置、淋水填料的型式和空气动力阻力等因素,通过技术经济比较确定。冷却塔的进风口面积与淋水面积之比宜符合下列规定:

1 自然通风逆流式冷却塔宜为 $0.30 \sim 0.45$;

2 机械通风冷却塔宜按现行国家标准《机械通风冷却塔工艺设计规范》GB/T 50392 的有关规定执行。

3.1.32 横流式冷却塔的淋水填料的高和径深应根据工艺对冷却

水温的要求、冷却塔的通风措施、淋水填料的型式、塔的投资和运行费等因素，通过技术经济比较确定。淋水填料高和径深的比宜符合下列规定：

1 机械通风冷却塔宜为2.0~3.0；

2 自然通风冷却塔当淋水面积不大于 1000m^2 时，宜为1.5~2.0；当淋水面积大于 1000m^2 时，宜为1.2~1.8。

3.1.33 冷却塔的集水池应符合下列要求：

1 集水池的深度可为2.0m，当集水池有其他贮备水量要求时深度可适当增加。当循环水采用阻垢剂、缓蚀剂处理时，集水池的容积应满足水处理药剂在循环水系统内允许停留时间的要求。

2 集水池应有溢流、排空及排泥措施。

3 池壁的超高不宜小于0.3m，小型机械通风冷却塔不宜小于0.15m。

4 出水口和集水池四周应设安全防护设施。

5 集水池周围应设回水台，其宽度宜为1.0m~3.0m，坡度宜为3%~5%。回水台外围应有防止周围地表水流人池内的措施。

6 同一单元循环水系统中，各冷却塔集水池水位高程应一致。

7 敷设在集水池内的管沟应满足抗浮要求。

8 当集水池兼作水泵吸水池时，局部水深应满足水泵吸水要求。

9 服务于炼油装置的循环水冷却塔集水池宜设溢流排污槽。

3.1.34 冷却塔进风口处的支柱和冷却塔内空气通流部位的构件，应采用气流阻力较小的断面及型式。

3.1.35 冷却塔内外与水汽接触的金属构件、管道和机械设备均应采取防腐蚀措施。

3.1.36 根据不同塔的类型和具体条件,冷却塔应有下列设施:

- 1** 通向塔内的塔门或人孔;
- 2** 从地面通向塔门和塔顶的扶梯或爬梯;
- 3** 配水系统顶部的人行道和栏杆;
- 4** 避雷保护装置;
- 5** 航空警示设施;
- 6** 运行监测的仪表;
- 7** 机械通风冷却塔上塔扶梯和塔顶平台照明;
- 8** 海水冷却塔内可设置填料淡水冲洗装置。

3.1.37 寒冷和严寒地区的冷却塔,根据具体条件应按下列规定采取防冻措施:

- 1** 在冷却塔的进风口上缘沿塔内壁可设置向塔内斜下方喷射热水的防冻管,喷射热水的总量可为冬季进塔总水量的 20%~30%。
- 2** 淋水填料内外围宜采用分区配水,冬季可采用外围配水运行。
- 3** 当同一循环冷却水系统中冷却塔的数量较多时,可减少运行的塔数。停止运行的塔的集水池应保持一定量的热水循环或采取其他保温措施。
- 4** 塔的进水阀门及管道应有防冻放水管或其他保温措施。
- 5** 机械通风冷却塔可采取减小风机叶片安装角,采用变速电动机驱动风机,或停止风机运行等措施减少进入冷却塔的冷空气量;也可选用允许倒转的风机设备,当冬季塔内填料结冰时,可倒转风机融冰。
- 6** 机械通风冷却塔的风机减速器有润滑油循环系统时,应有对润滑油的加热设施。
- 7** 自然通风逆流式冷却塔的进风口上缘内壁宜设挡水檐,檐宽宜为 0.3m~0.4m。
- 8** 自然通风冷却塔可在进风口设置挡风装置。

9 自然通风逆流式冷却塔的进水干管上宜设置能通过部分或全部循环水量的旁路水管,当循环水系统冬季冷态运行或热负荷较低时,循环水可通过旁路直接进入塔的集水池。

3.1.38 冷却塔设计文件中宜对施工、运行及维护提出要求。

3.1.39 新设计的冷却塔应有供验收测试使用的仪器和仪表的安装位置和设施。

3.1.40 自然通风冷却塔的塔筒宜采用双曲线型钢筋混凝土薄壳结构,寒冷地区也可采用钢架镶板结构。

3.2 自然通风冷却塔工艺

3.2.1 相邻自然通风冷却塔的塔间净距应符合下列规定:

1 塔间净距的计算点应为塔底(0.0m)标高斜支柱中心处。塔间净距不宜小于塔底(0.0m)标高斜支柱中心处塔体直径的0.5倍。对于逆流式冷却塔且不应小于4倍进风口高度,对于横流式冷却塔且不应小于3倍进风口高度。

2 当相邻两塔几何尺寸不同时应按较大塔计算。

3.2.2 根据冷却塔的通风要求,自然通风冷却塔与机械通风冷却塔之间的净距不宜小于自然通风冷却塔进风口高度的2倍加0.5倍机械通风冷却塔或塔排的长度,且不应小于40m~50m,必要时可通过模型试验确定其间距;自然通风冷却塔与其他建(构)筑物的净距不应小于2倍冷却塔进风口高度。

3.2.3 自然通风冷却塔的抽力宜按下式计算:

$$Z = H_e g (\rho_1 - \rho_2) \quad (3.2.3)$$

式中: Z ——塔抽力(Pa);

H_e ——塔的有效抽风高度,宜采用淋水填料中部至塔顶的高度差(m);

g ——重力加速度(m/s^2);

ρ_1 ——进塔湿空气密度(kg/m^3);

ρ_2 ——出塔湿空气密度(kg/m^3)。

3.2.4 自然通风冷却塔的外区配水的抽力计算可按下式计算：

$$Z = \int_0^{H_e} g \left(\rho_i - \rho_h - \frac{\rho_2 - \rho_h}{H_e} z \right) dz \\ = H_e g (\rho_i - \rho_h) - \frac{1}{2} (\rho_2 - \rho_h) g H_e \quad (3.2.4)$$

式中： ρ_h ——塔外区填料上的平均湿空气密度(kg/m^3)。

3.2.5 自然通风冷却塔的塔顶应设检修步道及栏杆，检修步道上应设检修孔。检修孔平时应封盖。

3.2.6 自然通风冷却塔从地面至塔门平台的扶梯应设护栏；从塔门平台至塔顶的爬梯应设护笼；当冷却塔总高度大于100m时，从塔门平台至塔顶的爬梯应设休息平台。

3.2.7 在大风地区建造的自然通风逆流式冷却塔，其填料底部至集水池水面间宜在两相互垂直的直径方向设挡风隔板或其他措施。

3.2.8 排烟冷却塔设计应满足循环水冷却和烟气排放要求，应符合烟气排放高度、扩散等环境保护标准。

3.2.9 排烟冷却塔塔型参数优化设计时，塔高与塔底零米直径的比值宜采用本规范表3.4.1规定的较大值，并应满足环境保护及周围环境的限制要求。

3.2.10 排烟冷却塔烟道出口的烟气流速宜控制在 $15\text{m}/\text{s}$ ~ $25\text{m}/\text{s}$ ，混合气体在冷却塔顶部出口处的平均流速不宜小于 $3\text{m}/\text{s}$ 。

3.2.11 排烟冷却塔的烟道布置应符合下列规定：

1 进塔烟道宜采用高位布置，其标高应根据脱硫塔出口标高确定。

2 排烟口宜布置在收水器上部和冷却塔中央，竖井及配水方式宜计入烟道支撑结构的影响。当采用双烟道时，排烟口宜对称布置。

3 烟道上应设置人孔、除灰孔、泄水孔和检测孔。

4 脱硫装置与冷却塔间的烟道宜设置不小于1%的纵向坡度,且坡向脱硫装置。

3.3 机械通风冷却塔工艺

3.3.1 机械通风冷却塔宜采用抽风式塔。当循环水对风机的侵蚀性较强时,可采用鼓风式塔。

3.3.2 机械通风冷却塔的平面宜符合下列规定:

1 单格的机械通风冷却塔的平面宜为圆形或正多边形;

2 多格毗连的机械通风冷却塔的平面宜采用正方形或矩形;

3 当塔格的平面为矩形时,边长比不宜大于4:3,进风口宜设在矩形的长边。

3.3.3 逆流抽风式冷却塔的淋水填料顶面至风机风筒的进口之间的气流收缩段宜符合下列规定:

1 当塔顶盖板为平顶且未装导流装置时,从填料顶面算起的气流收缩段的顶角不宜大于90°;当塔顶设有导流圈时,从收水器顶面算起的气流收缩段的顶角可采用90°~110°;

2 当塔顶盖板自收水器以上为收缩型时,收缩段盖板的顶角宜采用90°~110°。

3.3.4 抽风式塔的风机风筒进口应采用流线型,风筒的出口应采用减少动能损失的措施,宜设扩散筒。扩散筒的高度不宜小于风机半径,扩散筒的边壁宜采用曲线扩散型,边壁扩散角沿程逐渐加大,风筒的扩散中心角宜采用14°~18°。风机叶片尖端至风筒内壁的间隙不应大于风机厂推荐的间隙值,不宜大于30mm。

3.3.5 机械通风横流式冷却塔的淋水填料从顶部至底部应有向塔的垂直中轴线的收缩倾角。点滴式淋水填料的收缩倾角宜为9°~11°;薄膜式淋水填料的收缩倾角宜为5°~6°。

3.3.6 单侧进风塔的进风面宜面向夏季主导风向;双侧进风塔的进风面宜平行于夏季主导风向。

3.3.7 当塔的格数较多时,宜分成多排布置。每排的长度与宽度

之比不宜大于 5 : 1。

3.3.8 两排以上的塔排布置应符合下列要求：

- 1 长轴位于同一直线上的相邻塔排净距不应小于 4m；
- 2 长轴不在同一直线上相互平行布置的塔排净距不应小于塔的进风口高度的 4 倍。

3.3.9 周围进风的机械通风冷却塔之间的净距不应小于冷却塔的进风口高度的 4 倍。

3.3.10 根据冷却塔的通风要求，塔的进风口侧与其他建(构)筑物的净距不应小于塔的进风口高度的 2 倍。

3.3.11 设计机械通风冷却塔时，应分析冷却塔排出的湿热空气回流和干扰对冷却效果的影响，必要时应对设计气象条件进行修正。

3.3.12 机械通风冷却塔格数较多且布置集中时，冷却塔的风机宜集中控制；各台风机必须有可切断电源的转换开关及就地控制风机启、停的操作设施。

3.3.13 风机设备应采用效率高、噪声小、安全可靠、材料耐腐蚀、安装及维修方便、符合国家现行相关标准的产品。

3.3.14 风机的设计运行工况点应根据冷却塔的设计风量和计算的全塔总阻力确定。风机在设计运行工况点应有较高的效率。

3.3.15 风机的减速器应配有油温监测和报警装置，当采用稀油润滑时应配有油位指示装置；大型风机应配有振动监测、报警和防振保护装置。

3.3.16 机械通风冷却塔应有固定或临时起吊风机设备的设施。

3.3.17 双侧进风的逆流式机械通风冷却塔填料底部至集水池水面之间宜在塔中心平行于进风口的轴线上设挡风隔板。

3.3.18 机械通风横流式冷却塔进风口应设百叶窗式导风装置。

3.3.19 采用工厂生产的冷却塔时,应根据该型产品实测的热力特性曲线进行选用。选用的产品应符合国家现行有关产品标准。

3.4 冷却塔结构设计基本要求及材料

3.4.1 塔筒的几何尺寸应满足循环水的冷却要求,并应结合结构合理、施工方便等因素通过技术经济比较确定。当采用双曲线型钢筋混凝土塔筒时,湿式冷却塔塔筒的几何尺寸宜按表 3.4.1 的规定取值:

表 3.4.1 双曲线型钢筋混凝土塔筒几何尺寸

塔高与塔底(0.0m) 直径的比	喉部面积 与壳底面积的比	喉部高度 与塔高的比	塔顶扩散角 α_t	壳底子午线倾角 α_D
1.2~1.6	0.30~0.50	0.75~0.85	2°~8°	15°~20°

3.4.2 双曲线型自然通风冷却塔塔筒基础型式应根据塔型及地基条件确定,并宜符合下列规定:

1 超大型、大中型塔宜采用环板型基础;

2 中、小型塔在天然地基较差的条件下,可采用倒 T 型基础;

3 当地基为岩石时,可采用单独基础。

3.4.3 机械通风冷却塔宜采用现浇或预制的钢筋混凝土框架结构,围护结构可采用钢筋混凝土墙板或其他轻质墙板。

3.4.4 自然通风和机械通风冷却塔的钢筋混凝土结构强度计算与裂缝宽度验算,应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定执行。冷却塔塔筒、框架、斜支柱和池壁等构件的裂缝宽度不应大于 0.2mm。

3.4.5 自然通风和机械通风冷却塔的地基基础设计应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定执行。

3.4.6 自然通风和机械通风冷却塔的荷载除应符合本规范的规定外,尚应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关

规定执行。

3.4.7 自然通风和机械通风冷却塔的抗震设计,应按现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191 和《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定执行。

3.4.8 冷却塔应采用水工混凝土,并应符合下列要求:

1 水泥品种宜采用普通硅酸盐水泥,其熟料中铝酸三钙含量不宜超过 8%。

2 混凝土最小强度等级可按表 3.4.8 的规定确定。

表 3.4.8 混凝土最小强度等级

结构部位	混凝土最小强度等级			
	常规冷却塔	超大型冷却塔	排烟冷却塔	海水冷却塔
塔筒	C30	C35	C40	C40
斜支柱	C30	C35	C45	C45
集水池壁、倒 T 型、环板型基础	C30	C30	C30	C30
单独基础及水池底板	C30	C30	C30	C30
淋水装置构架、框架及墙板	C30	C35	C35	C40
垫层	C15	C15	C15	C15

注:本表混凝土最小强度等级适用于一般环境和冻融环境。

3 在混凝土中可掺塑化剂、减水剂等外加剂。当有抗冻要求时,应掺加引气剂。

4 水工混凝土不得掺用氯盐。

3.4.9 冷却塔宜使用热轧钢筋,不得使用冷拉钢筋。

3.4.10 排烟冷却塔设计应符合下列要求:

1 塔筒洞口应采取加固措施;

2 应计入风荷载和地震荷载作用方向对塔筒结构安全的

影响；

3 开孔大小应满足烟道安装要求，斜支柱布置宜满足烟道安装要求。

3.5 自然通风冷却塔的荷载及内力计算

3.5.1 自然通风冷却塔塔筒内力计算应选用下列荷载：

- 1 结构自重；
- 2 风荷载；
- 3 温度作用；
- 4 地震作用；
- 5 施工荷载；
- 6 地基不均匀沉降影响；
- 7 烟道对塔筒的作用。

3.5.2 计算自重时，钢筋混凝土重度可采用 25kN/m^3 。

3.5.3 作用在双曲线冷却塔外表面上的等效风荷载标准值应按下式计算：

$$w_{(z,\theta)} = \beta C_g C_p(\theta) \mu_z w_0 \quad (3.5.3)$$

式中： $w_{(z,\theta)}$ ——作用在塔外表面上的等效风荷载标准值(kPa)；

β ——风振系数；

C_g ——塔间干扰系数，大于或等于 1.0；

$C_p(\theta)$ ——平均风压分布系数；

μ_z ——风压高度变化系数；

w_0 ——基本风压(kPa)。

3.5.4 冷却塔风荷载计算时相关参数的选用应符合下列规定：

1 基本风压 w_0 应以当地较为空旷平坦地貌离地面 10m 高、重现期为 50 年的 10min 平均最大风速 $v(\text{m/s})$ 计算，可按下式计算。对于大、中、小型冷却塔不得小于 0.3kPa，对于超大型冷却塔不得小于 0.35kPa。

$$w_0 = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \quad (3.5.4-1)$$

式中： ρ ——空气密度(t/m^3)；

v_0 ——基本风速(m/s)。

2 当冷却塔建在不同地形处，其基本风压值应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定执行。

3 风压高度变化系数应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定执行。

4 双曲线冷却塔平均风压分布系数可按下式计算：

$$C_p(\theta) = \sum_{k=0}^m \alpha_k \cos k\theta \quad (3.5.4-2)$$

式中： α_k ——系数，外表面无肋条的双曲线冷却塔可按表 3.5.4-1 规定取值；外表面有肋条的双曲线冷却塔可按表 3.5.4-2 和表 3.5.4-3 规定取值；

m ——项数。

表 3.5.4-1 无肋塔系数 α_k

α_k	无肋双曲面
α_0	-0.4426
α_1	0.2451
α_2	0.6752
α_3	0.5356
α_4	0.0615
α_5	-0.1384
α_6	0.0014
α_7	0.0650

注：未包括内吸力。

表 3.5.4-2 有肋塔曲线选用表

塔筒外表面粗糙度系数 $\frac{h_R}{a_R}$	0.025~0.1	0.016~0.025	0.010~0.016
曲线编号	K1.0	K1.1	K1.2

注： h_R 和 a_R 为 1/3 塔筒高度处的平均肋高和平均肋间距(见图 3.5.4)。 a_R 不应大于塔筒平均周长的 1/50，塔筒平均周长可取 1/3 塔筒高度处的周长。

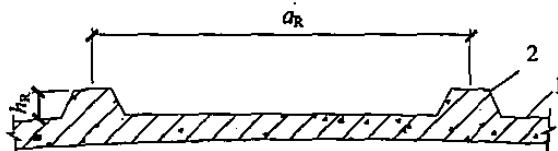


图 3.5.4 h_R 和 a_R

1—筒壁;2—肋条

表 3.5.4-3 有肋塔不同曲线系数 α_k

曲线系数	曲线编号 K1.0	曲线编号 K1.1	曲线编号 K1.2
α_0	-0.31816	-0.34387	-0.37142
α_1	0.42197	0.40025	0.37801
α_2	0.48519	0.51139	0.54039
α_3	0.38374	0.41500	0.44613
α_4	0.13956	0.13856	0.13427
α_5	-0.05178	-0.06904	-0.08635
α_6	-0.07171	-0.07317	-0.07074
α_7	0.00106	0.01357	0.02727
α_8	0.03127	0.03466	0.03500
α_9	-0.00025	-0.00851	-0.01798

注:未包括内吸力。

5 塔高为 190m 及以下的双曲线冷却塔,在不同地面粗糙度类别条件下的风振系数 β 值,可按表 3.5.4-4 规定取值;对于超大型冷却塔必要时可进行研究论证。

表 3.5.4-4 风振系数 β

地面粗糙度类别	A	B	C
风振系数	1.6	1.9	2.3

6 冷却塔塔间干扰系数可通过风洞试验确定。

3.5.5 内吸力标准值应按下列公式计算：

$$w_i = C_{pi} \cdot q_{(H)} \quad (3.5.5-1)$$

$$q_{(H)} = \mu_H \cdot \beta \cdot C_g \cdot w_0 \quad (3.5.5-2)$$

式中： $q_{(H)}$ ——塔顶处的风压设计值；

μ_H ——塔顶标高处风压高度变化系数；

C_{pi} ——内吸力系数，可取-0.5。

3.5.6 当计算冬季运行工况筒壁温度应力时，其筒壁内外温差计算应符合下列要求：

- 1 冬季塔外计算气温应按30年一遇极端最低气温计算；
- 2 冬季塔内计算温度应按进风口、淋水填料及淋水填料以上不同部位分别确定，并应按本规范附录A取值；
- 3 塔筒筒壁内外表面温度差应按下列公式计算：

$$\Delta t_b = \frac{h}{\lambda_b} K_{ch} \Delta t \quad (3.5.6-1)$$

$$\frac{1}{K_{ch}} = \frac{1}{\alpha_o} + \frac{h}{\lambda_b} + \frac{1}{\alpha_i} \quad (3.5.6-2)$$

式中： α_o 、 α_i ——筒壁外、内面向空气的换热系数，可取 $\alpha_o = \alpha_i = 23.26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ ；

h ——筒壁厚度(m)；

λ_b ——混凝土的热传导系数，可取 $1.98 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ ；

Δt_b ——筒壁内外表面温度差(°C)；

Δt ——筒壁内外空气温度差(°C)；

K_{ch} ——传热系数[W/(m² · °C)]。

3.5.7 当需要验算夏季日照下的温度应力时，日照筒壁温差可按沿塔高为恒值，宜采用半圆分布按下式计算：

$$\Delta t_{b(\theta)} = \Delta t_{bo} \sin \theta \quad (3.5.7)$$

式中： $\Delta t_{b(\theta)}$ ——计算点处日照筒壁温差(°C)， $\Delta t_{b(\theta)} = 0 \sim \Delta t_{bo}$ ；

θ ——计算点与日照筒壁温差为0处的夹角(°)， $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ 逆时针增大；

Δt_{bo} ——日照筒壁温差最大值，位于 $\theta = 90^\circ$ 处，可采用

10℃~15℃，热带取较大值，温带如计算可取较小值，寒冷及严寒地区可不考虑日照温度应力。

3.5.8 施工所引起的塔筒附加荷载必要时应进行验算。当施工荷载较大，引起塔筒厚度变化或材料增加过多时，应采用更为合理的施工方式以减小施工荷载对塔筒的影响，或采取临时措施解决，不宜过度增大塔筒厚度。

3.5.9 当遇有不均匀地基时，应复核地基不均匀沉降对塔筒、斜支柱及基础的承载能力和裂缝宽度的影响。

3.5.10 设计双曲线冷却塔塔筒时，应对承载能力和正常使用两种极限状态分别进行荷载效应组合，并应分别取其最不利工况进行设计。

3.5.11 按承载能力极限状态设计时，荷载效应组合选用应符合下列规定：

1 基本组合应满足 $\gamma_0 S \leq R$ ，荷载效应组合的设计值应按下列公式计算：

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_W S_{WK} + \gamma_i \psi_i S_{TK} \quad (3.5.11-1)$$

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_W \psi_w S_{WK} + \gamma_i S_{TK} \quad (3.5.11-2)$$

2 地震作用组合应满足 $S \leq R/\gamma_{RE}$ ，荷载效应组合的设计值应按下式计算：

$$S = \gamma_G S_{GE} + \gamma_W \psi_{WE} S_{WK} + \gamma_i \psi_i S_{TK} + \gamma_E S_E \quad (3.5.11-3)$$

式中： S ——荷载效应组合的设计值；

R ——结构构件抗力的设计值；

γ_{RE} ——承载力抗震调整系数，取 0.85；

γ_0 ——结构重要性系数，取 1.0；

S_{GK} ——按永久荷载标准值计算的荷载效应值；

S_{WK} ——按风荷载标准值计算的荷载效应值；

S_{TK} ——按计入徐变系数的温度作用标准值计算的效应值；

S_{GE} ——重力荷载代表值的效应；

S_E ——按地震作用标准值计算的效应值；

γ_G ——永久荷载分项系数,当其效应对结构有利时取 1.0;当其效应对结构不利时,在基本组合中对由可变荷载效应控制的组合应取 1.2;对由永久荷载效应控制的组合,应取 1.35;在地震作用组合中取 1.2;

γ_W ——风荷载分项系数,取 1.4;

γ_E ——地震作用分项系数,取 1.3;

γ_t ——温度作用分项系数,取 1.0;

ψ_w ——风荷载的组合值系数,一般地区可取 0.6,对于历年最大风速出现在最冷季节即 12 月、1 月、2 月的地区,按气象统计资料确定,取 30 年一遇最低气温时相应的大风荷载与 50 年一遇最大风荷载的比值且不小于 0.6;

ψ_t ——温度作用组合值系数,一般地区可取 0.6,对于历年最大风速出现在最冷季节即 12 月、1 月、2 月的地区,按气象统计资料确定,取 50 年一遇最大风荷载时相应的低气温与 30 年一遇最低气温的比值且不小于 0.6;

ψ_{WE} ——与地震作用效应组合时,风荷载的组合值系数取 0.25。

3.5.12 按正常使用极限状态计算时,裂缝验算应符合下列规定:

1 短期效应组合应按下式计算:

$$S_K = S_{GK} + S_{WK} + \psi_t S_{TK} \quad (3.5.12-1)$$

$$S_K = S_{GK} + \psi_w S_{WK} + S_{TK} \quad (3.5.12-2)$$

式中: S_K ——荷载效应标准组合的设计值。

2 短期最大裂缝宽度应按下式计算:

$$\omega_{smax} = \frac{1}{\tau_1} \omega_{max} \quad (3.5.12-3)$$

式中: ω_{smax} ——短期最大裂缝宽度(mm), $\omega_{smax} \leq 0.2\text{mm}$;

ω_{max} ——最大裂缝宽度(mm),应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定计算;

τ_1 ——长期作用扩大系数,对于塔筒取 1.5;对于斜支柱及环基取 1.0。

3 塔筒上、下刚性环向验算时,可按照正常使用极限状态下裂缝对刚度的影响,温度效应可乘以 0.6 的折减系数后再进行验算。

3.5.13 计算筒壁温度作用时,混凝土可取徐变系数 $C_t = 0.5$ 。

3.5.14 双曲线冷却塔塔筒内力计算,应按有限单元法或旋转壳体有矩理论计算。塔筒的支承条件可按离散支承计算。

3.5.15 双曲线冷却塔塔筒的弹性稳定验算应符合下列规定:

1 塔筒整体稳定验算应按下列公式计算:

$$q_{cr} = CE \left(\frac{h}{r_0} \right)^{2/3} \quad (3.5.15-1)$$

$$K_B = \frac{q_{cr}}{w} \quad (3.5.15-2)$$

$$w = \mu_H \cdot \beta \cdot C_g \cdot w_0 \quad (3.5.15-3)$$

式中: K_B ——弹性稳定安全系数,应满足 $K_B \geq 5$;

q_{cr} ——塔筒屈曲临界压力值(kPa);

w ——塔顶风压标准值(kPa);

C ——经验系数,其值为 0.052;

E ——混凝土弹性模量(kPa);

r_0 ——塔筒喉部半径(m);

h ——塔筒喉部处壁厚(m)。

2 塔筒局部弹性稳定安全系数应满足 $K_B \geq 5$,并应按下列公式计算:

$$0.8K_B \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \right) + 0.2K_B^2 \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \right)^2 \right] = 1 \quad (3.5.15-4)$$

$$\sigma_{cr1} = \frac{0.985E}{\sqrt[4]{(1-\nu^2)^3}} \left(\frac{h}{r_0} \right)^{4/3} K_1 \quad (3.5.15-5)$$

$$\sigma_{cr2} = \frac{0.612E}{\sqrt[4]{(1-\nu^2)^3}} \left(\frac{h}{r_0} \right)^{4/3} K_2 \quad (3.5.15-6)$$

式中： σ_1 、 σ_2 ——由 $G + w_e + w_i$ 组合产生的环向、子午向压力(kPa)，其中 w_i 为内吸力引起的压力；

σ_{cr1} 、 σ_{cr2} ——环向、子午向的临界压力(kPa)；

h ——筒壁厚度(m)；

ν ——混凝土泊松比；

K_1 、 K_2 ——几何参数，应按表 3.5.15 规定取值。

表 3.5.15 几何参数表

r_0/Z_r		r_0/r_u						
		0.571	0.600	0.628	0.667	0.715	0.800	0.833
K_1	0.250	0.105	0.102	0.098	0.092	0.081	0.063	0.056
	0.333	0.162	0.157	0.150	0.138	0.124	0.096	0.085
	0.416	0.222	0.216	0.210	0.198	0.185	0.163	0.151
K_2	0.250	1.280	1.330	1.370	1.450	1.560	1.760	1.850
	0.333	1.200	1.250	1.300	1.370	1.490	1.730	1.830
	0.416	1.130	1.170	1.230	1.310	1.430	1.680	1.820

注： r_0 为喉部半径(m)； r_u 为壳底半径(m)； Z_r 为喉部至壳底的垂直高度(m)。

3 超大型冷却塔宜进行施工期稳定验算。

3.5.16 冷却塔斜支柱应对塔筒下传至柱上、下端的内力进行组合计算，并分别取其最不利情况进行设计。当需要复核冬季停运状态时，斜支柱内力可按下列公式计算，并应与塔筒自重及实际风荷载作用下传至柱上、下端的内力进行组合计算：

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_W \psi_W S_{WK} + \gamma_S S_{TK} \quad (3.5.16-1)$$

$$M_K = \frac{6EI\alpha_1 \Delta t_K r_u}{L^2} \quad (3.5.16-2)$$

$$Q_K = \frac{2M_k}{L} \quad (3.5.16-3)$$

式中： S_{WK} ——冬季停运时实际风荷载(计人风振系数)的标准值

效应；

S_{TKK} ——冬季停运时柱端产生的内力(M_K 、 Q_K)。其中力矩为 M_K (kN·m),切力为 Q_K (kN);

α_1 ——混凝土的线膨胀系数,取 $\alpha_1=1.0 \times 10^{-5}({}^{\circ}\text{C}^{-1})$;

t_K ——斜支柱上、下端温度差(斜支柱上端温度即停运时气温;下端温度,当为环板基础时即为停运时柱下端实际温度,当为倒T型基础时取池壁内外平均温度)($^{\circ}\text{C}$);

I ——斜支柱断面惯性矩(m^4);

r_u ——塔筒底部半径(m);

L ——斜支柱长度(m)。

3.5.17 计算塔筒斜支柱纵向弯曲长度时,斜支柱可按下端固定上端铰支。斜支柱纵向弯曲计算长度 L_0 径向应取 $0.9L$,环向应取 $0.7L$ 。

3.5.18 冷却塔地基承载力计算时,其荷载组合应按下式计算:

$$S = 1.1S_{GK} + S_{WK}/\beta + \psi_i S_{TK} \quad (3.5.18)$$

3.5.19 塔体基础内力应按塔筒、斜支柱、基础和地基整体分析计算,并宜考虑基础与地基的变形协调。

3.5.20 塔体基础上拔力平衡验算应符合下列规定:

1 对于环板型和倒T型基础,基础底面出现上拔力的平面范围应控制圆心角不大于 30° ,验算时承载能力极限状态荷载组合应按下式计算:

$$S = S_{GK} + 1.2S_{WK} \quad (3.5.20)$$

2 对于单独基础,基础底面不应出现净上拔力,且自重 G 产生的压力与风荷载 W 产生的上拔力之比不应小于1.2。

3.6 机械通风冷却塔的荷载及内力计算

3.6.1 机械通风冷却塔塔体应选用下列荷载进行计算:

1 结构和设备自重;

- 2 顶板活荷载和检修荷载；
- 3 风荷载；
- 4 风机和电动机振动荷载；
- 5 淋水装置支承于塔体结构上的荷载；
- 6 降噪装置作用于塔体结构上的荷载；
- 7 地震作用。

3.6.2 计算塔顶梁板结构时，顶板的活荷载可取 $4\text{kN}/\text{m}^2$ ；顶板的检修荷载可按设备检修情况确定，但不应小于 $5\text{kN}/\text{m}^2$ 。这两项荷载不应同时组合。

3.6.3 计算框架时，顶板的活荷载或检修荷载可乘 0.7 的折减系数。

3.6.4 风机和电动机的振动荷载可按本规范附录 B 计算。

3.6.5 对于采用旋转壳体结构的机械通风冷却塔，结构计算可按本规范第 3.5 节自然通风冷却塔的荷载及内力计算的规定进行。

3.6.6 多格的机械通风冷却塔的纵、横向可按框架计算。

3.6.7 按承载能力极限状态计算框架时，荷载组合应符合下列规定：

1 基本组合荷载应包括：结构和设备自重、顶板活荷载或检修荷载、风机和电动机振动荷载、淋水填料支承于框架上的荷载和风荷载。

2 地震作用组合荷载应包括：结构和设备自重、顶板活荷载或检修荷载、风机和电动机振动荷载、淋水填料支承于框架上的荷载和地震力。地震作用组合在地震设计烈度 7 度及 7 度以上时应计算。

3 荷载分项系数、组合效应系数应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定执行。

3.6.8 按正常使用极限状态验算裂缝宽度时，应按荷载准永久组合下的荷载效应标准值进行。

3.6.9 对于地震作用组合,塔体框架应进行振幅计算,最大振幅不宜超过0.5mm。

3.7 淋水装置构架

3.7.1 自然通风冷却塔的淋水装置构架,宜采用钢筋混凝土结构。机械通风冷却塔的淋水装置构架,可采用钢筋混凝土结构或复合材料结构。

3.7.2 冷却塔采用槽式和池式配水时,水槽和配水池宜采用钢筋混凝土结构或复合材料结构。当采用槽管式或管式配水时,其管材宜采用塑料或玻璃钢。

3.7.3 淋水装置构架设计,应符合下列要求:

1 结构体系布置应稳定,构件类型应较少;

2 构件间距、截面尺寸及形状所造成的气流阻力应较小,应有利于通风;

3 构件应有足够的强度和刚度;

4 应便于塔内材料或装置的安装和检修。

3.7.4 冷却塔淋水装置构架,应选用下列荷载及相应取值规定进行计算:

1 淋水装置及构架自重。

2 配水槽、管、池内的水重。

3 淋水填料表面结垢重。淋水填料每侧的结垢厚度对于洁净原淡水可取0.5mm;对偏于浑浊原淡水、再生水、海水可取1.0mm;结垢容重可按 20kN/m^3 计算。

4 淋水填料表面水膜重。淋水填料每侧的水膜厚度可取1.0mm。

5 挂冰荷载。寒冷或严寒地区淋水填料下层构件的挂冰荷载,寒冷地区可采用 1.5kN/m^2 ;严寒地区可采用 2.5kN/m^2 ;气候类型的划分参见表3.9.1注的规定。

6 风筒检修荷载。自然通风逆流式冷却塔塔筒检修时,作用

在水槽、上层梁构件自身顶面范围内的检修荷载，可采用 $2\text{kN}/\text{m}^2$ 。风筒检修荷载与挂冰荷载不同时组合；风筒检修荷载与配水槽、管、池内的水重不同时组合。

7 烟道作用。

8 地震作用。

3.8 构造要求

3.8.1 自然通风冷却塔筒壁厚度应根据强度、稳定性及施工条件确定，筒壁最小厚度应符合表 3.8.1 的规定。

表 3.8.1 自然通风冷却塔筒壁最小厚度

淋水面积 $S(\text{m}^2)$	常规淡水冷却塔 (mm)	排烟淡水冷却塔 (mm)	排烟或不排烟海水 冷却塔(mm)
$S < 2500$	140	160	170
$2500 \leq S < 4000$	150	170	180
$4000 \leq S < 8000$	160	180	190
$8000 \leq S < 10000$	180	200	210
$S \geq 10000$	200	210	230

3.8.2 自然通风冷却塔塔顶应设置刚性环，塔顶刚性环可兼作塔顶检修步道。分析计算时应计入塔顶刚性环对冷却塔结构的影响。

3.8.3 自然通风冷却塔塔筒在子午向及环向均应双层配筋，钢筋截面应按计算确定。子午向及环向的内层和外层的最小配筋率分别不应小于混凝土计算截面的 0.2%。

3.8.4 塔筒的双层配筋间应设置拉筋，拉筋直径不应小于 6mm，间距不应大于 700mm。

3.8.5 筒壁子午向及环向受力钢筋接头的位置应相互错开，在任一搭接长度的区段内，有接头的受力钢筋截面面积与受力钢筋总截面面积之比，子午向不应大于 1/3，环向不应大于 1/4。

3.8.6 塔筒基础、斜支柱及环梁的钢筋接头处宜采用机械连接、焊接或绑扎连接,受力筋直径不小于25mm时,宜采用机械连接、焊接。

3.8.7 塔筒斜支柱钢筋伸入环梁的长度应采用60倍~80倍钢筋直径;伸入基础的长度应采用40倍~60倍钢筋直径。

3.8.8 塔筒及基础池壁上开孔处应设置加强钢筋,在孔洞四周加设水平筋、垂直筋和对角处斜钢筋,每侧水平筋或垂直筋的截面不应小于开孔处被切断钢筋截面的0.75倍。排烟冷却塔筒壁上孔洞宜按本规范第3.4.10条规定的计算原则确定。

3.8.9 冷却塔钢筋保护层最小厚度应符合表3.8.9-1、表3.8.9-2和表3.8.9-3的规定:

表3.8.9-1 常规及超大型冷却塔钢筋保护层最小厚度

部 位	钢筋保护层最小厚度(mm)
塔筒、墙板(机械塔)	25
塔筒斜支柱	35
环板型、倒T型、单独基础	40
框架(机械塔)	30
集水池壁、水池底板	25
淋水装置构架	25

表3.8.9-2 排烟冷却塔钢筋保护层最小厚度

部 位	钢筋保护层最小厚度(mm)
塔筒内壁	45
塔筒外壁	35
塔筒斜支柱	45
环板型、倒T型、单独基础	40
淋水装置构架	40

表 3.8.9-3 海水冷却塔钢筋保护层最小厚度

部 位	环境 划分	循环水 盐度(mg/L)	钢筋保护层 最小厚度(mm)
塔筒内壁	重 度 盐雾区	55	50
		100	55
塔筒外壁	海洋大气区		≥ 35
斜支柱、淋水装置构架	淋水区	55	55
		100	60
环基、水池及底板内壁	水下区	55	50
		100	55
环基、水池及底板外壁	有地下水		50
	无地下水		40

注:基础的外壁钢筋保护层厚度应根据地基土及地下水的腐蚀特性调整。

3.8.10 塔筒的水平施工缝应按现行国家标准《双曲线冷却塔施工与质量验收规范》GB 50573、《混凝土工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定执行。

3.8.11 冷却塔集水池底板与混凝土垫层间宜设防水层。当水池底板与柱基为分离式时,其底板厚度不宜小于 150mm,底板上层宜设 $\phi 8$ 构造钢筋,间距宜为 200mm~250mm。

3.8.12 冷却塔集水池应有直接或间接的溢流放空设施。进出集水池可搭设临时坡道,也可设永久坡道。

3.8.13 自然通风冷却塔水池底板宜设伸缩缝。集水池底板与塔筒基础和配水竖井等荷重差异较大的结构间应设沉降缝。伸缩缝与沉降缝宜采用止水带或填柔性防水填料。

3.8.14 自然通风冷却塔进水管穿越水池池壁时,宜设置套管或波纹补偿器,回水沟与塔基础之间应设沉降缝。

3.8.15 自然通风冷却塔塔筒基础在环向应设不少于 4 个沉降观

测点；当地基较差时，配水竖井应设置沉降观测点。当地基较差时，机械通风冷却塔，宜设置沉降观测点。

3.8.16 自然通风冷却塔环形基础宜采用分段跳仓浇筑混凝土，分段长度宜为 $25m \sim 40m$ ，分段断面宜留设在相邻柱底支墩间环基跨度的 $1/4$ 处。

3.8.17 环形基础施工完毕应及时回填。寒冷地区未投入运行前如要越冬，则水池应采取保温措施。冬季冷却塔停止运行时，水池应用热水循环或对水池及环形基础采取保温措施。

3.8.18 预制淋水装置钢筋混凝土构架的接头宜避免外露铁件。如有外露铁件，应采取可靠的防腐蚀措施。

3.8.19 冷却塔塔外的金属爬梯及栏杆，宜采用镀锌防腐；塔内的爬梯及栏杆，宜采用非金属材料。

3.8.20 当冷却塔外表面加肋（见图 3.8.20）时，肋条横断面高度 h_R 宜取 $100mm \sim 200mm$ ，底部宽度 b 宜取 $250mm$ ，坡度 m 宜取 0.25 ，顶部宽度 a 宜取 $150mm \sim 200mm$ 。肋高及肋间距应按所选风压分布曲线对粗糙度的要求确定。肋条应配置构造筋。

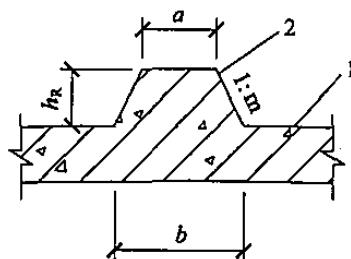


图 3.8.20 塔筒外表面子午向肋条

1—筒壁；2—肋条

3.9 冷却塔耐久性

3.9.1 混凝土最低抗冻等级和抗渗等级可按表 3.9.1 的规定确定。

表 3.9.1 混凝土的最低抗冻和抗渗等级

结构部位	最小抗冻等级												最小 抗渗等级	
	淡水环境						海水环境							
	微冻地区 冻融次数		寒冷地区 冻融次数		严寒地区 冻融次数		微冻地区 冻融次数		寒冷地区 冻融次数		严寒地区 冻融次数			
	≤100	>100	≤100	>100	≤100	>100	≤100	>100	≤100	>100	≤100	>100		
塔筒	F100	F150	F150	F200	F200	F300	F250	F250	F250	F300	F300	F350	W ₈	
斜支柱	F100	F150	F150	F200	F200	F300	F250	F250	F250	F300	F300	F350	W ₈	
环板型、倒T型基础、集水池壁	F50	F100	F100	F150	F150	F200	F250	F250	F250	F250	F250	F300	W ₆	
单独基础及水池底板	F50	F50	F50	F50	F50	F100	F250	F250	F250	F250	F250	F300	W ₄	
淋水装置构架、框架及墙板	F100	F150	F150	F200	F200	F300	F250	F250	F250	F300	F300	F350	W ₈	

注:1 低温地区的划分:微冻地区指最冷月月平均气温在2℃~-3℃;寒冷地区指最冷月月平均气温在-3℃~-8℃;严寒地区指最冷月月平均气温低于-8℃。对于地区最冷月月平均气温低于-25℃的酷寒地区,混凝土抗冻等级应根据具体情况研究确定。

2 冻融次数的划分:与水池水面接触且近距离直接接触冷空气的构件,如水池壁、压力沟、构架柱,可能挂冰的构件,如外区下层梁,相对重要构件,如塔筒、斜支柱,视为冻融次数>100。中央竖井及内区梁等远距离接触冷空气的构件,环基等间接接触冷空气的构件,视为冻融次数≤100。

3.9.2 混凝土的水胶比可按表 3.9.2 的规定确定。

表 3.9.2 混凝土的最大水胶比

结构部位	最大水胶比 W/C			
	常规冷却塔	超大型冷却塔	排烟冷却塔	海水冷却塔
塔筒	0.5	0.45	0.4	0.4
斜支柱	0.5	0.45	0.4	0.34
环板型、倒 T 型基础、集水池壁	0.5	0.5	0.4	0.4
单独基础及水池底板	0.5	0.5	0.5	0.4
淋水装置构架、框架及墙板	0.5	0.5	0.45	0.34

3.9.3 冷却塔防水防腐涂层应采用成熟、安全、可靠的技术和材料,免维护使用期不宜少于 10 年。

3.9.4 冷却塔混凝土表面防水防腐层应满足下列规定:

1 淡水冷却塔塔筒内表面应设防水层;对于再生水应根据水质确定防腐设计标准;

2 排烟冷却塔、海水冷却塔防腐材料可采用环氧类、聚氨脂类、硅烷类等。可根据不同区域设置防腐层,可按表 3.9.4 的规定划分。

表 3.9.4 排烟冷却塔及海水冷却塔不同区域防腐层最小厚度

区 域	排烟冷却塔防腐层干膜 最小厚度(μm)	海水冷却塔防腐层干膜 最小厚度(μm)
塔壁内表面喉部以上	400	400
塔壁内表面喉部 以下至收水器	350	350
塔壁内表面收水器至壳底	350	400
塔壁外表面自壳顶 向下 15m	300	350

续表 3.9.4

区 域	排烟冷却塔防腐层干膜 最小厚度(μm)	海水冷却塔防腐层干膜 最小厚度(μm)
塔壁外表面自壳 底向上 6m	200	300
斜支柱及支墩	350	350
塔体基础(环型或倒 T 型)	根据地下水侵蚀性确定	300
中央竖井、水槽、淋水构架、 压力进水沟、水池内壁	300	400

3.9.5 排烟塔、海水塔塔内栏杆及爬梯宜采用非金属材料,塔内烟道支座爬梯、冷却塔塔顶栏杆及上塔爬梯喉部以上部分宜采用不锈钢结构。护笼、上塔爬梯喉部以下部分可采用碳钢结构,但应镀锌或喷涂可靠的防腐涂料。

4 喷 水 池

4.1 喷水池工艺设计

4.1.1 当循环水量较小,工艺对冷却水温要求不严格,且场地开阔,环境允许时可采用喷水池;在大风、多沙地区不宜采用喷水池。

4.1.2 喷水池可按经验曲线进行热力计算。

4.1.3 计算喷水池的冷却水温时,选用的气象条件应符合本规范第3.1.16条、第3.1.17条和第3.1.18条的规定。

4.1.4 喷水池的损失水量应符合下列规定:

1 蒸发损失水量应符合本规范第3.1.20条第1款的规定;

2 风吹损失水量占循环水量的百分数可取1.5%~3.5%;

3 排水损失水量应根据对循环水质的要求经计算确定。

4.1.5 喷水池的淋水密度应根据当地气象条件和工艺要求的冷却水温确定;可采用 $0.7\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \sim 1.2\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

4.1.6 喷水池不宜少于两格,当允许间断运行时亦可为单格。

4.1.7 喷水池的喷嘴应符合下列要求:

1 喷水池的喷嘴宜选用渐伸线型或C-6型;

2 喷嘴前的水头:渐伸线型应为 $5\text{m} \sim 7\text{m}$;C-6型不应小于 6m ;

3 喷嘴布置宜高出水面 1.2m 以上。

4.1.8 喷水池内的设计水深宜为 $1.5\text{m} \sim 2.0\text{m}$ 。

4.1.9 喷水池的超高不应小于 0.25m ;池底应有坡向放空管的适当坡度。

4.1.10 喷水池宽不宜大于 60m ;最外侧喷嘴距池边不宜小于

7m。喷水池的长边应与夏季主导风向垂直布置。

4.1.11 喷水池应有排污、放空和溢流设施。出水口前应设置拦污设施。

4.1.12 配水管末端应装设放水管。配水管应有坡向放水管0.1%~0.2%的坡度。

4.1.13 寒冷和严寒地区的喷水池,根据具体条件应按下列规定采取防冻措施:

1 在进水干管上宜设旁路水管,旁路水管的排水口应位于水池出水口的对面一侧;

2 干管及配水管上的闸门应装设防冻放水管或采取其他保温措施。

4.2 喷水池结构设计

4.2.1 喷水池的设计应以工程地质和水文地质资料为依据,结合土质特点进行防水层设计,并应满足放空时抗浮稳定要求。

4.2.2 喷水池建在不透水土壤上时,可不另做防水层。如建在透水性土壤上时,则应根据当地材料供应情况和工程地质条件等,可选择黏土、卷材或土工膜作为防水层材料,卷材或土工膜上应设置保护层。

4.2.3 用黏土做防水层时,其塑性指数宜为15~17,厚度不宜小于300mm。黏土防水层压实系数不应小于0.96,其表面应做混凝土板护面,厚度不宜小于100mm。

4.2.4 喷水池底层混凝土强度等级不应低于C15,面层混凝土强度等级不应低于C20,喷水池水位经常变化的部分,应适当提高其混凝土的强度等级。抗渗等级宜为W₄。在寒冷地区应根据气候条件提出相应的抗冻性要求。

4.2.5 喷水池冬季施工或冬季停止使用放空时,应有防止土壤冻胀导致防水层损坏的措施。

4.2.6 喷水池宜采用下挖式,边坡应满足稳定要求。

4.2.7 喷水池边缘应有回水台，回水台的宽度不宜小于3m。回水台倾向水池的坡度宜为2%~5%。回水台外围应有防止周围地表水流人池内的措施。

5 水面冷却

5.1 一般规定

- 5.1.1 利用水面冷却循环水时,宜利用已有水库、湖泊、河道或海湾等水体,也可根据自然条件新建冷却池。
- 5.1.2 利用水库、湖泊、河道或海湾等水体冷却循环水时,水体的水量、水质和水温应满足工业企业取水和冷却的要求。
- 5.1.3 利用水库、湖泊、河道或海湾等水体冷却循环水时,应征得水利、农业、渔业、航运、海洋、海事和环境保护等有关部门的同意。
- 5.1.4 设计水面冷却工程,应满足排水对环境影响和冷却水体综合利用的要求。
- 5.1.5 工业企业使用综合利用水库或水利工程设施冷却循环水,应取得水利工程管理单位的供水协议。
- 5.1.6 取水、排水建(构)筑物的布置和型式应有利于冷水的吸取和热水的扩散冷却。有条件时,宜采用深层取水。排水口应使出流平顺,排水水面与受纳水体水面宜平缓衔接。
- 5.1.7 设计取水建(构)筑物的进水口应注意进口水流的均匀、平顺性。当漂浮物较多时,取水口进口流速宜小于该区域的天然流速,但不宜小于0.2m/s,并应满足航道、航运等部门要求。必要时,可通过模型试验确定进水口流速。
- 5.1.8 有条件时,宜采用冷热水通道分开的差位式取、排水口布置。当采用重叠的差位取、排水口布置时,受热水体应有足够的水深。设计应计入各种不利因素对设计最低水位和表面热水层厚度的影响。
- 5.1.9 水面蒸发系数和水面综合散热系数宜按下列公式计算:

$$\alpha = (22.0 + 12.5v^2 + 2.0\Delta T)^{1/2} \quad (5.1.9-1)$$

$$K_m = (b+k)\alpha + 4\epsilon\sigma (T_s + 273)^3 + (1/\alpha)(b\Delta T + \Delta e) \quad (5.1.9-2)$$

$$\Delta T = T_s - T_a \quad (5.1.9-3)$$

$$\Delta e = e_s - e_a \quad (5.1.9-4)$$

$$k = \frac{\partial e_s}{\partial T_s} \quad (5.1.9-5)$$

$$b = 0.66 \frac{P}{1000} \quad (5.1.9-6)$$

式中： α ——水面蒸发系数($W \cdot m^{-2} \cdot hPa^{-1}$)；

K_m ——水面综合散热系数($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)；

b ——系数($hPa \cdot ^\circ C^{-1}$)；

k —— $e_s - T_s$ 曲线的斜率；

P ——水面以上 1.5m 处大气压(hPa)；

v ——水面以上 1.5m 处的风速(m/s)；

ϵ ——水面辐射系数，可取 0.97；

σ ——Stefan-Boltzman 常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} (W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-4})$ ；

T_s ——水面以上 1.5m 处的气温($^\circ C$)；

T_a ——水面水温($^\circ C$)；

e_s ——水温为 T_s 时的相应水面饱和水汽压(hPa)；

e_a ——水面以上 1.5m 处的水汽压(hPa)。

5.1.10 自然水温应根据实测资料或条件相似水体的观测资料确定。当缺乏资料时，可按热量平衡方程或经验公式计算确定。

5.1.11 当水体的冷却能力不足或需要降低排水温度时，可根据综合技术经济分析，选用辅助的冷却设施。

5.1.12 冷却水体中有渔业生产时，取水建(构)筑物的卷吸效应不应影响鱼类，取水建(构)筑物应设拦鱼设施。

5.1.13 取水口和排水口应装设测量水温和冷却水体水位的仪表。

5.1.14 取、排水工程布置应与受纳水体环境功能区划要求相协

调,应避开环境敏感区。取水口和排水口应避开水生物养殖场和天然水生物保护区。

5.1.15 利用水库、湖泊、河道、海湾或建设新的冷却池冷却循环水时,视工程具体条件和设计阶段,应通过物理模型试验或数学模型计算以及其他方法,确定不同设计条件下水体的冷却能力、取水温度、水体表面和深层的水温分布、温排水的扩散范围等,并应结合技术经济分析,优化取水口和排水口的布置。

5.2 冷却池

5.2.1 新建冷却池设计应采取防止池岸和堤坝冲刷及崩坍的措施;还应采取措施,防止因冷却池附近地下水位升高对农田和建(构)筑物造成不良影响。

5.2.2 利用水库或湖泊冷却循环水,应根据水域的水文气象条件、水利计算、运行方式和水工建(构)筑物的防洪及结构安全要求进行设计。

5.2.3 冷却池的设计最低水位,应根据水体的自然条件、冷却要求的水面面积和最小水深、泥沙淤积和取水口的布置等条件确定。

5.2.4 冷却池在夏季最低水位时,水流循环区的水深不宜小于2m。

5.2.5 冷却池的正常水位和洪水位,应根据水量平衡和调洪计算成果、循环水系统对水位的要求和池区淹没损失等条件,通过技术经济分析确定。

5.2.6 新建冷却池,应根据冷却、取水、卫生和其他方面的要求,对池底进行清理。

5.2.7 新建冷却池,初次灌水至运行要求的最低水位所需的时间,应满足工业企业投入生产的要求。

5.2.8 从冷却池取水的最高计算温度,不应超过生产工艺允许的最高值。计算冷却池的设计冷却能力或取水的最高温度的水文气象条件,应根据生产工艺的要求确定,并宜符合下列规定:

1 深水型冷却池,宜采用多年平均的年最热月月平均自然水温和相应的气象条件;

2 浅水型冷却池,宜采用多年平均的年最炎热连续 15 天平均自然水温和相应的气象条件。

5.2.9 计算冷却池的各月月平均取水水温,应采用多年相应各月的月平均水文和气象条件。

5.2.10 冷却池必须有可靠的补充水源。冷却池补充水源的设计标准,应根据工业企业的重要性和生产工艺的要求确定。可采用保证率为 95%~97% 的枯水年水量。

5.2.11 冷却池的损失水量应按自然蒸发、附加蒸发、渗漏和排污等各项计算的损失水量确定。

5.2.12 冷却池的自然蒸发率宜按下列公式计算:

$$E = \frac{86400}{\rho_w r_{ts}} \alpha (e_s - e_a) \quad (5.2.12-1)$$

$$r_{ts} = 2500 - 2.39T_s \quad (5.2.12-2)$$

式中: E ——水面自然蒸发率($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$);

ρ_w ——水的密度,可近似采用 1000kg/m^3 ;

r_{ts} ——与水面水温 T_s 相应的水汽化热(kJ/kg)。

5.2.13 自然蒸发水量的计算应符合下列规定:

1 年调节水量的冷却池,当为地表径流补给时,应采用与补充水源同一设计标准的枯水年;人工补水时,可按历年中蒸发量与降水量的差值最大年份确定;

2 多年调节水量的冷却池,可采用多年平均值;

3 蒸发量年内各月分配可采用设计枯水年的年内月分配。

5.2.14 冷却池的附加蒸发水量宜按下列公式计算:

$$q_e = K_e \cdot \Delta t \cdot Q \quad (5.2.14-1)$$

$$K_e = \frac{C_w [\alpha k + (e_s - e_a)/\alpha]}{K_m r_{ts}} \quad (5.2.14-2)$$

式中: q_e ——附加蒸发水量(m^3/h);

Q ——循环水流量(m^3/h)；

Δt ——循环水的排水与取水温差($^\circ\text{C}$)；

K_e ——附加蒸发系数($1/^\circ\text{C}$)。

5.2.15 冷却池的渗漏水量可根据池区的水文地质条件和水工建(构)筑物的型式等因素确定。必要时,冷却池应采取防渗漏的措施。

5.2.16 冷却池的排水水量,应根据对循环水水质的要求计算确定。

5.2.17 冷却池应分析泥沙和各种污物对取、排水和冷却能力的影响,必要时应采取防止或控制淤积发展的措施。

5.2.18 当冷却池有地表径流补给水时,宜设置向冷却池下游排放热水的旁路设施。

5.2.19 冷却池取水口和排水口方位的选择,应分析风向对取水温度和热水扩散的影响。

5.2.20 新建冷却池形状、水深宜符合下列要求:

- 1 宜有利于散热;
- 2 宜减少风生浪影响;
- 3 宜取得底层低温水。

5.2.21 可采用导流堤、潜水堰和挡热墙等工程措施提高冷却池的冷却能力或降低取水温度。

5.2.22 地表径流补水的冷却池,应有排泄洪水的建(构)筑物。人工补水的冷却池,应根据需要,设置溢流和放水等设施。

5.2.23 工业企业自建的冷却池,应设专人管理。

5.2.24 冷却池工程的等级以及冷却池的堤坝、进排水沟渠和泄水构筑物等水工建(构)筑物的级别应按现行行业标准《水利水电工程等级划分及洪水标准》SL 252 的有关规定执行。

5.3 河道冷却

5.3.1 计算河道的设计冷却能力或冷却水最高温度的水文气象

条件,应根据生产工艺的要求确定。可采用历年最热时期3个月频率为5%~10%的日平均水温和相应的水文气象条件。冷却水的最高计算温度,不应超过生产工艺允许的最高值。

5.3.2 利用河网冷却循环水,应根据河网的规划设计,论证和选择设计最低水位。

5.3.3 排水口宜设在取水口下游。有条件时,宜采用水体底层排放方式。当排水门设在上游时,应采取减少进入取水口的热水量的措施。

5.3.4 应分析泥沙冲淤引起的河床地形变化对温排水扩散及取水温升等的影响。河口区域还应分析海水入侵对温排水扩散以及取水温升等的影响。

5.3.5 感潮河段应采取避免和减少排水热量在水体中积蓄对取水温度影响的措施。

5.3.6 利用河道或河网冷却循环水时,应校核在不利水文条件下的可取水量。必要时应采取措施,保证工业企业取得必需的循环冷却水量。

5.4 海湾冷却

5.4.1 工程海域设计冷却能力或冷却水最高温度的水文气象条件,应根据生产工艺的要求确定。可采用历年最热时期3个月频率为5%~10%的日平均水温和相应的典型潮水文条件、气象条件。冷却水的最高计算温度,不应超过生产工艺允许的最高值。

5.4.2 利用海湾冷却循环水时,宜结合海域内海流流向和温跃层的分布进行取、排水设计。当取水口海域有温跃层时,宜采用深层取水方式;当有合适的深层排放条件时,宜采用水体底层出流方式,必要时可根据工程的具体条件经模型研究确定。

5.4.3 利用河口、海湾冷却循环水时,宜结合海水盐度垂直分布不均匀特性对取水水温和温排水扩散进行论证。当可能出现这种

影响时,应重视取、排水高程的选定。采用重叠式取、排水口布置应有试验核定。

5.4.4 无化冰要求的环抱式港池内不宜同时设置循环冷却水的取、排水口。

5.4.5 当用于冷却循环水的海湾泥沙和海流运动活跃时,应首先研究和论证泥沙对取、排水设施的淤积和海流对取、排水设施的冲刷影响,并应根据有利于吸取冷水和温排水的扩散以及排水消能、消泡的要求,确定取、排水设施的位置和型式。

附录 A 自然通风冷却塔通风筒 内侧设计气温取值

附表 A 自然通风冷却塔通风筒内侧设计气温取值

气温取值 位置示意图	环梁有挡水设施				环梁无挡水设施	
	大气温为-15℃地区		大气温为-25℃地区		单元系统	母管系统
	单元系统	母管系统	单元系统	母管系统		
<p>淋水装置顶部 底部 进风口上缘</p>	a-10℃ b-10℃ c-0℃ d-0℃	a-15℃ b-15℃ c-0℃ d-0℃	a-10℃ b-10℃ c-15℃ d--5℃	a-15℃ b-15℃ c-15℃ d--5℃	a-10℃ b-15℃ c-0℃ d-0℃	a-15℃ b-20℃ c-0℃ d-0℃

注：1 环梁有(无)挡水设施，指淋水装置范围有(无)挡水板等防止热水直接溅到塔壁上的设施。

2 单元系统指一机一塔供水，冬季运行时不能调整水塔座数的情况。

3 母管系统指多机多塔供水，冬季运行时能调整水塔座数(如二机一塔)的情况。

4 大气温度为其他值的地区，塔内壁气温可参照表中数值研究确定。

附录 B 机械通风冷却塔风机和电动机 当量静荷载计算方法

B. 0. 1 竖向当量静荷载, 可按下式计算:

$$G_v = K_v W \quad (\text{B. 0. 1})$$

式中: G_v —— 竖向当量静荷载(kN);

W —— 风机或电动机自重(重力)(kN);

K_v —— 竖向动力系数, 风机可取 2.0, 电动机可取 1.5。

B. 0. 2 水平当量静荷载计算应符合下列规定:

1 风机正常运行时产生的扰力, 可按下式计算:

$$F_g = \frac{W_1 S n^2}{250} \quad (\text{B. 0. 2-1})$$

式中: F_g —— 水平扰力(kN);

W_1 —— 风机转动部分重量(重力)(kN);

S —— 风机转动部件的偏心距, 可按实际情况取值, 可取 1mm;

n —— 风机转速(s^{-1})。

2 计算框架时, 每台风机的水平当量静荷载可按下列公式计算:

$$G_H = K_H F_g \beta_i \quad (\text{B. 0. 2-2})$$

$$\beta_i = \frac{1}{\left(1 - \frac{n}{f}\right)^2 (1 - C_\mu) C_\mu} + \frac{0.07}{\left(1 - 0.4 \frac{n}{f}\right)^2 + C_\mu} \quad (\text{B. 0. 2-3})$$

式中: G_H —— 每台风机水平当量静荷载(kN);

K_H —— 风机水平动力系数, 可取 4.0;

β_i —— 风机对塔体的动性能系数;

n —— 风机转速(s^{-1});

f ——塔体自振频率(Hz)；
 G_μ ——材料非弹性阻力系数，可取 0.1；
 F_g ——每台风机的水平扰力(kN)。

3 电动机的水平当量静荷载可不计人。

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

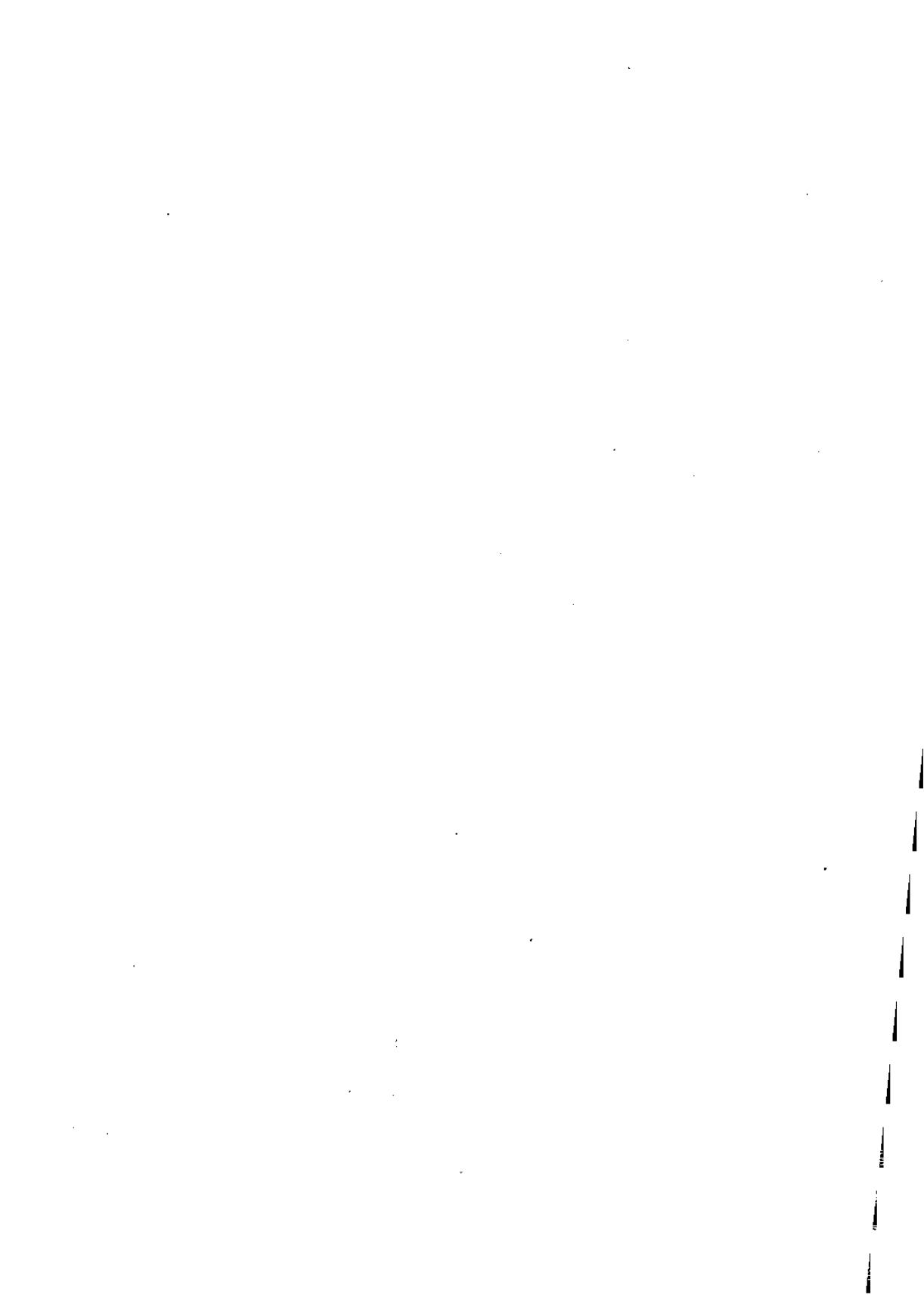
正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 《混凝土结构设计规范》GB 50010
- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《构筑物抗震设计规范》GB 50191
- 《混凝土工程施工质量验收规范》GB 50204
- 《机械通风冷却塔工艺设计规范》GB/T 50392
- 《双曲线冷却塔施工与质量验收规范》GB 50573
- 《水利水电工程等级划分及洪水标准》SL 252



中华人民共和国国家标准

工业循环水冷却设计规范

GB/T 50102-2014

条文说明

制 订 说 明

《工业循环水冷却设计规范》GB/T 50102—2014,经住房城乡建设部2014年12月2日以第622号公告批准发布。

本规范是在《工业循环水冷却设计规范》GB/T 50102—2003的基础上修订而成的,上一版的主编单位是国家电力公司东北电力设计院,参编单位是国家电力公司西北电力设计院,主要起草人是李志悌、华钟南、金喜卿。

本规范修订过程中,编制组进行了广泛的调查研究,总结了工业循环水冷却设施的工艺和结构设计实践经验,同时参考了国外先进技术法规、技术标准。

为便于广大设计、施工和生产单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定,《工业循环水冷却设计规范》编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明,对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是,本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握本规范规定的参考。



目 次

1 总 则	(63)
2 术 语	(66)
3 冷却塔	(67)
3.1 一般规定	(67)
3.2 自然通风冷却塔工艺	(147)
3.3 机械通风冷却塔工艺	(150)
3.4 冷却塔结构设计基本要求及材料	(161)
3.5 自然通风冷却塔的荷载及内力计算	(165)
3.6 机械通风冷却塔的荷载及内力计算	(196)
3.7 淋水装置构架	(197)
3.8 构造要求	(198)
3.9 冷却塔耐久性	(201)
4 喷水池	(204)
4.2 喷水池结构设计	(204)
5 水面冷却	(205)
5.1 一般规定	(205)
5.2 冷却池	(216)
5.3 河道冷却	(224)
5.4 海湾冷却	(226)

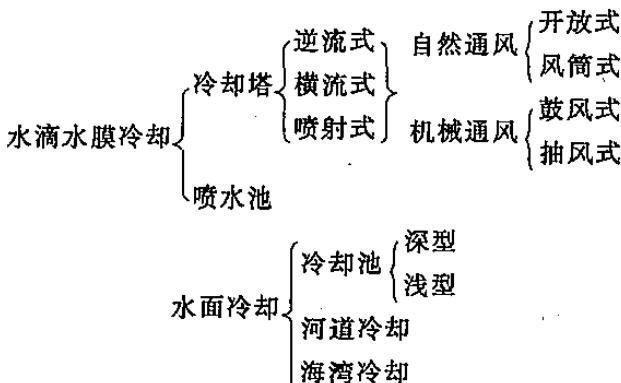
1 总 则

1.0.1 本条阐述了制定本规范的目的以及工业循环水冷却设施设计的原则要求。

1.0.2 本条规定了本规范的适用范围。

工业冷却水系统可分为直流式、循环式和混合式三种。循环供水系统又以循环水是否与空气直接接触而分为敞开式(湿式)系统和密闭式(干式)系统。本规范适用于循环水与空气直接接触、热交换和物质交换同时进行的敞开式循环供水系统和混合供水系统中的循环供水部分的冷却设施的工艺和结构设计。本规范不适用于密闭式循环系统。

用于敞开式循环供水系统的冷却设施可分为：



目前国内对喷射式冷却塔、喷雾式冷却塔的应用和研究较少，本规范暂不作统一规定。热季散热器外喷水辅助降温式冷却塔本规范不作规定。

在某些工业企业(例如化工、冶金、焦化等)的敞开式循环供水系统中循环水可能受到工艺物料的污染。被污染的循环水进入冷却设施和工艺设备，可能影响冷却设施和工艺设备的正常运行，并

影响循环水的蒸发冷却。现行国家标准《化学工业循环冷却水系统设计规范》GB 50648—2011 规定了含有酚、氰等污染物的直冷开式循环冷却水系统(循环冷却水与被冷却介质直接接触换热且循环冷却水与大气直接接触散热),其冷却设施宜采用鼓风式机械通风冷却塔或自然通风冷却塔;塔体内壁应进行防腐处理,配水设施、淋水填料和收水器等应耐腐蚀、抗老化和防污堵。

1.0.3 冷却设施的类型选择是一个比较复杂的问题。它涉及使用要求,自然条件,材料、设备的供应,场地布置和施工条件以及与周围环境的关系等因素。

不同的工艺设备对循环冷却水的水量、水温、水质和运行方式的要求不同。冷却设施必须满足工艺的使用要求。

每一种冷却设施的适用范围又受到它本身特点的限制,在有天然洼地、湖泊、水库的地区可以考虑选用冷却池,靠近河流的地区可以考虑利用河道冷却,有较为开阔的场地且环境允许时可以考虑建设喷水池。在各种冷却设施中应用最广泛的是冷却塔。

喷水池的冷却效果取决于风向和风力,水的风吹损失比较大,大量的水雾还会对周围环境带来不良影响。但这种设施构造简单,易于建造,投资省。在场地开阔,补充水充足,对冷却后的水温要求不甚严格的情况下可以考虑采用。

开放式冷却塔没有塔筒,水的风吹损失比较大,大量的水雾还会对周围环境带来不良影响。因此,开放式冷却塔已很少采用,故本规范未对开放式冷却塔作出规定。

机械通风冷却塔初期投资小、建设工期短、布置紧凑、占地少,可以使冷却后水温较低,冷却后水温与空气湿球温度的差($t_2 - \tau$)可以达到 $3^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$,冷却效果稳定,适宜在空气湿度大、温度高、要求冷却后水温比较低的情况下采用。但是机械通风冷却塔需要风机设备及经常运行中的电耗,较之自然通风冷却塔增加了检修维护工作量及运行费。

自然通风冷却塔初期投资较高、施工期长、占地多，但平时运行中维护工作量小，冷却效果稳定，适用于冷却水量较大，冷却水温降不小于5℃，冷却水温与空气湿球温度差大于3℃的情况。

高位集水塔初期投资高，具有降噪效果，可节省电厂的运行费用，可根据电厂情况酌情考虑。

1.0.4 本条规定了执行本规范与国家现行的其他有关标准、规范之间的关系。

循环水冷却设施的工艺设计应执行本规范的规定，但在设计工作中还会涉及其他方面的问题，如建筑的布置、防火、防爆、道路交通、环境保护、噪声等，应按国家现行的有关标准、规范执行。

2 术 语

2.0.1 现行国家标准《化学工业循环冷却水系统设计规范》GB 50648—2011第2.0.2条对“间冷开式循环冷却水系统”定义为：循环冷却水与被冷却介质间接传热且循环冷却水与大气直接接触散热的循环冷却水系统。本规范敞开式工业循环水冷却系统与上述的间冷开式循环冷却水系统对应。

2.0.3 《冷却塔验收测试规程》CECS 118术语中“漂滴损失水量”为在冷却塔风筒出口处以水滴形式被空气带走的水量，不包括冷却塔进风口处溅出的水滴量。冷却塔进风口处溅出的水滴量是收水器未能收回的，因此对于多风地区，宜设塔内十字形隔风板，避免平穿风带走水滴。

2.0.4 排水损失也叫排污损失，为避免歧意，本规范称为排水损失。

2.0.10 当冷却塔规模不同时，其设计标准有所差异。超大型冷却塔是本规范新增内容，故予以解释。

2.0.11 现行国家标准《海水循环冷却水处理设计规范》GB/T 23248—2009，对海水冷却塔(seawater cooling tower)定义为：用于海水循环冷却过程的一种构筑物，海水被输送到塔内，通过海水和空气之间进行热、质交换，达到降低水温的目的。

2.0.16 自然通风横流式冷却塔淋水填料的平面面积沿填料高度基本没变化。逆流冷却塔的淋水填料平面面积沿填料高度是变化的。按目前常用的水泥格网板和塑料波形淋水填料考虑，填料安装总高约在1.0m~1.6m，填料中部面积与填料顶面面积之差约为填料顶面积的1.0%~2.0%。溅水喷头处的塔平面面积更小。考虑到喷头的实际喷溅范围，逆流冷却塔淋水填料的平面面积以填料顶面计算为宜。

3 冷却塔

3.1 一般规定

3.1.1 本条规定了冷却塔在厂区总平面中的布置要求。

(1) 冷却塔在厂区总平面中的布置。

冷却塔在厂区总平面规划中的位置应当根据生产工艺流程的要求,冷却塔与周围环境之间的相互影响及工业企业的发展扩建规模等因素综合考虑确定。冷却塔的位置不应妨碍工业企业的扩建。

冷却塔宜靠近用水量较大的车间,这样做可以避免修建过长的循环水管沟,节省投资,降低循环水泵的电耗,利于循环水水质处理的操作。

在寒冷地区,为避免或减轻冷却塔的飘滴、水雾对厂区主要建筑(构)筑物和露天配电装置的不良影响,冷却塔应布置在厂区冬季主导风向的下风侧或侧风侧。

为了防止煤尘或其他粉尘对循环水的污染,冷却塔应布置在贮煤场等粉尘污染源全年主导风向的上风侧或侧风侧。

冷却塔应远离厂内露天热源,如冶金企业的高炉、石油加工厂和化肥厂的露天加热设备、发电厂的露天锅炉、炼油厂的排气火炬等,以免由于这些露天热源的影响,使进入冷却塔空气参数的数值长时间高于设计值,导致冷却塔的冷却效果达不到设计要求。

《火力发电厂水工设计规范》DL/T 5339—2006 第 5.4.3 条第 1 款规定:冷却塔在厂区总平面规划中的位置宜靠近汽机房前布置,但与主厂房之间的净距不应小于 50m,冷却塔的布置应充分考虑工业企业的发展扩建条件。在工程建设初期,冷却塔不宜布

置在工业企业的扩建端侧,以免堵塞扩建。冷却塔之间或塔与其他建(构)筑物之间的距离,除了应考虑塔的通风要求、塔与建(构)筑物的相互影响外,还应考虑厂区建(构)筑物平立面的协调,管道布置和交通道路,建(构)筑物防火、防爆的安全距离,塔和其他建(构)筑物的施工及检修对场地的要求等因素。

从冷却塔本身的进风要求考虑,根据国内外有关研究结果,机械通风冷却塔和自然通风冷却塔与相邻建(构)筑物的净距至少应为塔的进风口高的两倍。在这种情况下,塔内风速分布基本不受周围建(构)筑物的影响,进风口区沿高度风速分布趋向均匀。当塔与建(构)筑物的净距小于两倍进风口高度时,随净距的减小,进风口平均风速明显减小,进塔风量相应减少。如果相邻的是高大建(构)筑物如发电厂的汽机房、锅炉房等,考虑到自然通风冷却塔与高大建(构)筑物间可能产生的空气动力干扰或机械通风冷却塔湿空气回流干扰等影响,塔与高大建(构)筑物的净距还应适当加大。《英国冷却塔规范》(BS - 4485)规定,当必须将冷却塔布置靠近如汽机房和锅炉房等大型建(构)筑物时,冷却塔中心距建(构)筑物边缘最近点建议最小为一个冷却塔零米直径。

考虑到上述有关因素,我国《火力发电厂总图运输设计技术规程》DL/T 5032—2005 规定了冷却塔距电厂各建(构)筑物的最小间距,见表 1。

表 1 火电厂的冷却塔距各建(构)筑物间距(m)

建(构) 筑物名称	丙、丁、戊 类建筑耐 火等级一、 二、三级	屋外 配电 装置	露天 卸煤 装置 或贮 煤场	氢氧 站、贮 氢罐、 点火 油罐	行政 生活 服务 建筑 一、二、 三级	围 墙	厂外 道路 (路边)	铁路 中心线		厂内 道路 (路边)	
								厂 外	厂 内	主 要	次 要
自然通风 冷却塔		15~30 ¹	25~40 ²	25~30	20	30	10	25	25	15	10

续表 1

建(构)筑物名称	丙、丁、戊类建筑耐火等级一、二、三级	屋外配电装置	露天卸煤装置或贮煤场	氢气站、贮氢罐、点火油罐	行政生活服务建筑一、二、三级	围墙	厂外道路(路边)	铁路中心线		厂内道路(路边)	
								厂外	厂内	主要	次要
机械通风冷却塔	15~30 ¹	40~60 ³	40~45	25	35	15	35	35	20	15	15

- 注:1 自然通风冷却塔(机械通风冷却塔)与主控制楼、单元控制楼、计算机室等建(构)筑物间距采用 30m,其余建(构)筑物采用 15m~20m(除水工设施等采用 15m 外,其他均采用 20m);
- 2 为冷却塔零米(水面)外壁至屋外配电装置构架边净距,当冷却塔位于屋外配电装置冬季盛行风向的上风侧时为 40m,位于冬季盛行风向的下风侧时为 25m;
- 3 在非严寒地区采用 40m,严寒地区采用有效措施后可小于 60m。

其他设计规范尚无明确规定,设计中可参照表 1 执行。

(2)超大型冷却塔的应用。

随着电力建设技术水平的发展,近年来越来越多的电力工程采用高效率、大容量发电机组,与其匹配的超大型冷却塔(淋水面积等于或大于 10000m²)技术被工程采用。

在国内,以中国电力工程顾问集团六大设计院为主的电力设计院,几十年来为常规火电厂设计了数百座大大小小的冷却塔,其中不乏世界级的超大型冷却塔(如华电国际邹县发电厂四期 1000MW 机组冷却塔、国华宁海发电厂二期 1000MW 机组海水冷却塔、国华徐州 1000MW 机组排烟冷却塔等等),特别是近几年,超大型湿式冷却塔规模和数量不断增加,积累了大量超大型冷却塔设计经验和工程经验,冷却塔设计方法和设计手段的可靠性和安全性也都得到了长期验证,国内冷却塔设计建造技术水平基本与国际先进水平整体差距不大,国外典型超大塔主要参数见表 2,

国内典型超大塔主要参数见表 3。

表 2 国外典型超大塔主要参数

序号	名称	机组容量	淋水面积 (m ²)	塔高 (m)	环基直径或 零米直径	备注
1	德国 RWE Energie AG 下属的 Niederaussem 电厂 K 号机组	950MW 超超临界燃煤机组	约 14520	200	环基直径 152.54m	自然通风湿式排烟冷却塔,设计及建造由 BALCKE - DüRR 公司承担,由 E. Heikamp 进行土建设计
2	美国 Trojan 核电厂	1130MW	约 9420	150	零米直径 117.35m	自然通风湿式冷却塔,由比利时 Hamon 冷却塔公司设计建造。Trojan 核电厂由于财务和安全原因于 1993 年关闭,该冷却塔于 2006 年 5 月被爆破拆除
3	艾莎(Isar)核电站二期工程	1400MW	16300	165	零米直径 152.6m	自然通风湿式逆流式冷却塔,于 1988 年建成发电
4	美国新泽西州霍普河(Hope Creek)核电站	1100MW	—	150	—	自然通风湿式海水冷却塔,建于 1986 年
5	法国戈尔费什(Golfech)核电厂	1100MW	—	178.5	底部直径 149m	自然通风湿式冷却塔

表3 国内典型超大塔主要参数

序号	名称	机组容量	淋水面积 (m ²)	塔高 (m)	环基直径或 零米直径	备注
1	华电邹县 发电厂四期 工程	1000MW	12000	165	零米直径 133.3m	自然通风冷却塔， 2006年建成投运
2	国华宁海 电厂二期工 程	1000MW	13700	177.2	零米直径 142.3m	自然通风湿式海 水冷却塔，两座冷 却塔于2009年9月、 10月先后投入运行
3	天津北疆 电厂	1000MW	12000	165	零米直径 134.8m	自然通风湿式海 水冷却塔，两座冷 却塔于2009年10月～ 11月先后投入运行
4	国华徐州 电厂	1000MW	12000	167.16	环基直径 135.72m	自然通风湿式排 烟冷却塔，2011年 建成

(3)海水冷却塔的应用。

海水冷却塔为近年来在国内火电厂应用的新技术，与常规淡水冷却塔不同的是，海水冷却塔冷却水为浓缩海水，其散热能力低于淡水，从而导致海水冷却塔的热交换性能较常规冷却塔要低；另外，与淡水相比，海水存在着严重的结垢、腐蚀、污损生物附着以及海水冷却塔的盐沉积、盐雾飞溅、侵蚀等问题，因此海水冷却塔在热力计算、工艺布置、结构方面与淡水冷却塔有所区别。

宁海电厂二期 2×1000MW 工程 13000m² 自然通风海水冷却塔是国内第一座自然通风海水冷却塔，也是目前国内最大、最高的冷却塔。与淡水冷却塔相比，有如下设计特点：

1)海水冷却塔内设置了冲洗水管,为防止冷却塔填料在机组停运时沉积盐垢,在塔内设置了填料淡水冲洗管道,每塔配水槽上布置了16个冲洗水接口,在塔停运时方便运行人员及时冲洗。

2)为保证海水循环水水质,宁海电厂设置了海水净水站对循环冷却水进行海水预处理,以满足循环水系统对悬浮物含量的要求。

3)宁海电厂海水塔设计前对塔芯材料进行了专题研究。根据研究结果,喷溅装置采用ABS塑料,填料、收水器采用改型PVC塑料,配水管采用UPVC管,在冷却塔中配水管位于填料与收水器之间,此区域处于高温高湿的富氧环境,加上浓缩海水的飘逸水滴及盐雾聚集,区域内 Cl^- 含量非常高,腐蚀性较海水更严重,配水管采用传统打包带的方式固定金属结构,很容易出现点蚀和应力腐蚀而引起打包带断裂,因此在宁海工程中研制了新型配水管吊架装置。该装置采吊架的吊杆和托架采用钢塑复合结构,内部以适当直径和厚度的圆钢及钢板作为承力层,保证吊架具有足够的刚度和强度,钢结构外层采用一定厚度的ABS工程塑料作为防腐层,解决了吊架的耐腐蚀问题,该装置已获得国家专利。

4)在结构设计方面,海水冷却塔与淡水冷却塔的区别主要体现在混凝土材料选择、防腐设计及金属构件选材方面,其他结构计算等方面两者基本一致。

宁海电厂二期海水冷却塔于2009年9月、10月先后投运,截至2013年已安全运行4年多,西南院对海水塔的运行情况进行了跟踪调查,从历次调查的情况看:

- ①塔体外部及周围环境干净整洁;
- ②雨区淋水均匀,未发现喷头脱落等现象;
- ③循环水水质良好;
- ④塔体壁面无明显结垢和腐蚀现象;
- ⑤塔内干净整洁,但有部分收水器塌落,飘滴从塌落处飘出,

经维修后正常。

中国水利水电科学研究院于 2010 年 5 月和 8 月对宁海电厂二期海水塔进行了性能测试，测试时冷却塔系统整体工作正常。海水塔 5 月和 8 月的测试分别代表了春秋季和夏季两种工况，5 月测试时为 2 机 3 泵运行，干球气温约 20.3℃，测试实际冷却能力为设计值的 101.4%，漂滴损失率为 0.1%；8 月测试时为 2 机 4 泵运行，干球气温约 31.6℃，测试实际冷却能力为设计值的 102.8%，漂滴损失率为 0.06%。根据实际测试结果，宁海电厂海水塔性能达到设计要求，海水冷却塔的出塔水温设计值与实测结果相符。

（4）排烟冷却塔的应用。

自基于国外技术的国内首座 300MW 机组的排烟塔在华能北京高碑店热电厂建成并于 2006 年 9 月投入商业运行后，国内首座自主设计施工的国华三河 300MW 机组热电厂的排烟塔也于 2007 年 9 月投入运行，到目前为止，国内已出现了多座应用于 300MW、600MW、1000MW 机组工程国内自主设计、施工的排烟塔。

从 2012 年 3 月开始，由华北电力设计院工程有限公司和华东电力设计院联合或单独对国内已投入运行的排烟冷却塔的设计特点及运行情况进行了现场调研，调研的工程有：国华徐州发电厂排烟冷却塔、国华三河电厂排烟冷却塔、天津东北郊热电厂排烟冷却塔、天津军粮城电厂排烟冷却塔。

总体来看，这些电厂的排烟冷却塔运行正常、冷却塔的冷却效果达到或超过了设计的要求，烟气通过冷却塔的排放也能满足环保要求，循环水的水质变化不明显，塔内收水器和主水槽上有少量积灰，湿冷机组排烟冷却塔的补充水量略有增加，部分冷却塔的防腐涂料虽有局部脱落，但经修补后冷却塔仍能正常运行，玻璃钢烟道的运行正常，无明显的变形。国内典型排烟冷却塔主要技术参数统计见表 4。

表4 国内典型排烟冷却塔主要技术参数统计表

序号	项目	单位	徐州电厂	三河电厂	天津东北郊	天津军粮城
1	机组容量	MW	2×1000	2×300	2×330	—
2	淋水面积	m ²	12000	4500	5000	5000
3	循环水量	m ³ /h	103600	36167	38022	39528
4	烟气量	m ³ /s	902	393	437.4	434.1
5	烟气温度	℃	45	60	50	54
6	冷却塔高	m	167.16	120.00	110.00	110.00
7	进风口高	m	11.70	7.80	7.60	7.600
8	喉部高度	m	129.68	90.00	82.80	82.80
9	底部直径	m	141.814	85.704	87.00	87.00
10	喉部直径	m	76.79	44.284	49.038	49.038
11	塔顶直径	m	83.028	47.201	52.581	52.581
12	环基外侧直径	m	143.214	94.00	94.882	95.642
13	人字柱对数	对	52	35	39	39
14	人字柱直径	mm	1000	700	650	650
15	环基宽度	m	7.50	6.00	5.00	5.76
16	环基高度	m	2.00	1.50	1.50	1.50
17	最大厚度	m	1.200	0.80	0.70	0.70
18	最小厚度	m	0.22	0.18	0.18	0.18
19	烟道直径	m	8.50	5.20	5.20	5.20
20	开孔直径	m	10.50	7.00	7.00	7.00
21	烟道壁厚	mm	31	28/27	28/27	28/27
22	烟道长度	m	88.7	96+143+105	90+210	61+70

续表 4

序号	项目	单位	徐州电厂	三河电厂	天津东北郊	天津军粮城
23	烟道高度	m	40.5	38.70	35.00	34.00
25	涂料类别	—	佐敦	佐敦	北方工程	MC
26	防腐区域	—	壳体内外壁	壳体内外壁	壳体内外壁	壳体内外壁
27	壳体腐蚀状况	—	完好	局部脱落	完好	完好
28	架构腐蚀状况	—	完好	完好	表面脱落	完好

3.1.3 当冷却塔采用其他设计使用年限时,宜按相应的规范要求对设计标准作出调整。

3.1.4 国家环保部门对工业企业厂界环境噪声视不同类型的区域有不同的控制标准。目前冷却塔的噪声都超过规定标准。冷却塔的噪声是由水滴落入集水池时产生的水滴撞击声、机械通风冷却塔电机、风机和传动机构产生的噪声等构成。据国外和国内的一些工程资料,各种不同类型冷却塔在距塔外缘3m、距地面1.5m处测得的噪声约为70dB(A)~85dB(A)。

控制冷却塔噪声影响的措施为:

(1)冷却塔隔声屏障宜布置在塔外2倍进风口高度以外,如小于2倍进风口高度,应考虑隔声屏障对冷却塔热力性能的影响。

(2)当采用吸音栅条(通透)时可近体布置,并考虑吸音栅条对冷却塔热力性能的影响。

(3)选用低噪声电机和风机,或采用高极数电动机与低转数风机直联的风机构动力系统。

(4)在集水池水面处设降噪装置近年来应用较少。降噪装置布置在冷却塔集水池水面处,不占用塔外场地,初始投资较低,但冷却塔水池清淤时需要重新铺设,后期费用高。且其碎片进入循环水增加了杂质含量。

当采用一种措施达不到要求的降噪效果时,可同时使用两种

降噪措施。例如皖能合肥发电厂 9500m^2 冷却塔，既采用近塔吸音栅条，又采用厂界隔声屏障。

新建工程冷却塔设计应在可行性研究阶段或初步设计阶段，以冷却塔设计者为主，协同业主、总图、环保及早考虑冷却塔降噪相关问题。

3.1.5 当用水车间较多且分散或用水要求不同，冷却塔集中或分散布置各有利弊。冷却塔集中布置便于运行管理，可减少对环境的影响范围，但可能造成某些用水车间的循环水管沟较长，循环水泵的电耗增加，以及循环水管沟与厂区内的其他管沟、管道的交叉。分散布置就可以避免集中布置的一些缺点，但分散布置不利于冷却塔的维护管理。当各用水车间相距较远或对冷却水温和水质要求不同时，冷却塔宜分散布置。在条件不甚明确的情况下，应当对布置方式进行技术经济分析比较。

3.1.6 据调查，除少数工业企业内较重要的工艺设备配置的机械通风冷却塔有备用外，大多数工业企业的各类型冷却塔无备用。

各类型冷却塔中，除机械通风冷却塔的风机易出现事故外，冷却塔一般很少发生事故。

冷却塔应当安排在与主工艺设备同期检修。当主工艺设备不能停止运行、冷却塔又必须检修时，应当采取措施尽量减少因冷却塔检修对工艺生产的影响。如将冷却塔的检修安排在工艺生产的低负荷时期，或当冷却塔格数较多时各格分期检修。为了缩短风机设备的检修时间，还可以采取设置库存备用风机配件等措施。

3.1.7~3.1.9 冷却塔的热力计算方法可分为两类。一类是根据冷却塔内水和空气之间的热交换和物质交换过程，按蒸发冷却理论推导出来的理论公式计算法；另一类是按经验公式或图表的计算法。

理论公式计算法国内外有多种。以逆流式冷却塔为例，一种

是根据冷却塔内水和空气之间在接触散热、蒸发散热过程中的热质交换关系，建立含有水温、空气干球温度和水蒸汽分压力三变量的联立微分方程组：

$$\frac{d\theta}{dV} = a(t - \theta) \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{v\theta}}{dV} = b(P''_{vt} - P_{v\theta}) \\ \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dt}{dV} = A(t - \theta) + B(P''_{vt} - P_{v\theta}) \\ \end{array} \right. \quad (3)$$

式中： V ——淋水填料的体积(m^3)；

θ ——空气的干球温度($^\circ C$)；

t ——水温($^\circ C$)；

P''_{vt} ——相应于水温 t 的饱和水蒸汽压力(Pa)；

$P_{v\theta}$ ——气流中的水蒸汽分压力(Pa)。

$$a = \frac{\alpha_v}{G_d C_a} \quad (4)$$

式中： α_v ——容积散热系数 [$W/(m^3 \cdot ^\circ C)$]；

G_d ——进入冷却塔的干空气质量流量(kg/s)；

C_a ——湿空气的定压比热 [$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$]。

$$b = \frac{\beta_{pv} p_{dm}}{0.622 G_d} \quad (5)$$

式中： β_{pv} ——与蒸汽分压力差有关的容积散质系数 [$kg/(m^3 \cdot s \cdot Pa)$]；

p_{dm} ——干空气的平均分压(Pa)；

0.622——干空气与水蒸汽的气体常数比值。

$$A = \frac{\alpha_v}{Q C_w} \quad (6)$$

式中： Q ——进入冷却塔的循环水流量(kg/s)；

C_w ——循环水的比热 [$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$]。

$$B = \frac{r_0 \beta_{pv}}{Q C_w} \quad (7)$$

式中： r_0 ——水在0℃的汽化热，可取2500.8kJ/kg。

这种计算方法国内习惯上称为压差动力法或压差法。在上述的三变量方程中未考虑因蒸发损失引起的沿冷却过程水量的变化，如果考虑这一变化则变量又增加一个水量Q，可建立起一组四变量方程组。用解析法解方程组(1)~(3)比较困难，尤其是横流式冷却塔直接求解更为困难。在实际应用中对逆流式冷却塔的求解多采用差分法。

另一种理论公式计算方法是把传热与传质用焓统一起来，以在冷却塔内水和空气之间的总的热交换强度与水表面层饱和湿空气和进入冷却塔的湿空气之间的焓差成正比这一关系而建立的微分方程作为冷却塔内蒸发冷却的基本方程。即：

$$\frac{C_w}{K} Q dt = G_a dh = K_a (h'' - h) dV \quad (8)$$

$$K = 1 - \frac{C_w t_2}{r_{12}} \quad (9)$$

式中： K_a ——与含湿量差有关的淋水填料的容积散质系数[kg/(m³·s)]；

K ——考虑蒸发水量散热的系数，实际工作中也可不考虑此系数；

h'' ——和水温相应的饱和空气比焓(kJ/kg)；

h ——湿空气的比焓(kJ/kg)；

r_{12} ——与冷却后水温相应的水的汽化热(kJ/kg)。

实际设计工作中则是对式(8)积分并求解方程：

$$\frac{KK_a V}{Q} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{C_w dt}{h'' - h} \quad (10)$$

式中： t_1 ——进入冷却塔的水温(℃)；

t_2 ——冷却后水温(℃)。

这种计算方法国内习惯上称为焓差动力法或简称焓差法。利用方程(10)可以简便地求解冷却塔的有关问题。

压差动力法和焓差动力法在推导过程中都从不同方面作了一

些假定，而且都是建立在接触散热和蒸发散热的经验关系式的基础上。两种计算方法的精度从理论上目前难评优劣。但是焓差法具有求解简便的优点，因而得到世界各国冷却塔工程技术人员的普遍应用。前苏联过去用压差法，近年在计算机械通风和自然通风逆流式冷却塔时基本也采用焓差法。

基于上述情况，并考虑到目前我国各有关部门在冷却塔的热力试验中基本上都采用焓差法整理试验数据，因此本规范规定冷却塔的热力计算宜采用焓差法。

式(10)等号的右边为对所设计的冷却塔提出的冷却要求，等号的左边为满足右边的要求所采用的淋水填料种类和相应冷却水量下淋水填料的体积。等号右边 $h'' \sim f$ 的函数关系甚为复杂，很难直接积分求解，实际工程中多采用近似解法。国内外采用的近似解法有多种，其中较为简便，经常采用的是辛普森(Simpson)近似积分法。采用这种方法时是将水温 t_1 至 t_2 的积分区域分成 n 等份，一般对等份的划分宜取不小于 2 的偶数。当水温差 $\Delta t < 15^{\circ}\text{C}$ 时，取 $n=2$ 已可达足够精度。

对于圆形横流式冷却塔，从圆形横流式冷却塔的环形淋水填料中切取中心角为 θ 的填料单元，考虑圆周进风，水从上面淋下，采用柱坐标系，坐标原点为塔的中轴线与淋水填料顶面的交点， z 向下为正， r 自中心向外为正，建立微分方程：

$$C_w q \frac{\partial t}{\partial z} = g_i \frac{r_1}{r} \cdot \frac{\partial h}{\partial r} = -K_a (h'' - h) \quad (11)$$

边界条件为： $z=0$ 时， $t=t_1$ ； $r=r_1$ 时， $h=h_1$ 。

式中： q ——淋水密度 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]；

g_i ——冷却塔进风口断面的平均质量风速 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]；

r ——塔半径 (m)；

r_1 ——塔进风口半径 (m)；

h_1 ——进风口的湿空气比焓 (kJ/kg)；

h ——进入冷却塔的湿空气比焓 (kJ/kg)。

对于矩形横流式冷却塔可以设其为半径趋于无限大的圆形塔,利用式(11)求解,也可从矩形横流式冷却塔中切取一填料单元,水从上面淋下,空气从进风口(在左边)进入塔内,采用直角坐标系,坐标原点为淋水填料顶面与进风口断面的交点, z 向下为正, x 沿气流流向为正,建立的微分方程:

$$-C_w q \frac{\partial t}{\partial z} = g_i \frac{\partial h}{\partial x} = K_a (h'' - h) \quad (12)$$

边界条件为: $z=0, t=t_1; x=0, h=h_1$ 。

方程(11)和(12)均可用解析法或有限差分法求解。

在热力计算中饱和水蒸汽压力采用 1939 年发表的纪利公式计算。

$$\begin{aligned} \lg P'' &= 0.141966 - 3.142305 \left(\frac{10^3}{T} - \frac{10^3}{373.16} \right) \\ &\quad + 8.2 \lg \frac{373.16}{T} - 0.0024804(373.16 - T) \end{aligned} \quad (13)$$

经对式(13)中 P'' 单位 kg/cm^2 转换为 kPa 后为:

$$\begin{aligned} \lg P' &= 2.0057173 - 3.142305 \left(\frac{10^3}{T} - \frac{10^3}{373.16} \right) \\ &\quad + 8.2 \lg \frac{373.16}{T} - 0.0024804(373.16 - T) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: P' —— 饱和水蒸汽压力(kPa);

T —— 开尔文温度(K)。

超大型逆流式冷却塔热力修正按下式计算:

$$\begin{aligned} \int_{t_2}^{t_1} \frac{C_w dt}{h'' - h} &= \frac{K_a V}{Q} = A \lambda^n - N_m + (0.34 + 0.00763 h_0 - \\ &\quad 0.000367 h_0^2) \lambda^{0.6} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: V —— 淋水填料的体积(m^3);

Q —— 进入冷却塔的循环水流量(kg/s);

r_{t2} —— 与冷却后水温相应的水的汽化热(kJ/kg);

K_a —— 与含湿量差有关的淋水填料的散质系数 [$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$];

C_w ——循环水的比热 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$];

t_1 ——进入冷却塔的水温 ($^\circ\text{C}$);

t_2 ——冷却后水温 ($^\circ\text{C}$);

h ——湿空气的比焓 (kJ/kg);

h'' ——和水温相应的饱和空气比焓 (kJ/kg);

A, n ——填料室内模拟塔填料试验常数;

h_0 ——进风口高度加塔壳底沿至填料底总的距离 (m);

λ ——气水比;

N_m ——室内模拟塔尾部效应的冷却数。

上式左侧可采用辛普森 (Simpson) 近似积分法或其他方法求解。当采用辛普森近似积分法求解时, 对水温 t_1 至 t_2 的积分区域宜分为不小于 4 的等份; 当水温差小于 15°C , 水温 t_1 至 t_2 的积分区域也可分为 2 等份。

湿空气的比焓值按下式计算:

$$h = C_{da}\theta + X(r_o + C_{v\theta}) \quad (16)$$

式中: C_{da} ——干空气的比热, 可取为 $1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

C_v ——水蒸气的比热, 可取为 $1.846 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

焓差法的缺点是只能确定湿空气的比焓, 空气的其他状态参数还要用相应的假定采用其他计算方法才能得出。当进行自然通风冷却塔的空气动力计算时, 需要求风筒的抽力, 其中出塔空气的干球和湿球温度值, 可按下列公式计算:

$$\theta_2 = \theta_1 + (t_m - \theta_1) \frac{h_2 - h_1}{h''_m - h_1} \quad (17)$$

$$h_2 = h_1 + \frac{C_w \Delta t}{K\lambda} \quad (18)$$

式中: θ_1 ——进入冷却塔空气的干球温度 ($^\circ\text{C}$);

θ_2 ——排出冷却塔空气的干球温度 ($^\circ\text{C}$);

t_m ——出、入冷却塔的水温度的算术平均值 ($^\circ\text{C}$);

h_2 ——排出冷却塔的空气比焓 (kJ/kg);

h''_m ——与 t_m 相应的饱和空气比焓(kJ/kg);

Δt ——冷却塔进、出水温差(℃);

λ ——进入冷却塔的干空气和水的质量比。

根据式(17)求出 θ_2 ,再假定出口气态为饱和求出排出塔的空气密度 ρ_2 即可求塔筒抽力。

目前国内对于逆流式冷却塔的热力计算均是按一维均匀流考虑,对水从喷嘴喷出至集水池水面之间笼统地作为水气之间的热质交换区处理。在逆流式冷却塔中冷却水与空气之间的热质交换空间,除填料区外,尚有填料以上至喷嘴之间的空间和填料底部至集水池水面之间的空间。前者称之为喷淋区,后者称之为雨区或尾冷区。在这两个区段内冷却水以水滴形式自由下落,其散热、散质系数的确定除与气、水通量有关外,还与水滴粒径及其级配有关。逆流式冷却塔气流自进风口经雨区到填料底部的流动是介于纯逆流与纯横流之间的二维流动。基于对以上各点的分析,并改进现在普遍采用的 Merkel 简化假定下的焓差法,我国水利水电科学研究院冷却水研究所等单位已经研究出对逆流冷却塔的热力计算采用二维或拟二维计算方法。

冷却塔二维计算方法如下:

(1)自然通风冷却塔内气流运动方程。

冷却塔如图 1 所示,在无自然风时,塔内空气流场为轴对称的二维流动。塔内气流流动符合轴对称定常不可压二维雷诺时均方程,采用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型进行方程封闭。

连续方程:

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(vr)}{\partial r} = 0 \quad (19)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho uv)}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_e r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \\ = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_e r \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \rho g + F_x \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho vv)}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_e r \frac{\partial v}{\partial r} \right) \\ & = \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_e r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{2\mu_e v}{r^2} + F_r \quad (21) \end{aligned}$$

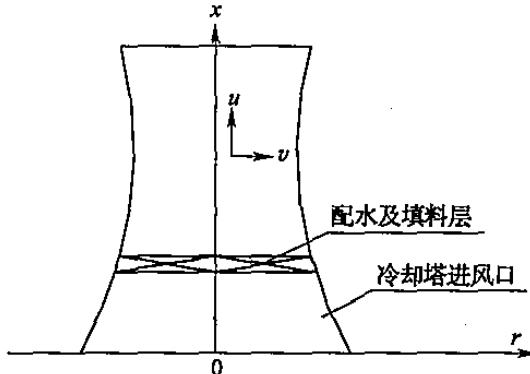


图 1 冷却塔及坐标系示意图

k 方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho uk) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho rvk) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (22) \end{aligned}$$

ϵ 方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho ue) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho rv \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_e} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_e}{\sigma_e} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) \\ & \quad + \frac{C_1 G_k \epsilon - C_2 \rho \epsilon^2}{k} \quad (23) \end{aligned}$$

$$G_k = \mu_T \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (24)$$

$$\mu_e = \mu_l + \mu_t = \mu_l + C \mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (25)$$

式中：

u —— x 方向的气流速度(m/s)；

v —— r 方向的气流速度(m/s)；

ρ ——气流密度(kg/m³)；

p ——压力(Pa)；

g ——重力加速度(m/s^2);

F_x —— x 方向的填料及水滴阻力(N/m^3);

F_r —— r 方向的填料及水滴阻力(N/m^3);

μ_e ——有效黏性系数 [$N/(s \cdot m^2)$];

$C_\mu, C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_e$ ——湍流模型常数, 其值见表 5。

表 5 湍流模型常数表

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_e
0.011	1.44	1.112	1.0	1.3

(2) 塔内热交换数学模型为下式:

$$dQ = K_a (i_t'' - i_a) dV \quad (26)$$

式中: dQ ——微单元体内的换热量(kJ/h);

K_a ——填料或雨滴的散质系数 [$kg/(m^3/h)$];

i_t'' ——与单元体内水温相应的饱和蒸汽焓(kJ/kg);

i_a ——单元体内的空气焓(kJ/kg);

dV ——单元体积(m^3)。

空气焓的方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho u i_a) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v i_a) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_t} \frac{\partial i_a}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_e}{\sigma_t} \frac{\partial i_a}{\partial r} \right) + \frac{K_a (i_t'' - i_a)}{3600} \end{aligned} \quad (27)$$

$$q C_w \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{K_a (i_t'' - i_a)}{3600} \quad (28)$$

式中: q ——淋水密度 [$kg/(m^2/s)$];

C_w ——水的比热 [$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$];

t ——水温($^\circ C$);

(3) 雨区的阻力及雨滴运动的数学模型。

雨滴在冷却塔中的运动简化为相同直径的刚性球, 雨滴的运动方程。

$$m \frac{du_w}{dt} = m \frac{du_w}{dx} \frac{dx}{dt} = mu_w \frac{du_w}{dx} = -mg + f_x \quad (29)$$

$$m \frac{du_r}{dt} = m \frac{du_r}{dr} \frac{dr}{dt} = mu_r \frac{du_r}{dr} = f_r \quad (30)$$

式中： m ——雨滴的质量(kg)；

u_w ——雨滴速度(m/s)；

t ——时间(s)；

f_x ——空气在 x 方向对雨滴的作用力(N)；

f_r ——空气在 r 方向对雨滴的作用力(N)。

$$f_x = C_d R_e \frac{\pi d_r \mu_l}{8} (u - u_w) \quad (31)$$

$$f_r = C_d R_e \frac{\pi d_r \mu_l}{8} (v - v_w) \quad (32)$$

$$C_d = \frac{24}{R_e} + \frac{6}{1 + \sqrt{R_e}} + 0.4 \quad (33)$$

$$R_e = \frac{\rho d_r \sqrt{(v - v_w)^2 + (u - u_w)^2}}{\mu_l} \quad (34)$$

式中： μ_l ——空气的动力黏性系数[$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$]；

d_r ——等效的雨滴直径或雨滴当量直径(m)。

雨滴当量直径的大小与淋水密度、冷却塔的直径、雨区高度等有关，取值宜通过模拟试验获取。

雨滴对塔内气流的作用力：

$$F_x = \frac{\sum f_x}{\Delta V} = \frac{6q}{\rho_w \pi |u_w| d_r^3} f_x \quad (35)$$

$$F_r = \frac{\sum f_r}{\Delta V} = \frac{6q}{\rho_w \pi |u_w| d_r^3} f_r \quad (36)$$

式中： ΔV ——体积(m^3)；

ρ_w ——水的密度(kg/m^3)。

淋水填料对气流的作用力为：

$$F_x = \frac{1}{2} \rho \xi_t |u| u / H_t \quad (37)$$

$$F_r = \frac{1}{2} \rho \xi_f |u| v / H_f \quad (38)$$

式中: ξ_f ——填料的阻力系数;

H_f ——填料的高度(m)。

(4) 雨区热交换的数学模型。

雨区的热交换将雨滴简化为相同大小的球,球的面积散质系数计算公式为:

$$K = 0.514 \rho D_c \left(\frac{\rho \sqrt{(u-u_w)^2 + (v-v_w)^2}}{\mu_l} \right)^{0.5} \quad (39)$$

$$D_c = \frac{0.0805}{P_a} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.8} \times 9.8 \times 10^4 \quad (40)$$

式中: P_a ——大气压力(Pa);

T ——空气的绝对温度(K);

D_c ——湿空气的分子扩散系数(m^2/h)。

雨滴的散质系数为:

$$K_a = K \frac{6q}{\rho_w u_w d_h} \quad (41)$$

式中: d_h ——雨区热交换的雨滴当量直径,宜通过模拟试验获取(m)。

(5) 雨区阻力系数计算公式。

单位时间通过单位面积的雨滴数为:

$$N_p = \frac{6q}{\pi d_r^3} \quad (42)$$

每个雨滴占的空间为:

$$V_{op} = \frac{|u_w|}{N_p} \quad (43)$$

所以,在微元体 ΔV 内水滴的个数为:

$$D_N = \frac{\Delta V}{V_{op}} = \frac{6q \Delta V}{\pi |u_w| d_r^3} \quad (44)$$

气流径向阻力的功率 N_r 为:

$$N_r = \sum f_r V_r \quad (45)$$

气流垂向阻力的功率 N_x 为：

$$N_x = \sum f_x V_x^2 \quad (46)$$

化到填料段风速 V_0 后的气流径向阻力损失为：

$$F_H = (\sum f_x V_x^2) / V_0^2 \quad (47)$$

化到填料段风速 V_0 后的气流垂向阻力损失为：

$$F_V = (\sum f_x V_x^2) / V_0^2 \quad (48)$$

径向阻力系数为：

$$\xi_H = \frac{2 F_H}{\rho A V_0^2} \quad (49)$$

垂向阻力系数为：

$$\xi_V = \frac{2 F_V}{\rho A V_0^2} \quad (50)$$

雨区的阻力系数为：

$$\xi_2 = \xi_H + \xi_V \quad (51)$$

计算方法的改进研究，无疑将提高逆流冷却塔的热力计算精度。此外还需改进目前国内的淋水填料室内试验和工业塔试验方法，以取得冷却塔内喷淋区、填料区和雨区的散热、散质系数。

国内外的工程技术人员在冷却塔热力计算中还广泛采用一些经验计算方法，这些方法多系根据原型塔或模拟塔的试验资料经归纳整理成为经验公式或曲线图供设计使用，计算简便，在一定条件下具有较好的精度。由于这些方法的得来均有某些特定条件，其使用也均有一定的局限性。当工程的具体条件与经验公式或曲线图的适用范围相符时，设计者采用某种经验方法也是应当允许的。但对冷却塔验收考核试验数据的整理仍应采用焓差法。

排烟冷却塔的热力计算公式与常规冷却塔相同。海水冷却塔的热力计算公式与常规冷却塔相同，但需对淡水塔淋水填料热交换特性进行修正。超大型冷却塔的雨区散热特性，宜通

过实验确定。

(6)关于湿空气的比焓计算。

湿空气的比焓等于干空气的比焓与水蒸汽的比焓之和,本规范1987年和2003年版本曾以下式表示:

$$h = C_d \theta + \chi (\gamma_0 + C_v \theta) \quad (52)$$

$$h''_d = (\gamma_0 + C_v \theta) \quad (53)$$

式中:
h——湿空气比焓[kJ/kg(DA)];

h''_d ——干饱和水蒸汽的焓值(kCal/kg);

C_d ——干空气的比热,可取 $C_d = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

C_v ——水蒸汽的比热,可取 $C_v = 1.846 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

γ_0 ——水在 0°C 时的汽化热,可取 $\gamma_0 = 2500 \text{ kJ/kg}$;

θ ——干空气的温度($^\circ\text{C}$);

χ ——空气的含湿量。

如何计算湿空气中干饱和水蒸汽的焓值,目前国际上还没有统一意见,一些权威学者的意见也不一致。

1926 年德国工程师麦克尔在计算湿空气中水蒸汽的焓值时则采用:

$$h''_d = 595 + 0.46\theta \quad (54)$$

式中“595”是 0°C 时水的汽化潜热(kcal/kg),“0.46”则是水蒸汽的比热 [$\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]。

1965 年以前我国出版的一些工程热力学著作和冷却塔书籍中,例如前苏联 Л. Д. 别尔曼著《循环水蒸发冷却》(1957 年俄文版,胡伦桢等译,中国工业出版社 1965 年中文版)、同济大学热工教研组编《工程热力学》(中国工业出版社 1965 年版)、哈尔滨建筑工程学院与西安冶金建筑学院供热与通风教研室合编《采暖与通风》(中国工业出版社 1961 年版),对干饱和水蒸汽焓值一般采用:

$$h''_d = 595 + 0.47\theta \quad (55)$$

日本学者内田秀雄在其所著《湿空气和冷却塔》(日文版,1963 年

裳华房出版)书中提出在计算湿空气中低压水蒸汽的焓值时应采用:

$$h_d'' = 597.3 + 0.441\theta \quad (56)$$

B. A. 格拉特科夫等著 1964 年俄文版《机械通风冷却塔》书中采用:

$$h_d'' = 597.3 + 0.44\theta \quad (57)$$

B. A. 格拉特科夫等著 1976 年俄文版《机械通风冷却塔》(施建中等译, 化学工业出版社 1981 年版)书中采用:

$$h_d'' = 2500 + 1.84\theta \quad (58)$$

书中还注明相当于公式(57)。

我国赵振国所著《冷却塔》(水利电力出版社 1997 及 2001 年版)和赵顺安所著《海水冷却塔》(中国水利水电出版社 2007 年版)书中则采用:

$$h_d'' = 2500 + 1.842\theta \quad (59)$$

上式也相当于公式(57)。

现行国家标准《机械通风冷却塔工艺设计规范》(GB/T 50392—2006)中采用:

$$h_d'' = 2500.8 + 1.846\theta \quad (60)$$

上式相当于公式(56)。

在冷却塔常用的空气温度 0°C ~ 50°C 范围内, 按以上各式计算出的焓值与国际水蒸汽协会(IAPS)公布的《国际水蒸汽骨架表》的数值及允差的比较见表 6。

表 6 各公式计算的焓值与国际水蒸汽骨架表的比较表(kJ/kg)

水蒸汽温度(°C)	0	10	20	30	40	50
麦克尔采用公式 $h_d'' = 595 + 0.46\theta$	(595) 2491.15	(599.6) 2510.40	(604.2) 2529.66	(608.8) 2548.92	(613.4) 2568.18	(618.0) 2587.44
别尔曼采用公式 $h_d'' = 595 + 0.47\theta$	(595) 2491.15	(599.7) 2510.82	(604.4) 2530.5	(609.1) 2550.18	(613.8) 2569.86	(618.5) 2589.54

续表 6

水蒸汽温度(℃)	0	10	20	30	40	50
内田秀雄采用公式 $h_d'' = 597.3 + 0.441\theta$	(597.3) 2500.77	(601.7) 2519.24	(606.12) 2537.70	(610.53) 2556.17	(614.94) 2574.63	(619.35) 2593.09
格拉特科夫采用公式 $h_d'' = 2500 + 1.84\theta$	2500.77	2519.20	2537.62	2556.04	2574.46	2592.88
赵振国等采用公式 $h_d'' = 2500 + 1.842\theta$	2500.00	2518.42	2536.84	2555.26	2573.68	2592.10
GB/T 50392—2006 采用公式 $h_d'' = 2500.8 + 1.846\theta$	2500.8	2519.26	2537.72	2555.38	2574.64	2593.10
本次修编采用公式 $h_d'' = 2500.8 + 1.842\theta$	2500.8	2519.22	2537.64	2556.06	2574.48	2592.90
国际水蒸汽骨架表及允差	2501±3	2519±3	2538±2	2556±2	2574±2	2592±2

注:表中括号内的数据单位为 kcal/kg。

从表 6 可见,除德国麦克尔和前苏联别尔曼采用的计算公式计算结果超出《国际水蒸汽骨架表》允许的误差外,其余各式计算结果均未超出《国际水蒸汽骨架表》允许的误差,其中以本次修编采用的公式计算结果与《国际水蒸汽骨架表》相差最小,因此建议国家标准《工业循环水冷却设计规范》此次修改版本,在计算湿空

气的比焓时,水在0℃时的汽化热取 $\gamma_0=2500.8\text{kJ/kg}$,水蒸汽的比热取 $C_v=1.842\text{kJ/(kg}\cdot\text{°C)}$ 。

3.1.10 淋水填料的热交换特性通常是以冷却数 N 或容积散质系数 K_a 的经验关系来表示:

$$N=A\lambda^m \quad (61)$$

$$K_a=Bg^nq^n \quad (62)$$

式中: N ——冷却数;

A, B ——常数;

m, n ——经验指数。

注:常数 A, B 和指数 m, n 均需通过原型塔或模拟塔试验求取。

淋水填料的热交换特性取决于淋水填料的型式、材质及其在冷却塔内的布置,塔的配水和通风条件,塔内的气、水流量和流场分布,塔的水气参数等一系列因素的影响。同样的淋水填料在不同的原型塔或模拟塔的试验中结果也不尽相同。逆流式冷却塔的散热能力由配水部分(喷淋区)、淋水填料及下部雨区(尾冷区)三部分组成。目前我国的各室内试验装置和工业冷却塔的试验中,均是把上述三部分混在一起测试,给出的试验成果也都是上述三部分共同作用的结果。实际工程中所设计的冷却塔,其配水部分和雨区往往与室内试验装置或工业试验塔不同,在设计中必须考虑设计条件与试验条件的差别,宜优先采用与所设计的塔条件相同或相似的原型塔的试验资料进行设计。当采用模拟塔的试验资料时,应视模拟塔与所设计的塔的不同条件,对模拟塔的资料加以修正。需要注意的是,有些资料中 K_a 或 N 单指淋水填料本身的热力特性,其中不包括喷淋区和尾冷区,这与我国目前一些试验资料给出的淋水填料的 K_a 和 N 不同,设计者在采用某种淋水填料的 K_a 和 N 时应注意其试验条件和所包括的范围。

国内外对淋水填料在原型塔与模拟塔之间的相关关系研究很不够。现将国内西安热工研究院和中国水利水电科学研究院冷却

水研究所对几种不同淋水填料经各自的模拟塔和有关的原型塔试验得出的相关关系列于表 7。

原苏联维捷涅叶夫水利工程科学研究所建议取 $\Phi = 0.85 \sim 1.0$ 。B·A·格拉特科夫建议取 $\Phi = 0.8$ 。综合国内外有关资料，在设计中相关系数一般宜取 $0.85 \sim 1.0$ 。

表 8 和表 9 中列出近年国内有关单位研制和应用较为广泛的部分逆流和横流冷却塔的塑料淋水填料的热力及阻力特性。表中的数据除注明者外，均为中国水利水电科学研究院冷却水研究所的试验结果。该所逆流试验塔断面为 $0.6m \times 0.6m$ ，横流试验塔试验段宽 $1.0m$ 。表 10 中列出近年西安热工研究院对部分淋水填料的工业塔实测热力特性数据。其中逆流式冷却塔淋水填料的热力特性均包括了喷淋区、填料区和尾冷区三部分，阻力仅为淋水填料本身的阻力。

表 7 原型塔与模拟塔冷却数的比值(气水比 $\lambda = 0.5 \sim 1.0$)

填 料 名 称	测 试 单 位	
	西 安 热 工 研 究 所	冷 却 水 研 究 所
I 型双斜波 SXB-I $H=1000mm$	0.94	1.0
复合波 ANCS $H=1000mm$	0.98	1.0
S 波 $H=1000mm$	0.88	1.0
Z 波 $H=1000mm$	0.89	1.0
双向波 $H=1000mm$	—	1.0

表 8 部分逆流式冷却塔填料特性参数表

序号	填料名称	填料高度 (m)	热力特性表达式	阻力特性表达式 $\frac{\Delta P}{\gamma_a} = A v^M$	备注
1	复合波	1.00	$N = 1.62 \lambda^{0.56}$ $K_a = 1754 g^{0.55} q^{0.42}$	$A = -2.09 \times 10^{-4} q^2 + 3.63 \times 10^{-2} q + 0.538$ $M = -9.36 \times 10^{-4} q^2 - 7.34 \times 10^{-3} q + 1.95$	片距 20mm
2	复合波	2.00	$N = 2.19 \lambda^{0.72}$ $K_a = 760 g^{0.81} q^{0.36}$	$A = 1.30 \times 10^{-3} q^2 + 1.96 \times 10^{-2} q + 0.84$ $M = -3.0 \times 10^{-4} q^2 - 1.57 \times 10^{-2} q + 1.91$	片距 20mm
3	双斜波	1.00	$N = 1.61 \lambda^{0.66}$ $K_a = 1355 g^{0.69} q^{0.39}$	$A = 8.00 \times 10^{-4} q^2 + 3.29 \times 10^{-2} q + 0.599$ $M = -1.40 \times 10^{-3} q^2 - 7.30 \times 10^{-3} q + 2.00$	片距 30mm
4	双斜波	1.25	$N = 1.90 \lambda^{0.66}$ $K_a = 1423 g^{0.67} q^{0.36}$	$A = -1.8 \times 10^{-3} q^2 + 5.40 \times 10^{-2} q + 0.700$ $M = 1.10 \times 10^{-3} q^2 - 2.80 \times 10^{-2} q + 2.00$	片距 30mm
5	双斜波	1.50	$N = 2.08 \lambda^{0.76}$ $K_a = 1100 g^{0.76} q^{0.34}$	$A = 1.00 \times 10^{-4} q^2 + 2.78 \times 10^{-2} q + 0.877$ $M = 3.00 \times 10^{-4} q^2 - 1.11 \times 10^{-2} q + 2.00$	片距 30mm
6	双斜波	2.00	$N = 2.65 \lambda^{0.78}$ $K_a = 1470 g^{0.75} q^{0.20}$	$A = 4.00 \times 10^{-4} q^2 + 4.08 \times 10^{-2} q + 1.05$ $M = 3.00 \times 10^{-4} q^2 - 2.75 \times 10^{-2} q + 2.00$	片距 30mm
7	S 波	1.00	$N = 1.60 \lambda^{0.66}$ $K_a = 1319 g^{0.69} q^{0.40}$	$A = -1.00 \times 10^{-4} q^2 + 2.83 \times 10^{-2} q + 0.603$ $M = -1.00 \times 10^{-4} q^2 - 1.09 \times 10^{-2} q + 2.00$	片距 30mm

续表 8

序号	填料名称	填料高度 (m)	热力特性表达式	阻力特性表达式 $\frac{\Delta P}{\gamma_a} = Av^M$	备注
8	S 波	1.25	$N=1.86\lambda^{0.66}$ $K_a=1447g^{0.66}q^{0.35}$	$A=8.00 \times 10^{-4}q^2 + 1.22 \times 10^{-2}q + 0.741$ $M=-1.50 \times 10^{-3}q^2 + 1.52 \times 10^{-2}q + 2.00$	片距 30mm
9	S 波	1.50	$N=2.17\lambda^{0.70}$ $K_a=1483g^{0.69}q^{0.30}$	$A=2.10 \times 10^{-3}q^2 - 2.40 \times 10^{-3}q + 0.829$ $M=-2.00 \times 10^{-3}q^2 + 2.14 \times 10^{-3}q + 2.00$	片距 30mm
10	S 波	2.00	$N=2.89\lambda^{0.73}$ $K_a=1690g^{0.70}q^{0.23}$	$A=1.60 \times 10^{-3}q^2 + 1.77 \times 10^{-2}q + 1.07$ $M=-1.00 \times 10^{-3}q^2 - 3.30 \times 10^{-3}q + 1.94$	片距 30mm
11	双向波	1.00	$N=1.37\lambda^{0.69}$ $K_a=1531g^{0.67}q^{0.28}$	$A=-4.00 \times 10^{-4}q^2 + 3.76 \times 10^{-2}q + 0.389$ $M=1.00 \times 10^{-3}q^2 - 4.71 \times 10^{-2}q + 2.00$	片距 25mm
12	双向波	1.25	$N=1.55\lambda^{0.63}$ $K_a=962g^{0.67}q^{0.45}$	$A=7.00 \times 10^{-4}q^2 + 2.78 \times 10^{-2}q + 0.483$ $M=-6.00 \times 10^{-4}q^2 - 2.26 \times 10^{-2}q + 2.00$	片距 25mm
13	双向波	1.50	$N=1.75\lambda^{0.69}$ $K_a=989g^{0.71}q^{0.37}$	$A=-6.00 \times 10^{-4}q^2 + 2.75 \times 10^{-2}q + 0.532$ $M=0.00 \times 10^{-3}q^2 - 5.70 \times 10^{-3}q + 2.00$	片距 25mm
14	双向波	2.00	$N=2.25\lambda^{0.72}$ $K_a=1050g^{0.73}q^{0.30}$	$A=4.00 \times 10^{-4}q^2 + 3.36 \times 10^{-2}q + 0.71$ $M=3.00 \times 10^{-4}q^2 - 2.77 \times 10^{-2}q + 1.93$	片距 25mm

15	斜折波	1.00	$N = 1.40\lambda^{0.61}$ $K_a = 1132g^{0.64}q^{0.45}$	$A = 1.00 \times 10^{-4}q^2 + 2.28 \times 10^{-2}q + 0.466$ $M = -8.00 \times 10^{-4}q^2 - 4.50 \times 10^{-3}q + 1.99$	片距 30mm
16	斜折波	1.25	$N = 1.65\lambda^{0.59}$ $K_a = 1152g^{0.61}q^{0.45}$	$A = -1.60 \times 10^{-3}q^2 + 4.34 \times 10^{-2}q + 0.570$ $M = 2.60 \times 10^{-3}q^2 - 4.46 \times 10^{-3}q + 2.00$	片距 30mm
17	斜折波	1.50	$N = 1.78\lambda^{0.63}$ $K_a = 1041g^{0.65}q^{0.41}$	$A = 6.00 \times 10^{-4}q^2 + 1.33 \times 10^{-2}q + 0.714$ $M = -4.00 \times 10^{-4}q^2 - 2.00 \times 10^{-3}q + 2.00$	片距 30mm
18	金坛斜波	0.90	$N = 1.79\lambda^{0.71}$ $K_a = 2360g^{0.68}q^{0.25}$	$A = -3.00 \times 10^{-4}q^2 + 2.50 \times 10^{-2}q + 0.46$ $M = 2.00 \times 10^{-4}q^2 - 1.70 \times 10^{-2}q + 2.00$	片距 20mm
19	金坛斜波	1.50	$N = 2.28\lambda^{0.67}$ $K_a = 1270g^{0.74}q^{0.35}$	$A = 2.00 \times 10^{-4}q^2 + 5.00 \times 10^{-2}q + 0.64$ $M = 9.00 \times 10^{-4}q^2 - 5.40 \times 10^{-2}q + 2.00$	片距 20mm
20	金坛斜波	2.10	$N = 2.72\lambda^{0.67}$ $K_a = 1290g^{0.68}q^{0.34}$	$A = -2.00 \times 10^{-4}q^2 + 4.82 \times 10^{-2}q + 0.92$ $M = -3.00 \times 10^{-4}q^2 - 1.17 \times 10^{-2}q + 2.00$	片距 20mm
21	高效斜波	1.00	$N = 1.63\lambda^{0.62}$ $K_a = 1350g^{0.66}q^{0.42}$	$A = 1.60 \times 10^{-3}q^2 + 1.76 \times 10^{-2}q + 0.63$ $M = -1.00 \times 10^{-3}q^2 - 2.70 \times 10^{-3}q + 1.71$	片距 25mm
22	高效斜波	1.25	$N = 1.74\lambda^{0.72}$ $K_a = 1630g^{0.69}q^{0.24}$	$A = 1.00 \times 10^{-3}q^2 + 1.47 \times 10^{-2}q + 0.70$ $M = -3.00 \times 10^{-4}q^2 + 1.50 \times 10^{-3}q + 1.84$	片距 25mm

续表 8

序号	填料名称	填料高度 (m)	热力特性表达式	阻力特性表达式 $\frac{\Delta P}{\gamma_a} = Av^M$	备注
23	高效斜波	1.50	$N = 2.18\lambda^{0.69}$ $K_a = 1450g^{0.69}q^{0.31}$	$A = 6.00 \times 10^{-4}q^2 + 3.28 \times 10^{-2}q + 0.81$ $M = 0.00 \times 10^{-4}q^2 - 1.78 \times 10^{-2}q + 1.80$	片距 25mm
24	高效斜波	1.75	$N = 2.39\lambda^{0.69}$ $K_a = 1000g^{0.72}q^{0.32}$	$A = 2.00 \times 10^{-3}q^2 + 4.10 \times 10^{-3}q + 0.91$ $M = -2.00 \times 10^{-3}q^2 + 2.33 \times 10^{-2}q + 1.92$	片距 25mm
25	高效斜波	2.00	$N = 2.60\lambda^{0.70}$ $K_a = 1070g^{0.74}q^{0.35}$	$A = 9.00 \times 10^{-4}q^2 + 2.45 \times 10^{-2}q + 1.04$ $M = -4.00 \times 10^{-4}q^2 - 1.23 \times 10^{-2}q + 1.88$	片距 25mm
26	全梯波	1.00	$N = 1.51\lambda^{0.58}$ $K_a = 1933g^{0.54}q^{0.35}$	$A = -5.09 \times 10^{-4}q^2 + 3.07 \times 10^{-2}q + 0.570$ $M = 1.28 \times 10^{-3}q^2 - 3.23 \times 10^{-2}q + 1.96$	片距 22mm
27	TJ-10	1.00	$N = 1.48\lambda^{0.54}$ $K_a = 1439g^{0.54}q^{0.47}$	$A = -9.24 \times 10^{-3}q^2 + 4.33 \times 10^{-2}q + 0.760$ $M = 2.18 \times 10^{-4}q^2 - 9.36 \times 10^{-3}q + 1.98$	片距 30mm
28	梯形斜波	1.00	$N = 1.70\lambda^{0.61}$ $K_a = 1897g^{0.59}q^{0.36}$	$A = 1.07 \times 10^{-4}q^2 + 3.02 \times 10^{-2}q + 0.770$ $M = 4.10 \times 10^{-4}q^2 - 1.35 \times 10^{-2}q + 2.00$	片距 33mm
29	台阶波	1.00	$N = 1.26\lambda^{0.53}$ $K_a = 1149g^{0.55}q^{0.50}$	$A = 2.67 \times 10^{-3}q^2 - 2.94 \times 10^{-3}q + 1.069$ $M = -1.38 \times 10^{-3}q^2 + 4.71 \times 10^{-3}q + 2.00$	片距 27mm

30	Z字波	1.00	$N = 1.76\lambda^{0.58}$ $K_a = 2214g^{0.54}q^{0.35}$	$A = -1.02 \times 10^{-3}q^2 + 3.76 \times 10^{-2}q + 0.851$ $M = -0.00 \times 10^{-3}q^2 - 0.00 \times 10^{-3}q + 2.00$	片距 33mm
31	梯形斜波	0.675	$N = 1.25\lambda^{0.57}$ $K_a = 2600g^{0.46}q^{0.37}$	$A = 1.85 \times 10^{-4}q^2 + 3.94 \times 10^{-2}q + 0.550$ $M = 2.78 \times 10^{-3}q^2 - 5.83 \times 10^{-2}q + 1.90$	片距 30mm
32	梯形斜波	0.90	$N = 1.43\lambda^{0.58}$ $K_a = 2012g^{0.51}q^{0.37}$	$A = 1.91 \times 10^{-3}q^2 + 4.76 \times 10^{-2}q + 0.700$ $M = -1.21 \times 10^{-3}q^2 - 7.01 \times 10^{-3}q + 1.77$	片距 30mm
33	梯形斜波	0.90	$N = 1.37\lambda^{0.57}$ $K_a = 1936g^{0.51}q^{0.37}$	$A = 5.56 \times 10^{-4}q^2 + 5.18 \times 10^{-2}q + 0.820$ $M = -2.78 \times 10^{-3}q^2 - 1.67 \times 10^{-3}q + 1.81$	片距 30mm
34	RMC-1900	1.20	$N = 1.33\lambda^{0.56}$ $K_a = 1692g^{0.49}q^{0.32}$	$A = 2.32 \times 10^{-4}q^2 + 2.66 \times 10^{-2}q + 0.650$ $M = 1.51 \times 10^{-3}q^2 - 3.98 \times 10^{-2}q + 1.61$	片距 20mm
35	斜折波网式填料	1.00	$N = 1.17\lambda^{0.60}$ $K_a = 1034g^{0.54}q^{0.30}$	$A = -6.00 \times 10^{-4}q^2 + 6.06 \times 10^{-2}q + 0.390$ $M = 4.70 \times 10^{-3}q^2 - 9.66 \times 10^{-2}q + 1.99$	片距 24mm
36	塑料网格	1.00	$N = 0.93\lambda^{0.45}$	$A = 1.20 \times 10^{-3}q^2 + 5.69 \times 10^{-2}q + 0.210$ $M = 4.30 \times 10^{-3}q^2 - 1.10 \times 10^{-1}q + 1.89$	正方形网孔 边长 50mm, 板厚 50mm
37	塑料网格	2.00	$N = 1.29\lambda^{0.54}$	$A = -4.40 \times 10^{-3}q^2 + 1.30 \times 10^{-1}q + 0.400$ $M = 1.80 \times 10^{-3}q^2 - 4.95 \times 10^{-2}q + 1.83$	

续表 8

序号	填料名称	填料高度 (m)	热力特性表达式	阻力特性表达式 $\frac{\Delta P}{\gamma_a} = A u^M$	备注
38	塑料网格	1.00	$N = 1.01 \lambda^{0.47}$	$A = 2.50 \times 10^{-3} q^2 + 3.23 \times 10^{-2} q + 0.320$ $M = -1.70 \times 10^{-3} q^2 - 3.90 \times 10^{-3} q + 2.00$	正方形网孔 边长 51mm, 板厚 30mm
39	塑料网格	2.00	$N = 1.36 \lambda^{0.54}$	$A = 3.00 \times 10^{-4} q^2 + 5.95 \times 10^{-2} q + 0.570$ $M = -1.80 \times 10^{-3} q^2 + 1.52 \times 10^{-2} q + 2.00$	
40	塑料网格	1.00	$N = 1.01 \lambda^{0.51}$	$A = 8.00 \times 10^{-5} q^2 + 7.70 \times 10^{-2} q + 0.310$ $M = 1.60 \times 10^{-3} q^2 - 6.67 \times 10^{-2} q + 2.00$	正六角形网 孔边距 50mm, 板厚 30mm
41	塑料网格	2.00	$N = 1.28 \lambda^{0.49}$	$A = 1.41 \times 10^{-3} q^2 + 4.11 \times 10^{-2} q + 0.580$ $M = -4.00 \times 10^{-4} q^2 - 1.06 \times 10^{-3} q + 2.00$	
42	人字波	1.50	$N = 1.94 \lambda^{0.63}$ $K_a = 1812 g^{0.55} q^{0.29}$	$A = 2.55 \times 10^{-4} q^2 + 1.40 \times 10^{-2} q + 0.787$ $M = 3.01 \times 10^{-4} q^2 - 6.15 \times 10^{-3} q + 2.00$	片距 23mm
43	梯形波 T29-60	1.20	$N = 1.86 \lambda^{0.62}$ $K_a = 1756 g^{0.58} q^{0.36}$	$A = 4.56 \times 10^{-4} q^2 + 9.54 \times 10^{-2} q + 0.608$ $M = -3.23 \times 10^{-4} q^2 - 6.15 \times 10^{-3} q + 2.00$	片距 29mm

44	斜波纹 50×20-60	1.00	$N = 1.36\lambda^{0.44}$ $K_s = 1699g^{0.40}q^{0.49}$	$A = 1.77 \times 10^{-4}q^2 + 1.03 \times 10^{-2}q + 0.609$ $M = 6.75 \times 10^{-5}q^2 - 1.22 \times 10^{-2}q + 1.85$	片距 20mm
45	折波	1.50	$N = 1.85\lambda^{0.59}$ $K_s = 1555g^{0.52}q^{0.36}$	$A = 1.56 \times 10^{-4}q^2 + 1.98 \times 10^{-2}q + 0.870$ $M = 4.83 \times 10^{-4}q^2 - 2.06 \times 10^{-2}q + 2.00$	片距 28mm
46	组合波	1.20	$N = 1.80\lambda^{0.59}$ $K_s = 2401g^{0.48}q^{0.29}$	$A = 4.59 \times 10^{-4}q^2 + 1.20 \times 10^{-2}q + 0.768$ $M = -1.46 \times 10^{-4}q^2 - 1.04 \times 10^{-2}q + 2.00$	2 层 0.5m 折波加 1 层 0.2m 梯形波
47	改型水泥 格网板 16×50-50	1.55	$N = 1.52\lambda^{0.54}$ $K_s = 1334g^{0.48}q^{0.38}$	$A = 9.91 \times 10^{-4}q^2 + 1.44 \times 10^{-2}q + 0.836$ $M = -6.11 \times 10^{-4}q^2 - 7.00 \times 10^{-3}q + 2.00$	网孔为 50mm
48	改型水泥 格网板 16×40-50	1.55	$N = 1.60\lambda^{0.57}$ $K_s = 1395g^{0.51}q^{0.35}$	$A = 1.13 \times 10^{-3}q^2 + 1.19 \times 10^{-2}q + 0.979$ $M = -1.11 \times 10^{-4}q^2 + 1.20 \times 10^{-2}q + 2.00$	网孔为 40mm
49	改型水泥 格网板 16×30-50	1.55	$N = 1.80\lambda^{0.54}$ $K_s = 1673g^{0.39}q^{0.47}$	$A = 5.66 \times 10^{-4}q^2 + 2.21 \times 10^{-2}q + 1.190$ $M = -4.72 \times 10^{-4}q^2 - 7.83 \times 10^{-3}q + 2.00$	网孔为 30mm

续表 8

序号	填料名称	填料高度 (m)	热力特性表达式	阻力特性表达式 $\frac{\Delta P}{\gamma_a} = A v^M$	备注
50	陶瓷横凸 纹格网 55×55×100	1.50	$N=1.59\lambda^{0.52}$ $K_a=1084g^{0.53}q^{0.49}$	$A=4.59\times10^{-4}q^2+1.20\times10^{-1}q+0.638$ $M=3.82\times10^{-4}q^2-2.28\times10^{-2}q+1.98$	网孔为 55mm
51	陶瓷横凸 纹格网 55 ×55×100	1.2m	$N=1.35\lambda^{0.57}$ $K_a=1354g^{0.56}q^{0.35}$	$A=4.50\times10^{-4}q^2+1.02\times10^{-2}q+0.558$ $M=-3.51\times10^{-4}q^2-1.04\times10^{-2}q+1.96$	网孔为 55mm
52	陶瓷横凸 纹格网 55 ×55×100	1.00m	$N=1.29\lambda^{0.60}$ $K_a=1632g^{0.50}q^{0.39}$	$A=2.82\times10^{-4}q^2+1.17\times10^{-2}q+0.510$ $M=-7.77\times10^{-5}q^2-1.04\times10^{-2}q+1.98$	网孔为 55mm
53	斜梯波	1.50m	$N=1.67\lambda^{0.71}$ $K_a=1602g^{0.62}q^{0.27}$	$A=1.17\times10^{-4}q^2+1.43\times10^{-2}q+0.739$ $M=5.43\times10^{-4}q^2+7.22\times10^{-4}q+1.94$	片距 23mm
54	MC75	1.20m	$N=1.95\lambda^{0.64}$ $K_a=1150g^{0.72}q^{0.44}$	$A=-2.49\times10^{-3}q^2-1.02\times10^{-1}q+3.230$ $M=9.64\times10^{-4}q^2-1.48\times10^{-2}q+1.77$	片距 19mm

注:1 表中的淋水填料热力阻力性能测试,在中国水利水电科学研究院试验室内抽风式逆流冷却塔模拟测试平台上进行。

2 各参数的单位: K_a 为 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$; g, q 为 $\text{t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ΔP 为 Pa ; γ_a 为 N/m^3 ; v 为淋水填料断面的平均风速(m/s)。

表9 部分横流式冷却塔填料的热力和阻力特性

填料 型式	序号	填料名称	填料试验尺寸 (m)		热力特性表达式	阻力 $\frac{\Delta p}{\gamma_a} A \nu^M$ 的 A、M 表达式
			高	长		
点滴式	1	DC150×150	2.0	2.5	$N = 1.23\lambda^{0.26}$ $K_a = 602g^{0.29}q^{0.75}$	$A = 2.86 \times 10^{-5}q^2 + 4.26 \times 10^{-3}q + 0.23$ $M = 2.86 \times 10^{-5}q^2 - 8.14 \times 10^{-3}q + 2.10$
	2	塑料弧形板 100-100-300	2.0	2.5	$N = 1.43\lambda^{0.27}$ $K_a = 246g^{0.23}q^{0.68}$	$A = 4.2 \times 10^{-4}q^2 + 3.7 \times 10^{-2}q + 0.11$ $M = -4.09 \times 10^{-5}q^2 - 1.48 \times 10^{-3}q + 1.316$
薄膜式	3	HTB-80-30	2.1	2.4	$N = 1.09\lambda^{0.81}$ $K_a = 455g^{0.83}q^{0.21}$	$A = 6.74 \times 10^{-5}q^2 + 1.77 \times 10^{-2}q + 1.09$ $M = 2.05 \times 10^{-4}q^2 - 1.21 \times 10^{-2}q + 1.90$
	4	正弦直波	2.0	2.5	$N = 0.66\lambda^{0.76}$ $K_a = 404g^{0.72}q^{0.22}$	$A = 0.54 \times 10^{-4}q^2 + 0.38 \times 10^{-2}q + 0.25$ $M = 0.91 \times 10^{-4}q^2 - 0.54 \times 10^{-2}q + 1.44$

注:1 填料材质均为改性 PVC。

2 本表中 g 为横流式冷却塔进风口断面的平均质量风速 [$t/(m^2 \cdot h)$]，其余各参数单位见本条文说明表 3； ν 为塔进风口断面的平均风速 (m/s)。

表 10 部分冷却塔淋水填料工业塔实测热力特性

填料名称	实测时间	工业塔特性	设计条件	实测条件	实测冷却数
I型 双斜波 SXB-I	1996年 6月	淋水面积 3500m ² 逆流式双曲线自然通风冷却塔, 槽式配水。塔高 90.0m; 填料高 1.0m; 进风口高 5.6m	$\theta=32.0$ $\tau=27.8$ $Q=20468$ $\Delta t=7.43$	$\theta=19.3\sim31.2$ $\tau=22.4\sim26.2$ $Q=17353\sim22050$ $\Delta t=5.26\sim7.65$	$N=1.79\lambda^{0.63}$
Z波	1997年 8月	淋水面积 4500m ² 逆流式双曲线自然通风冷却塔, 管式配水。塔高 105m; 填料高 1.0m; 进风口高 7.8m	$\theta=28.3$ $\tau=25.4$ $Q=25668$ $\Delta t=9.08$	$\theta=22.8\sim33.9$ $\tau=20.4\sim23.4$ $Q=14565\sim25605$ $\Delta t=7.33\sim10.91$	$N=1.66\lambda^{0.67}$
S波	1997年 7月	淋水面积 6000m ² 逆流式双曲线自然通风冷却塔, 槽式配水, 塔高 120m; 填料高 1.0m; 进风口高 7.8m	$\theta=28.4$ $\tau=25.5$ $Q=33300$ $\Delta t=8.98$	$\theta=29.1\sim35.9$ $\tau=25.5\sim28.2$ $Q=33310$ $\Delta t=10.50\sim10.92$	$N=1.69\lambda^{0.54}$
斜折波	1988年 8月	淋水面积 2000m ² 逆流式双曲线自然通风冷却塔, 槽式配水。塔高 70m; 填料高 1.2m; 进风口高 4.0m	$\theta=26.1$ $\tau=22.0$ $Q=13500$ $\Delta t=7.99$	$\theta=18.2\sim24.0$ $\tau=13.4\sim17.6$ $Q=10110\sim14260$ $\Delta t=7.70\sim9.70$	$N=1.76\lambda^{0.58}$

复合波 ANCS	1992年 8月	淋水面积 6183m^2 逆流式双曲线自然通风冷却塔, 槽管配水。塔高 130m; 填料高 1.0m; 进风口高 7.74m	$\theta=30.0$ $\tau=27.1$ $Q=61396$ $\Delta t=9.74$	$\theta=22.7 \sim 28.6$ $\tau=20.9 \sim 23.8$ $Q=60730 \sim 63700$ $\Delta t=6.56 \sim 10.60$	$N=1.64\lambda^{0.62}$
全梯波	1992年 7月	淋水面积 1500m^2 逆流式双曲线自然通风冷却塔, 槽式配水。塔高 64.2m; 填料高 1.0m; 进风口高 3.37m	$\theta=26.8$ $\tau=24.0$ $Q=9300$ $\Delta t=7.80$	$\theta=23.4 \sim 36.3$ $\tau=22.3 \sim 26.2$ $Q=6515 \sim 9390$ $\Delta t=6.56 \sim 10.53$	$N=1.63\lambda^{0.65}$
HTB-8 0-30	1996年 7月	横流式机械通风冷却塔。风机直径 8.53m, 双侧进风, 进风口宽 11.0m, 高 11.2m; 填料宽 11.0m 高 11.2m。径深 $2 \times 3.6\text{m}$, 池式配水。反射 I型喷头	$\theta=32.6$ $\tau=28.2$ $Q=2600$ $\Delta t=10.00$	$\theta=23.5 \sim 31.9$ $\tau=21.3 \sim 27.6$ $Q=2407 \sim 2920$ $\Delta t=4.72 \sim 5.92$	$N=2.42\lambda^{0.60}$ $K_a =$ $371g^{0.63}q^{0.42}$

注:1 表中 θ —干球温度 $^{\circ}\text{C}$; τ —湿球温度 $^{\circ}\text{C}$; Q —冷却水流量 m^3/h ; Δt —冷却水温差 $^{\circ}\text{C}$ 。

2 K_a 单位为 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$; g, q 单位为 $\text{t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

3 表中数据均为西安热工研究院测试。

横流式冷却塔的淋水填料散热特性是在某一几何尺寸特定的模拟试验塔上试验得出的,该模拟塔的填料高度和深度与实际工业塔不同,所以在进行工业塔设计时要对模拟塔的试验数据进行填料高度和深度的换算。

有关淋水填料高度、径深对填料散热特性的修正计算方法可参见有关著述(赵振国著《冷却塔》,中国水利电力出版社,1996年)。

当冷却塔雨区高度与模拟塔雨区高度不一致时,应对雨区散热特性进行修正。

逆流式冷却塔的填料试验高度与工业塔内的设计高度一般情况下相等,不需进行淋水填料高度修正。

3.1.11~3.1.13 海水冷却塔与淡水冷却塔相比,热力特性有所降低,主要影响因素为海水的比热比淡水低,降低了海水的纳热能力,同时海水的蒸汽压力低于淡水,蒸发量变小,散热能力变低,另外海水的导热系数比淡水低,影响了接触传热。

海水冷却塔的热力特性的折减可以通过理论分析方法求得,也可通过模拟塔试验进行测试,参考《海水冷却塔》(赵顺安,中国水利水电出版社,2007年1月),通过试验给出的海水塔热力特性修正的关系式:

$$A_s = 1.00 - 5.53 \times 10^{-2} C \quad (63)$$

式中: A_s ——海水冷却塔热力计算时填料热力特性修正系数;

C ——海水浓度(含盐量相对于含盐量35000mg/kg的倍数)。

参考《海水冷却塔》,对不同海水浓度的填料冷却数与出塔水温采用理论与试验两种修正系数进行计算对比分析,结论为两种方法得出出塔水温差值小于0.1℃。

由于目前国内海水塔的实际应用还较少、时间也不长,相关试验研究和实测对比数据有限,参考《海水冷却塔》中试验所参考的水质为特定工程条件下的海水水质,故规范中指出对海水冷却塔

热力计算时填料热力特性修正系数宜通过试验确定。

海水循环水的设计浓缩倍率应结合环境保护部门对浓缩海水的排放要求、海水预处理及循环水水质稳定设计等因素综合确定。

参考《海水冷却塔热力阻力性能研究》(唐勇等,冷却塔会议论文集,2012年),通过室内模拟塔对不同盐度海水对淋水填料阻力性能影响进行研究,试验结果表明,各种填料阻力大小随盐度增加变化不大,说明海水盐度对填料阻力没有明显影响,填料阻力大小只与填料型式和填料高度等有关。

计算海水冷却塔最高冷却水温时,宜按近期连续不少于5年,每年最热3个月时期的月平均海水补给水盐度进行设计,每年最热时期3个月,一般为6月、7月、8月三个月或7月、8月、9月三个月。

3.1.14、3.1.15 这两条规定了冷却塔的通风阻力系数的选用和计算方法。

(1)冷却塔的通风阻力系数。

冷却塔的通风阻力一般按下式计算:

$$H = \frac{1}{2} \xi \rho_m v_m^2 \quad (64)$$

式中: H ——冷却塔的全部或局部通风阻力(Pa);

v_m ——淋水填料计算断面的平均风速(m/s);

ρ_m ——塔内湿空气平均密度(kg/m³);

ξ ——冷却塔的总阻力系数或局部阻力系数。

无论是机械通风还是自然通风冷却塔,当前均没有恰当的计算方法准确地计算塔的总阻力系数。因此,冷却塔的通风阻力计算也就成为一个难题。为了解决这一问题,国内外的有关研究人员进行过大量的研究,提出了一些解决办法。这些办法可概括为下列三种:

1)根据对已建成的冷却塔测试结果,设计相似的新塔。采用这种方法存在的问题有两方面。其一是在工业塔测试中塔的通风

量和出塔空气参数既不易测，又测不准，测试结果与实际情况往往存在较大误差；其二是只有新设计的塔与所试验的塔在外形、进风口、淋水装置（包括配水系统、填料、雨区及支承梁柱）、收水器等各部件完全相似的条件下，才可以采用已建塔的测试数据设计新塔，倘二者相差较大，则必然会导致新塔的设计误差。

2) 根据室内模型塔试验研究成果计算冷却塔的各部分阻力系数。各部分阻力系数之和即为塔的总阻力系数；或根据各部分阻力系数，分别求出各部分的阻力。这种办法的缺陷是没有考虑塔内各部分之间的相互影响。实际上塔内各部分的气流相互影响，塔内气流流场是塔内各部分，特别是相邻部分共同作用的结果。不考虑塔内各部分之间的相互影响，必然会造成计算上的误差。

3) 根据模型塔试验结果，得出冷却塔的总阻力系数。

(2) 自然通风逆流式冷却塔的通风阻力系数计算方法。

我国的工程技术人员以往在计算自然通风逆流式冷却塔的通风阻力时，常按下式计算塔的总阻力系数：

$$\xi = \frac{2.5}{\left(\frac{4H_0}{D_0}\right)^2} + 0.32D_0 + \left(\frac{F_m}{F_c}\right)^2 + \xi_t \quad (65)$$

式中： H_0 —— 进风口高(m)；

D_0 —— 进风口平均直径(m)；

F_m —— 塔的淋水面积(m^2)；

F_c —— 塔筒出口面积(m^2)；

ξ_t —— 淋水装置的阻力系数。

式(65)出处不详。实践表明，按式(65)计算的总阻力系数较实际偏大。如我国某电厂淋水面积 $3500m^2$ 和另一电厂淋水面积 $6500m^2$ 的自然通风逆流式冷却塔按式(65)计算和根据实测水温按抽力及阻力平衡的方法推算出的“实测”总阻力系数比较见表 11。

表 11 总阻力系数比较

淋水 面积 (m ²)	塔总高 (m)	进风口高 (m)	进风口 平均直径 (m)	塔筒出 口直径 (m)	实测 总阻力 系数	式中(65) 计算总 阻力系数	实测/ 计算
3500	90	5.8	69.8	43.1	48.2	66.7	0.72
6500	125	9.0	95.4	57.6	79.8	97	0.82

表 11 中的实测和计算的总阻力系数均为不同淋水密度的平均值。从表 11 中可以看出工业塔实测的总阻力系数仅为按式(65)计算的 72%~82%。

根据西安热工研究院、华北电力试验所和中国水利水电科学研究院冷却水所等单位对国内的淋水面积为 1500m²~7000m² 的 18 座双曲线型自然通风冷却塔的实测资料, 按塔的抽力与阻力平衡方法计算的总阻力系数约为按式(65)计算结果的 60%~90%, 大部分为 75%~85%。

式(65)采用的是把塔的进风口、雨区、淋水装置和塔出口各部分的阻力系数相加的方法求得塔的总阻力系数。其中的第二项 $0.32D_0$ 仅和塔的进风口平均直径有关, 可视为塔内雨区的气流水平阻力, 此项内容除塔的直径外, 其他如淋水密度、气流速度、雨区高度等因素均未考虑, 这是导致该式计算结果偏差较大的原因之一。

为了克服利用式(65)计算总阻力系数误差较大的缺陷, 国内不少单位都进行过有关的研究, 提出了一些解决办法, 可分为以下三种:

1) 根据对已建工业塔的实测资料, 在设计同型的新塔时, 按式(65)计算的总阻力系数乘以 0.75~0.85 的折减系数。目前国内工业塔的实测资料较少, 采用这一方法受到限制。

2) 把塔的各部分阻力系数相加。

1980 年, 西北电力设计院王良中工程师根据对国外一些试验资料的分析, 建议采用下式计算自然通风逆流式冷却塔的总阻力系数:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 + \xi_5 + \xi_e \quad (66)$$

$$\xi_1 = 0.117 \left(\frac{D_2}{H_0} \right)^2 + 0.33 \left(\frac{D_2}{H_0} \right) + 2.48 \quad (67)$$

$$\xi_2 = (0.1 + 0.025q) \frac{D_2^3}{256 H_0^2} \quad (68)$$

$$\xi_4 = [0.5 + 1.3(1 - F_b)^2] \times \left(\frac{1}{F_b} \right)^2 \quad (69)$$

$$\xi_e = \left(\frac{F_m}{F_c} \right)^2 \quad (70)$$

式中： ξ_1 ——进风口阻力系数；

ξ_2 ——雨区阻力系数；

ξ_3 ——淋水填料的阻力系数，根据试验资料确定；

ξ_4 ——配水装置的阻力系数；

ξ_5 ——收水器的阻力系数，根据试验资料确定；

ξ_e ——塔出口的阻力系数；

D_2 ——塔筒下缘直径(m)；

F_b ——配水装置气流通过的有效面积与淋水面积之比。

式(67)为德国 W. Zembaty 等通过室内模型塔的试验给出的空塔进风口阻力系数。

冷却塔内安装淋水填料、配水装置和收水器并淋水时，由于这部分设施阻力大，与空塔相比，进塔空气气流分布趋于均匀，进口阻力大为减小。因此，对于实际的冷却塔式(67)计算的结果偏大很多。

式(68)系根据前苏联 B · A · 格拉特科夫等人所著《机械通风冷却塔》书中推荐的按原全苏水利科学研究所的计算空气分配区的阻力系数公式，结合自然通风逆流式冷却塔的情况经修改得出。该式主要反映了雨区的水平方向气流阻力，没有反映垂直向阻力，也没有反映风速对阻力系数的影响。

前苏联 E - A. 苏霍夫 1984 年发表的《逆流式冷却塔的空气动力研究》一文中给出经模型试验得出的雨区阻力系数公式为：

$$\xi_2 = (0.1 + 0.025q)R \quad (71)$$

式中: R ——塔半径(m)。

1990 年在国际冷却塔和喷水池会议上苏霍夫等人发表了计算进风口和雨区的阻力系数公式:

$$\xi_{(1+2)} = \frac{(0.1 + 0.025q)R}{9.72\left(\frac{H_0}{R}\right) - 0.77} + \frac{1}{0.332\left(\frac{H_0}{R}\right) + 0.02} \quad (72)$$

以上两式主要反映了雨区的水平方向气流阻力, 没有反映垂直向阻力, 也没有反映风速对阻力系数的影响。

Rish. R. F 于 1961 年在国际传热会议上发表的论文《自然通风冷却塔设计》中给出的淋水的阻力系数计算公式为:

$$\xi_{(2+3)} = 0.525(H_f + H_0)\left(\frac{Q}{G_d}\right)^{1.32} \quad (73)$$

式中: $\xi_{(2+3)}$ ——包括雨区和淋水填料的阻力系数;

H_f ——淋水填料高度(m)。

若填料阻力中已包括了淋水阻力, 则可令 $H_f = 0$, 式(73)可视为雨区阻力。此式主要反映了雨区的垂向阻力, 没有包括气流在水平方向运动的影响。

式(69)则是利用《机械通风冷却塔》书中的公式。该式是利用了计算格栅阻力的经验公式。

利用淋水面积为 2000m^2 、 3500m^2 和 5000m^2 三个自然通风逆流式冷却塔的实测数据对式(66)进行验算, 按式(66)计算的总阻力系数计算冷却水温与各塔的实测水温比较见表 12。

表 12 计算水温与实测水温比较

淋水面积 (m^2)	工况点数	实测水温—计算水温差值 范围($^\circ\text{C}$)	平均误差($^\circ\text{C}$)	差值低于平均误差的点数
2000	12	-0.28~0.65	0.27	8
3500	26	-0.09~0.84	0.32	17
5000	21	-0.34~0.84	0.38	12

三个塔大多数工况点的计算水温低于实测水温。

式(66)的缺陷如前所述,采用这种分部计算方法没有反映各部分流场之间的相互影响,此外计算进风口,雨区和配水装置的阻力系数公式本身也存在不足。式(66)曾被一些电力设计院在设计自然通风冷却塔时采用。近年为改进式(66)的缺陷,王良中工程师在研究自然通风冷却塔的阻力计算问题上又有新的进展,详见其1995年发表的论文《自然通风冷却塔空气动力计算方法剖析》。

3)根据试验和流场计算求塔的综合阻力。

水利水电科学研究院冷却水研究所与东北电力设计院合作,研究了自然通风逆流式冷却塔的通风阻力,通过对装有模拟淋水装置(包括填料、配水装置和收水器)的模型塔进行不淋水的干塔试验和对不装淋水装置的模型塔进行淋水时的雨区阻力试验,并结合塔内流场计算,建立了塔的气流总阻力系数的计算方法:

$$\xi = \xi_a + \xi_b + \xi_c \quad (74)$$

$$\begin{aligned} \xi_a &= (1 - 3.47\epsilon + 3.65\epsilon^2)(85 + 2.51\xi_f - \\ &\quad 0.206\xi_f^2 + 0.00962\xi_f^3) \end{aligned} \quad (75)$$

$$\begin{aligned} \xi_b &= 6.72 + 0.654D + 3.5q + 1.43v_m - \\ &\quad 60.61\epsilon - 0.36v_m D \end{aligned} \quad (76)$$

$$0.35 < \epsilon < 0.45$$

$$\epsilon = \frac{2\pi R H_0}{\pi R^2} \quad (77)$$

式中: ξ ——总阻力系数;

ξ_a ——从塔的进风口至塔喉部的阻力系数(不包括雨区淋水阻力);

ξ_b ——淋水时雨区阻力系数;

ξ_c ——塔出口的阻力系数;

ξ_f ——淋水时的填料、收水器、配水槽和配水管的阻力系数,
 $10 < \xi_f < 23$;

R——进风口上檐塔内半径(m);

ϵ ——进风口面积与进风口上缘塔面积之比；

D ——填料底部塔内径(m)。

利用式(74)对 $D=80\text{m}$ 、进风口高 $H_0=8\text{m}$ 、60 对人字柱、柱断面 $0.63\text{m} \times 0.63\text{m}$, 四角削圆、圆半径 0.2m , 淋水装置阻力系数为 20、淋水密度 $q=6\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $7\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $8\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、风速 1.2m/s 的条件进行计算，并与有关公式对比，见表 13。

表 13 总阻系数比较表($D=80\text{m}$)

名称		式(74)			式(65)			式(72)			式(73)					
$q[\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$		6	7	8	6	7	8	6	7	8	6	7	8			
人字柱		25.3							6.65			6.65				
进风口					16.63							15.6				
淋水装置					20				20			20				
雨区 淋水 阻力	水平向	23.2	26.1	30.3	(26.4)		20.09	20.94	21.8	5.73	7.01	8.36				
支柱+出口		7			7		7			7						
总阻系数		55.5	58.4	62.6	70.0	53.7	54.6	55.5	55.0	56.3	57.6					

表 13 中塔的出口阻力取 6,一般塔的淋水面积与塔的出口面积之比约 2.5,与按式(70)计算值相近。支柱阻力系数取 1。

计算 ξ_a 的式(75)是根据塔的进风口人字柱为 60 对,柱断面为正方形,边长 63mm ,四角削圆半径为 2mm 的模型试验得出。若所设计的塔人字柱与此不同,且要求计算 ξ_a 很精确,可对式(75)进行修正。从 ξ_a 中减去按式(78)计算的本试验人字柱阻力,加上按式(78)计算的所设计的人字柱阻力系数即可。

$$\xi = C_D \frac{A_D}{A} \left(\frac{v}{v_m} \right)^2 \quad (78)$$

式中: ξ ——换算到淋水填料断面的人字柱阻力系数;

C_D ——柱体阻力系数,圆柱略小于 2,方柱为 3,椭圆柱小于

1.5;

A_D ——进风口柱体总面积(m^2);

A ——进风口总面积(m^2);

v ——通过进风口净断面的气流速度(m/s);

v_m ——填料断面风速(m/s)。

从表 13 可以看出,式(65)计算的总阻力系数最大,其他三式略有差别,但分项值不同。前已述及,式(72)的雨区阻力主要反映了水平方向的影响,式(73)主要反映了垂直方向的影响,二者之和接近式(74)的数值。

式(74)的前两项综合反映了从塔的进风口(包括人字柱)到塔喉部的气流阻力系数,考虑的因素比较全面。表 14 列出几个冷却塔利用式(74)计算的总阻力系数和实测的总阻力系数的比较。从表中可见,利用式(74)计算的总阻力系数较为接近实测值。式(74)已于 1993 年 7 月经原能源部组织专家鉴定。鉴定意见是:“通过严格的模型试验和数值计算相结合,提出的总阻力系数计算方法使冷却塔的阻力计算比以往沿用的公式更接近实际,与实测工业塔的总阻力系数基本吻合,新方法在理论上更严格、更科学、合理。该自然通风逆流式冷却塔通风阻力计算的研究成果总水平达到国际先进水平,其中在解决阻力计算的难点即冷却塔雨区气流阻力计算中,引入水滴当量直径的概念,结合流场计算确定雨区气流阻力的方法属国际领先水平。该成果可用于冷却塔工程设计,并为今后修订国标和行标提供了科学依据”。

表 14 实测与计算总阻力系数比较

电厂名称	丰镇 发电厂	白马 发电厂	潍坊 发电厂	江油 发电厂	邹县 发电厂	彭城 发电厂	宁海 发电厂
冷却塔淋水面积 (m^2)	3000	4500	5500	6500	12000	12000	13000
测试时间	1990 年	1997 年	1994 年	1991 年	2007 年	2010 年	2010 年

续表 14

电厂名称	丰镇 发电厂	白马 发电厂	潍坊 发电厂	江油 发电厂	邹县 发电厂	彭城 发电厂	宁海 发电厂
实测总阻力系数	63.80	61.79	73.20	78.00	87.04	88.40	84.6
按式(74)计算 总阻力系数	64.90	61.02	73.24	72.70	85.77	85.37	82.3

在设计自然通风逆流式冷却塔时,宜采用同型工业冷却塔的实测总阻力系数;当缺乏工业塔的实测资料时,宜采用式(74)计算塔的总阻力系数;有条件时,也可采用其他经验方法计算塔的总阻力系数。

采用式(74)算出的总阻力系数计算塔的阻力时,相应的风速应采用淋水填料断面平均风速。

(3)对于自然通风横流式冷却塔、横流和逆流机械通风冷却塔,目前尚缺乏系统的阻力模拟试验资料,设计新塔时,宜采用同型工业塔的阻力实测资料。由于目前工业塔的阻力实测资料较少,新设计塔的总阻力可采用分别计算塔的各部分阻力后相加的方法。塔的各部分气流阻力可表示为:

$$\Delta p_i = \xi_i \rho_i \frac{v_i^2}{2} \quad (79)$$

式中: Δp_i ——塔的各部分气流阻力(Pa);

ξ_i ——各部分气流阻力系数;

ρ_i ——该处的气流密度(kg/m³);

v_i ——该处的气流速度(m/s)。

上述各种不同塔型各部分的气流阻力系数可参照有关著述选用。

在非均匀配水或填料非均匀布置条件下,本规范公式(3.1.15-2)、(3.1.15-3)需修正。

本规范公式(3.1.15-6),烟气量为进入冷却塔排放的烟气体

积流量,分标志(Nm^3/s)及自然状态(m^3/s)。

(4)机械通风冷却塔的通风阻力系数方法见现行国家标准《机械通风冷却塔工艺设计规范》GB/T 50392。

(5)大型冷却塔阻力修正。

对于大型冷却塔设计需要对常规冷却塔阻力计算部分进行修订,以满足大型逆流式湿式冷却塔阻力计算。

冷却塔的阻力是冷却塔热力计算的重要环节,由于冷却塔结构的复杂性,不可能仅通过数值模拟的方法加以解决。所以,在不进行物理模型试验的情况下,可采用现在常用阻力模型进行计算,冷却塔阻力计算公式如本规范公式(3.1.15-1)、(3.1.15-2)、(3.1.15-3)、(3.1.15-4)。这些计算公式是通过试验拟合给出的,其应用有一定范围,具体应用范围分别如下:

对于冷却进风口区域阻力系数 ξ_a ,其应用范围如下:

1)进风口面积与进风口上缘塔面积比 $0.35 < \xi_a < 0.45$;

2)填料阻力系数 ξ_b 变化范围 $10 \sim 25$ 。

根据计算,进风口面积与进风口上缘面积比由 0.35 下沿至 0.30 后,阻力系数变化未出现剧烈波动,因此进风口区域阻力系数计算公式应用范围可以扩延至 $0.30 \sim 0.45$ 。

对于淋水时雨区阻力系数 ξ_b ,其值是通过试验和数值计算给出的,应用范围如下:

1)塔底直径 $60m \sim 100m$;

2)填料断面平均风速 $1.0m/s \sim 1.2m/s$;

3)淋水密度 $6m^3/(h \cdot m^2) \sim 9m^3/(h \cdot m^2)$ 。

当塔底直径、填料断面风速以及淋水密度超出范围时,淋水时雨区阻力系数 ξ_b 会出现负值,导致计算出现错误,可以通过二维计算方法对雨区阻力系数进行计算,计算方法见本规范 3.1.7 ~ 3.1.9 条的条文说明。

3.1.16 本条规定计算冷却塔设计最高冷却水温对应的气象条件的设计标准、频率统计方法、气象参数的取值方法和资料年限。

(1)气象条件的设计标准。

冷却塔热力计算中采用的气象条件是由空气的干球温度、湿球温度(或相对湿度)和大气压力各参数组成。用于计算的空气温度和湿度越高,为达到工艺允许的最高冷却水温所需要的冷却塔尺寸就越大。但是空气的高温度和高湿度的持续时间是短暂的。如果采用能观测到的最高温度和湿度进行计算,虽然能满足工艺要求,但却使冷却塔尺寸增大,投资增加,经济效益不一定好。如果用于计算的空气温度和湿度较低,虽然冷却塔尺寸可以减小,但又可能导致在炎热季节冷却水温长时间高于工艺允许的最高水温,使工艺过程受到破坏,造成不同程度的损失,因此必须恰当地选用计算的气象条件。用这样的气象条件确定的冷却塔的尺寸既能满足工艺过程在较长的时间内不受破坏,又能在常年运行中得到较好的经济效益。

前苏联给水设计规范(1976年版)规定:按工艺对冷却水温的要求程度把冷却水用户分为三类,并按表15选择设计保证率。

表15 按冷却水温对生产工艺影响确定设计保证率

类别	由于冷却水温超过而引起的破坏	设计保证率(%)
I	生产工艺过程完全被破坏,其后果造成很大损失; 空调系统被破坏	99
II	个别装置的工艺过程和空调系统允许暂时破坏	95
III	整个工艺过程和个别装置的经济性暂时降低	90

美国冷却塔设计最高计算水温的气象条件是按夏季(6月、7月、8月、9月)湿球温度频率统计方法计算的频率为2%~10%的小时气象条件,频率值由业主视工程条件选定。

英国冷却塔规范BS-4485(1988年版)规定:根据不同工艺过程的需要,选择历年炎热时期(一般以4个月计)频率为1%~5%的小时湿球温度值作为设计气象条件。

我国《火力发电厂水工设计规范》DL/T 5339—2006 规定：当采用冷却塔循环供水系统时，确定冷却水的最高计算温度宜采用按湿球温度频率统计方法计算的频率为 10% 的日平均气象条件；主要用于夏季调峰的电厂宜留有适当的裕度。气象资料应采用近期连续不少于 5 年，每年最热时期（可采用 3 个月）的日平均值。

现行国家标准《化学工业循环冷却水系统设计规范》GB 50648—2011 规定：循环冷却水系统设计选取的干、湿球温度和大气压等气象资料应以日平均湿球温度为基础数据进行统计，宜采用建厂地区近 5 年平均的每年最热时期 3 个月中最热天数不超过 5d~10d 日平均湿球温度作为设计湿球温度，并应以与之相对应的日平均干球温度、大气压力作为设计干球温度、大气压。若以 6 月、7 月、8 月三个月或 7 月、8 月、9 月三个月计，则 5 个最热天略低于频率为 5% 的统计值。

上述各部门的设计标准在我国已沿用多年，除电力设计部门曾对该标准是否得当进行过一些探讨外，其他工业部门没有提出过异议。考虑到各工业部门普遍适用的统一标准，本规范规定计算冷却塔的设计最高冷却水温的气象条件按频率为 5%~10% 的日平均气象条件计算，对各行业的具体标准没作统一规定，各设计单位可结合本行业的实际需要选用适当的标准。

个别对冷却水温要求较严格或要求不高的工艺过程，在有充分论证的基础上，本规范也允许提高或降低标准。

计算冷却塔设计最高冷却水温对应的气象资料应采用近期连续不少于 5 年，每年最热时期 3 个月的日平均值，每年最热时期 3 个月，一般为 6 月、7 月、8 月三个月或 7 月、8 月、9 月三个月。

（2）频率统计方法。

各设计单位常采用的方法可归纳为下列五种：

1) 干、湿球温度频率统计法：将日平均干球温度及湿球温度分别统计，绘制频率曲线，从这两条曲线上查出相同频率的干、湿球

温度数值作为设计计算值。

2) 干球温度和相对湿度频率曲线法: 将日平均干球温度和相对湿度分别统计, 绘制频率曲线, 从两条曲线上查出相同频率的干球温度和相对湿度作为设计计算值。

3) 湿球温度频率曲线法: 仅对日平均湿球温度进行统计, 绘制频率曲线, 查出设计频率下的湿球温度数值, 并在原始资料中找出与此湿球温度相对应的干球温度, 相对湿度和大气压力的日平均值。

4) 干球温度频率曲线法: 对日平均干球温度进行统计、绘制频率曲线, 查出设计频率下的干球温度值, 并在原始资料中找出与此干球温度相对应的湿球温度、相对湿度和大气压力的日平均值。

5) 焓值频率曲线法: 利用日平均干、湿球温度和大气压力计算出日平均焓值, 再用日平均焓值绘制频率曲线, 查出设计频率的焓值, 在原始资料数据中找出与此焓值相对应的日平均干球温度、相对湿度和大气压力。

第一、二两种方法的弊病是把实际上不在同一频率下同时出现的一组数据作为同一频率下的设计计算值, 结果造成实际设计频率偏高。据中南电力设计院对中南及华东地区的安阳、郑州、信阳、黄石、荆门、长沙、彬州、徐州、上海、淮南、盱眙、宁波等 12 个城市 5 年中每年夏季 3 个月的气温资料统计结果, 按这两种方法计算得出的频率为 10% 的干、湿球温度的数值, 在实际资料中出现这种数值的频率只有 6.5%。

在冷却塔内产生传热与传质共同过程的动力是水表面饱和湿空气与进入冷却塔的外界湿空气间的焓差。湿空气的焓主要取决于空气的湿球温度。从这一观点出发, 显然第三种和第五种方法是合理的。根据东北电力设计院对东北地区的五常、长春、鞍山、赤峰 4 个城市 5 年~10 年的气象资料整理计算的结果, 按这两种方法得出的频率为 10% 的有关参数如表 16 所示。

表 16 不同统计方法的比较

地区	方法	干球温度 (℃)	相对湿度 (%)	湿球温度 (℃)	焓值 (kJ/kg)
五常 (黑龙江)	第三种	24.4	85	22.3	67.323
	第五种	23.9	87	22.3	67.323
长春 (吉林)	第三种	23.7	86	21.8	65.232
	第五种	24.7	79	21.8	65.232
鞍山 (辽宁)	第三种	24.9	95	23.9	73.596
	第五种	25.5	91	24.3	74.014
赤峰 (内蒙古)	第三种	26.7	59	20.4	62.306
	第五种	23.8	77	20.4	61.470

从表 16 可见,两种方法得到的湿球温度和焓值基本相同。采用第三种方法的优点是可以从各地气象台、站的原始记录数据中直接抄录到湿球温度数据,较之第五种方法更简便。

对于第三种和第四种方法,则以北京和上海两地的算例作一对比。取两市连续 5 年、每年 6 月、7 月、8 月三个月共 460d 的各气象要素的日平均值分别进行统计,结果见表 17 和表 18。

表 17 按湿球温度进行频率统计结果

地区	频率(%)	湿球温度 (℃)	出现次数 (次)	相对湿度(%)		大气压力(mmHg)	
				最高	最低	最高	最低
北京	10	24.6	6	95	82	791	633
	5	25.4	2	85	73	740	706
上海	10	26.8	5	86	72	753	750
	5	27.4	5	85	71	757	749

表 18 按干球温度进行频率统计结果

地区	频率 (%)	湿球温度 (℃)	出现次数 (次)	相对湿度(%)		大气压力(mmHg)	
				最高	最低	最高	最低
北京	10	27.5	2	75	71	779	778
	5	28.2	3	76	55	753	707
上海	10	29.5	3	83	77	757	750
	5	30.7	6	81	73	754	749

对两市的日平均湿球和干球温度分别从高到低排列,取其中最炎热的若干天进行逐日的冷却水温计算,其中:

北京:湿球温度的变化范围为 $24.0^{\circ}\text{C} \sim 27.4^{\circ}\text{C}$;干球温度的变化范围为 $27.0^{\circ}\text{C} \sim 31.0^{\circ}\text{C}$,共 108d。

上海:湿球温度的变化范围为 $26.5^{\circ}\text{C} \sim 28.8^{\circ}\text{C}$;干球温度的变化范围为 $29.0^{\circ}\text{C} \sim 32.6^{\circ}\text{C}$,共 96d。

冷却水温的计算是以一个配 200MW 的汽轮发电机组的自然通风冷却塔为例进行的。计算结果见表 19 和表 20。

表 19 按湿球温度计算的冷却水温

地点	设计频率时 的湿球温度 t_c (℃)	$t \geq t_c$ 发生的天数 (d)	t_c 时计算冷却水温 t_c (℃)		日平均水温 $t > t_c$ 的天数 (d)	
			最高水温 t_{\max}	最低水温 t_{\min}	$t > t_{\max}$	$t > t_{\min}$
北京	24.6(10%)	45	31.0	30.6	37	61
	25.4(5%)	22	31.7	31.5	16	22
上海	26.8(10%)	48	32.4	32.1	34	46
	27.4(5%)	25	32.9	32.5	8	29

表 20 按干球温度计算的冷却水温

地点	设计频率时 的干球温度 θ_c (℃)	$\theta \geq \theta_c$ 发生的天数 (d)	θ_c 时计算冷却水温 θ_c (℃)		日平均水温 $\theta > \theta_c$ 的天数 (d)	
			最高水温 t_{\max}	最低水温 t_{\min}	$\theta > \theta_{\max}$	$\theta > \theta_{\min}$
北京	27.5(10%)	43	30.9	30.5	44	68
	28.2(5%)	23	31.3	29.3	27	92

续表 20

地点	设计频率时的干球温度 θ_c (°C)	$\theta \geq \theta_c$ 发生的天数 (d)	θ_c 时计算冷却水温 t_c (°C)		日平均水温 $t > t_c$ 的天数 (d)	
			最高水温 t_{\max}	最低水温 t_{\min}	$t > t_{\max}$	$t > t_{\min}$
上海	29.5(10%)	46	32.4	31.9	33	68
	30.7(5%)	22	33.1	32.4	7	32

两市逐日冷却水温的计算结果表明,高水温绝大多数出现在湿球温度较高或干、湿球温度都较高的日期。如表 19 所列,在频率为 10% 时,北京市逐日冷却水温 $t > t_{\min}$ 的 61d 中有 59d,上海市 $t > t_{\min}$ 的 46d 中有 45d 是出现在湿球温度较高或干、湿球温度都较高的日期。出现在干球温度高的日期分别只有 2d 和 1d。

相同的计算湿球(或干球)温度,由于其出现日期不同,相应的相对湿度和大气压力也可能不同,当计算的湿球温度相同时,冷却水的计算温度随相对湿度的降低而增高,如表 19 中所列的 t_{\min} 和 t_{\max} 分别相当于表 17 中相对湿度的最高和最低值;当计算的干球温度相同时,冷却水的计算温度随相对湿度的增高而增高,如表 20 中所列的 t_{\max} 和 t_{\min} 分别相当于表 18 中相对湿度的最高和最低值。就所比较的两市频率为 10% 和 5% 的气象条件而言,其冷却水温的差按湿球温度计算时为 0.2°C ~ 0.4°C,而按干球温度计算时则为 0.4°C ~ 2.0°C。另外从两市逐日水温计算结果可知,当湿球温度相同时,由于相对湿度不同计算水温的差值绝大多数在 0.5°C 以内,个别的可达 0.7°C ~ 0.8°C;而干球温度相同时,由于相对湿度的不同计算水温的差值绝大多数在 0.9°C 以上,最大可达 3.0°C。

从上述比较可知,按第四种方法得出的气象条件在冷却塔热力计算中会引起计算冷却水温的过大误差,这种方法是不可取的。

在气象资料的统计计算期间内,对应同一个日平均湿球温度,

不同日期相应出现的日平均干球温度、相对湿度和大气压力不一定相同。冷却塔内水冷却的动力是进塔空气与进塔冷却水之间的焓差和进塔空气量。

对于机械通风冷却塔的进塔风量取决于风机的能力，在风机选定的前提下，进塔空气与进塔冷却水之间的焓差便成为影响冷却水温的主要因素。在同一湿球温度下，干球温度越低，相对湿度越大，进塔空气焓值也越高，进塔空气与进塔冷却水之间的焓差就越小，冷却塔的计算冷却水温就越高。

对于自然通风冷却塔，影响进塔风量的主要因素之一是塔的抽力，而影响塔抽力的主要因素之一是进出塔的空气密度差。在同一湿球温度下，干球温度越高、相对湿度越低，进塔空气密度越低，进出塔空气的密度差越小，冷却塔的抽力就越小，计算的冷却水温就越高。以湖南桃花江电厂和湖北咸宁电厂的冷却塔为例，每个工程同样的热负荷、选定同样的冷却塔计算结果见表 21：

表 21 同样的热负荷、选定同样的冷却塔计算结果

电厂名	设计湿球 温度 (℃)	最高干球 温度 (℃)	最低干球 温度 (℃)	最高相对 湿度 (%)	最低相对 湿度 (%)	计算冷却水 最大温差 (℃)
湖南桃花江	27	32.2	28.5	88	67	1.0
湖北咸宁	27	32.9	29.9	77	65	0.6

同一湿球温度下干球温度、相对湿度的差值较大时，进塔的空气密度相差也较大，计算冷却水温相差也大。当同一个频率为10%的日平均湿球温度值出现的日数较多，相应的干球温度、相对湿度和大气压力又不相同时，自然通风冷却塔的冷却水温应采用其中日平均干球温度最高、相对湿度最低的一日气象条件进行计算；机械通风冷却塔的冷却水温应采用其中日平均干球温度最低、相对湿度最高的一日气象条件进行计算，冷却塔的计算气象条件还需考虑热空气回流影响。

自然通风冷却塔需要计算风筒的抽力。在湿球温度相同时，随相对湿度的增加，湿空气密度增加，冷却塔的抽力也增加，计算的冷却水温降低，导致所设计的冷却塔尺寸减小。从保证工艺过程的安全着眼显然不利。但上述两市的算例是采用自然通风冷却塔进行计算的，在算例的计算结果分析中反映了这一因素。所以前述结论对北京、上海两市设计自然通风冷却塔是适用的。

我国幅员辽阔，上述两市的气象参数变化规律尚不能完全代表国内广大地区。从上述两市的计算结果来看，在同一湿球温度下，由于相对湿度不同，冷却水温的差值多数在 0.5°C 以内，个别也可达 $0.7^{\circ}\text{C} \sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 。为安全计，在设计自然通风冷却塔时，可在前述推荐的气象参数选取方法计算出的冷却水温的基础上，留有适当裕度（冷却水温增加不超过 0.5°C ），作为冷却塔设计最高冷却水温；也可以取同一湿球温度下出现的不同相对湿度的平均值作为计算采用的相对湿度。

对于不靠风筒抽风的机械通风冷却塔，则完全可采用前述推荐的方法，而不必考虑裕度。

（3）气象参数的取值方法。

各设计单位对日平均气象参数的取值方法可归纳为以下四种：

- 1) 取国家气象部门统一规定的一昼夜 4 次标准时间（每天的 2 点、8 点、14 点、20 点）测值的算术平均值作为日平均值；
- 2) 取每天 24 小时的 24 次测值的算术平均值作为日平均值；
- 3) 取每天的 8 点、14 点、20 点 3 次测值的算术平均值作为日平均值；
- 4) 取每天 14 点的测值作为日平均值。

按第三和第四种方法取值无疑会使计算气温增高，使冷却塔尺寸增大。

对北京、成都两地的湿球温度分别按第一和第二种两种方法计算日平均值，计算结果的差值见表 22。

表 22 两种方法计算的日平均湿球温度差值分析

地点	差值	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7~1.1
北京	数据个数	94	166	91	48	32	15	6	8
	占百分比(%)	20.4	36.1	19.8	10.4	7	3.3	1.3	1.7
成都	数据个数	202	335	194	115	40	14	14	5
	占百分比(%)	22.0	36.5	21.1	12.5	4.4	1.5	1.5	0.5

把按两种不同方法计算的日平均湿球温度分别进行频率分析,结果见表 23。

表 23 两种计算方法的日平均湿球温度频率分析表

地点	计算方法	不同频率的湿球温度(℃)			
		5%	10%	15%	20%
北京	4 次测值平均	25.4	24.6	24.1	23.7
	24 次测值平均	25.2	24.5	24.1	23.7
成都	4 次测值平均	25.4	24.8	24.5	24.3
	24 次测值平均	25.3	24.8	24.5	24.2

从表 22 和表 23 可见,按两种方法计算的日平均湿球温度和不同频率时的日平均湿球温度均相差甚小。为便于气象资料的收集和简化统计计算工作,以一昼夜 4 次标准时间测值的算术平均值作为日平均值是适宜的。

经对两地的干球温度进行同样的比较,结果与湿球温度的比较结果一致。

对于个别因产品或设备对冷却水温要求严格的冷却塔的设计,视其要求的严格程度,也可取每天的白天 3 次测值的平均值或每天 14 点的测值进行统计计算。

(4) 气象资料年限

根据对上海、成都两地连续 5 年和 10 年的气象资料进行频率统计的结果,两条频率曲线基本重合。日平均干球或湿球温度,两种资料年限的统计结果在相同频率时相差仅 0.1℃~0.2℃。为

减少资料的收集及统计计算工作量,采用连续5年的资料能够满足设计精度的要求。

3.1.17 在满足工艺允许的最高冷却水温条件下,冷却塔和循环水系统中的其他设备和建(构)筑物可以有不同的方案。在进行方案的优化计算时,可采用月平均冷却水温。月平均冷却水温的计算宜按历年逐月平均气象条件。对于某些工业企业采用季平均冷却水温进行方案的优化计算,季平均冷却水温采用该季度内月平均冷却水温的平均值,或直接采用季度内的平均气象条件计算平均冷却水温等方法也是允许的。

3.1.18 本条规定了收集气象资料时选择气象台、站的原则。在实际工作中,往往冷却塔所在地附近没有国家气象台、站,这种情况下就要分析冷却塔所在地的气象特征与所选气象台、站的气象特征是否一致。必要时可在冷却塔所在地设短期气象观测站,用短期观测资料求取与有关国家气象台、站的相关关系,选取相关关系较好的气象台、站的资料供设计使用。在使用这些资料时应注意按相关系数对所选气象台、站的资料进行必要的修正。

还应注意的是国家气象台、站多位于城郊的开阔地区,周围没有高大建(构)筑物和密集的居民生活区,一般也不受工业企业热排放的影响。在气象台、站观测到的气象总是低于建(构)筑物密集、居民集中的城区中心。在城区内建冷却塔时,设计者应考虑这一因素。位于城郊的工业企业,由于建筑密度、人口活动及工业企业本身热排放的影响,厂区的气象条件也与建厂前有所不同,由于情况各异,影响因素复杂,难以统一规定。设计者可视具体情况,适当考虑这一因素的影响。

根据目前已有工程经验与反馈,有些山区厂址地形较复杂,易出现逆温现象,因此建议,易出现逆温现象的厂址区域,在条件允许时可考虑逆温影响。

3.1.19 本条规定了冷却塔的水量损失项目。冷却塔的水量损失

应当是循环水进入冷却塔到排出冷却塔过程中因蒸发和风吹造成的水损失。排水量不仅与冷却塔的蒸发和风吹损失有关，还与循环水系统要求的水质及补充水的水质有关。排水并不一定在冷却塔内实施。设计者习惯上把排水量计人冷却塔的水量损失。前苏联给水设计规范和英国冷却塔设计规范以及美国的冷却塔协会规范中均把排水损失计人冷却塔水量损失。考虑到上述因素，本规范也把排水损失规定为冷却塔的损失水量。

3.1.20 本条规定了蒸发损失水率的计算方法。增加了按进出塔空气含湿量差计算蒸发损失的规定。

冷却塔的蒸发损失水量应当根据进入和排出冷却塔的空气的含湿量计算：

$$q_e = G_d(X_2 - X_1) \quad (80)$$

式中： q_e ——蒸发损失水量(kg/s)；

X_2 ——排出冷却塔的空气的含湿量(kg/kg)；

X_1 ——进塔空气的含湿量(kg/kg)。

在工程的可行性研究阶段往往不进行冷却塔的详细计算，不能确定空气的含湿量差。为了确定冷却塔的补充水量及初步考虑循环水处理方案，可按本规范条文给出的经验公式计算冷却塔的蒸发损失水量。该公式的建立是以水的散热量，主要由于蒸发散热为基础，并考虑接触散热的影响。即：

$$q_e r_0 \approx Q \Delta t C_w \quad (81)$$

变换式(81)，并令 $K_{ZF} = C_w / r_0$ 可得：

$$q_e = K_{ZF} \Delta t Q \quad (82)$$

若取 $r_0 = 2.43 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 则系数 K_{ZF} 约等于 $0.00172/\text{°C}$ ，由于实际上还存在接触散热，因此系数 K_{ZF} 在不同的外界气温条件下应适当修正。规范条文中表 3.1.20 的数据采用了前苏联给水设计规范(CH_{II} II-31-74, 1976 年版)的条文内容。经与英国冷却塔设计规范(BS-4485)对照，两者计算出的蒸发损失水率基本相符。两者的计算结果见表 24。

表 24 蒸发损失水率 p_e

空气干球温度 θ_1 (°C)	10	20	30
按本规范公式(3.1.15-1)计算的 p_e (%)	1.2	1.4	1.5
按英国 BS - 4485 规范计算的 p_e (%)	1.07~1.24	1.37~1.42	1.47~1.52

3.1.21 冷却塔的风吹损失是由出塔空气中带出的水滴(飘滴)和从塔的进风口处吹出塔外的水滴组成。前者的损失水量与塔的通风方式(自然通风或机械通风)、淋水填料的型式(点滴式或薄膜式)、配水喷嘴的型式和喷溅方向(上喷或下喷)、收水器的型式、收水效率、逸出水率以及冷却塔的冷却水量、塔内风速(特别是收水器断面风速)等因素有关;后者的损失水量与塔型、风速、风向及进风口的构造(有、无百叶窗)等因素有关,这部分损失不是经常发生的,即使有发生,一般量也较少。冷却塔的风吹损失主要是前者。

目前国内广泛用于各种冷却塔的收水器的收水效率均较高(参见本规范条文说明第 3.1.24 条),各型收水器的逸出水率(飘滴损失水量与进塔循环水量之比)经试验室测试均较低。如广泛用于逆流式冷却塔的 BO - 160 - 45 型收水器的逸出水率为 0.003%,用于横流式冷却塔的 HC130 - 50 型收水器的逸出水率为 0.005%,ZO - 40/150 折板型收水器在不同风速下的逸出水率见表 25。

表 25 ZO - 40/150 折板型收水器逸出水率

风速(m/s)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
逸出水率(%)	0.00008	0.00032	0.0012	0.0036	0.0069

出塔空气中带出的水滴可以通过试验装置测出比较精确的数值;从进风口吹出的水滴由于影响因素较多不易测定。因此包括上述两部分水量损失的风吹损失总量比较难确定。英国冷却塔设计规范(BS - 4485)规定对于安装收水器,并在塔的进风口采取防

溅和回收措施,从估算补给水量的角度,冷却塔的风吹总损失按循环水量的0.1%已足够。美国和日本的有关设计规范中强调接收水器的逸出水率计算并考虑适当裕度,实际工程中风吹总损失水量一般按循环水量的0.05%~0.1%计算。考虑到本规范已规定机械通风和自然通风冷却塔均应装收水器,并对塔的进风口采取防溅措施和集水池周围设回水台等项规定,现规定风吹损失水量较原规定减少50%,以循环水量40000t/h计(约相当于1台300MW汽轮发电机组的循环水量),自然通风冷却塔每小时可节水20t,每年可节水13万t~15万t,若为机械通风冷却塔则节水量达20万t以上。

风吹损失水率与塔型、隔风板、收水器效率、风速等因素有关。根据产品性能调查,表26供参考。

表26 风吹损失水率(%)

塔型	无收水器	单波普通收水器	单波高效收水器	双波高效收水器
自然通风逆流式冷却塔无隔风板	0.820	0.050	0.035	0.025
自然通风逆流式冷却塔有隔风板	0.780	0.044	0.028	0.020
自然通风横流式冷却塔	0.800	0.046	0.030	0.022
机械通风逆流式冷却塔无隔风板	1.250	0.100	0.065	0.045
机械通风逆流式冷却塔有隔风板 机械通风逆流式冷却塔背对背布置	1.200	0.085	0.057	0.038
机械通风横流式冷却塔	1.220	0.087	0.060	0.040

3.1.22 冷却塔的排水量应根据对循环水的水质要求及处理方法、补充水的水质及处理方法、循环水的浓缩倍数等因素按现行国家标准《工业循环冷却水处理设计规范》GB 50050 的有关规定经计算确定。

3.1.23 淋水填料是在塔内造成水和空气之间有可以充分接触的热、质交换表面的关键元件。不同的塔型、不同的冷却任务要求、不同的水温和水质等因素要求的填料不同。本条所规定的是选择淋水填料时应当考虑的一些主要因素。循环水的水温指的是填料能承受的水温适用范围，填料的物理力学性能、化学性能和稳定性指的是耐温度变化、阻燃耐火、抗老化和抗腐蚀等性能。近年来国内各单位都在从事新型淋水填料的研究，研制出不少性能好的淋水填料。例如大中型逆流式冷却塔中应用较普遍的塑料双斜波和塑料复合波等，横流式冷却塔中应用的塑料 HTB - 80 - 30 斜波、塑料空心橄榄型等。淋水填料的发展方向是轻型化，各种塑料材质的淋水填料必然得到广泛采用。

在采用塑料材质的淋水填料时尚需注意以下几个问题：

(1)当采用烟气处理循环水或循环水水质较差、未经处理、易在填料表面结垢时，不宜采用填料片间距较小的斜坡和蜂窝等型式的淋水填料。

(2)在考虑淋水填料的支撑系统结构时，淋水填料的运行重量可视具体情况按本规范第 3.7.4 条的规定采用。

上述问题在有些工程中由于考虑不当，曾因淋水填料的严重结垢或挂冰造成塔的冷却效果下降，甚至造成淋水填料的支撑结构破坏，淋水填料塌落等事故。

(3)应严格选用淋水填料片材的材质。塑料片材的材质直接影响填料的使用寿命，西欧、美国及日本等工业发达国家要求塑料填料的正常使用寿命为 20 年～25 年。我国有些在 20 世纪 70 年代使用的塑料填料如吉林省辽源电厂等，填料在冷却塔中运行 20 余年仍然完好。也有一些企业的冷却塔采用塑料填料仅运行 2 年～3 年

就发生老化破碎。这些塔填料损坏的原因主要是塑料片材不合格，采用劣质聚氯乙烯树脂，配方不当、片材中掺入过量的碳酸钙、增塑剂或掺入再生废旧塑料。

对于冷却塔淋水填料所用的塑料片材的材质要求，2001年发布实施的电力行业标准《冷却塔塑料部件技术条件》DL/T 742，规定了冷却塔内使用的淋水填料、收水器、喷溅装置和配水管等塑料部件的材质要求及质量检验方法。在选用冷却塔内的淋水填料等塑料部件时，应按该技术条件的相关规定执行，才能保证淋水填料等部件的质量和使用寿命。

填料的支撑方式包括直接搁置式、带托架搁置式、悬挂式。考虑到安全因素，超大型自然通风冷却塔淋水填料宜采用搁置式。

海水冷却塔淋水填料应选择水垢、海藻、微生物在淋水填料片表面上难以附着和生长或影响较小的波形，同时使喷淋水在淋水填料片上的流程尽量长。

海水冷却塔淋水填料宜选择热力性能较好，通过能力较强的S波、双向波及双斜波等片型，或者通过相关试验研究确定。

海水冷却塔内可设置填料淡水冲洗系统。为防止填料层在机组大修长时间停运时，填料表面残留的海水结垢硬化，形成永久性垢膜，影响冷却塔的热力性能，冷却塔内可设置填料淡水冲洗系统。

3.1.24 本条规定了冷却塔安装收水器应遵循的原则。

随着我国工业的发展，冷却水的用量也日益增大，由于水资源的限制，越来越多的工业冷却水采用带冷却塔的循环冷却系统。大量的冷却塔投入运行，从冷却塔中飘逸出来的飘滴除造成水的大量损失外，还造成对环境的危害。如一些火电厂曾因冷却塔的大量飘滴降落在室外配电站，引起配电装置闪络停电事故；飘滴在冷却塔周围较大范围内形成降水，路面结冰，给附近居民生活带来困难，严重的还影响交通安全，造成重大车祸。由于考虑飘滴的影响，在确定厂址时往往要远离其他建

筑群；在确定厂内的总布置时要使冷却塔远离厂房及配电装置。这不仅造成厂址布局及厂内布置的不合理，还将增加建厂投资和运行费。

为了防止冷却塔逸出的飘滴对环境的危害，利于人民生活，保证工业企业的安全运行，并在一定条件下节约用水，在冷却塔中装设收水器是简易可行的措施。

国内外的机械通风冷却塔中均装有收水器。自然通风冷却塔中安装收水器，国外自 20 世纪 50 年代开始，至 60 年代已很普遍，英国先后在自然通风冷却塔中安装木质双层百叶式收水器和石棉水泥波形收水器，取得了防止飘滴逸出的较好效果，并将这两种收水器纳入英国冷却塔设计规范(BS - 4485)条文中。美国、前苏联等国自 20 世纪 70 年代也开展了这方面的试验及研究工作，收水器型式多为百叶式及弧型，材质有木质、塑料、石棉水泥及金属网板等。

我国早期的一些机械通风冷却塔中安装的也多是以木材、石棉水泥等为材质的百叶式收水器，收水效率低，通风阻力大。自 1977 年以来，在原水电部有关部门的组织下，科研、设计、加工等部门共同协作，通过室内小型试验及工业试验，对收水器的选型、材质、收水器的理论分析、计算方法、测试方法和手段、安装方式等问题做了大量研究工作，取得了显著成果。

当前国内广泛采用逆流式冷却塔中 BO - 42/140 型、BO - 50/160 型和 BO - 160 - 45 型，横流式冷却塔中的 ZO - 40/150 折板型和 HC - 130 - 50 型收水器的收水效率、阻力及冷却塔安装收水器后的逸出水率均达到国外发达国家的相应水平。

美国 CHAIK POINT 电厂横流式冷却塔采用双层收水器设计逸出水率为 0.002%，法国电力公司要求自然通风冷却塔的逸出水率不大于 0.005%。我国波 160 - 45 型收水器实验室实测逸出水率为 0.003%，HC - 130 - 50 型收水器为 0.0025%，ZO - 40 /

150 折板型收水器仅为 0.0012%。

根据飘滴滴谱分析,冷却塔内不装收水器时,飘滴直径小于 $100\mu\text{m}$ 的占飘滴总数的 80%~90%,但其质量仅为飘滴总量的 10%~20%;直径大于 $100\mu\text{m}$ 的飘滴数约 10%~20%,而其质量却占总量的 80%~90%,对环境危害最大的是这部分直径大于 $100\mu\text{m}$ 的飘滴。

根据安装收水器后对飘滴滴谱分析,在逆流式冷却塔上安装 HU-270-50 型收水器后,当通过收水器的风速为 0.98m/s ,淋水密度为 $3.75\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,收水器后 100% 的飘滴直径小于 $50\mu\text{m}$;风速为 1.78m/s ,淋水密度 $4.2\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,100% 的飘滴直径小于 $100\mu\text{m}$ 。在横流式冷却塔试验装置上测试,当淋水密度为 $10\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \sim 30\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,风速 $1.0\text{m/s} \sim 2.5\text{m/s}$,安装 HC-150-50 型收水器后,飘滴直径均小于 $143\mu\text{m}$,且风速大于 1.0m/s 时,飘滴直径全部小于 $100\mu\text{m}$,仅风速为 1.0m/s 时有 3% 的飘滴直径大于 $100\mu\text{m}$ 。从试验结果可见安装收水器的效果。

根据国内近几年的实践,冷却塔安装收水器后的效果有以下几方面:

(1) 改善环境,利于人民生活和交通安全,提高企业生产安全性。

A 电厂自 1976 年两座 $2,000\text{m}^2$ 的自然通风冷却塔运行以后,由于大量飘滴撒落在厂前区及附近公路上,冬季结冰范围很大,不仅造成厂前区职工生活不便,还严重地影响交通安全,有记载的较大车祸发生过 10 余起、伤 10 人。1977 年 12 月 23 日一天就发生 3 起车祸,其中一起造成 5 辆汽车相撞。为解决交通问题,防止路面结冰,曾用路面喷洒食盐水等措施,均没收到明显效果。1979 年秋在两座塔上都安装了收水器,收到明显效果,原飘滴撒落范围内无降水,路面干燥,交通安全无恙。

B 电厂冷却塔距变电站最近处仅 34m ,因飘滴污染造成多次闪络事故。1980 年安装收水器后,效果明显。实测从塔内

排出空气的含水量未装收水器时为 8.74g/m^3 , 安装收水器后为 0.73g/m^3 。

C 电厂冷却塔附近为人口稠密的居民区, 飘滴在居民区形成落水, 终日细雨蒙蒙, 冬季尤甚, 周围居民反映强烈。自 1980 年安装收水器后, 周围无降水感, 人可以在冷却塔附近长时间停留感觉不到有大水滴飞溅, 衣服不湿。

(2) 节约水量。

自然通风冷却塔安装收水器前, 设计中风吹损失常取为循环水量的 0.5%, 若按电厂 1 台 200MW 机组计, 每小时风吹损失水量约 150t。安装收水器后, 每小时风吹损失水量仅 15t。当然, 实际节水量还与循环水处理方式及循环水的浓缩倍率相关。

(3) 改善厂区布置, 节约投资和运行费。

在过去的设计中, 为了考虑飘滴的影响, 在企业总平面设计时往往把冷却塔布置在远离厂内主要建(构)筑物的位置, 增加了厂区占地及循环水管沟的长度。安装收水器后, 飘滴影响大幅度减小, 冷却塔可以向主要建(构)筑物靠近。不仅节省三材及投资, 还可节省循环水泵的电耗。经济效益显著, 厂区布置更加紧凑。因此机械通风冷却塔和自然通风冷却塔均应装设收水器。

收水器的材质目前应用较多的是聚酯玻璃钢或改性聚氯乙烯塑料制成的片材, ABS 塑料制成的支架、联杆。玻璃钢片材价格较高, 且由于采用两层玻璃纤维布和三层树脂粘接手糊成型, 虽然新片材的强度和刚度均较好, 但经长期在湿热条件下使用, 易老化变脆, 也有因树脂固化不好, 被逐渐冲蚀致片材脱胶而损坏的现象, 目前已逐渐被 PVC 片材取代。改性聚氯乙烯片材价格低, 材料难燃, 自熄性好, 国外已经大量应用。发电厂的冷却塔内宜采用塑料材质的收水器。

目前国内常用的各种收水器的性能及与国外若干收水器的比较见表 27。

表 27 国内外收水器比较

塔型	收水器型式	风速 (m/s)	淋水密度 [m ³ /(m ² · h)]	收水效率 (%)	阻力系数 ξ	测试单位
逆流	BO - 42 - 140	1.6		99	1.46	西北电力设计院
		2.0		99	1.47	西安热工所
	BO - 170 - 50	1.5	16	96.5	1.25	冷却水研究所
		2.0	17	99.4	1.30	河南电力设计院
	BO - 160 - 45	1.5	17	95.4	1.0	冷却水研究所
		2.0	17	99	1.13	河南电力设计院
横流	波形 145 - 57	1.6	4.9	96.5	3.4	英国
		2.23		98.5		
	波形 125 - 35	1.0		95	2.6	前苏联
		2.0		99.2	2.1	
	折板 166 - 50 夹角 120°			95		原联邦德国
横流	HC - 150 - 50	1.5	15	97.3	0.66	冷却水研究所
		2.0	20	98.6	0.77	河南电力设计院
	HC - 130 - 50	1.5	15	97.1	1.61	冷却水研究所
		2.0	20	98.0	1.56	河南电力设计院
	ZO - 40 - 150 折板型收水器	1.5	12.5~20.5	99.4	4.76	东北电力设计院 冷却水研究所
		2.0		99.0	4.65	
		2.5		98.3	4.47	
	双层收水器 (石棉水泥 波片和蜂窝)	2.22	约 27	99.7	—	美国

选择收水器的原则是阻力小, 收水效率高(或逸出水率低), 组装后具有足够的强度和刚度, 使用寿命长, 造价低。

3.1.25 对冷却塔配水系统的原则要求是在同一设计淋水密度区域内配水均匀、通风阻力小、便于维修和能量消耗低。大型冷却塔的循环水量较大,若采用无压的槽式配水系统,水槽将占去较大的通风面积,增加了通风阻力,直接影响冷却塔的冷却效果。据统计,目前国内投入运行的淋水面积 $500\text{m}^2 \sim 5000\text{m}^2$ 的自然通风冷却塔和风机直径 $4.7\text{m} \sim 8\text{m}$ 的机械通风冷却塔多数采用管式配水系统。为了改善冷却塔的通风条件,减少配水槽所占的通风面积,降低通风阻力,大中型冷却塔采用有压的管式配水系统或槽、管结合的配水系统。

超大型自然通风冷却塔可采用单竖井压力水槽内外围分区配水系统或多竖井压力水槽内外围分区配水系统。

超大型自然通风冷却塔淋水面积小于或等于 12000m^2 时宜采用单竖井管槽结合配水系统;冷却塔淋水面积大于 12000m^2 时宜采用双竖井或多竖井管槽结合配水系统,经论证不排除采用单竖井的可能性。

冷却塔的规模界限很难准确划分,经多次讨论,可参照表28。

表28 小、中、大、超大型冷却塔的规模划分

塔型	小	中	大	超大
自然通风逆流式塔淋水面积 $S(\text{m}^2)$	$S < 4000$	$4000 \leq S < 8000$	$8000 \leq S < 10000$	$S \geq 10000$
机力塔单格冷却水量 $Q(\text{m}^3/\text{h})$	$Q < 1000$	$1000 \leq Q < 3000$	$Q \geq 3000$	—

注:1 自然通风逆流式冷却塔的规模划分系参考现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191 的规定,并结合近年来冷却塔研究资料划分。

2 机械通风冷却塔的规模划分按现行国家标准《机械通风冷却塔工艺设计规范》GB/T 50392 规定划分。

3 划分冷却塔的规模是为了适用相应的设计标准。

3.1.26 管式配水系统的管道水流速度国内研究得较少,本条规定参照前苏联 B·A·格拉特科夫等著《机械通风冷却塔》一书中给出的数字提出。经对近年从国外引进的一些冷却塔的管式配水系统进行核算,其干管流速均在本规定的范围之内。

3.1.27 本条规定了保持槽式配水系统正常工作的一些要求。

1 在冷却塔设计中一般不进行配水槽的水力计算。槽断面是根据结构要求,槽内流速、水槽中的水深,并考虑尽量少占塔的空气通流断面等因素确定。为了避免因配水槽内的水位差太大而影响配水的均匀性,槽内水流速度不宜太大,仅在大型冷却塔中因循环水量较大,为了使水槽少占空气流通面积才采用较大的槽内流速。本条对槽内水流速度的各项规定是参照前苏联 П·Д·别尔曼所著《循环水的蒸发冷却》和 B·A·格拉特科夫等著《机械通风冷却塔》以及我国《火力发电厂水工设计规范》DL/T 5339 等资料给出的数字提出。

2 为了保持喷嘴的正常工作,根据水科院冷却水研究所对各种喷嘴的试验结果,在水槽内水深大于 6 倍喷嘴直径时,水流才不致在喷嘴入口处产生空气旋涡。为了保持槽内有一定的水深以保证喷嘴的正常工作,槽内水深不宜小于 0.15m。

3 配水槽应当有适当的裕度。在设计水量工况下应当有不小于 0.1m 的超高。在供水系统可能出现超过设计流量工况时,为了保持较好的配水效果和冷却效果,配水槽也不应产生溢流。例如某些火电厂的循环水供排水管沟采用母管制,每台汽轮发电机组配置 2 台循环水泵和 1 座冷却塔。由于冬季循环水温较低,为了减少供电耗和防止冷却塔结冰,往往采用 2 台汽轮机组各运行 1 台循环水泵,并共用 1 座冷却塔,这种情况下进入冷却塔的水量一般为设计水量的 1.2 倍左右。某些工业企业设有备用循环水泵,当工艺设备特殊需要时,备用水泵投入运行,循环水量将增加到设计水量的 1.2 倍~1.4 倍。在上述情况下,都应当对配水槽内的水深进行校核计算,必要时可适当增加配水槽的高度,以保

持不产生溢流。

4 配水槽不宜太宽,但也不能太窄,为便于水槽的清污、喷嘴的检修及施工方便,经实践总结配水槽净宽不宜小于0.12m。

5 在槽式配水系统中按本条给出的流速确定的水槽断面,运行中水槽的水位差一般仅有5cm左右,靠水面坡降可以正常运行,为便于施工本条规定配水槽底宜水平设置。

槽式配水系统的主水槽和配水槽连接处多采用插入式的结合方案,插入到主水槽内的配水槽槽壁阻碍了主水槽内的水流,形成较大的局部阻力,影响水流分配。所以本规范要求水槽连接处应圆滑。

3.1.28 横流式冷却塔的配水池在光照下易滋长菌藻,当采用磷系配方药物处理循环水时更甚,所以配水池顶宜设盖板。大型塔的水池较大,设盖板比较困难,此时配水可采用槽式或管式系统。对于新设计的横流式冷却塔,宜采用管式配水系统。

3.1.29 本条规定了选用喷溅装置的原则要求。近年来国内许多单位研制了冷却塔喷溅装置的新型式,提出了一些性能较好的喷头,从国外引进的一些冷却塔中也带来了不同国家的一些较好的喷头。这些喷头按其溅散水流的工作原理可分为两类。一类是靠冲击力的作用将水流溅散成小水滴洒向四周;另一类是靠旋转产生的离心力的作用将水流分散洒向四周。对喷头水力特性的评价一般是从喷头的泄流能力、喷溅范围、喷溅均匀性三方面。单个喷头的泄流能力按下式计算:

$$Q = \mu A \sqrt{2gH} \quad (83)$$

式中: Q ——喷头的泄流量(m^3/s);

μ ——流量系数,由试验求得;

A ——喷头出口处过流面积(m^2);

H ——作用在喷头出口断面的水头(m)。

喷头的溅散范围一般以喷溅水滴最外层的轨迹来描述,可通过试验得出,喷头溅散的均匀性也从试验得出。通常是从喷头的

中心起,向四周测量 n 个测点的淋水密度,并以下列公式表示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\chi_i - 1)^2}{n}} \quad (84)$$

$$\chi_i = \sqrt{\frac{q_i}{q_m}} \quad (85)$$

式中: σ —喷头溅散水流的均方差;

n —测点总数;

q_i —测量点的淋水密度 [$m^3/(m^2 \cdot h)$];

q_m —各测点的平均淋水密度 [$m^3/(m^2 \cdot h)$]。

3.1.30 竖井水流在上升过程中容易产生旋涡流,造成竖井内水面不平稳,各主水槽进流不均匀,影响全塔的均匀配水。为避免上述现象的发生,可在进入竖井的循环水管出口装设导流弧片或在竖井内装设整流格栅,同时还应当适当增大竖井的过流断面以保持较低的上升流速。根据经验,竖井内上升流速不宜大于 $0.8m/s$ 。

3.1.31 冷却塔的进风口面积对塔内的气流分布和进风口区的气流阻力影响极大,进风口过小会造成冷却塔进口空气流速过高、塔内的风速分布不均匀,塔的阻力增加。从流体力学的角度,进风口的高度愈高愈好,但是进风口过高将增加塔的供水水头和塔的总高度,增加了冷却塔的造价和运行费。根据国外有关资料和中国水利水电科学研究院冷却水研究所对自然通风冷却塔和机械通风冷却塔模型试验研究结果,本条规定了逆流式冷却塔的进风口面积与淋水面积之比。自然通风逆流式冷却塔淋水面积小于或等于 $12000m^2$ 宜为 $0.35 \sim 0.40$; 淋水面积大于 $12000m^2$ 宜为 $0.30 \sim 0.35$ 。德国 AISAL 核电站淋水面积 $16,000m^2$ 冷却塔进风口面积与淋水面积之比为 0.32 ,综合上面数据,正文中规定自然通风逆流式冷却塔宜为 $0.30 \sim 0.45$ 。高位收水冷却塔不适用此规定。

中国水利水电科学研究院近期对逆流式机械冷却塔进风口区域的空气动力特性进行了试验研究,根据《关于机械通风冷却塔进

风口区域气流阻力系数计算的调研报告》，不同条件的冷却塔阻力系数测试结果表明，进风口高度是影响冷却塔气流流态的重要因素，进风口高度越高，气流越顺畅阻力越小。随进风口面积与淋水面积比的增大，即进风口高度的增加，阻力系数减小，当进风口面积与淋水面积比大于 0.3 时，阻力系数随进风口面积与淋水面积比的变化逐渐减小，当进风口面积与淋水面积比大于 0.5 时，阻力系数基本不再减小。根据测试结果，机械通风冷却塔进风口面积与淋水面积比取值为 0.35~0.45 比较合适。

现行国家标准《机械通风冷却塔工艺设计规范》GB/T 50392—2006 中规定机械通风冷却塔宜为 0.35~0.60：单面进风时宜取 0.35~0.45，二面进风时宜取 0.40~0.50，三面进风时宜取 0.45~0.55，四面进风时宜取 0.50~0.60。

3.1.32 本条规定了横流式冷却塔淋水填料的高度和径深的恰当比例。当淋水填料体积一定时，增加填料高度比增加径深所取得的效果要好。本条规定是参照国内外已经设计出的冷却塔和中国水利水电科学研究院冷却水研究所的研究结果给出的。

3.1.33 本条规定了对冷却塔集水池的设计要求。

1 集水池的容积应当满足循环水处理药剂在循环水系统内停留时间的要求。循环水系统内的换热器、沟、管等容积一般均为定值，为了保证所设计的系统容积不大于按药剂的允许停留时间所计算出的容积，只有冷却塔的集水池和循环水泵的吸水池可以适当调整。循环水药剂的允许停留时间可按现行国家标准《工业循环冷却水处理设计规范》GB 50050 有关规定进行计算。

根据国内外比较先进的设计资料统计，循环水系统的容积约为循环水小时流量值(m^3)的 1/3~1/5。根据国内运行经验，在此范围内其冷却塔的集水池容积能保证运行的安全。设计中可参照此值计算集水池的容积。对于没有药剂停留时间要求，或对集水池有其他贮备水量要求的工程，宜视具体要求进行设计。

2 冷却塔运行中因外界空气中的尘土、树叶等杂质，塔内的

填料碎片以及补给水中所含悬浮物等各种杂物的污染会形成大量沉积物,因此塔内应有排泥措施。

由于补充水控制不当及循环水系统的运行调整等因素,往往造成集水池满溢,为保持集水池的正常水位,应当在集水池内设置溢流管。

当冷却塔水池检修时需要将水池放空,因此集水池应当设排空管或考虑其他排空措施。

3 为使集水池不致因偶然的水位失控而造成满溢,本条规定池壁应有适当的超高。

4 为了保证人身安全,不致因失足落入水池后被水流冲入循环水沟造成危险,在塔的出水口应设安全栏栅。

3.1.34 为了减小冷却塔的通风阻力,冷却塔进风口处的支柱、塔内的支柱、梁及水槽等构件均应尽量减小断面宽度,并采用流线型的断面型式。如自然通风冷却塔的塔筒支柱宜采用圆形断面,改进淋水填料的支承方式尽量减少支柱和梁所占的通流断面,配水系统采用管式等。

3.1.35 冷却塔内外裸露的金属部件长期暴露在水汽环境中极易腐蚀,为了延长金属构件的使用年限,应当采取有效的防腐措施。如采用玻璃钢材质等。

3.1.36 经过对实际运行的冷却塔的调查,本条规定的设施是冷却塔的运行维护、检修及安全防护工作必要的措施。其中运行监测仪表一般包括以下各项:空气的干、湿球温度测量仪表;大气压力测量仪表;自然风速和风向测量仪表;冷却塔进水和出水温度测量仪表;冷却塔进水管压力测量仪表;冷却塔集水池水位监视仪表;当补充水补入集水池时,在补充水管上装设的流量计量仪表;机械通风冷却塔的风机电动机的电压和电流指示仪表。

自然通风冷却塔应设避雷接地系统。

自然通风冷却塔顶部应安装航空警示灯,数量不应少于4个。自塔顶向下一定高度范围涂刷航空警示色标范围及要求按照现行

行业标准《民用机场飞行区技术标准》MH 5001 规范执行。

3.1.37 在气候寒冷的地区修建的冷却塔，冬季运行中的最大危害是冷却塔的结冰。冷却塔结冰后，不仅影响塔的通风，降低冷却效率，严重时还会造成淋水填料塌落，塔体结构和设备的损坏。

(1) 冷却塔易结冰的部位、原因及危害。

1) 进风口处结冰。这是一种最普通的结冰形式，在各种类型的冷却塔的进风口处均有可能结冰。

①自然通风逆流式冷却塔的进风口结冰一般是在塔筒内壁下缘或塔内的挡水檐边缘挂冰。轻者形成一道很薄的冰帘，严重时连同塔筒人字支柱一起冻结成一堵冰墙。在塔的背风侧，由于塔内的部分水滴被吹洒到人字支柱上，往往在人字支柱的塔内侧结冰。

②机械通风逆流冷却塔一般是在进风口上、下缘及两侧结冰。

③横流式冷却塔进风口百叶窗内缘挂冰及因顶部进水槽漏水造成的进风口支柱和百叶窗外侧大面积结冰。

进风口处结冰的主要原因是冷却塔淋水填料外围水量过小，沿筒壁下流的少量水在进风口上缘或挡水檐边缘滞留时间过长，遇冷空气而结冰。此外，自然通风冷却塔的挡水檐和筒壁连接处混凝土不够密实，或出现裂缝造成渗水也会在塔筒下缘造成结冰。

进风口处结冰除对塔筒壁下缘和人字支柱的混凝土有破坏作用外，还影响冷却塔的进风，使塔的冷却效果降低。

2) 淋水填料和填料的支承梁、柱结冰：

①淋水填料的大面积结冰。由于全塔的热负荷及水量过小会造成整个塔内淋水填料底部挂冰，或采用分区配水的冷却塔，由于水量分配不当，造成部分填料结冰。

②填料的支承梁、柱及部分填料结冰。由于淋水填料局部水量过小，或淋水填料外围支柱紧靠进风口时，极易造成结冰。

填料及支承梁柱结冰往往造成淋水填料支承梁、柱的结构破

坏，淋水填料大面积塌落。

3) 塔顶结冰：

①自然通风冷却塔的塔顶刚性环内外缘，由于水汽积聚，形成冰锥，严重时会形成较大冰块，如某电厂塔顶冰锥长达3m。

②机械通风冷却塔由于塔内收水器效率较差，水滴随出塔空气飞出塔外，飘落在塔顶平台及风机的出风筒上造成结冰。

塔顶的结冰除对冷却塔结构造成危害外，还将影响运行人员的安全巡视。某电厂曾发生过因自然通风冷却塔塔顶冰锥落下砸伤运行人员的事故。

4) 冷却塔周围地面结冰。由于收水器的效率较差，大量水滴飘落在冷却塔周围，或进风口处由于风的旋流，将一部分水滴带出塔外洒落在进风口前地面上，都会造成塔周围地面结冰。这种结冰主要影响运行人员的安全巡视及冷却塔附近的交通安全。

5) 机械通风冷却塔的风机叶片表面结冰。当机械通风冷却塔的格数较多时，冬天常有一些格不运行。由于运行的塔排出的水汽飘落到停止运行的塔风机叶片上，并在这些叶片表面积聚结冰。如果不对这些结冰的叶片进行融冰处理，当再启动运行时，因叶片的静、动平衡失调，将引起风机振动，严重时会造成风机及塔体结构的损坏。

6) 某些风机的减速器采用稀油润滑，并带有油循环系统。当冬季停用时间较长时，润滑油会在管路中凝固，风机再启动运行之前如果不对油加热解凝，将会造成油路不通畅，风机减速器因失润造成事故。

7) 除上述塔本身的冰冻之外，塔的进水干管闸门及集水池也会因塔停止运行发生冻害，进水闸门被冻裂，集水池基础冻涨，池壁冻裂的事故均发生过。

(2) 防冰冻措施。

冷却塔结冰的条件是低气温、少量的水和结冰附着物。其中低气温是主要因素，但可以防护。东北某电厂，因运行防护得当，

在气温低达 -45°C 的条件下,仍可保持冷却水温为 $12^{\circ}\text{C} \sim 16^{\circ}\text{C}$,冷却塔基本不结冰。而在最低气温仅为 -10°C 左右的某电厂,因设计及运行维护不当,仍结冰严重。

解决冷却塔结冰的关键在于“防”。有些厂事先“防”得不够,当冷却塔结冰后,采取人工打冰,虽然可以防止结冰扩大,但这种消极的打冰既是一种繁重危险的工作,又可能造成淋水填料的塌落。河北某电厂就曾因打冰导致蜂窝淋水填料的大面积塌落。

多年来国内很多生产运行单位和设计单位在冷却塔的防冰方面积累了丰富的经验,国外的一些成熟经验也可借鉴。

针对导致冷却塔结冰的三个因素(低气温、少量的水和结冰附着物),采取相应的措施防止结冰。设计和施工要为防结冰创造条件,运行管理和维护要有切实可行的措施。

1) 设计方面宜采取的防结冰措施:

①在进风口上缘设置向塔内喷射热水的防冻喷水管,喷射热水的总量可取为冬季进塔总水量的 $20\% \sim 30\%$ 。

采取这一措施可以在进风口内形成一道热水幕,增大进风阻力,减少进入冷却塔的空气量,提高进塔冷空气的温度,并可以使进风口上缘的结冰受热水冲融,不致造成大量结冰。过去,有一些冷却塔也曾采取过在塔的进风口上缘或下缘安装热水喷管的防冰措施,由于喷射水量较少(一般仅为进塔水量的 $10\% \sim 15\%$),喷水孔直径较小,孔易被杂物堵塞,不能形成较强的热水流,非但不能防冰,反而加剧了结冰。

根据国外的经验,防冰热水管的喷射水量宜取冬季进塔总水量的 $20\% \sim 30\%$ 。天津某电厂的4座自然通风逆流式冷却塔(淋水面积为 $1500\text{m}^2 \sim 3500\text{m}^2$),热水喷管安装在塔筒内进风口上缘以上 $200\text{mm} \sim 300\text{mm}$ 处,采用直径 200mm 的聚氯乙烯管,管的侧下方开孔,孔径为 $10\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的椭圆孔,间距 200mm 。热水从塔的各条主水槽引接。经3个冬季的运行实践,有一定防冰效

果。伊敏某电厂冷却塔防冰热水管,由于冷却塔进风将热水幕吹散,其防冰效果一般。

②在冷却塔的进水干管上设旁路水管,使部分或全部循环水可以不进入塔的配水系统,直接流入集水池。

这项措施在美国、英国、法国、比利时等国家的冷却塔内已普遍实施,并作为成熟的经验写入美国冷却塔协会的设计规范和英国冷却塔规范(BS-4485)。

当工艺系统启动或停运的初期,循环水系统将在没有或只有少量热负荷的情况下运行,如果水喷淋到淋水填料上,将导致淋水填料大面积结冰。我国东北某电厂1985年11月就曾因汽轮发电机组启动初期,循环水系统在很低的热负荷条件下运行,造成淋水填料全部挂冰,有的大冰柱从填料底直达集水池水面,后经采取措施,通入热水缓缓融冰才避免了填料的塌落,但淋水填料的支承结构已受到不同程度的破坏。

近年东北电力设计院设计的东北地区的一些电厂的自然通风冷却塔均设有旁路水管。运行实践表明,在冬季循环水冷态运行中开启旁路水管对于防止淋水填料结冰是有效的。

③配水系统分区配水;冬季可加大塔填料外围部分的淋水密度。

④减少进入冷却塔的空气量。自然通风冷却塔可在进风口设挡风板。冬季随气温变化,调整挡风板的面积和悬挂方向。哈尔滨热电厂4座淋水面积 2000m^2 的自然通风冷却塔,冬季采用挡风板调节进塔空气量,保持冷却后水温 $12^\circ\text{C} \sim 14^\circ\text{C}$,在气温达 -30°C 时冷却塔仍不结冰。实践证明,在严寒地区采用在冷却塔的进风口挂挡风板是最有效的防结冰措施。

大型自然通风冷却塔宜配备可调节进风流量的挡风装置,大、中、小型冷却塔界限见本规范第3.1.25条条文说明。

机械通风冷却塔可采取停止风机运行;减小风机叶片的安装角或采用变速电动机驱动风机;也可采用允许倒转的风机设备,冬

季短时间倒转风机等措施。

⑤自然通风逆流式冷却塔的进风口上缘内壁设挡水檐，檐宽采用0.3m~0.4m。

挡水檐可以收集沿筒壁流下的水流，防止在进风口上缘及人字支柱上结冰。挡水檐与增大外围水量并用效果更好。这项措施已经作为一项成功的经验在东北各电厂的冷却塔上推广。

⑥当冷却塔的数量较多时，可考虑在冬季停运一部分塔，把循环水集中引到运行的塔内，增加这部分塔的淋水密度。根据东北及华北的一些电厂的运行经验，自然通风逆流式冷却塔的淋水密度冬季不宜小于 $5\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。机械通风冷却塔和横流式自然通风冷却塔的淋水密度冬季不宜小于 $15\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

采用冬季停塔措施防冻需要注意以下几个问题：

a. 停运的塔应避免在冬季频繁启、停，以防冷却塔的混凝土结构因冻融加速破坏。东北某电厂有6座自然通风逆流式冷却塔，冬季停运2座，但其中有1座塔作为冬季调峰运行，白天气温稍高，电负荷也较高时开塔，夜间停塔，仅经过2个冬季，塔内的配水槽、淋水填料支承梁、柱等混凝土构件因冻融损坏严重。

b. 停运的塔的集水池应保持一定量的热水循环。

c. 防止冻坏进水闸阀。一般可在闸阀的底部及上部安装直径50mm的放水管。冬季打开放水管，使阀体内保持热水流动。

d. 集水池壁和淋水填料支柱在水面线附近一段应涂环氧沥青漆或其他防水材料，以防混凝土受冻融破坏。

⑦当机械通风冷却塔的风机减速器有润滑油循环系统时，应设有对润滑油的加热设施。

⑧淋水填料的外圈支承柱尽量远离进风口，底部支承梁稍高于进风口上缘。

⑨冷却塔应安装除水效率高的收水器。

2)施工应注意的问题。冷却塔的施工质量直接影响塔的寿命，冷却效率和冬季塔结冰的程度，施工中应注意以下几个

方面：

①冷却塔各部分的混凝土必须按设计要求的强度、抗冻、抗渗标号施工，采用设计要求的水泥品种。混凝土中不得掺用氯盐，不得使用过期和受潮的水泥。砂石料的含泥量应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的要求。

冷却塔各部分混凝土的强度、抗冻、抗渗标号要求应符合本规范第 3.4.8 条、3.9.1 条的规定。

东北某电厂的 1 座淋水面积为 3,500m² 的自然通风逆流式冷却塔的淋水填料支承架构，由于冬季频繁启动和预制构件质量较差，未达到设计要求的强度、抗冻和抗渗标号。自 1985 年 11 月投入运行，仅经过一个冬天，全塔的 172 根钢筋混凝土支柱有 85 根严重剥皮，36 根三面露主筋，103 根产生纵向裂缝，有的裂缝宽达 5mm，深达 80mm~90mm，表面混凝土疏松，直径 16mm 的圆钢用手锤击即可贯入 100mm 以上。全塔的 204 根主梁中有 30% 以上严重露筋，548 根次梁中严重剥皮露筋的占 10% 以上。淋水填料支承架构基本破坏。

②塔内的配水槽应严格控制安装中的高度误差，否则将造成水槽的高低不平，有的溢水，有的达不到设计水深，夏季影响塔的冷却效率，冬季因配水不均匀导致少水部分的淋水填料及支承架构的结冰。

③淋水填料的交接处不应留间隙。

④配水槽及配水喷嘴应在施工完毕后清扫干净，以防污物堵塞喷嘴。

⑤横流式冷却塔的配水池及配水槽接缝处应保持严密，避免漏水。

⑥自然通风逆流式冷却塔的挡水檐与塔筒间的接缝应严密，避免漏水及渗水。

3) 运行管理措施。冷却塔运行的好坏直接关系到工艺生产的安全和经济运行。以发电厂为例，冷却塔冷却后水温每降低

1℃，发电煤耗可降低 $1\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 以上。仅此一项，全国采用冷却塔供水的发电厂每年可节省标准煤数十万吨。此外，冷却塔运行、维护得当，还可以延长冷却塔的使用寿命，降低冷却塔的大修费用，全国各行业数以千计的冷却塔每年所节省的费用相当可观。

运行管理措施的关键在于“专人管理”和“健全各项规章制度”。电厂应设专人管理冷却塔，并制定冬季防冻的各项措施，做好入冬前的防冻准备。如对循环水管道阀门、接头等处应进行检查维护，确保不漏水；对冷却塔的配水系统、淋水填料进行全面检查，清除污物，以防喷嘴堵塞；对防冻设施进行检查等。

冬季，随气温的变化、冷却塔热负荷和水负荷的变化，调整和启用各项防冻设施。

当冷却塔结冰时，尤其是淋水填料及其支承架构结冰，应首先考虑采用增加塔的热负荷和水负荷的措施，使冰缓缓融化。

为了防止冷却塔因水温过低而结冰，冷却塔的出水温度不宜低于 $10^\circ\text{C} \sim 12^\circ\text{C}$ 。

为防止机械通风冷却塔风机叶片结冰，可在叶片表面涂刷薄层涂料（润滑脂、定子油、石蜡各 $1/3$ 加温混合）。

3.1.39 过去，我国在冷却塔设计、施工及投入运行后一般不进行验收试验。塔的效果能否达到设计要求，或塔的设计能否满足使用要求主要靠塔投入运行以后的实践验证，即便塔达不到设计要求或设计的塔不满足使用要求，也不能及时总结经验，及时采取补救措施。这是不正常的，既不利于生产，也不利于积累设计经验。应当在冷却塔投入运行以后的规定时间内进行验收试验，以评价冷却塔的设计、施工等工作的成败，在验收试验过程中对冷却塔进行调整，为生产运行创造较好的条件。为便于验收试验工作的进行，在设计冷却塔时就应当根据验收试验的要求，考虑留有供验收试验使用的仪器及设备的安装位置和相应的设施。

供验收测试使用的仪表除本规范第 3.1.36 条条文说明提出

的各项外,还需在冷却塔进水管上考虑设置流量测量仪表的位置及措施,如当管径大于 500mm 时,一般采用毕托管测流量,在进水管路上应设计预留毕托管的插口接头;当管径小于 500mm 时,一般采用截流孔板测流量,应设计预留法兰接口。当塔的进水管径较大,采用超声波流量计测量流量时,还应预留表井。

为了保证验收试验工作的进行,还应在工程的概、预算费用中列入专款。

3.2 自然通风冷却塔工艺

3.2.1 英国规范(BS-4485)、比利时哈蒙公司设计资料和前苏联规范等国外资料对自然通风冷却塔的净距均规定为不小于 $0.5D$,其中前苏联规范规定 D 为塔进风口处直径,其他资料中 D 均指相邻最大塔的底部直径。我国以往设计中塔间净距一般取相邻最大塔直径的 0.2 倍~0.5 倍。据水科院冷却水研究所模型试验结果,塔间净距不小于 4 倍进风口高时就不影响冷却塔的进风。另据有关文献资料介绍模型试验的结果,当自然通风冷却塔成群布置时,沿塔壳体圆周的风压分布不同于单塔。当塔的中心距小于塔底直径 1.5 倍时,其壳体圆周风压分布与单塔比变化很大,中心距愈小,变化愈大,沿风向布置的后排塔的负压增大,对壳体不利。当塔布置不当时还会由于风道效应的影响使位于下风向的塔壳体承受较大风荷载而影响壳体安全。综合塔的通风要求及塔间空气动力干扰因素,本条文规定逆流式冷却塔间净距不宜小于塔进风口下缘标高处的塔体半径。

横流式冷却塔由于进风口高度一般比逆流式冷却塔进风口高度大,而风筒直径比逆流式冷却塔小,塔间净距取不小于 3 倍进风口高即可满足进风要求。但考虑塔间空气动力干扰因素,本条文规定横流式冷却塔间净距不宜小于塔进风口下缘标高处的塔体半径。

3.2.2 本条规定仅是从冷却塔进风要求而定的，其他方面的要求超过本条规定的净距时应按较高的要求设计。国内外实际工程设计中冷却塔与高大的厂房建筑之间的净距一般取不小于塔底部直径。

自然通风冷却塔与机械通风冷却塔之间不宜小于自然通风冷却塔进风口高的2倍加0.5倍机械通风冷却塔(或塔排)的长度，并不应小于40m~50m，当冷却塔淋水面积大于等于 3000m^2 时用大值，当冷却塔淋水面积小于 3000m^2 时用小值。

3.2.3、3.2.4 自然通风冷却塔的抽力与塔筒的有效抽风高度 H_e 成正比。国内外有关资料中对塔筒有效抽风高度的计算方法各异。国内电力设计单位过去多采用 $H_e = H_1 + 0.5H_2$ 的计算方法计算逆流式冷却塔的有效抽风高度，其中 H_1 为配水系统以上的塔筒高度， H_2 为进风口中部到配水系统顶面的高度。本条按英国规范(BS-4485)的规定， H_e 等于从淋水填料中部到塔顶间的高差。经对东北电力设计院设计的淋水面积 $500\text{m}^2 \sim 4500\text{m}^2$ 的8种自然通风冷却塔进行计算(淋水填料为水泥格网板)，按两种方法计算的 H_e 相差为0.5%~1%，按英国规范计算的结果稍低。从工程设计实用角度考虑 H_e 稍低偏于安全。横流式冷却塔的风筒有效抽风高度通常采用淋水填料中部至塔顶的高差，这样规定无论逆流、横流自然通风塔均适用。规定简化，便于应用。

在塔的出口由于热空气上升还会形成附加抽力，在外界风的作用下塔的抽力也将发生变化。这些问题在工程设计中均可以不考虑。

超大型自然通风冷却塔的外区配水的抽力计算公式在超大塔实测中得到验证，在其他规模塔中可参照使用。

海水冷却塔的抽力计算公式与常规冷却塔相同。

排烟冷却塔的抽力计算公式与常规冷却塔相同。烟气在冷却塔内排放时的附加抽力，可按负阻力系数表达。

当考虑逆温影响时宜对抽力计算进行修正。

3.2.5 自然通风冷却塔壳体检修时需要设吊架,塔顶人行道上需有预留孔以便检修时穿吊索。为避免冬季从预留孔滴水结冰,预留孔平时采用预制混凝土块封盖,并用砂浆密封。

3.2.6 自然通风冷却塔的风筒壳体一般都比较高,为安全计,设此规定。根据《工程建设标准强制性条文》(电力工程部分)当塔总高大于100m时,从塔门平台至塔顶的爬梯应设休息平台。

3.2.7 为了减轻自然风速较大时(平均风速大于3m/s)对塔内气流场的不利影响,建议在填料底部至集水池水面间建隔风板,隔风板在塔池内宜采用十字形布置。

近年来有些电厂在进风口外装设导风装置,建议在实际采用时,具体工程可结合当地风速和模拟试验研究确定。若在进风口外装设导风装置,塔内可不再设置十字隔墙。

自然风是影响冷却塔冷却效果的一个重要因素。当电厂所处地区年平均风速较大时,采用冷却塔进风导流装置,可减缓侧向风的影响。近年来,冷却塔进风导流装置出现了三种导风板结构型式,即钢筋混凝土结构、钢骨架外包钢板蒙皮结构和钢骨架外包玻璃钢蒙皮结构。安徽蚌埠电厂1号机组配置的冷却塔和上海吴泾第二电厂2号机组配置的冷却塔进风导流装置采用的是钢筋混凝土结构;黄台电厂冷却塔和华能杨柳青电厂6号机组配置的冷却塔进风导流装置采用的是钢骨架外包钢板蒙皮结构;钢骨架外包玻璃钢蒙皮结构的冷却塔进风导流装置是相关单位近年设计研究和技术开发的新产品。

3.2.8 本条为新增条文。排烟冷却塔的设计参数应包括循环水量、进出水温、水质、烟气量、烟气温度、烟气密度、烟气压力及主要化学成分等。影响排烟冷却塔烟气扩散的因素有空气热容量、环境风速、逆温层和相对湿度等。

3.2.9 本条为新增条文。条文中对于建(构)筑物对周围环境的影响包括机场限高等。

3.2.10 本条为新增条文。本条规定的目的是为了提高烟气抬升高度和降低烟气对塔筒的腐蚀,使烟气气流在冷却塔内不易扩散。

3.2.11 本条为新增条文。

1 当进塔烟道的标高与脱硫塔出口烟道水平段标高一致时为高位布置。进塔烟道宜采用高位布置的目的是减小烟道的压力损失。

2 排烟冷却塔布置时在满足建筑间距的前提下应尽可能缩短烟道长度,降低烟道费用。

3 排烟冷却塔人孔宜设在便于出入的烟道侧壁下部;排烟冷却塔内的烟道在容易积灰处应设除灰孔,除灰孔宜设在烟道底部。

4 为便于烟道内凝结水的收集和处理,脱硫装置与冷却塔间的烟道宜设置不小于1%的纵向坡度,且坡向脱硫装置。

3.3 机械通风冷却塔工艺

3.3.1 机械通风冷却塔按风机安装位置的不同可分为抽风式和鼓风式塔。

鼓风式塔的风机安装在进风口处。这种塔的优点是便于风机的维护检修,风机设备不受湿热空气的腐蚀,风机设备可以和塔体结构分开,振动小。缺点是一般鼓风机的容量较小,不适用于水量大的塔,湿空气的回流量大,影响冷却效果。

抽风式塔的风机安装在冷却塔顶部。这种塔的优点是适用于水量大的大塔、布置紧凑、湿空气回流小,缺点是风机设备经常处于湿热空气中运行易受腐蚀,风机安装位置较高检修维护较困难。

由于抽风式塔适用范围广,国内外大、中型塔多采用这种型式。

3.3.2 根据前苏联B·A·格拉特科夫等著《机械通风冷却塔》给出的资料,平面图形对冷却塔的阻力的影响见表29。

表 29 平面图形对塔阻力系数的影响

塔平面 图形	周围进风的 正八边形	四边进风的 正方形	从相反两侧避风的正方形和矩形			
			1:1	1:1	4:3	3:2
边长比	—	1:1	1:1	4:3	3:2	2:1
阻力系数比	1.0	1.1~1.15	1.2~1.3	1.3~1.48	1.4~1.5	1.53~1.64

表中以正八边形的阻力系数为 1.0, 其余各种平面形状的阻力系数均大于 1.0。因此塔的平面图形宜采用本条推荐的形状。

3.3.3 淋水填料顶面至风机风筒进口之间取一定高度的距离和保持适当的收缩角, 其作用有两方面: 一是可以保证气流平稳地被压缩进入风筒, 减少气流阻力; 二是便于施工和检修。前者是主要的。根据中国水利水电科学研究院冷却水研究所对常用的Φ4.7m 风机的机械通风冷却塔的模型试验结果, 淋水填料顶面以上至风机风筒进口之间的收缩段高度应大于风机半径。但该试验是对特定的塔型所进行的试验结果。对于各种不同的塔型以控制收缩角为宜。

目前工程中常见的塔顶形状有两种: 一种是平顶, 此种最普遍; 另一种为收缩形顶板, 风机直径较大的大型机械通风冷却塔常采用。

本条规定系参照前苏联 B·A·格拉特科夫等著《机械通风冷却塔》一书和国内外大量工业塔的实践经验作出的有关规定。从填料段的风速分布比较均匀, 收缩段的气流收缩比较平稳出发, 以取收缩顶角不大于 90° 为宜, 此顶角应将填料顶面包括在内。

以某顶面算起的收缩段的顶角是指该顶面等面积当量圆形边缘与风筒底座的下边缘之间的连线延长至风机轴, 与风机轴的交点为顶点, 以风机轴为对称轴, 两侧连线间的夹角。

3.3.4 风筒进口采用流线型可以使气流平稳地进入风机风筒, 避

免气流与风筒边壁分离而产生涡流，减小这部分的阻力。据中国水利水电科学研究院冷却水研究所模型试验（同第3.2.3条）结果，风筒进口采用流线型比直角形风量可提高18%。

本条所指的是位于风机叶片下部风筒进口处的形线，应注意与通常所指的淋水填料上部收缩段部分的导流装置有所区别。

风机出口安装扩散筒的作用有二：一是减少塔的出口动能损失，一般冷却塔风机出口的平均风速达 $5\text{m/s} \sim 10\text{m/s}$ ，出口动能在塔的总能量损失中占相当大的比例。若无扩散筒，这部分由风机提供的能量将在塔的出口处直接消散于大气中，安装扩散筒后可使塔的出口动能减小，回收一部分动能。二是可以减轻出塔湿空气向塔进风口回流。根据中国水利水电科学研究院冷却水研究所的试验结果，扩散筒不同高度时风量的增加量见表30（扩散筒中心角为 14° ）。

表30 扩散筒高对风量的影响

扩散筒高与风机直径之比	0	0.5	1.0	1.5
风量增加率（%）	0	7	8	10

从表30可见，扩散筒的高度对风量的增加有较大影响，一般情况下扩散筒高与风机直径之比以0.5左右为宜。扩散筒过高将增加造价，带来的效益也不明显。

据国内外冷却塔统计资料并从流体力学的要求考虑，本条规定扩散筒的中心角不宜大于 18° 。

控制风机叶尖与风筒壁的间隙利于提高风机的效率。

3.3.5 横流式机械通风冷却塔的进风口风速较高，一般在 3.0m/s 左右。沿淋水填料垂直下落的水流，在这样高的水平风力吹动下，从顶部至底部产生整体偏移。淋水填料的设置应当与之相适应。根据国内一些设计单位的经验和我国石化、化肥、轻工、冶金等部门的30多个工业企业从日本、美国等7家公司引进的9种塔型的实际布置和运行实践经验，本条规定了不同型式的淋水填料宜采用的收

缩倾角。

3.3.6 按本条规定可以减少外界风对冷却塔的进风影响。

3.3.7 当塔的格数较多单排布置时,塔排首尾之间易受湿空气回流和干扰影响,故每排塔的格数不宜过多。前苏联规范规定塔排的长宽比宜取3:1,英国规范规定宜取5:1。我国实际工程中有一些是超过这一比例关系的,但大多数情况是在5:1至4:1范围内。

冷却塔的格数较多时,应考虑占地面积、湿热空气回流和干扰的影响因素。大、中型冷却塔,塔排的长宽比宜为3:1~5:1;小型冷却塔,塔排的长宽比宜为4:1~5:1。

3.3.8 塔排的布置除应考虑塔的通风要求、塔排之间的回流和干扰影响外,还要考虑如本条文说明第3.1.1条所述的厂区总平面布置方面的其他要求。

表31 给出英、美等国关于塔排布置方面的有关要求。

表31 国外有关塔排间距数据

塔排相互关系	两塔排平行,长轴在同一直线上的单列布置	两塔排平行,长轴不在同一直线上的双列或多列布置
风向	垂直于塔长轴	平行于塔长轴
英国冷却塔规范 (BS-4485)	$L \geq \frac{1}{2}(L_1 + L_2)$	$L \geq \frac{1}{2}(L_1 + L_2)$
前苏联B·A·格拉特科夫 《机械通风冷却塔》	4m~6m	$L \geq 10H_0$
美国N.P. CHEREMISINOFF “COOLINGTOWERS”	$L \geq \frac{1}{8}(L_1 + L_2)$	$L \geq \frac{1}{2}(L_1 + L_2)$

表中 L 为塔排间距(m); L_1 、 L_2 分别为相邻塔排的长度; H_0 为塔的进风口高度(m)。

按表 31 的要求布置塔排, 塔排间的回流和干扰的影响可减至最小。

对于淋水面积不同的机械通风冷却塔, 前苏联 B·A·格拉特科夫在研究苏联国内外关于冷却塔相互影响的基础上建议如下(表 32)。

表 32 不同面积的塔排间距

塔排中单格淋水 面积(m^2)	<10	<20	<100	<200	>200
塔排净距(m)	9	12	21	27	33

表 32 中给出的数字折算为进风口高约相当于 $6H_0 \sim 10H_0$, 折算为塔排长度约相当于 $1.0L_m \sim 0.6L_m$ (L_m 为塔排长度)。

参照表 31 和表 32, 并结合我国现有工程实际布置情况制订了本条条文。

1 本款规定主要是考虑施工期基坑开挖和两排塔基础间的结构间距, 同时也考虑到塔运行管理和检修期间的通道要求。

2 本款规定主要是考虑塔的通风要求。当其他因素要求较高时应按较高的要求设计。

本条规定的塔排间距没有考虑湿热空气回流和干扰的影响, 如果考虑湿热空气回流和干扰的影响时, 可参照表 31 或表 32 给出的数据进行设计。

3.3.9 仅从冷却塔本身的进风要求考虑, 国内外有关试验研究均认为相邻塔的净距至少为 2 倍进风口高才能保持进风口风速分布均匀, 进风量稳定。表 33 是前苏联全苏给水、排水、水工结构物和工程水文地质科学研究所(ВОДГЕО)对淋水面积 $400m^2$ 的机械通风冷却塔模型的试验结果。从表 33 可见, 当塔间距减小时, 避风口平均风速明显减小。当塔间距为 $0.5H_0$ 时, 进风口平均风速较塔间距为 $2H_0$ 时降低 25%, 沿进风口风速分布极不均匀。

表 33 进风口风速分布

H_i	v_i/v_m			备注
	$L=0.5H_0$	$L=H_0$	$L=2H_0$	
$0.9H_0$	1.09	1.16	1.15	L 为两塔间净距； H_0 为进风口高； H_i 为自进风口底部 算起测点高度； v_i 为测点风速； v_m 为进风口平均风 速
$0.7H_0$	1.00	1.05	1.08	
$0.5H_0$	0.80	0.88	1.00	
$0.3H_0$	0.55	0.72	0.90	
$0.1H_0$	0.42	0.65	0.80	

表 33 的数据是在其中一个塔不运行的情况下得出的。当两个塔同时运行时,根据中国水利水电科学研究院冷却水研究所的试验研究结果,两塔净距不小于 $4H_0$ 对塔的通风即无影响。前苏联 B·A·格拉特科夫建议塔间净距取表 34 中的数值。

表 34 B·A·格拉特科夫建议的周围进风的机械通风冷却塔间距

单风机单格塔淋水面积 (m^2)	300~400	400~800	800~1200
塔间净距 $L(m)$	21	27	33

表中 L 相当于 $6H_0 \sim 8H_0$, 或 $0.85D_0 \sim 1.0D_0$ (D_0 为塔直径)。

参照上述资料,本条主要从塔的进风要求考虑规定塔间净距不得小于 $4H_0$ 。如果其他方面的要求较高时,塔间净距可以加大。

3.3.10 前苏联(ВОДГЕО)对淋水面积 $400m^2$ 的机械通风冷却塔的模型试验结果见表 35。中国水利水电科学研究院冷却水研究所也通过模型试验证明,当 $L > 2H_0$ 时的塔进风便不再受邻近建筑物的影响。参照上述试验结果,本条从塔的进风要求考虑塔与相邻建(构)筑物的净距应大于 $2H_0$ 。当其他方面要求较大的距离时,应按其他方面的要求进行设计。

表 35 进风口风速分布

H_i	v_i/v_m			备注
	$L=0.5H_0$	$L=H_0$	$L=2H_0$	
$0.9H_0$	1.05	1.00	1.05	L 为进风口至墙的距离； H_0 为进风口高；
$0.7H_0$	0.94	0.96	1.01	H_i 为自进风口底部算起测点高度；
$0.5H_0$	0.80	0.87	0.97	v_i 为测点风速；
$0.3H_0$	0.68	0.83	0.98	v_m 为进风口平均风速
$0.1H_0$	0.45	0.77	0.98	

3.3.11 回流是指进入冷却塔的空气中混入一部分本塔排出的湿热空气。干扰是指入塔空气中混入一部分从附近其他的塔排出的湿热空气。当冷却塔并非一格，而是多格塔布置在一起时，回流和干扰就同时存在。由于机械通风冷却塔的塔体较低，因地形、地物、塔群布置、塔的结构型式和气象等因素的影响，回流和干扰总会或多或少地发生。设计冷却塔时应当考虑回流和干扰这两种现象造成的进塔空气温度和湿度升高对冷却效果的不利影响。

目前国内有些单位对回流和干扰的影响做过观测，积累了一些资料，但没有系统的分析，不能归纳出可行的计算方法。国外也有一些计算方法，现分述如下：

(1) 英国冷却塔规范(BS - 4485)推荐的方法：

该规范认为在塔的下风侧空气回流的百分比最大为出塔空气量的 20%，并建议按最大回流率的 60% 作为设计采用的预计回流率。根据冷却塔的设计水量(塔排的总设计水量)、空气的湿球温度、设计冷却水温差及逼近度(冷却水温 t_2 减去湿球温度)，按该规范给出的经验曲线计算出湿球温度的修正值。

(2) 美国冷却塔协会(CTI)推荐的方法：

美国冷却塔协会(CTI)冷却塔规范《CTI Bulletin PFM - 110》给出的经验关系式：

$$R_e = \frac{0.24L_1}{1+0.013L_1} \quad (86)$$

式中： R_e ——回流率(%)；

L_1 ——冷却塔塔排长度(m)。

根据这一关系式，按塔内的热平衡条件及有关的设计数据计算有回流情况下的进塔空气参数。

(3)前苏联(ВОДГЕО)方法：

此方法是建立在大量实测资料基础上的经验公式，对于定型的多格冷却塔，每格面积为 $64\text{m}^2 \sim 192\text{m}^2$ 及单格的面积为 400m^2 ，塔排平行排列，塔排间距 $20\text{m} \sim 40\text{m}$ ，可采用下式近似地确定设计湿度、温度 τ_1 ：

$$\tau_1 = \tau_M + 0.2B[1 + K_L(n-1)\sin\alpha] \quad (87)$$

式中： τ_1 ——考虑回流后的塔进口湿球温度($^\circ\text{C}$)；

τ_M ——没考虑回流的设计湿球温度($^\circ\text{C}$)；

n ——顺风向排列的塔排序数；

α ——风与塔排长轴的夹角；

K_L ——考虑塔距影响的系数，其数值见表 36；

B ——考虑塔排长度影响的系数，其数值见表 37。

表 36 系数 K_L

塔排间距 (m)	20	25	30	35	40
K_L	1.0	0.48	0.32	0.2	0.1

表 37 系数 B

塔排长 (m)	100	75	50	25	10
B	1.0	0.8	0.5	0.2	0.1

按式(87)可计算出每排塔修正后的湿球温度。全部塔排的平均计算湿球温度为各塔排的算术平均值。

(4) 日本经验公式：

$$R_e = \frac{0.22L_1}{1+0.012L_1} \quad (88)$$

上述四种方法均系经验方法，都有一定的局限性，除式(87)外，其他方法的使用范围也不甚明确。设计中可视具体情况参照本规范条文说明第3.3.8条表31及表32的有关数据加大塔排的间距，或选用本条列举的式(87)方法对气象参数进行修正。

2012年上海交通大学和江苏海鸥冷却塔股份有限公司进行了《减少冷却塔塔群湿热空气回流和干扰影响的研究》，在模拟实验和冷却塔群现场运行测试分析的基础上，研究分析了塔排长、塔排间距、冷却塔结构和风速、风向与塔排长轴的夹角及相互关联对回流率的影响。模拟冷却塔实验模型采用塑料结构，按照1:150的比例制作，模拟塔群放置在一个Φ2000mm，长21m的标准风洞可视实验段内。现场测试为某电厂冷却塔、某循环水厂冷却塔、某石化项目冷却塔。研究结果表明：考虑夏季天热、湿度大，冷却效果差，取冷却塔排的轴线沿夏季季风方向，使夹角尽量小，可减少湿热空气的回流率；塔排长是回流率增加的主要影响因素，缩短塔排长是必要的；塔排间距的最低限值为4倍冷却塔进风口高度，在4倍进风口高度的基础上适当增大塔排间距，会减少湿热空气回流率。《减少冷却塔塔群湿热空气回流和干扰影响的研究》给出了新的回流率计算公式：

$$R_e = F \left[\frac{0.12L_1}{1+0.013L_1} + \frac{L_1}{40} \times \frac{\sin\alpha}{0.51} \times \left(\frac{L}{4H} \right)^2 \right] \quad (1+0.056V_1) \quad (89)$$

式中： H ——冷却塔进风口高度(m)；

L ——塔间距(m)；

V_1 ——塔外风速(m/s);

F ——冷却塔的结构相关系数, $F \leq 1$, 回流率大小与冷却塔的进风速度和风筒高度、形状等相关。

按上述公式计算的冷却塔回流率与实测值的比较见表 38。

表 38 冷却塔回流率计算值与实测值比较

项目名称	(89)式计算 回流率(%)	(88)式计算 回流率(%)	(86)式计算 回流率(%)	实测回流率(%)
某电厂冷却塔	6.72	11.8	12.2	6.87
某循环水厂冷却塔	8.08	11.5	11.9	7.49
某石化项目冷却塔	4.75	11.7	12.1	4.64

3.3.12 冷却塔集中控制便于运行管理,但是为了便于对风机设备运行中紧急情况的处理及检修过程中的安全,还应当在各台风机附近设有就地开停按钮和切断电源的设施。实践证明这些措施是非常必要的。

3.3.13 本条提出了风机设备及配套产品的选用原则。

3.3.14 根据冷却塔的设计风量和计算的全塔总阻力选定风机的运行工况点,风机在这一点运行时应有较高的效率,否则应当重新确定风机的叶片安装角。在选定风机的运行工况点时还应注意使风机配套的电动机的功率有适当的裕度。

3.3.15 大型风机的减速器多采用稀油润滑并配有油循环设备。由于油循环设备故障或油路故障将使润滑油不能循环,减速器内油温升高或断油失润造成减速器事故,严重时事故扩大将导致电动机事故。为安全计应当装设油位指示、油温监测及报警装置。

大型风机出于叶片动平衡失调及其他原因造成风机或减速器振动,严重时将影响风机设备和冷却塔结构的安全。设置对振动的监测和防振保护设施就可以避免事故扩大。这些设施一般应在

风机订货时注明要求,由风机设备制造厂提供。

直径大于或等于 6.0m 的风机应配有振动检测、报警和防振保护装置;直径小于 6.0m 的风机宜配有振动检测、报警和防振保护装置。

3.3.16 为便于对风机设备的检修应设有固定起吊设施或临时起吊设施。

3.3.17 双侧进风的机械通风冷却塔,填料底部至水池水面之间若不设中间隔板,由于两侧进风往往不对称,尤其是当外界风速较大时,自然风速的影响往往造成两侧进风的较大差别,影响塔内气流流场分布,影响塔的散热效果。当设置中间隔板后能有效地减轻这种影响。试验证明,设置中间隔板对塔的通风阻力没有影响,隔板上缘距填料支撑梁底可取 200mm~300mm,下缘可伸入塔的集水池水面以下。

3.3.18 在机械通风冷却塔的进风口装设百叶窗式导风装置的主要有以下几点:

(1)改善进风口和塔内雨区的气流流场,特别是塔外自然风速较大时,可减弱自然风的不利影响;

(2)防止塔内的水溅出塔外,尤其是横流式冷却塔,此作用更为明显;

(3)建在寒冷地区的冷却塔进风口的百叶窗式导流装置还可做成可调角度的,冬天可调整角度减小进风口面积,减少进风量,防止塔内结冰;

(4)减小塔的噪声;

(5)防止杂物吹入塔内。

但是在进风口装设百叶窗式导风装置将加大气流阻力。

基于上述利弊,本条规定逆流式机械通风冷却塔一般可不设百叶窗式导风装置,机械通风横流式冷却塔和多风沙地区建造的机械通风逆流式冷却塔进风口应当装设百叶窗式导风装置,多漂浮物地区的机械通风逆流式冷却塔进风口宜设防护网。

3.3.19 目前工厂化生产的小型玻璃钢冷却塔正趋向定型化、系列化,生产厂家众多。这些生产厂大部分都有一些设计单位作为技术指导,一般都有完整的产品设计文件和较好的工艺管理措施,成品也多数经过不同方式的鉴定。但也有生产厂的产品存在较多问题,质量差,没有完整的设计技术资料,更没有实测资料,实际运行中达不到要求。设计选用这类产品时应当注意。选用的产品应符合现行国家标准《玻璃纤维增强塑料冷却塔》GB 7190 等的有关规定。

3.4 冷却塔结构设计基本要求及材料

3.4.1 根据国内外工程实践,本条推荐自然通风冷却塔采用双曲线钢筋混凝土薄壳结构型式,但未作严格规定。在具体工程设计中,经充分论证,也可采用其他结构型式和材料,如箕舌线型(钟型)塔和钢架镶板、钢索结构等。

对于双曲线型自然通风湿式冷却塔的壳体尺寸,在编制中,经汇总统计了国外、国内业已建成的几个大型冷却塔各部尺寸,并通过相关尺寸的相对比较和结合对引进的哈蒙(Hamon)设计技术的消化,给出了表 39 的几何尺寸有关范围,供设计选型采用。

为符合工艺要求及拟合双曲线型子午线,且目前实际工程中塔顶扩散角已有角度小于 6° 的塔,有的已接近 2° ,因此,修改了塔顶扩散角范围。

表 39 国内外几个冷却塔塔型参数

类别	序号	国家及电厂冷 却塔名称	冷却塔各部尺寸(m)								有关相对比			
			总高 <i>H</i>	壳体面 积 <i>F_u</i>	上段壳 高 <i>H_o</i>	下段壳 高 <i>H_u</i>	出口半 径 <i>r_o</i>	喉部半 径 <i>r_s</i>	壳底半 径 <i>r_u</i>	进风口 高 <i>H_P</i>	总高/壳 底直径	喉部高/ 总高	喉部面 积/壳底 面积	出口面 积/壳底 面积
国外	1	英国拉德 日利	107	7234	—	—	—	32.5	48.0	—	1.11	—	0.46	—
	2	原联邦德国 格思根	150	9378	32.0	107.0	37.08	35.08	54.65	10.8	1.37	0.79	0.41	0.460
	3	原联邦德国 Mulheimkarlich	160	9227	37.0	112	34.0	32.65	54.21	11.0	1.47	0.77	0.36	0.393
	4	原联邦德国 施麦豪森	120	5630	26.0	88.4	26.795	25.07	42.35	—	1.4	0.78	0.35	0.400
	5	美国 Trojan	150	9777	30.0	107.0	38.20	35.4	55.8	12.5	1.34	0.80	0.40	0.469

国内	6	3500m ² 冷却塔	90	3617	18.0	66.2	20.73	19.4	33.94	5.8	1.32	0.80	0.33	0.373
	7	4500m ² 冷却塔	105	4912	21.0	76.2	23.51	21.9	38.74	7.8	1.35	0.80	0.32	0.368
	8	5000m ² 冷却塔	110	5206	22.0	80.2	24.84	23.13	40.72	7.8	1.35	0.79	0.32	0.372
	9	6500m ² 冷却塔	125	6832	26.0	90.0	28.84	26.64	46.65	9.0	1.33	0.78	0.33	0.382
	10	7000m ² 冷却塔	130	7328	29.3	91.7	29.87	26.91	48.31	9.0	1.34	0.78	0.31	0.382
	11	8500m ² 冷却塔	147	9239	29.4	107.12	35.136	32.383	54.701	9.88	1.34	0.80	0.35	0.413
	12	9000m ² 冷却塔	150	9782	29.8	109.43	36.142	33.311	56.268	10.17	1.33	0.80	0.35	0.413
	13	10000m ² 冷却塔	155	10752	34.3	109.90	37.175	34.581	59.113	10.20	1.31	0.78	0.34	0.395
	14	12000m ² 冷却塔	165	12082	30.4	122.30	40.039	36.940	62.397	11.64	1.32	0.81	0.35	0.412
原联邦德国经验塔型			2d	—	1.415d	0.44d	—	0.5d	0.75d	0.145d	—	0.78	0.39	—

注:表中 d 冷却塔±0.000m 处直径。

3.4.2 根据以往工程实践,对自然通风冷却塔的基础型式和选用情况作了一般的规定。由于倒T型基础刚性大,能较好地适应地基变形,在地基条件较差时推荐采用。对于超大型、大中型塔,因进出水管沟尺寸较大,倒T型将过大削弱基础环的刚度,从而降低了它的优越性,宜采用环板形基础。对于岩石地基,可采用单独基础,但应有可靠的防滑措施且上拔力不得大于下压力。

3.4.3 考虑到较大型的机械通风冷却塔有可能采用单独的薄壳结构,因此对单格的塔,推荐采用钢筋混凝土结构。它可能是薄壳结构,也可能是框架结构,可能是现场浇制,也可能是预制。对于多格毗连的塔一般应采用钢筋混凝土框架结构。

3.4.4~3.4.7 根据冷却塔的使用条件及其特殊性,规定在设计中除要求执行的相关规范和所要遵循的一些专门要求外,同时还要参照执行现行的有关工民建建筑工程的设计规范。

3.4.8 本条是根据冷却塔的工作条件及运行环境编制的。本条规定冷却塔结构材料应采用水工混凝土。

混凝土中掺加相应水泥用量百分比的塑性添加剂,是为了提高混凝土的有关性能,如:和易性、抗冻性、抗渗性以及方便施工。按现行国家标准《水工建筑物抗冰冻设计规范》GB/T 50662—2011 中第 5.1.4 条的要求,混凝土中应掺加引气剂。但在水工混凝土中掺加氯盐,对结构是极不利的,故不得掺用。

同样强度等级的混凝土,其抗冻能力与所采用的水泥品种有关。实践比较,普通硅酸盐水泥的混凝土抗冻能力要比矿渣水泥混凝土强。在有抗冻要求的地区,不宜采用抗冻性能较差的火山灰质水泥,而宜优先采用普通硅酸盐水泥。对水泥熟料中铝酸三钙含量的限定,是为了增加混凝土的抗腐蚀性能。

3.4.9 由于冷拉后的钢筋性质变脆,这对承受冲击荷载或重复荷载的构件及处于负温下的结构,是很不利的。为此,规定了在阵风和风机作用下的冷却塔(尤其是自然通风冷却塔)是不能使用冷拉钢筋的。考虑抗震的冷却塔应按现行国家标准《建筑抗震设计规

范》GB 50011 的相关要求执行。

3.4.10 本条为新增条文。对于 300MW~1000MW 机组的排烟冷却塔, 塔筒洞口直径一般在 6m~10m 范围内, 这样大的洞孔改变了洞口周围壳体的受力状态和局部稳定安全系数, 必须采取局部加固措施。

排烟冷却塔塔筒上开洞后破坏了壳体的旋转对称性, 因此, 需考虑风荷载和地震荷载不同方向角对塔筒结构安全的影响。经过计算分析, 找出最不利风向角和水平地震方向角时冷却塔通风筒及洞口、斜支柱、基础的最不利内力。

烟道直径一般在 5m~9m 范围内, 常规设置的人字柱净空一般不能满足烟道运输、安装的需求。因此需要在人字柱布置时采取适当的措施。

3.5 自然通风冷却塔的荷载及内力计算

3.5.1 本条主要列出了自然通风冷却塔塔筒内力计算应考虑的荷载。烟道对塔筒的作用是排烟冷却塔特有的。当烟道支撑在塔筒上时, 应考虑烟道对塔筒的作用。

3.5.3、3.5.4 作用在冷却塔表面上的等效设计风荷载, 其有关参数主要是根据《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012(以下简称《荷载规范》)的规定和近年来国内有关冷却塔风荷载大量试验结果制定的。

(1)多年来国内在冷却塔设计中, 其基本风压 ω_0 的取值, 曾经按 60 年一遇取用。然而, 目前国外除美国(ACI-334)取值标准较高外, 如英国(BS)、德国(VGB)均按 50 年一遇取值; 我国现行的《荷载规范》规定, 基本风压按 50 年一遇取值。为使本规范能与国内、国外的相应规范趋于一致, 自然通风冷却塔的基本风压 ω_0 的取值规定了按 50 年一遇气象资料来取用。最小基本风压值 0.3kN/m² 是按《荷载规范》取用的。

当冷却塔建在不同的地区时, 应根据地形、地貌的不同对基本

风压值进行修正,见《荷载规范》中第8.2节的有关规定。

(2)风压高度变化系数 μ_z 按《荷载规范》相应地貌类别分别进行取值,可查阅《荷载规范》表8.2.1。

(3)双曲线冷却塔平均风压分布系数。自新中国成立以来,在工程设计中,风压分布曲线基本采用:罗比锡三项式,1984年通过鉴定的西安热工所等单位在茂名实测的无肋塔风压分布曲线8项式及拟合曲线(北大 S_{xx} 曲线)见图2。

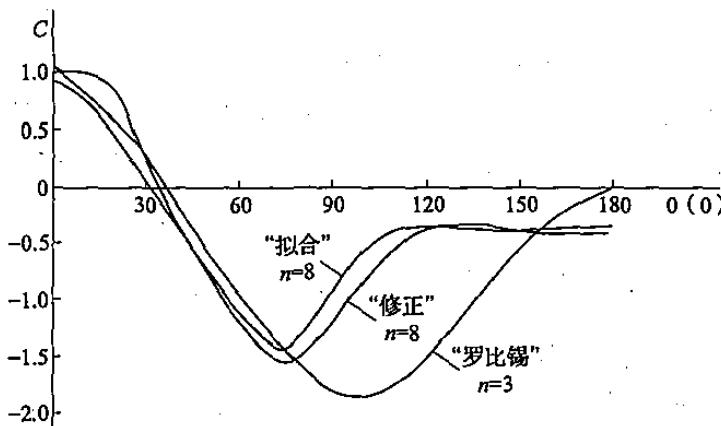


图2 无肋塔风压分布曲线

图2中无肋双曲面冷却塔风压分布曲线,是按原水利电力部1984年在西安对《双曲线冷却塔风压分布和阵风响应的研究》(卢文达,西安热工研究所,1983年)的鉴定意见制定的。

1)实测修正曲线(简称修正曲线):系指茂名 $3500m^2$ 塔的实际测定结果,考虑测量误差及安全等因素经过修正得到的曲线,按富氏级数(多项式)展开,即为:

$$C_p[\theta] = \sum_{k=0}^m \alpha_k \cos k\theta \quad (90)$$

式中系数: $\alpha_0 = -0.4675, \alpha_1 = 0.2708, \alpha_2 = 0.7852, \alpha_3 = 0.5623, \alpha_4 = -0.0022, \alpha_5 = -0.1499, \alpha_6 = 0.0105, \alpha_7 = 0.0332$ 。

2)实测与模型试验拟合曲线(简称拟合曲线):系指茂名 $3500m^2$ 塔的实际测定结果与风洞模型试验结果拟合曲线(北大

S_{xx}), 其富氏级数(多项式)展开式(90)中的系数为: $\alpha_0 = -0.4426$, $\alpha_1 = 0.2451$, $\alpha_2 = 0.6752$, $\alpha_3 = 0.5356$, $\alpha_4 = 0.0615$, $\alpha_5 = -0.1384$, $\alpha_6 = 0.0014$, $\alpha_7 = 0.065$ 。

在编制过程中, 分别对罗比锡、修正、拟合这3条曲线进行了计算和比较, 图3和表40、表41即是用这3条不同的风压分布曲线对 3500m^2 和 8000m^2 两个塔型的计算比较结果(基本风压值 $w_0 = 0.56\text{kPa}$)。

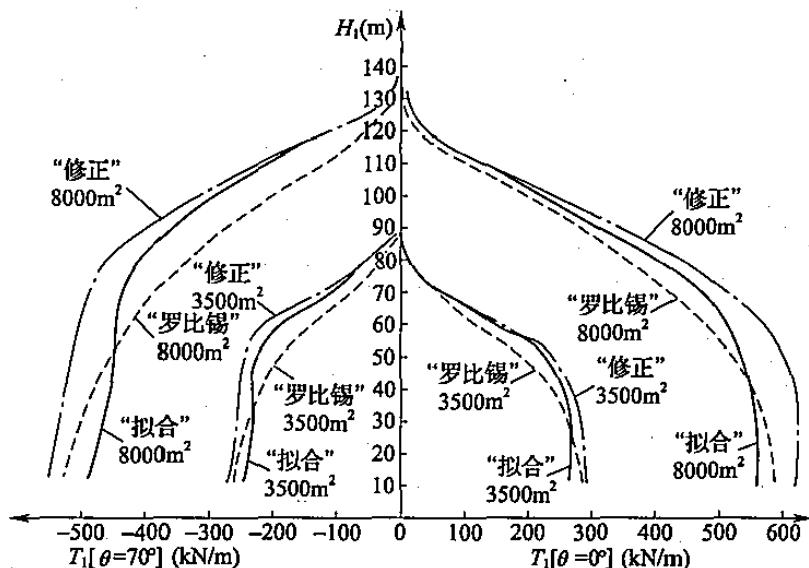


图3 不同风压分布曲线计算的子午向拉、压风内力

表40 3500m^2 塔采用不同风压分布曲线时风压内力比较

塔壳 相对 标高	薄膜内力 $T_1(\text{KN}/\text{m})$						相对于拟合曲线			
	罗比锡($n=3$)		拟合曲线		修正曲线		“罗”比“拟合”		“修正”比“拟合”	
	拉力	压力	拉力	压力	拉力	压力	拉力	压力	拉力	压力
0.9	14	-19	15	-35	17	-35	-6.7	-45.7	0	0
0.8	57	-59	63	-104	64	-104	-9.5	-43.3	0	0
0.7	108	-107	124	-160	124	-170	-7.7	33.1	0	+6.2
0.6	171	-163	196	-198	205	-212	-12.8	-17.7	+4.6	+7.1
0.5	217	-191	244	-216	257	-232	-11.1	-11.8	+5.3	+7.4
0.4	250	-218	267	-219	284	-238	-6.4	-0.4	+6.4	+8.7

续表 40

塔壳 相对 标高	薄膜内力 T_1 (KN/m)						相对于拟合曲线			
	罗比锡($n=3$)		拟合曲线		修正曲线		“罗”比“拟合”		“修正”比“拟合”	
	拉力	压力	拉力	压力	拉力	压力	拉力	压力	拉力	压力
0.3	271	-231	277	-220	298	-240	-2.2	+5.0	+7.6	+9.1
0.2	283	-240	278	-223	300	-244	+1.8	+7.6	+7.9	+9.5
0.1	288	-246	277	-232	299	-252	+4.0	+6.0	+7.9	+8.6
0.0	298	-247	273	-242	299	-258	+9.2	+2.1	+9.5	+6.6

表 41 8000m²塔采用不同风压分布曲线时风压内力比较

塔壳 相对 标高	薄膜内力 T_1 (KN/m)						相对于拟合曲线			
	罗比锡($n=3$)		拟合曲线		修正曲线		“罗”比“拟合”		“修正”比“拟合”	
	拉力	压力	拉力	压力	拉力	压力	拉力	压力	拉力	压力
0.9	22.5	-35.0	27.5	-50.0	37.5	-50.0	-18	-30	+36.4	0
0.8	92.5	-80.0	97.5	-170.0	100.0	-177.5	-5	-53	2.6	4.4
0.7	187.5	-177.5	200.0	-282.5	217.5	-300.5	-6	-37	8.8	6.4
0.6	297.5	-272.5	322.5	-372.5	352.5	-407.5	-8	-27	9.3	9.4
0.5	397.5	-380.0	432.5	-433.0	475.0	-470.0	-8	-12	9.8	8.5
0.4	472.5	-420.0	505.0	-440.0	560.0	-495.0	-6	-4.5	10.9	12.5
0.3	527.5	-462.5	540.0	-445.0	610.0	-500.5	-2.3	-3.9	12.9	12.5
0.2	567.5	-485.0	560.0	-455.0	630.0	-510.0	-1.3	+6.6	12.5	12.1
0.1	580.0	-500.0	570.0	-465.0	622.5	-515.0	+1.8	+7.5	9.2	10.8
0.0	600.0	-510.0	570.0	-480.0	620.0	-522.5	+5.3	+6.2	8.8	8.8

结果表明：修正曲线要比拟合曲线在子午向的拉、压应力值增加10%~13%，塔高和风载增加使应力增大的幅度更大。由此可见，“实测修正曲线”计算值偏大，“实测与模型拟合曲线”计算值较为合理。为此，本规范推荐采用实测与模型试验的拟合曲线。

关于加肋塔的风压分布曲线，因国内尚缺乏模型试验及原体测定的曲线，故本规范表3.5.4-3中的加肋双曲面沿用了德国规范(VGB)中的富氏级数展开式中的系数(不包括内吸力)，该系数是在原型塔上的实测结果。其雷诺数约为 $Re=4.0 \times 10^7$ ，该塔上布置有竖向小肋，肋间距不大于平均周长的1/50。

为便于对比分析，现将4条K类曲线和原规范的有肋曲线及无肋曲线共6条曲线的富氏余弦级数系数(10项)列于表42中。

表 42 各风压分布曲线的富氏余弦级数系数表(10 项式)

曲线编号	曲线类别	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9
No. 0	K1.0 有肋 曲线	-0.31816	0.42197	0.48519	0.38374	0.13956	-0.05173	-0.07171	0.00106	0.03127	-0.00025
No. 1	K1.1 有肋 曲线	-0.34387	0.40026	0.51139	0.41500	0.13856	-0.06904	-0.07317	0.01357	0.03466	-0.00851
No. 2	K1.2 有肋 曲线	-0.37142	0.37801	0.54039	0.44613	0.13427	-0.08635	-0.07074	0.02727	0.035	-0.01798
No. 3	K1.3 有肋 曲线	-0.46585	0.31318	0.65177	0.53386	0.09424	-0.13332	-0.03604	0.06482	0.032011	-0.02765
No. 4	2003 规范 有肋曲线	-0.3923	0.2602	0.6024	0.5046	0.1064	-0.0948	-0.0186	0.0468	—	—
No. 5	2003 规范 无肋曲线	-0.4426	0.2451	0.6752	0.5356	0.0615	-0.1384	0.0014	0.0650	—	—

注:1 2003 规范有肋曲线系美国 ACI-334 规范曲线。

2 2003 规范无肋曲线系北大风筒试验研究成果与原塔实测资料拟合曲线。

经计算,风压沿 $0^\circ \sim 180^\circ$ 各曲线的分布情况见图4。各风压分布曲线体形系数正,负值及负压相对比较见表43。

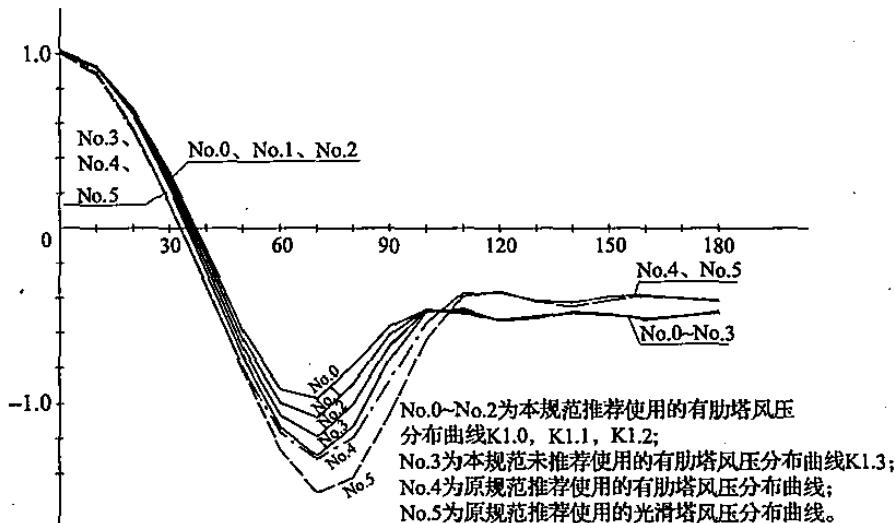


图4 有助与无肋风压分布曲线图

表43 各风压分布曲线体形系数正、负压值比较表

曲线编号	曲线类别	正压最大值 (0°)	负压最大值 ($67^\circ \sim 72^\circ$)	负压比值 (有助/无肋)	负压比值 (K类/规范)
No. 0	K1.0 有助曲线	1.02	-0.985(67°)	-35.1%	-25.2%
No. 1	K1.1 有助曲线	1.02	-1.088(68°)	-28.3%	-17.3%
No. 2	K1.2 有助曲线	1.01	-1.192(70°)	-21.5%	-9.4%
No. 3	K1.3 有助曲线	1.01	-1.299(70°)	-14.4%	-1.3%
No. 4	2003 规范有助曲线	1.01	-1.316(70°)	-13.3%	0
No. 5	2003 规范无肋曲线	1.00	-1.518(72°)	0	-

从比较可见,K1.0~K1.2有助曲线优于原规范有助曲线,本次修订予以采用;K1.3有助曲线与原规范有助曲线相似,本次修订未予采用。

(4) 风振系数。

风振系数是根据20世纪80年代初期做的《双曲线冷却塔风

压分布和阵风响应研究》报告并利用“双曲线冷却塔阵风响应 TWQ-4 计算程序”, 经过多方面的大量计算分析确定的。20 世纪 80 年代初期做的这个研究, 风剖面、湍流度与《建筑结构荷载规范》GB 5009—2012 均有差异, 需要进一步研究。

1) 最小固有频率的计算。本规范按茂名实测的三角级数表达式, 对 $3500\text{m}^2 \sim 9000\text{m}^2$ 六个典型塔进行了塔的动力计算。其固有频率随环向谐波数的变化规律(图 5)表明: 各塔塔壳的最小固有频率均出现在 $n \approx 3$ 的地方, 其值见表 44。

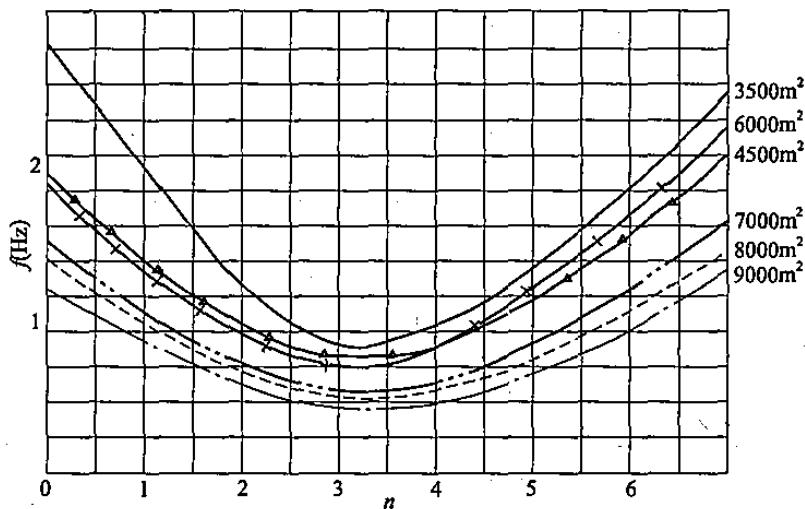


图 5 各类塔的固有频率

表 44 无肋双曲线冷却塔的最小固有频率

冷却塔面积 (m^2)	3500	4500	6000	7000	8000	9000
最小固有 频率(Hz)	0.94	0.84	0.83	0.67	0.65	0.59

注:未计人自重影响。

2) 风振系数 β 的计算。冷却塔壳体内力设计时, 由子午向薄膜力 T_1 , 起主要控制作用, 而且控制部位均在壳体中、下部, 所以, 计算中仅考虑与脉动风压不完全相关的与子午向($\theta=0$)对应的风振系数 β 。

计算中分别验算了自重对风振系数的影响、风振系数随塔高的变化和影响风振系数的参数等三方面的情况。

根据现行规范规定,我国分 A、B、C、D 四类不同的地貌,由于火电厂和自然通风冷却塔一般不会建在高大密集建筑群的市区内(即 D 类地貌区),所以本规范对 A、B、C 三类地貌进行了计算,其相应的风速剖面幂指数为 $\alpha_A = 0.12$, $\alpha_B = 0.16$ 和 $\alpha_C = 0.22$ 时,各类地面粗糙度 K 和湍流度 $\sigma_{(v)}/\bar{v}_{10}$ 直接影响风振系数的大小,其中以地面粗糙度 K 的取值对风振系数的变化最为敏感。

经参照有关资料所提供的参数,根据《荷载规范》的要求,并结合茂名实测的情况,计算了塔高 $H=165m$ 以下,不同面积的双曲线冷却塔在各类地形、地貌下的风振系数,其结果见表 45。

表 45 不同面积冷却塔风振系数计算值

地形地貌类别	α	K	$\sigma_{(v)}/\bar{v}_{10}$	\bar{v}_{10}	β					
					3500	4500	6000	7000	8000	9000
A	0.12	0.002	0.18	30	1.749	1.739	1.726	1.719	1.713	1.705
B	0.16	0.005	0.25	30	2.114	2.096	2.075	2.060	2.047	2.031
C	0.22	0.010	0.32	30	2.492	2.467	2.435	2.409	2.386	2.361

注:1 支柱条件为弹性固定,计算点为进风口上缘。

2 表中 α 为风速剖面幂指数; K 为地面粗糙度; $\sigma_{(v)}$ 为脉动风速均方根; \bar{v}_{10} 为地面上 10m 高处平均风速(m/s); $\sigma_{(v)}/\bar{v}_{10}$ 为湍流度。

同时,经按《双曲线冷却塔风压分布和阵风响应研究》报告中提出的,在弹性柱支承和 $H/d=2.0 \sim 2.6$ 的条件下的近似公式,验算了各类塔的最小固有频率和风振系数,见表 46 和表 47。

表 46 不同面积冷却塔风振系数计算值(近似公式法)

地形地貌类别	α	K	\bar{v}_{10}	β					
				3500	4500	6000	7000	8000	9000
B	1/7	0.005	30	2.11	2.11	2.03	1.96	2.00	1.98
C	2/9	0.01	30	2.66	2.65	2.50	2.37	2.44	2.40

表 47 不同面积冷却塔最小固有频率计算值(近似公式法)

冷却塔面积 (m ²)	3500	4500	6000	7000	8000	9000
最小固有 频率(Hz)	1.015	0.921	0.745	0.654	0.574	0.532

以上两种方法的风振系数计算表明,尽管以近似公式计算的值变化规律尚差,但各类塔在不同条件下的数值是基本相同的;而且也不难看出, β 值随塔面积的改变其值变化不大,只需按A、B、C三种不同地形、地貌类别来给出相应的 β ,即A类为1.7,B类为2.0,C类为2.4。

考虑到在计算中的某些因素(如临界阻尼比的合理取值和计算点的位置上移等)可能使 β 有所下降,参考国外 β 取值情况,对上述给出的3个数值按降低约5%进行修正,即为本规范提出的风振系数,见表48。

表 48 风 振 系 数

地形地貌类别	A	B	C
风振系数 β	1.6	1.9	2.3

(5) 塔群的影响。

按照国内外有关资料和风洞试验,当冷却塔的间距能满足本规范时可以不考虑塔群对风压的影响。

当多个冷却塔构成的塔群其间距小于上述规定时,就有可能随风向的改变而互相干扰,产生“通道”或“屏蔽”效应,从而改变了塔表面的风压分布及大小,尤其风压分布引起结构应力的变化较明显。

结构计算时,国外通常采用加大风压系数来考虑塔群的影响。如原联邦德国 Herzog 博士建议风压乘以系数1.25,英国BS-4485规定塔群影响风压系数取用1~1.3,原联邦德国和法国有规定塔群影响系数采用1~1.15。

近年来设计院也曾与高校院所合作,利用风洞试验研究塔群的影响,对塔群的排列和布置提出了一些建议,但由于塔群的互相

影响造成的风压分布变化十分复杂,试验中很难得到一种确切的方法来表达塔群的实际影响,因此,该项试验研究尚须继续进行。在本次修订中,未能增补这方面的具体规定。有条件时,建议结合工程实际情况进行必要的塔群风洞试验。

本次修改,本条将作用在塔筒上的风荷载进行了划分,增加了内吸力和塔间干扰系数。对作用于双曲线冷却塔外表面上的等效风荷载 w_e ,按塔筒外表面是否加肋提供了不同的风压分布系数,其中无肋塔采用的是原规范风压分布系数,有肋塔的风压分布系数直接引用了德国(VGB)规范,并取消了原规范中有肋塔的风压分布系数,因原规范中有肋塔的风压分布对冷却塔的受力状态改善有限;内吸力为作用于塔筒、沿塔筒环向及子午向均匀分布、垂直于塔筒表面方向、指向塔内的吸力,原规范没有给出其值的确定方法,本次给出了计算方法;近年来冷却塔的风洞试验表明群塔布置确实存在塔间干扰系数,考虑到已运行的中小型冷却塔多未计入而能够安全运行,因而仅要求在大型、超大型冷却塔设计中考虑不小于 1 的塔间干扰系数。

冷却塔塔间干扰系数宜通过风洞试验确定。无试验时可按表 49 的规定取值。

表 49 塔间干扰系数参考值

L/d_m	1.6	2.5	4.0
C_g (串列)	1.25	1.10	1.0
C_g (方阵)	1.30	1.15	1.0

注:1 L 为临近两座冷却塔的中心距离。

2 C_g 中间数值可通过线性内插得到。

3 表中系数系根据风洞试验资料整理。用于两座及以上冷却塔的塔群,塔群为串列或方阵布置。根据风洞试验资料,串列或方阵布置的塔间干扰系数是不同的,方阵布置的塔间干扰系数相对较大。如果新试验对具体数值有所调整,可在下一版规范修订时予以调整。

4 d_m 为冷却塔壳底直径和喉部直径的平均值。

冷却塔壳底直径和喉部直径的平均值 d_m 可按下式计算：

$$d_m = \frac{d_u + d_t}{2} \quad (91)$$

式中： d_u ——为冷却塔壳底直径(m)，当相毗邻的两座塔的规模不同时，应取较大塔的直径；

d_t ——为冷却塔喉部直径(m)，当相毗邻的两座塔的规模不同时，应取较大塔的直径。

3.5.5 本条对内吸力标准值作了规定。从荷载组合看，冷却塔局部稳定计算时，需要考虑内吸力。其他计算暂未要求考虑内吸力。

3.5.6 本条是冷却塔风筒冬季运行工况筒壁计算温度应力的依据。

1 冬季冷却塔塔外最低气温，按 30 年一遇标准取值，是根据国内多年来在工程设计中长期沿用的结果而制定的。

2 冬季冷却塔塔内温度的取值，是通过对哈尔滨、大庆安达、秦岭等电厂的冷却塔在冬季运行时实测的结果整理而定的，其不同部位的温度与循环供水系统的方式有关。

3 为确定混凝土的热工参数参阅的规范及资料见表 50。

表 50 有关文献、资料的热工参数综合表

文献资料名称	混凝土导热系数 λ_h [W/(m · °C)]	外表面放热系数 α_o [W/(m ² · °C)]	内表面放热系数 α_i [W/(m ² · °C)]
《给水排水工程结构设计手册》(中国建筑工业出版社，第二版)	两侧表面与空气接触时取 1.55； 一侧表面与空气、一侧表面与水接触时取 2.03	冬季：23.26 夏季：17.44	—
《水工混凝土结构设计规范》SL/T 191—2008	2.94	19.44	

续表 50

文献资料名称	混凝土导热系数 λ_h [W/(m · °C)]	外表面放热系数 α_o [W/(m ² · °C)]	内表面放热系数 α_i [W/(m ² · °C)]
德国:《冷却塔结构设计规范》(VGB)	2.37	23.26	23.26
《Repair of Cooling Tower》(R. I. K. RUPFERWER)	1.86	23.26	11.63
《热电站钢筋混凝土薄壳结构冷却塔的设计和计算》([波]M·哥尔宙克)	1.74	1.163(2+13 $\sqrt{v_o}$)当 $v_o=2\text{m}/\text{s}$ 时: $\alpha_o=23.70$	1.163(2+13 $\sqrt{v_i}$)当 $v_i=2\text{m}/\text{s}$ 时: $\alpha_i=7.26$
《火力发电厂水工设计规范》DL/T 5339—2006	1.98	23.26	23.26

注: v_o ——塔外空气速度(m/s);

v_i ——塔内空气上升速度(m/s)。

表中数字表明:外壁面向空气的放热系数 α_o 应采用 23.26 W/(m² · °C), 至于塔内向内壁面的放热系数则应取决于塔内介质的速度、温度、湿度等条件,其影响因素很复杂(比如《钢筋混凝土圆形水池设计》一文介绍,在水温 6°C~15°C 时,水与池壁的热交换系数 α_i ,一般为 58.2 W/(m² · °C)~145.4 W/(m² · °C),这远远大于表中所列出的 α_i)。而过小则偏于保守,故采用 $\alpha_i = 23.26 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。对于混凝土的导热系数 λ_h 。各规范差异较大,经过试算比较 $\lambda_h = 1.98$ 与 $\lambda_h = 2.37 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的钢筋用量仅差 2.568t,故暂采用原规定值 $\lambda_h = 1.98 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

3.5.7 日照产生的温度内力是否计算,在国内外工程实践中不尽一致。目前总的倾向是南方地区夏季日照下温度差较大时应进行计算,否则可能导致筒壁内层钢筋偏小;而北方地区由于日照下温差不大,且持续时间较短时可以不计算。考虑到南北界线难以划

分,因此本条未规定何时应验算,由各工程根据气象条件等具体情况确定。

在进行日照温度工况内力组合时,风荷载取值可采用最大日照作用时相应风荷载取值进行内力组合,以节约筒壁配筋。

至于计算方法,将有关内容介绍如下:

(1)[德国]《冷却塔规范》(VGB):筒壁日照温度沿半圆按 $\sin\theta$ 分布,沿高度为恒值,筒壁有效温差 $\Delta t_{bo}=25^{\circ}\text{C}$ 。

(2)[美国]《富罗先锋公司自然通风双曲线冷却塔结构规范》:日照筒壁温差 $\Delta t_b[\theta]=\frac{\Delta t_{bo}}{2}(1+\cos\theta)$,其中 $\Delta t_{bo}=11.2^{\circ}\text{C}$ 。

(3)筒壁日照温差分布见图 6,(a)沿半圆按 $\Delta t_{bo}\sin\theta$ 分布;(b)沿全圆按 $\Delta t_{bo}\left(\frac{1+\cos\theta}{2}\right)$ 分布,经比较算出结果两者基本一样。但半圆分布较为符合实际日照分布情况。故本规范采用图 6(a)所示的半圆分布。

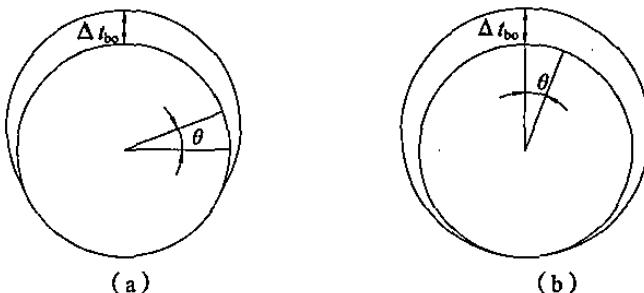


图 6 筒壁日照温差分布曲线

(4)关于壁温差沿高度为恒值问题:实际上,沿高度方向壁厚度与壁温差是变化的。在下环梁及其以上附近范围内,壁厚与壁温差(由于塔内周边有气流短路)变化较大,多次计算日照配筋时,发现在此范围内,内壁配筋按最小配筋率控制。进风口上檐 5m 以上壁厚与壁温差的变化幅度逐渐变小。为简化计算,近似假定壁温差沿高度为恒值。见表 51。

表 51 筒壁下部日照温度应力配筋计算

高程 (m)	壁厚 (m)	子午向配筋(cm^2/m)		环向配筋(cm^2/m)		
		计算配筋		最小配筋率配筋 (0.002)	计算配筋	
		$\Delta t_{bo} = 20^\circ\text{C}$	$\Delta t_{bo} = 10^\circ\text{C}$		$\Delta t_{bo} = 20^\circ\text{C}$	$\Delta t_{bo} = 10^\circ\text{C}$
19.322	0.24	5.361	4.255	3.916	0.273	0
15.456	0.255	5.676	4.285	4.229	0.282	0
11.875	0.450	3.879	3.190	8.123	1.969	0
11.1	0.492	3.445	2.927	8.966	1.566	0
10.9	0.503	3.319	2.852	9.184	1.373	0
9.65	0.571	2.571	2.394	10.543	0	0
8.4	0.639	2.020	2.018	11.902	0	0
8.2	0.65	1.967	1.967	12.120	0	0

注:计算塔的淋水面积为 5000m^2 , 塔高 105m。

(5) 壁温差 Δt_{bo} 取值: 由于日照是太阳辐射不稳定导热过程, 计算复杂, 并需要太阳辐射强度、气温幅值及平均值等资料, 故本规范采取壁温差建议值, 免去太阳辐射不稳定导热计算。据计算: 当最高辐射强度为 $912\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 平均辐射强度为 $292\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 最高气温为 36.8°C , 昼夜平均气温为 29.8°C , 冷却塔壁厚为 $0.16\text{m} \sim 0.25\text{m}$ 时, 计算壁温差为 $10^\circ\text{C} \sim 13^\circ\text{C}$ 。据在秦岭电厂二期工程 1、2 号冷却塔的测试结果, 当最高辐射强度为 $865\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [即 $744\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$], 最高气温为 34.6°C , 壁厚为 $0.235\text{m} \sim 0.275\text{m}$ 时, 最高壁温差为 $11.3^\circ\text{C} \sim 12.2^\circ\text{C}$, 故本规范将最大壁温差定为 $10^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$, 具体可根据各地气温而定。

3.5.8 在施工期间, 某些施工方法会使筒壁承受施工荷载。例如: 悬挂或爬升脚手架的荷载, 起吊塔架的缆绳锚固力等。这时需要验算筒壁在未达到 100% 强度前能否承担施工荷载, 应由施工单位提出并委托设计单位验算。此外, 还应提出施工期备龄期混凝土早期强度及 E 值等资料, 验算内容为施工期屈曲稳定和筒体

强度，并将验算结果反馈给施工单位。如强度不够，应采取局部加固措施，或改进施工方法，一般不宜过多地加大结构断面及配筋。

3.5.9 本条规定了在遇到不均匀地基和受采矿塌陷影响的地区，应复核地基不均匀沉降对各部结构的承载能力和裂缝宽度的影响原则。

(1)由于风荷载是瞬时荷载，地基在风荷载作用下的变形是瞬间的具有弹性变形性的变形，因而当计算风荷载作用下的地基变形时，应用地基土的弹性模量 E 而不用地基土的压缩模量 E_s 。现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 进一步明确了当计算风荷载作用下的地基变形时，应采用地基土的三轴试验不排水模量(弹性模量)代替变形模量。《高耸结构设计规范编制说明》中指出， E 值为 $6E_s$ 及以上。故本规范规定在无实测资料时，偏于安全 E 值可取 3 倍 E_s 计算。

(2)建议的地基变形验算范围：在我国已建成的冷却塔中，由于对不均匀地基均进行了慎重而仔细的地基处理，故很少发生地基严重变形而导致损坏的情况。故建议：

- 1)一般均匀地基，可不验算地基变形。
- 2)塔高在 105m 及以下的冷却塔，遇有不均匀地基时，在采取地基处理及加强塔体构造措施之后，一般也可不验算风荷载产生的不均匀沉降，但应验算自重产生的不均匀沉降。
- 3)当塔高于 105m 并遇有不均匀地基时，除采取上述措施外，还应验算自重及风载产生的不均匀沉降。

(3)容许地基变形值。由于各国冷却塔设计规范及历次《火力发电厂水工设计规范》DL/T 5369 条文中均未规定容许变形值，本规范未在条文中列出容许值，可参考现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135。通常容许平面倾斜值 $0.001D$ (D 为塔基直径)，相邻柱容许不均匀沉降值为 5mm。超过此容许值，应经计算复核。

(4)计算不均匀沉降及其影响时，可根据基础下地质情况，沿塔基划分若干个典型地质地段，然后计算各段沉降值，并计算壳

体、斜支柱和基础的附加内力。

3.5.10 本条主要明确了内力计算应按现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 进行承载能力和正常使用两种极限状态计算，并分别取其最不利的荷载组合进行计算。

3.5.11 本条荷载效应组合均按《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068、《建筑结构荷载规范》GB 50009、《混凝土结构设计规范》GB 50010、《构筑物抗震设计规范》GB 50191 等现行规定，并结合冷却塔具体情况而制定。

(1) 国外几种荷载组合：

1)[英]《冷却塔规范》BS 4485—1996 第四部分冷却塔结构设计第 2.3.1 条，按极限状态设计时，在荷载组合中应考虑第 2.2 条所提及的荷载，并应考虑如下组合：

A. 于冷却塔壳体的设计：

$$S = 1.0G_k + 1.5\phi_c W_k \quad (92)$$

$$S = 1.4G_k + 1.5\phi_c W_k \quad (93)$$

B. 对于支柱的设计：

$$S = 1.0G_k + 1.5\phi_f W_k \quad (94)$$

$$S = 1.4G_k + 1.5\phi_f W_k \quad (95)$$

式中： G_k ——恒载；

W_k ——小时平均风荷载；

ϕ_f 和 ϕ_c 按[英]《冷却塔规范》BS 4485—1996 第四部分冷却塔结构设计第 2.3.5.2 条要求取值。

风荷载所使用的系数 1.5 是在 BS 8110 中的系数为 1.4 的基础上考虑到壳体结构对风荷载较为敏感而加大的。

2)[美]《钢筋混凝土冷却塔薄壳—实用方法与注解》ACI - 334、《混凝土与钢筋混凝土设计规范》ACI 318 当有风载组合时：

$$0.9G + 1.3W \quad (96)$$

当有差异沉降、温度收缩变化时：

$$0.75(1.4G + 1.4T + 1.7W) = 1.05G + 1.05T + 1.275W \quad (97)$$

当有地震荷载时：

$$0.75(1.4G + 1.7W + 1.1E) = 1.050G + 1.275W + 0.825E \quad (98)$$

其中风载是百年一遇离地面 9.144m(即 30ft)高处的基本风压,是从等风速图上相应标高的最大基本风速(mile/h)计算得出的。阵风反应系数 $C=1$ 。

(2)本规范采用的荷载组合。

当考虑基本组合时：

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_W S_{WK} + \gamma_t \phi_t S_{TK} \quad (99)$$

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_W S_{WK} + \gamma_t \phi_t S_{TK} \quad (100)$$

当考虑地震作用偶然组合时：

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_W \phi_{WE} S_{WK} + \gamma_t \phi_t S_{TK} + \gamma_E S_E \quad (101)$$

此荷载组合主要考虑了下列因素：

1)风荷载基本风压按 50 年一遇离地面 10m 高处的 10min 平均最大风速计算,风荷载效应 S_{WK} 已考虑风振系数 β (不包括内吸力)。

2)温度作用效应已考虑混凝土徐变系数 $C_t = 0.5$ 。

3) ϕ_W, ϕ_t 荷载效应组合系数,对于一般地区均采用 0.6。一般地区系指历年最大风速均不出现在冬季的地区。根据东北电力设计院对赤峰站 31 年气象资料(见表 52)和西北电力设计院对西安、济南、济宁等地资料(见表 53)分析,认为采用值是合适的。

表 52 赤峰站 31 年气象资料分析

项目	历年大风为主		冬季大风为主		历年低温为主	
	大风为主 v (m/s)	相应低温 t (°C)	冬季大风为主 v (m/s)	相应低温 t (°C)	相成风速 v (m/s)	低温为主 t (°C)
60 年一遇取值	37	-18.3	28.8	-26	11	-32.2
相应风压、温差与最大值之比	1	0.67	0.61	0.85	0.09	1

续表 52

项目	历年大风为主		冬季大风为主		历年低温为主	
	大风为主 v (m/s)	相应低温 t (°C)	冬季大风为 主 v (m/s)	相应低温 t (°C)	相成风速 v (m/s)	低温为主 t (°C)
30年一遇取值	33.3	-16	26	-24.2	10	-31.4
相应风压、温差与最大值之比	1	0.628	0.61	0.83	0.09	1
60年一遇/30年一遇	1.11	1.14	1.11	1.07	1.10	1.025

注:1 相应温差与最大值之比已考虑了塔内气温为+10°C。

2 基本风压等于 $v^2/1600$ 。

3 表中各值均按 $\bar{v}=v+2\sigma$ 及 $\bar{t}=t-2\sigma$ 计算,其中 \bar{v}, \bar{t} 为均值, σ 为均方差极值。

表 53 西安、济南、济宁气象资料统计

地区	项目	历年大风为主		冬季大风为主		历年最低气温为主	
		大风为主 v (m/s)	相应 低温 t (°C)	冬季大风 为主 v (m/s)	相应低温 t (°C)	相应风速 v (m/s)	低温为主 t (°C)
西安	30年一遇取值	24	-9.7	—	—	7.2	-23
	相应风压、温差与最大值之比	1	0.569	—	—	0.09	1
济南	30年一遇取值	29	-12.2	—	—	11.9	-23
	相应风压、温差与最大值之比	1	0.672	—	—	0.168	1
济宁	30年一遇取值	30	-12.2	—	—	15.5	-21
	相应风压、温差与最大值之比	1	0.716	—	—	0.266	1

注:1 相应温差与最大值之比已考虑了塔内气温为+10°C。

2 基本风压等于 $v^2/1600$ 。

3 表中各值均按 $\bar{v}=v+2\sigma$ 及 $\bar{t}=t-2\sigma$ 计算,其中 \bar{v}, \bar{t} 为均值, σ 为均方差极值。

需要说明的是,表值仅为冬季与非冬季一日内最大风速和低温各自极值的统计值,并非同一时刻的相应值。表列大风为主相应气温(为极值的 0.596~0.716,已考虑塔内气温为 +10°C)并非同一时刻出现,故采用 $\psi_t = 0.6$ 是偏于安全的。表列低温为主相应大风仅为极值的 0.09~0.266,考虑到风的随机性,并遵照《建筑结构荷载规范》GB 50009 采用 ψ_w 亦是偏于安全的。这样选用也有利于向国家新规范靠拢。

但是,对于历年最大风速出现在最冷季节(12月、1月、2月)的某些地区, ψ_w 、 ψ_t 取 0.6 可能偏小时,条文规定了应按气象统计资料来确定,这时, ψ_w 取 30 年一遇最低气温时相应的大风荷载与 50 年一遇最大风荷载的比值且不小于 0.6; ψ_t 取 50 年一遇最大风荷载时相应的低气温与 30 年一遇最低气温的比值且不小于 0.6。

4) 在基本组合中,永久荷载的分项系数,当其效应对结构有利时取 1.0。当其效应对结构不利时,对由可变荷载效应控制的组合,应取 1.2;对由永久荷载效应控制的组合,应取 1.35;风荷载的分项系数取 1.4。

在本次修改中对基本组合中的永久荷载分项系数的影响进行了分析计算,从计算结果看,当永久荷载分项系数大于 1 时,对塔筒、支柱的内力有一定的影响,但配筋影响较小;对环基而言内力和配筋都有所增加。为与现行的《建筑结构荷载规范》GB 50009 一致,并参考《冷却塔规范》BS 4485—1996 的规定,给出了不同的永久荷载分项系数,设计时应视其效应进行选取。

5) 在地震作用效应的偶然组合中,本次修改中对永久荷载分项系数按照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《构筑物抗震设计规范》GB 50191 进行了调整,即当其效应对结构有利时取 1.0;当其效应对结构不利时取 1.2。其他荷载的分项系数和组合系数未变。永久荷载分项系数的调整,将会使偶然组合下的斜支柱轴力增大,为满足轴压比的要求,可将地震区冷却塔斜支柱的混凝土强度等级提高到 C35~C40。

(3) 荷载组合算例分析见表 54。

表 54 各种荷载组合的算例分析

(基本风压 $w_0 = 400 \text{ Pa}$, 室外最低气温 -20°C , 淋水面积 $5,000 \text{ m}^2$, 塔高 105 m)

比较项目	本 规 范			徐变系数 $C_T = 0.65$	
	内排不考虑日照	日照壁温差 10°C	日照壁温差 20°C	荷载组合按本规范	荷载组合按本规范, 并考虑重要建(构)筑物系数 1.1
荷载组合	主要组合 $G + 1.4W + 0.5T$ 附加组合 $G + 0.6 \times 1.4W + 0.5T$			主要组合 $G + 1.4W + 0.6 \times 0.65T$ 附加组合 $G + 0.6 \times 1.4W + 0.65T$	主要组合 $1.1G + 1.4W + 0.6 \times 0.65T$ 附加组合 $1.1G + 0.8 \times 1.4W + 0.65T$
风载	$q = -1120 \text{ Pa}$ $\beta = 2.0$			$q = -1129 \text{ Pa}$ $\beta = 2.0$	
壁温差计算有关参数	$\alpha_0 = \alpha_i = 23.26 \eta_0 W / (\text{m}^2 \cdot {}^\circ\text{C})$ $\lambda_b = 1.98 W / (\text{m} \cdot {}^\circ\text{C})$			$\alpha_0 = \alpha_i = 13.96 W / (\text{m}^2 \cdot {}^\circ\text{C})$ (按原《火力发电厂水工设计规定》SDGJ 5—78 规定取值) $\lambda_b = 1.98 W / (\text{m} \cdot {}^\circ\text{C})$ (按原《火力发电厂水工设计规定》SDGJ 5—78 规定取值) 内排不考虑日照	

设计强度(Pa)		$R_w = 165 \times 10^5$ $R_G = 3100 \times 10^5$			$R_w = 165 \times 10^5$ $R_G = 3100 \times 10^5$	
钢筋用量(t)	子午向外排 G_U	82.554	82.554	82.554	83.119	88.974
	子午向内排 G_{UN}	65.937	76.139	89.687	65.937	68.763
	环向外排 G_V	72.136	72.136	72.136	73.969	74.237
	环向内排 G_{VN}	72.136	72.136	72.136	73.969	74.237
	钢筋总用量 G	292.764	302.965	316.513	296.448	306.210
钢筋用量增减值(t)		0	10.201	23.748	3.684	13.446
钢筋用量增减百分比(%)		100	103.48	108.11	101.26	104.59

1)本规范中考虑日照壁温差 10°C 与不考虑日照壁温差相比,子午向内排钢筋总用量差 10.201t 。

2)本规范与德国(VGB)规范相比,当不考虑日照时,本规范比德国规范用钢量少 3.9t ,当考虑日照壁温差 10°C 时,比德国规范用钢量增加 6.3t ,说明本规范可靠度与德国规范相近。本规范可靠度 $\beta=3.2$,失效概率 $P_f \leqslant 6.9 \times 10^{-4}$ 。

3)关于重要建(构)筑物系数:如该系数考虑为 1.1,则将增加钢筋用量 9.76t (增率 3.23%),考虑到本规范中风荷载分项系数采用 1.4,风振系数 β 采用 2 左右,已增加用钢量 10%~14%,故本规范中重要建(构)筑物系数采用 1.0。

4)按本规范荷载组合对日照壁温差为 0°C 、 10°C 和 20°C 分别作了计算,相应钢筋总用量为 292.764t 、 302.965t 和 316.513t ,钢筋增加量分别为 0t 、 10.201t 和 23.748t ,增加幅度较大,故今后对日照壁温差及荷载组合应作进一步研究。

5)本规范算例分析的基本气象参数为:基本风压 $w_0 = 400\text{Pa}$,室外最低气温 -20°C ,塔内气温 10°C 。适用于河南、河北、湖南、湖北、安徽、四川、贵州等 14 个省的大部分地区,具有广泛的代表性。对于东北、西北(甘、宁、青)、西藏、新疆、内蒙古则基本上可分为 $w_0 = 700\text{Pa}$ 、室外最低计算温度为 -30°C 和 $w_0 = 600\text{Pa}$,室外最低计算气温为 -25°C 两种典型算例。

对于 $5,000\text{m}^2$ 淋水面积、高 105m 的冷却塔在 $w_0 = 400\text{Pa}$ 、室外最低气温为 -20°C 的情况下,按本规范荷载组合得出的配筋见表 55。对于 $w_0 = 700\text{Pa}$ 、室外最低气温为 -30°C 的配筋见表 56。

表 55 配筋特点表

(淋水面积 5000m^2 , 塔高 105m , $w_0 = 400\text{Pa}$, 室外最低气温 -20°C)

钢筋部位	标高(m)	配筋特点
子午向内排钢筋	105~68.335	$A_g \min$ (最小配筋率配筋)
	64.49~26.68	主要组合控制配筋
	23~8.2	$A_g \min$ 配筋

续表 55

钢筋部位	标高(m)	配筋特点
子午向外排钢筋	105~87.75	$A_{g\min}$ (最小配筋率配筋)
	76.06~15.46	主要组合配筋
	11.88~8.2	$A_{g\min}$ 配筋
环向内、外排钢筋	105~99.42	附加组合控制配筋
	99.42~9.65	$A_{g\min}$ 配筋
	9.65~8.2	附加组合配筋

表 56 配筋特点表

(淋水面积 $5000m^2$, 塔高 105m, $w_0 = 700Pa$, 室外最低气温 $-30^\circ C$)

钢筋部位	标高(m)	配筋特点
子午向内排钢筋	105~87.75	$A_{g\min}$ 配筋
	76.05~11.1	主要组合控制配筋
	10.9~8.2	$A_{g\min}$ 配筋
子午向外排钢筋	105~99.42	$A_{g\min}$ 配筋
	87.75~10.9	主要组合控制配筋
	9.65~8.2	$A_{g\min}$ 配筋
环向内外排钢筋	105~34.08	附加组合控制配筋
	30.37~9.65	$A_{g\min}$ 配筋
	9.65~8.2	附加组合配筋

(4) 结论: 从以上两表分析, 对于 $w_0 = 400Pa$, 室外计算温度为 $-20^\circ C$ 时子午向钢筋顶部和底部为构造配筋, 喉部附近至下环梁以上为主要组合控制配筋; 对环向钢筋上、下环梁为附加组合控制配筋, 其他均为构造配筋。对于 $w_0 = 700Pa$, 室外最低气温为 $-30^\circ C$ 时, 不过是子午向主要组合控制配筋段向上、下伸展, 环向附加组合控制配筋段由顶、底部向中部伸展而已。这些均说明双曲线冷却塔的配筋很大部分是构造配筋。本规范可靠度指数为 3.2 以上, 失效概率 $P_f \leqslant 6.9 \times 10^{-4}$, 与德国 VGB 规范可靠度相近, 说明本规范具有相当的安全保证。

3.5.12 本条系在原规范第2.6.11条的基础上修改而成。

主要修改了荷载效应组合的表达方式。

1 本条指出冷却塔塔筒按正常使用极限状态计算时,应按短期效应组合条件验算裂缝,短期最大裂缝宽度 $\omega_{smax} \leq 0.2\text{mm}$ 。

2 关于裂缝验算中温度内力计算时刚度取值问题。

(1)冷却塔内力计算中温度力矩是按均质弹性材料计算的。

$$M = E_b J \Delta t_b / h \quad (102)$$

式中: E_b ——混凝土计算弹性模量;

J ——未开裂的匀质截面惯性矩。

此公式说明温度内力与筒壁刚度成线性关系。

(2)钢筋混凝土构件使用阶段不出现裂缝的刚度 B_d :

$$B_d = 0.85 E_b J \quad (103)$$

(3)使用阶段在短期荷载作用下受拉区出现裂缝的刚度 B_s ,按《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 第7.2.3条执行。

在制定本条例及说明时,验算了东北电力设计院设计的伊敏电厂冷却塔下刚性环的环向裂缝(其工况条件见后)宽度为0.32mm,相应开裂刚度(不考虑温度内力折减) $B_s = 0.28 E J$ 。

(4)冷却塔上、下刚性环是塔筒的重要部位,不宜出现较大的裂缝宽度,因而建议采用I、II阶段的平均刚度 $(B_d + B_s)/2$ 作为裂缝验算刚度较为安全,在伊敏冷却塔工况条件下采用 $(0.85 + 0.28)/2 \approx 0.6$ 作为刚度(温度工况)折减系数是较安全的。

将0.6的刚度折减系数乘以温度内力,并重新按本规范(3.5.12-1~3.5.12-3)式进行正常使用极限状态验算,最大裂缝宽度为 $0.165\text{mm} < 0.2\text{mm}$ 。

(5)冷却塔下刚性环处使用阶段受拉区出现裂缝的刚度简化计算公式的采用。根据以上验算,在下刚性环处温度内力折减系数采用0.6,而且在一般条件 $h/h_s \leq 1.15$ 内。使用阶段在受拉区出现裂缝的矩形截面短期刚度可采用以下简化公式:

$$B_s = (0.3 + n\mu) E_b J \quad (104)$$

在冷却塔上、下刚性环处常用配筋率范围为 0.002~0.015，按简化公式计算，

$$B_s = (0.313 \sim 0.35) E_h J \quad (105)$$

如采用 I、II 阶段平均刚度折减系数，则为：

$$\begin{aligned} (B_d + B_s) / 2E_h J &= (0.85 + 0.313 \sim 0.35) E_h J / 2E_h J \quad (106) \\ &= 0.58 \sim 0.6 = 0.6 \end{aligned}$$

在验算上、下刚性环裂缝时，可初步将 0.6 乘以温度内力后重新按本规范第 3.5.12 条的相关规定验算裂缝宽度，符合 $\omega_{smax} \leq 0.2$ 即可。

3 制定本条时，曾对东北电力设计院设计的伊敏电厂冷却塔进行了验算。该塔高 115m，±0.00 处直径为 90.314m。基本风压为 0.687kN/m²，风振系数为 1.9，室外计算气温为 -44.27℃。按正常使用极限状态短期荷载效应组合，采用公式(3.5.12-1~3.5.12-3)验算得出如下结果，可供参考：

(1) 凡属构造配筋部位，如环向(上、下刚性环除外)及子午向的上、下刚性环处均可不验算裂缝。

(2) 子午向配筋由承载能力极限状态计算中主要组合控制。伊敏筒壁按正常使用极限状态公式(3.5.12-1~3.5.12-3)验算时(未考虑裂缝刚度对温度内力折减) $\omega_{smax} = 0.2$ ，故一般工况条件下可不验算裂缝宽度。

(3) 上、下刚性环处环向钢筋由承载能力极限状态计算中附加组合控制。由于内、外壁温差及边缘干扰在此处产生较大的环向温度轴力和力矩。裂缝验算时，一般情况下裂缝宽度均 $> 0.2mm$ 。考虑到温度内力随筒壁刚度成线性关系，开裂后，刚度随裂缝宽度降低，温度内力随之降低，裂缝宽度不再发展或减少。伊敏电厂冷却塔下刚性环如不考虑温度内力折减，裂缝宽度为 0.319mm。如考虑裂缝后刚度降低为 $0.6 E_h J$ ，温差内力折减后，重新内力组合计算，裂缝宽度减少为 0.165mm。可见，在一般工况下温度内力乘以 0.6 的折减系数后可不验算裂缝。

3.5.13 混凝土徐变降低了结构刚度,从而使温度内力相应降低。但影响徐变因素较多,正确估算徐变值较为困难,本规范在计算温度应力时,混凝土的徐变系数 C_s 采用0.5,是根据多年来使用的经验数据所制定的。

3.5.14 本条是根据国外有关规范及我国情况制定的。

(1)据调查冷却塔风筒内力分析理论,国外有关规范规定如下:

1)德国VGB规范第1.2.1条规定:

A.下部为连续支承冷却塔壳体按薄膜理论分析。包括:考虑温度作用的弯曲变形解;上下边缘干扰;下边缘按深梁计算附加应力。

B.下部为连续支承冷却塔壳体按弯曲理论分析。包括:下部边缘按深梁计算附加应力。

C.下部为非连续(离散)支承冷却塔壳体按弯曲理论分析。

2)[美]《钢筋混凝土冷却塔薄壳—实用方法与注解》ACI-334第4.2.2.1条规定:对于冷却塔及其支承结构的设计,以公认的弹性薄壳弯矩理论为基础的分析方法被认为是最适当的。以薄壳的薄膜理论为基础的分析方法如果能用适当的方法进行局部弯曲计算也是可以使设计满意的。

3)[美]《富罗先锋公司自然通风双曲线冷却塔结构规范》第2.2.1.1条规定:静力分析必须根据公认的薄弹性壳体弯曲理论进行。

4)[英]《冷却塔规范》BS 4485第四部分冷却塔结构设计指出:“薄膜”分析法假定壳体的一切弯矩可以忽略,而只考虑法向力和切向力的作用,它已被“弯矩”分析法所改进……因此,建议采用它。

综上所述,对于冷却塔壳体的内力分析,倾向于用“弯曲”理论。

(2)在我国多年来也是以“薄膜”和“弯曲”理论并用的。然而,近年来,随着电子计算机和计算方法的不断发展,国内目前在工程

中,以弯曲理论为基础的有限单元法解,基本代替了“薄膜”理论的计算。根据这种现状,本条规定按旋转壳体有矩理论计算,同时按照各单位不同程序的不同计算习惯,其塔筒底部支承条件可按离散考虑。

当按连续支承计算时,风筒下环梁应迭加按深梁计算由风筒自重及风荷载等所产生的内力。

3.5.15 德国(VGB)规范、英国(BS)和美国(ACI)及美国富罗先锋公司等有关规程规范,对冷却塔壳体的弹性稳定(或称为整体屈曲稳定),均规定按下式计算:

$$q_{cr} = CE (h/r_0)^{\alpha} \quad (107)$$

式中: q_{cr} ——风筒弹性临界压力(kPa);

E ——混凝土弹性模量(kPa);

h ——风筒喉部壁厚(m);

r_0 ——风筒喉部半径(m);

α ——系数,取 7/3 或 2.3;

C ——经验系数。

这个经验公式是验算冷却塔壳体塔顶的临界失稳压力的,其中略有差异的是 C 值这个经验系数,目前认为采用 0.052 较为合理。

根据德国(VGB)规范规定,其稳定安全系数 $K_B = q_{cr}/w_{(z)} \geq 5$, $w_{(z)}$ 为塔顶风压标准值。而美国(ACI—384)规范却提出, q_{cr} 应至少为 $w_{(z)}$ 的两倍,即 $K_B = q_{cr}/w_{(z)} \geq 2$ 。显然,这两者表示出来的安全度有很大的差别。

然而,美国富罗先锋公司的《自然通风双曲线冷却塔结构规范》第 2.5.1 条规定双曲线冷却塔塔顶最大允许风压:

$$w_{(z)max} = \frac{0.052F_2E}{F_1} \left(\frac{h}{r_0}\right)^{2.3} \quad (108)$$

公式揭示了 $K_B = q_{cr}/w_{(z)} \geq 5$ 的含意,也同时表明了 $K_B = q_{cr}/w_{(z)} \geq 2$ 的意思。

式中： F_1 ——临界风压的安全系数，不小于 2；

F_2 ——临界风压的降低系数，它包括各种不利因素，如：几何外形的缺陷，混凝土裂缝，风压沿着圆周的变化，内吸力，柱支承柔度以及自重影响等。此系数采用 0.4。

这表明，美国(ACI—334)规范仅考虑了 F_1 的单一因素，而德国(VGB)规范和美国富罗公司的规程则考虑了 F_1 、 F_2 两个综合因素， $F_2/F_1=0.4/2=0.2$ ； $1/0.2=5$ (K_B 与 w_{cr} 为倒数关系)。故本规范的冷却塔壳体弹性稳定安全系数取用 $K_B \geq 5$ 是有据可依的。

德国(VGB)规范提出了局部稳定公式：

$$0.8K_B\left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{cm}}\right) + 0.2K_B^2\left[\left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{cm}}\right)^2\right] = 1 \quad (109)$$

式中： K_B ——局部稳定安全系数，不小于 5；

σ_r 、 σ_m ——相应的环向、子午向的计算应力；

σ_{cr} 、 σ_{cm} ——环向、子午向临界压力：

$$\sigma_{cr} = \frac{0.985E}{\sqrt[4]{(1-\nu^2)^3}} \left(\frac{h}{r_0}\right)^{4/3} K_r \quad (110)$$

$$\sigma_{cm} = \frac{0.612E}{\sqrt[4]{(1-\nu^2)^3}} \left(\frac{h}{r_0}\right)^{4/3} K_m \quad (111)$$

式中： r_0 ——喉部半径；

h ——筒壁厚度；

K_r 、 K_m ——系数，由表查得；

ν ——混凝土泊松比。

用相关的图表来验算筒壳的弹性稳定，这种方法即是原联邦德国 Bochum 大学的试验成果。计算表明，采用这种方法计算的弹性稳定，是考虑了自重和风荷载同时作用的整体安全系数，比较切合实际的受力情况，而且可以得到塔体上每个环的本身的安全系数。

目前，它仍是验算筒壳局部稳定的比较成熟的方法，所以本规范将此列入了条文。

目前采用有限元整体弹性屈曲稳定分析,其安全系数的衡量和判断标准尚需研究,故暂未写入本规范。

目前冷却塔进行施工期弹性稳定验算的做法及控制原则尚在研究,故条文中未作具体规定。

3.5.16 本条明确斜支柱应对塔筒下传至柱顶、柱底内力按承载能力和正常使用极限状态计算,并取其最不利情况设计。冬季停运状态的复核,仅是过去没有条件进行整体计算斜支柱内力的情况下沿用的方法,各国规范均未载有此种核算。因而此种工况只有在当需要进行复核时采用,而且所采用的上、下端温度、气温及风载应是冬季实际的数据,以免造成过大的内力。

3.5.17 斜支柱纵向弯曲的计算长度 L_0 主要参考以下资料:

(1)《水工钢筋混凝土结构学》(华东水利学院等编,水利电力出版社,1974年):

两端完全固定 $L_0 = 0.5L$ 。

两端弹性固定 $L_0 = 0.7L$ 。

一端固定、一端为不移动铰接 $L_0 = 0.7L$ 。

一端固定、一端自由 $L_0 = 2L$ 。

(2)德国(VGB)规范:

两端固定柱:径向 $L_0 = 0.8L$;切向 $L_0 = 0.6L$ 。

一端固定柱、一端铰接:径向 $L_0 = 0.9L$;切向 $L_0 = 0.7L$ 。

根据冷却塔斜支柱的支承特点,本规定考虑下端为固定、上端为铰接,比较符合实际,为此采用:径向 $L_0 = 0.9L$,环向 $L_0 = 0.7L$ 。

3.5.18 本条文规定了冷却塔地基承载力验算时的荷载组合。

冷却塔地基承载力验算时,应按《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011进行,按该规范第5.2条基础底面压力 $P(P_{max})$ 均采用设计值,地基承载力 f 亦采用设计值。故冷却塔地基承载力验算时应考虑荷载分项系数。

在式(3.5.18)中,自重及风荷载是主要荷载,现对其荷载分项

系数取值说明如下：

(1)自重荷载分项系数：冷却塔塔筒是薄壳结构，筒壁自重所占塔总重的比例最大。壁厚尺寸由用以穿对销螺栓的混凝土撑杆及塑料管的长度控制，斜支柱截面尺寸及池壁厚度控制亦较严。根据《双曲线冷却塔施工与质量验收规范》GB 50573，冷却塔截面尺寸允许偏差，环基、池壁、斜支柱： $+5\text{mm}$ ，筒壁： $+8\text{mm}$ ， -5mm 。根据调查，在冷却塔上自重超载远小于10%，同时对塔筒这样高耸结构上部自重正负偏差值传至基底会相互抵消，故自重分项系数采用1.1是偏于安全的。

(2)风荷载分项系数：冷却塔采用的基本风压乘以风振系数后已接近50年一遇的瞬时最大风压。这样的风压在塔筒上经富氏级数展开后，仅在 72° 处产生最大子午向压力，对于这样的瞬间风荷载效应的峰值，引起地基变形及承载力破坏是来不及的。因而可不考虑风振系数。

公式(3.5.18)中 S_{wk} 风效应值是按 72° 处最大一点峰值压力确定的。风荷载效应在环向是不均匀的，但正如英国《冷却塔规范》BS-4485第四部分第5.3条指出的那样：“壳体有部分内力重分布和吸收局部风荷载效应峰值的结构作用”，“柱子和基础能有限度对子午向内力重分布”，“柱的风荷载效应可取相邻两柱平均值的85%”。故在环向方面、壳体、斜支柱基础组成一个较大的环，可对基底压力环向重分布及调整峰值起空间协调作用。考虑到国内外冷却塔地基验算的习惯经验，风荷载分项系数采用1是可取的。

3.5.19 本条强调冷却塔基础计算方法应按塔筒、支柱、基础、地基整体分析，其计算结果较为正确。只有在缺乏整体分析程序时，才采用手算按斜支柱下传力分别计算，但由于各单位具体计算中取值不一致，可按过去借用方法作相应补充：

(1)把环板和倒T型基础分列，以便清晰。至于单独基础计算比较简单，条文内未列。

(2) 关于风载产生的环向拉力,由于塔筒上承受风载呈 $\sum_{k=0}^m a_k \cos k\theta$ 富氏级数分布,因此塔筒传至基础的风载内力为非轴对称分布,整体分析计算中的环拉力远小于自重(轴对称荷载)产生的环拉力,这是比较符合实际的。

以往在无整体计算程序的情况下,大多数单位采用 $1.3W/4$ 作为均布轴对称内力计算,这是偏大的。

(3) 关于地震产生的基础内的环向拉力,由于垂直、水平地震呈 $\sum_{k=0}^1 a_k \cos k\theta$ 分布,即垂直地震为轴对称分布,水平地震为 $a_1 \cos \theta$ 分布,因此地震作用在基础内产生环拉力比例较大。西北电力设计院在利用哈蒙 TSMTOWER 程序进行地震分析时,发现在 8 度,中软场地地震作用在基础环中的环拉力有可能大于风载引起的环拉力而成为地震组合控制。

(4) 在所有环拉力计算中均应考虑地基与基础变形协调。

(5) 冷却塔动力分析中,地基切向刚度可采用动剪切刚度,该刚度由勘测部门根据剪切波速计算提出。在缺乏资料时,暂采用 3 倍静地基剪切刚度。

3.5.20 基础的上拔力 S 指风荷载作用下的拉力大于自重作用下的压力时两者的差值。规定:

在承载能力极限状态下: $S = S_{GK} + 1.2S_{WK}$

在正常工作极限状态下: $S = S_{GK} + S_{WK}$

这里 S_{GK} 为压力, S_{WK} 为拉力。

美国《富罗先锋公司冷却塔结构规范》规定:在工作荷载组合下,基础不应上拔。在计算荷载组合下,基础上拔允许平面圆心角不大于 30° 。

德国(VGB)规范指出:在 $S_{GK} + S_{WK} + S_{TK}$ 荷载组合下,断裂的基底接缝是不允许的,在 $S_{GK} + 1.5S_{WK}$ 荷载组合下,允许断裂的基底接缝在不大于 30° 的扇形内。

考虑到环板型和倒 T 型基础底面上，在正常工作极限状态下，一般不应出现上拔力，这对于一些位于大风地区的塔不易满足。西北电力设计院在工作验算中发现，在风载稍大的地区，按 $S_{GK} + 1.4S_{WK}$ 验算，上拔力产生的范围大于圆心角 40° ，不易满足小于 30° 的条件。考虑到过去工程中未规定此要求，实际工程中亦未发现上拔破坏的现象，为此，本条文仅规定在 $S_{GK} + 1.2S_{WK}$ 情况下，上拔力产生的圆心角不大于 30° ，并建议基础环的施工接缝应大于 30° 圆心角。当上拔力范围不能满足时，应采取措施（如利用基础以上土重或加大基础重量等）解决。

对于单独基础则要求在正常工作极限状态下不出现上拔力，且下压力与上拔力之比不小于 1.2。其中 1.2 引自现行国家标准《高耸结构物设计规范》GB 50135 在短期荷载作用下的自重抗拔安全系数。

3.6 机械通风冷却塔的荷载及内力计算

3.6.1 本条规定了设计机械通风冷却塔时应考虑的荷载。

3.6.2 本条规定了顶板的某些部位无安装、检修荷载时，仅考虑活荷载的规定。当有检修荷载时，应按二者中大的考虑。

3.6.3 参考现行的《建筑结构荷载规范》GB 50009，计算框架时顶板活荷载和检修荷载采用 0.7 的折减系数。

3.6.4 根据以往工程实践，风机和电动机的振动荷载可按当量静荷载计算，计算方法参见附录 B。

3.6.5 对于安装大型风机的机械通风冷却塔，有的常采用旋转薄壳结构。这时，设计壳体结构要考虑温度作用，计算可参照自然通风冷却塔有关条文进行。

3.6.6 本条对多格毗连的机械通风冷却塔的结构计算及构造原则作了一般规定，具体工程执行时可以参照。

3.6.7 按承载能力极限状态计算框架时，根据机械通风冷却塔的特点考虑两种组合。

(1) 基本组合:除各项目自重、活荷载外,考虑风荷载的组合。
(2) 偶然组合:除各项目自重、活荷载外,考虑地震荷载的组合。由于机械通风冷却塔高度较低,计算地震荷载时,可不计算风荷载。

鉴于风和地震荷载分别组合计算,按规范要求,地震设计烈度7度及以上时均应计算。这与第3.5.11条的区别在于,自然通风冷却塔地震荷载组合时,虽考虑了1/4风载,但由于高耸结构风荷载作用较大,以至7度时除软场地外,地震荷载组合不会起控制作用。而机械通风冷却塔不是高耸结构,两个组合何者起控制作用,目前难以判断,故应自7度起算。

3.6.8 按正常使用极限状态计算验算裂缝宽度时,按现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068的规定,采用基本组合时的荷载效应标准值进行。地震荷载组合可不考虑裂缝宽度验算。

3.6.9 本条是根据多年设计实践的经验制定的。如果振幅过大,会造成或加大塔体框架裂缝,对于塔体框架在震后的使用及防腐均不利。

3.7 淋水装置构架

3.7.1 由于冷却塔运行的特殊性,本条对淋水装置的构架结构作了一般规定。

3.7.2 根据目前冷却塔的发展和使用情况,对某些情况作了规定:

- (1) 当为横流式冷却塔时,可采用配水管或配水池,其配水池宜做成钢筋混凝土结构。
 - (2) 当采用管式配水时,其管材宜采用塑料或钢管。
- 3.7.3** 根据工程实践的总结,本条提出了在淋水装置构架设计中应考虑的几个基本要求。提高材质性能、减小截面尺寸以利通风是当前的发展趋势。

3.7.4 本条规定了在设计淋水构架时所要考虑的基本荷载。其中应着重说明的是第3款。据调查,结垢有的很厚。如徐州电厂垢厚达5mm。结垢厚度在特殊情况下,可酌情增减。垢的容重有些塔经测定高达 22.0kN/m^3 ,建议一般情况下可按 20.0kN/m^3 计算(对软垢还可减小)。

淋水填料表面结垢厚度每侧宜按1.0mm考虑,在特殊情况下可酌情增减。当填料高度1m时,结垢重度可按 2.5kN/m^2 计算;当填料高度1.5m时,结垢重度可按 3.7kN/m^2 计算。海水循环水中易形成硬垢和污垢,硬垢是水中一些溶解盐类物质结晶析出形成的固相沉积物,污垢是海水中的海泥及海生物的沉积物粘附在冷却塔的填料表面或塔体结构面上形成的。硬垢和污垢的形成量与运行时浓缩倍率、阻垢剂与杀菌剂的投加有关,为保证海水冷却塔的安全,提出海水塔结垢厚度参考值。海水冷却塔中淋水填料表面结垢厚度大于淡水冷却塔淋水填料表面结垢厚度,宜根据类似工程经验确定。如没有类似工程资料,海水冷却塔填料表面结垢厚度可按1.3mm~2.0mm考虑。

淋水填料表面水膜厚度每侧按0.5mm~1.0mm考虑,当填料高度1m时,水膜重量 0.6kN/m^2 ~ 1.3kN/m^2 ;当填料高度1.5m时,水膜重量 1.0kN/m^2 ~ 2.0kN/m^2 。

挂冰荷载按整个淋水填料水平投影面积考虑,可采用 1.5kN/m^2 ~ 2.5kN/m^2 。

风筒检修荷载仅作用在风槽、上层梁构件自身顶面范围内,不按全层面受载考虑。

排烟冷却塔塔内,当烟道支撑布置在中央竖井上方或构架柱上时,结构计算应计算烟道的荷载。

3.8 构造要求

3.8.1 自然通风冷却塔筒壁最小厚度,德国(VGB)规范规定:“冷却塔壳体壁厚不应小于160mm,在有根据的情况下不应小于

140mm”。本条根据国内情况按塔的面积大小作了相应的规定。考虑到屈曲稳定和保证筒壁混凝土施工方便,比原标准略有提高。海水冷却塔、排烟冷却塔保护层厚度比普通淡水塔要大许多,结构厚度也相应增大。对于再生水冷却塔,应根据水质条件确定筒壁最小厚度。

3.8.2 模型试验及数值分析均表明:塔顶刚性环的存在,可以显著提高冷却塔的抗风稳定性,提高幅度甚至超过20%。刚性环的存在,对塔顶区域的内力也有明显影响,故要重视其设计,并在分析时予以考虑。塔顶上刚性环可兼作塔顶检修平台(见图7)。

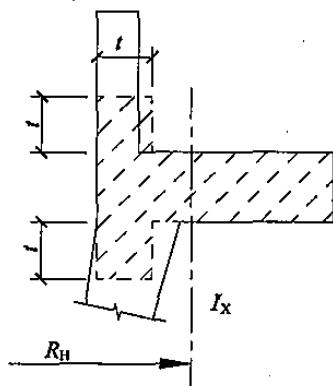


图7 塔顶上刚性环

t —刚性环上下两侧壳体平均壁厚(m)

刚性环应按不应出现裂缝的钢筋混凝土构件进行设计。其尺寸应满足如下要求:

$$\frac{I_x}{R_H} \geq 0.003 \quad (112)$$

式中: I_x ——刚性环有效区域对截面形心轴的惯性矩(m^4)。环顶竖墙位于外圈时,算法类似;

R_H ——壳顶刚性环 I_x 所在轴半径(m);

3.8.3 国外有关规程规范规定的最小配筋率:

美国(ACI—334)规定壳体环向及子午向每个方向上均为混

混凝土计算断面的 0.4%。

[美]福罗先锋公司规定全部壳体每个方向的最小壳体钢筋，不小于混凝土断面的 0.4%。

德国(VGB)规定壳体每个方向的最小配筋 $\mu \geq 0.3\%$ 的混凝土断面。

综合国内外情况,规定的最小配筋率,即壳体两侧合计为混凝土计算断面的 0.4%,也即每边 0.2%。

3.8.4 塔筒的双层配筋间应设置直径不小于 6mm 的拉筋,系参考德国(VGB)规程规定:在壳的整个区段内,应预先考虑在两层配筋网之间每平方米配有 2 个 S 弯钩的拉筋,可以保证钢筋的保护层厚度和筒壁的受力强度。

3.8.5~3.8.7 这几条是根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 有关条文制定的。

3.8.8 本条是参照《混凝土结构构造手册》(第四版)(中国有色工程设计研究总院编,中国建筑工业出版社,2012 年 6 月)及多年来设计实践的经验而制定的。

3.8.9 冷却塔各部位的受力钢筋保护层最小厚度的规定,是根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中对在潮湿环境条件的混凝土构件的要求制定的。

参考现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的规定,按化学腐蚀环境提高了排烟冷却塔和海水冷却塔混凝土的保护层厚度。

为防止氯离子等浸蚀,海水冷却塔保护层厚度比淡水环境要大许多。

拉筋的保护层厚度可不受本条限制。

3.8.10 在壁厚较厚的地方允许做成凹槽止水。在筒壁厚度小于 300mm 区段的水平施工缝,应设有白铁皮或钢板或橡胶板止水片。

3.8.11 本条明确当集水池底板与柱基础分离时,底板宜设构造

钢筋。

3.8.12 本条是根据以往冷却塔运行检修经验,为方便清污、排水等要求而制定的。

3.8.13 本条是根据以往设计经验,为防止大面积整片底板因温度和混凝土在凝固过程中产生的收缩等作用引起开裂,及防止底板与塔筒竖井荷载差异而产生沉降开裂而制定的。

3.8.14 本条是根据以往工程一般的做法制定的。

3.8.15 本条是根据国内多年工程设计的实践经验而制定的,同时还明确了适用于机械通风冷却塔。

3.8.16 本条明确了尽量减小冷却塔环基在施工时由收缩及闭合温差产生的收缩及温度裂缝的构造措施。

3.8.17 集水池未投运前的越冬保温措施,一般采用堆放炉渣或稻草。

3.8.18 自然通风和机械通风冷却塔的淋水构架,一般采用预制钢筋混凝土构架。其接头方式有:留出钢筋头进行二次浇灌的;有预埋铁件进行焊接的;也有二者兼用的。鉴于塔内腐蚀较强,故规定避免外露铁件,如有外露铁件,应采取防腐蚀措施。

3.8.19 本条是根据冷却塔运行的特殊性,考虑水雾的飘滴及周围湿空气的影响,以及近年来国际投标工程的需要而制定的。冷却塔体爬梯及栏杆采用一般涂料防腐处理效果较差。

3.8.20 超大型冷却塔受风荷载作用面积大,为减小风荷载的作用及作用效应,可在塔筒外表面增加肋条提高塔表面的粗糙度,以改善冷却塔表面风压分布,从而减小风荷载的作用及作用效应。塔表面增加肋条后可节省大量的钢筋,降低成本,但其增加了施工的难度、降低了施工的效率,因此,设计时塔筒外表面是否加设肋条应通过技术经济比较确定。

3.9 冷却塔耐久性

3.9.1 本条是根据冷却塔的工作条件及运行环境编制的。本条

规定了混凝土的最小抗冻、抗渗等级,提高混凝土的抗渗、抗冻等性能,延长冷却塔的使用寿命。

条文中对冷却塔的塔筒、框架、基础、淋水装置构架等结构部位,按气候地区的分类列表作出了规定,以便设计时选用。

表 3.9.1 根据现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 中第 5.2.1 条,增加了微冻地区等相关要求。

3.9.4 考虑结构的重要性及维修的难易程度,本条规定了冷却塔塔筒内表面应设防水层。至于防水层的材料,据调查目前发展较快,无法在本规范中明确规定。

排烟冷却塔可按塔壁内表面喉部以上、塔壁内表面喉部以下、中央竖井、水槽顶部及配水层梁系、塔壁外表面及其他部位的不同防腐要求进行防腐处理。

排烟冷却塔腐蚀影响因素主要有:①硫酸根离子腐蚀;②氯离子腐蚀;③紫外线作用;④冻融循环作用;⑤碳化作用。

环氧类和聚氨脂类防腐涂料的主要特点是对混凝土表面的封闭并阻断腐蚀介质进入混凝土的通道。排烟冷却塔防腐材料种类繁多,性能、特点各不相同,应通过技术经济比较后择优选用,有条件时,应通过性能对比试验确定。防腐涂料施工时,塔筒和环境温度宜为 5℃~30℃,相对湿度小于 85%。应避免在大风、雨雪、霜冻的天气施工。夏季高温天气应避免在日光直射下施工,应做好现场安排,在太阳照不到的阴面施工。

本条针对海水冷却塔环境下各部位混凝土的腐蚀程度不同提出不同的分区。

(1)冷却塔各部分的涂层体系,可考虑选用无机类和有机类的涂层,如环氧树脂、丙烯酸、聚胺酯、矿物类涂层体系,以及试验确定的其他涂层体系。

(2)涂层防腐方案一般应由底层、中间层和面层配套涂料涂膜组成,选用的配套涂料之间应具有良好的相容性和可重涂性。

(3)海水冷却塔表干区(喉部以上)和外表面区涂料要求考虑

抗紫外线；外壁是否设涂层根据工程情况具体论证确定。

3.9.5 隔风板、托架宜采用玻璃钢制品，水池池壁栏杆、塔内栏杆宜采用玻璃钢制品或衬钢聚丙烯复合塑料制品；海水冷却塔椭圆门以下进塔爬梯可采用 Q235 钢涂刷防腐涂料，埋件、椭圆门、椭圆门以上上塔顶爬梯、塔顶栏杆可采用 316L、双相不锈钢、超级奥氏体不锈钢等。

4 喷水池

4.2 喷水池结构设计

4.2.2 本条中不透水土壤系指渗透系数小于 1.0×10^{-7} cm/s 且厚度不小于 1.5m 的土层, 可不另做防水层。

5 水面冷却

5.1 一般规定

5.1.1 “水面冷却”是工业循环水利用水体的自然水面，向大气中散质、散热进行冷却的一种方式。它同冷却塔、喷水池等冷却设施人工造成细水滴和薄水膜而进行的冷却相比较，具有另一种水力、热力和空气动力特性。

利用已有水库、湖泊、河道或海湾的自然水面冷却工业企业排出的循环水，比起新建冷却池和其他类型的冷却设施有一定的优点：这些水体一般具有较丰沛的天然来水量；或者冷却水体本身提供了调蓄水量的作用，成为工业企业的可靠水源；减少了占地；循环水系统的总损失水量可能比较少；能获得比较低的冷却水温度；当自然条件合适时，可减少循环冷却水系统的施工工程量，降低工程造价等等。因此，为了综合利用水利资源，发展水利工程的综合效益，在条件可能时，利用水库、湖泊、河道或海湾的自然水面冷却循环水是适宜的。

应该注意到，利用自然水面冷却循环水，在近些年的生产实践和工程设计中，也显露出一些新的问题：由于保护水体环境的原因，对排水温度提出了要求；有些地区的水利工程管理单位向工业企业征收过高的供水费；随着冷却水量的增大，为了充分利用水面冷却，给水排水建(构)筑物的工程量增加很多；常有一定数量的水下施工工程；进、排水渠道也要占用相当数量的耕地等。这些情况，又使利用自然水面冷却产生了一定的困难，因此，工程中最终能否采用自然水面冷却的方案，应取决于具体工程的条件和技术经济综合分析。

当工业企业附近有低洼地可供利用时，新建冷却池往往也具

有一定的经济意义,所以,条文中提出了“也可根据自然条件新建冷却池”。

5.1.2 利用水库、湖泊、河道或海湾等水体冷却循环水时,在同一水体中常有多个用水户,这些用水户取水和排水,都将对工业企业取水的水质、水量或水温产生影响。设计中预先注意并考虑到这种影响,对于保证工业企业的安全经济生产是必须的。

5.1.3 近年来,由于工业企业的建设规模愈来愈大,循环水量也急剧增加,加之利用水库、湖泊、河道或海湾作为冷却水体时,涉及面比较广,当循环水排入冷却水体,由于水温、水量和水质的变化,对其他工业企业、水利、农业、渔业、航运和环境等,都将带来一定的影响。本条文规定的目的在于,在设计水面冷却工程时,应根据国家的有关标准和规定,充分考虑取水、排水及其建(构)筑物对其他部门可能引起的影响。工作中,应同有关方面充分协商,在满足工业企业自身用水的技术要求的基础上,对有关方面提出的问题,认真分析研究,提出解决问题的措施方案,并应征得有关部门同意。实际工作中,当以能取得有关部门同意的书面文件为宜。

5.1.4 利用水库、湖泊、河道或海湾等水体冷却循环水时,可以综合利用的内容是多方面的,诸如排水具有的势能可驱动水力机械,排出的热水可供灌溉和养鱼,水库和湖泊等水体的部分水域可养殖水产,新建冷却池美化了环境,也可作为游览场所等。在设计水面冷却工程时,应根据工程的具体条件,考虑综合利用的可能性。

5.1.5 工业企业使用综合利用水库或其他水利工程设施冷却循环水时,一方面扩大了水利工程的综合利用效益,使水利工程管理单位增加了经济收入,另一方面,工业企业在利用既有水利工程获得了一定的经济效益的同时,其用水方式和要求,也给水利工程管理单位的经营管理增加了新的内容,并在一定的条件下制约着水利工程的运用调度计划,因此,双方应该在自愿互利的基础上,满足相互提出的要求,并应就此形成必要的书面文件,作为工程技术经济论证和双方以后工作的依据。

5.1.6 水面冷却工程布置的核心是对冷却水取水口和排水口的安排,特别是两者平面及立面的相对布置位置以及取、排水建(构)筑物的型式和尺寸。它们对有效地利用冷却水体的散热、蓄热作用和降低取水温度至关重要,并直接影响到整个循环水系统的投资、经济运行和冷却水受纳水体的水面开发及利用效率。

对于冷却池水面冷却方式,为了充分利用冷却水体的水面面积和水体容积,降低取水温度,对取水、排水建(构)筑物布置的要求,一般是尽量减小排出的热水与冷水产生强烈的掺混,提高排水在出流掺混后的温度,让表层热水运行到较远的距离,以增大水面散热量,加强吸取下层冷水能力并延长热水由排水口流入取水口的行程历时。这些问题的合理解决,一般是应通过试验研究择优选用。但对于河道或海域冷却方式,为减少温排水对环境水体温升影响,一般宜采用深水区底层排放方式。本条规定了选择取水、排水建(构)筑物布置和型式应考虑的一般性原则。

5.1.7 取水建(构)筑物的进水口流速值是确定其尺寸的重要数据,而影响选用进水口流速的因素又是多方面的。如:进水口附近热水层的厚度,冷水层与热水层的密度差;进水口上缘到热水层的距离;进水口的形状,进水口下缘至动床面的距离,所控制的吸入上层热水量,底层沙量和泥沙特性等。因此,在有条件的情况下,应通过模型试验来确定合适的进水口流速。有些湖泊的天然流速较低,考虑到取水口的实际运行条件,规定了进口流速不宜低于 0.2m/s ,否则会使取水口的造价太大。同时取水口进口流速应满足航道、航运等部门要求。

初步计算时,条文中建议采用的进水口平均流速,是依据以下几份资料综合取定的:

(1)《冷却池设计手册》(北京电力设计院,1978年)。文中指出:“根据过去一些模型试验资料,一般临界密度佛氏数 $F_r' = 0.5$, (取水口的)过孔流速控制为 $0.1\text{m/s} \sim 0.15\text{m/s}$ ”。

(2)《冷却水工程布置》(水利水电科学研究院,1979年)。文

中指出：“取水口进孔流速，确定进水口断面尺寸”。在工程规划阶段，进孔流速，可参照下式之经验数据采用：

$$R_i = \frac{v}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_{\text{下}}} g H}} \quad (113)$$

式中：
 R_i ——黎式数(Richardion)；
 v ——进孔流速(m/s)；
 $\Delta\rho$ ——上下层水密度差(kg/m³)；
 $\rho_{\text{下}}$ ——下层水密度(kg/m³)；
 g ——重力加速度(m/s²)；
 H ——水深(m)。

一般可取 $R_i=0.3\sim0.5$ ，假定水深 $H=4\text{m}\sim12\text{m}$ ，计算的进水孔流速 $v=0.07\text{m/s}\sim0.2\text{m/s}$ 。

(3)《火力·原子能发电厂土木结构的设计》(日文)一书中推荐“取水的进水口设计平均流速以 $0.1\text{m/s}\sim0.2\text{m/s}$ 为宜”。该书中统计了日本发电厂中 13 个海边取水的敞开式取水口和 8 个海底取水的管式取水资料，进水口平均流速为 $0.07\text{m/s}\sim0.22\text{m/s}$ 的占 95%。

(4)《在火电厂和原子能发电厂供水中采用重叠式取、排水建(构)筑物的水力学研究》(俄文)一文中，介绍了一个工程试验实例。文中叙述“取水口进口处的水流平均速度为 0.2m/s ”。

当水深较大、取水口较低或允许吸入的热水量较大、进沙问题不大时，进水口流速也可以大于条文中建议的数值。

5.1.8 取水口和排水口重叠差位式布置的联合建(构)筑物，是我国首先使用的一种新型冷却水工程布置。自 1966 年天津军粮城发电厂的重叠式取、排水口建成以来，各地又结合不同的情况，相继在潮汐河道及浅水河道中出现了因地制宜、类型不同的取、排水口重叠布置型式。目前，已有天津市的军粮城发电厂、上海市的高桥发电厂、江苏省的徐塘发电厂和广东省的黄埔发电厂投入运行，

同时,还进行了一系列的系统试验研究和工程模型试验。实践证明,重叠式取、排水口工程的优越性,在于能大幅度地减少冷却水输送线路长度,节省工程投资,缩短工期;而且工程布置紧凑,便于维护管理;在一定条件下,它能取得比取、排水口分列布置较低的水温。因此,在某些具体的水文和地形条件下,这种工程布置是比较成功的一种取水、排水建(构)筑物型式,但要注意水域表面水温较高引起的水环境影响。

我国发电厂已投入使用的重叠式取、排水建(构)筑物的工程概况列于表 57。这些工程都做过详细的物理模型试验,并经受了原型观测的验证和生产运行的考验。另外,还做过几个发电厂重叠式取、排水口的模型试验研究。各个工程的模型试验,都证实了取水口和排水口重叠布置,程度不同地取得了较分列布置低的水温。

重叠式取、排水口比起分列布置的取水口和排水口有其明显的特殊性,如设计不当,也有出现热水短路、取水温度升高的可能。因此,采用重叠式取、排水口,除应考虑在相应冷却水量时所必需的最小水深外,还应注意各种不利因素(例如:风浪、日照、航船和潮汐等)对热水层厚度的干扰作用和人类活动对设计最低水位的影响。一般情况下,都应该通过物理模型试验来研究确定重叠式取、排水建(构)筑物各部分的具体尺寸,如果水深较浅,应做模型不宜缩得过小的正态重叠式取、排水建(构)筑物的试验,以求得到比较可靠的试验成果。

5.1.9 水面的综合散热系数 K_m ,是计算水面冷却能力、水体对废热自净能力的基本参数,直接影响电厂规划装机容量、工程布置和环境评价的确定。这个参数综合体现了水气交面对流、蒸发、辐射三种散热能力之和,其定义为单位水面面积单位温差的散热通量的增量,以“ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ ”表示。此概念由我国水利水电科学研究院冷却水研究所于 1962 年首先提出,美国 Edinger 于 1965 年也提出同一概念,此概念目前已被国内外普遍采用。

表 57 重叠式取、排水建(构)筑物工程概况

序号	发电厂名称	最大冷却水量 (m ³ /s)	热水受纳水体	平均河宽 (m)	平均水深 (m)	排水堰上水深(m)	取水口高度(m)	排水堰顶(或排水口下缘)到取水口上缘的垂直距离(m)	排水密度 佛氏数	布置类型	投产时间
1	军粮城发电厂	10	海河	100~120	5~6	0.8	1.5	4.2	3	圆弧形排水	1966 年
2	高桥发电厂	4.6	黄埔江 (潮汐河道)	400~500	8~10	1.5	2.0	4.5	2.3	托盘式排水	1971 年
3	徐塘发电厂	6	大运河	120	2.5~3	0.4	1.1	1.3 (取水) 1.3		大圆弧取、排水	1974 年
4	黄埔发电厂	47	珠江 (潮汐河道)	350 (河叉)	6	1.4	1.5	2.5	—	双向排水	1978 年

设 Φ_L 、 Φ_c 、 Φ_e 、 Φ_r 相应代表总散热通量、对流、蒸发、辐射散热通量，则：

$$\Phi_L = \Phi_c + \Phi_e + \Phi_r = (\alpha_1 + k\alpha + \alpha_3) \Delta T \quad (114)$$

式中： α_1 、 $k\alpha$ 、 α_3 ——对流、蒸发、辐射散热系数；

α ——蒸发系数；

k —— e_s (饱和水汽压)－ T_s (水面温度)曲线的斜率，
即 $k = \partial e_s / \partial T_s$ 。

如果 α_1 、 α 、 α_3 均与水温或水气温差无关，则：

$$K_m = \frac{\partial \Phi_L}{\partial T_s} = \alpha_1 + k\alpha + \alpha_3 \quad (115)$$

水面散热能力：

$$H = \int_A K_m (T_s - T_\infty) dA \quad (116)$$

式中： T_∞ ——废热排入前的水域自然水温(℃)；

A ——水域面积(m^2)。

大量观测资料显示，蒸发散热一般为总散热量的主体；对流散热(显热传送)通过 Bowen 比与蒸发散热(潜热传送)建立联系，可以归入蒸发项。因此，对蒸发散热的估算精度成为影响整个散热能力举足轻重的因素。采用蒸发系数的正确性和精确度，将直接关系着水面冷却能力计算的正确性和精确度。

国内外对水面蒸发系数已做过大量观测研究工作，并已有大量估算这个系数的经验公式，这些公式存在的问题是：

(1) 影响蒸发系数的各个参数中，多数公式未考虑水气温差的影响；或者虽有反映，但试验根据不足。

(2) 试验方法及分析方法缺乏统一性，量测精度不高或不和谐。

(3) 试验资料具有地区性，公式的使用范围受限。

(4) 缺乏影响蒸发系数的单因子分析。

我国原水电部为解决这一课题，于 1978 年～1985 年间由中国水利水电科学研究院负责，组织全国有关单位协同攻关，取得了

包括以下两个方面的成果：

第一方面，综合分析全国各地区观测基地的试验资料，提出了水面蒸发与散热系数的全国通用公式 A[参见《水面蒸发与散热系数研究》(水面蒸发与散热系数研究协作组, 1990 年 5 月)], 该成果概括了我国各地室内外蒸发观测资料，分析了蒸发水气界面上质量、能量、动量传递过程和水文气象要素对蒸发的非线性影响，综合为 P_v 、 P_e 两个无量纲量及蒸发有效风速参数，使它能在我国各地出现的从逆温到极端不稳定，风速 $0\text{m/s} \sim 9\text{m/s}$ 等各要素全年实际变化范围内适用。根据具体工程相应概率下可能出现的水文气象条件，就可以算出相应条件下的蒸发系数及综合散热系数。为便于应用，还制定了计算程序软件及查算表。

第二方面，在可控气象参数的专用风洞中进行系统试验研究提出了全国通用蒸发与散热系数公式 B。此项工作针对火电厂或核电厂冷却水域的特点，试验参数变化范围为风速 $0 \sim 3\text{m/s}$, 水温 $10^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$, 水气温差 $\Delta T = 0^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $50\% \sim 90\%$ 。公式 B 如实反映了室内与现场试验的实际情况，统一了自由对流、强迫对流的散热机理、天然水体与受热水体的水面蒸发规律，并受到国内蒸发试验基地资料和国外大量实测资料的检验。公式形式简单，便于实际应用。

上述两方面工作提出的公式 A 和 B，得到相互支持与检验，在我国应用优于国内外同类公式，可用于工程设计与评估。

本规范推荐一般情况下采用水面蒸发与散热系数全国通用公式 B。

5.1.10 自然水温系指没有外界客水注入的水体，在当地当时气象条件下自然形成的表层水温。天然情况下，气象因素随时而变，实测天然表层水温（一般采用水面以下 $0.1\text{m} \sim 0.5\text{m}$ 处的水温）也是随时而变的。

设计采用的自然水温应根据实测资料或条件相似水体的观测资料确定。当缺乏观测资料时，可利用当地的气温、湿度、风速和

太阳辐射等资料,求解天然情况下的水体热平衡方程,求取自然水温的随时变化过程。

一些观测实验单位(如湖南天台蒸发试验站、江苏地理研究所和官厅水库管理处水文实验站等),根据自己的观测资料建立了当地的水温与气温经验公式。这样的公式有着计算简单的优点,只是应用的局限性较大,只有在工程地区的条件与建立经验公式的具体观测条件相似时,方可应用。水利电力部东北勘测设计院曾对水库的水温分布与特征进行过分析,并提出了估算水库里水温的方法,其研究成果曾在《水文》1984年第1期发表,可供参考。

5.1.11 需要增加辅助冷却设施,经常发生在下述的几种情况:

(1)新建工业企业附近有自然水面可以利用,但个别季节水面的冷却能力不足。

(2)已利用水面冷却的工业企业,随着生产的发展,循环水量增加很多。

(3)环境保护部门对水体温度提出了新的要求等。

常用的辅助冷却设施有冷却塔、喷水池和喷射冷却装置等。

增建辅助的冷却设施,会使循环供水系统复杂化,增加了运行维护的难度。不同型式的辅助冷却设施,技术经济条件的差别也是比较大的,因此,要求在设计中结合工程的具体条件,进行综合的技术经济分析,以便确定选用辅助冷却设施及其型式的合理性。

5.1.12 作为冷却水体的水库、湖泊或河道,往往都是鱼类繁衍的优良环境,常辟为渔业生产场地。取水建(构)筑物设置拦鱼设施,防止鱼类进入,是保证循环水系统及其工艺设备安全经济运行和防止鱼类流失的重要措施。

目前国内外应用的拦鱼设施类型很多,如网箔栏、气幕栏、音响阻拦、电水锤和电栅栏等。在一定的条件下使用这些设施,均可收到一定的拦鱼效果,可在设计中选择使用。对于仔鱼的防护问题需优先考虑取水口适宜的进流方式,宜通过模型试验研究确定。

5.1.13 为了监督冷却水体的运行工况,积累必要的资料,分析冷

却水系统运行的经济性，需要设置测量仪表。

冷却水体的水位测量一般设在取水泵房附近，水位测量的准确程度不应低于1cm。取水温度可在取水泵房内测量；排水温度计可设在排水系统汇合后进入冷却水体以前的便于监测的位置。温度测量的准确程度以 0.2°C 以内为宜。

5.1.14 取、排水工程布置应考虑受纳水体的环境保护要求，避开环境敏感区。为了避免水生物养殖场内的鱼类、藻类和贝壳类生物进入循环冷却水系统的管道及设备，取水口应远离水生物养殖场。

排水口远离水生物养殖场主要是考虑温排水对水生物的影响。水温的变化会引起水体饱和水气压、运动黏度、水的密度、饱和溶解氧、氧的扩散系数等参数的变化。水温升高时，水中溶解氧减少。据有关资料介绍，水温从 20°C 升至 30°C ，氧的溶解度减少16%，升高至 40°C 时，减少29%，由此，对水生物的影响较大。水温升高还促使水中有机污染物质分解，加速水生物的呼吸，导致耗氧量增加。水中饱和溶解氧的降低还会使水域复氧困难、缺氧增加。在受污染的水域里，水温升高与已存在于水中的毒性物质对鱼类会产生协同作用，水温升高，毒性增大，水生物对耐受极限水温的能力也就降低。在突然升温的条件下，鱼类胚胎及鱼苗死亡率也有不同程度的增加。因此温排水对鱼类胚胎发育有着不利的影响。此外温排水还对水中浮游生物如枝角类有影响，以火电厂温排水为例，一般火电厂温排水比取水水体的水温高约 $8^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ ，它将造成水中枝角类浮游生物的死亡率由常温的10%升高到40%~60%。浮游生物的死亡亦将造成鱼类饵料的减少，影响鱼类的生长。以上所述为温排水温度与天然水体温度相差较大的不利影响。

温排水在环境水体内扩散较快，与作为受纳水体的江、河、湖、海相比，其对环境水体的高温升影响范围一般很小。与此同时，温排水所带来的环境水体温升影响具有两重性，环境水体适当的温

度升高也有促进水生生物的生长繁殖、增加鱼类产量等效应，需结合工程实际研究确定。

在工程筹建初期，应当委托有关单位进行工程水域的温排水物理模型或数学模型试验以及对生物影响的评价，了解温排水对所在水域温度场的影响和变化情况，以便采取适当措施，减少温排水对其受纳水影响范围内重要水生物的不利影响。

5.1.15 本条提出了确定水体的水面冷却能力和取水温度的原则。

(1)水体水面的散热是个复杂的物理现象，同时具有热力学的、流体力学的和空气动力学的过程。目前，要圆满地解决冷却工程的全部问题，还存在一定的困难。但是，为了满足设计工作的要求，研究工程中所必须解决的问题，近30年来，已经积累了一定的经验和一些可行的方法，可供设计采用。

(2)冷却水工程的物理模型试验，可以得到比较满意的整体流态相似和时均水力热力相似，能够直接反映出复杂的物理现象，迄今，仍然是研究冷却水工程的主要手段。

在电子计算机上进行冷却水的数学模型计算，可以不受物理模型中那些相似准则的限制，具有较大的灵活性和适应性，特别是有了统一的通用程序后，可以用较短的时间来完成多种方案的计算，所以，也是现今解决水面冷却问题的重要手段之一。

其他一些方法，如利用条件相似工程的类比、经验公式和计算图表等，在一定的工程条件下，也可获得比较满意的结果。

(3)在规划设计水面冷却工程时，要求解决的问题可归结为预估工程的冷却效果和确定最优工程布置。因此，在工程规划设计的不同阶段，都应对冷却水域进行水力热力计算研究，以满足相应设计阶段内容深度的要求。

在工程设计中，应该对冷却水域进行深入细致的研究。一般情况下，应进行物理模型试验。当工程条件允许，在工程的可行性研究阶段也可以利用数学模型计算或其他一些计算方法。有条件

时还可同时采用数学的和物理的两种方法，互为条件，密切配合，互补不足，比较圆满地解决冷却容量和工程布置问题。

本条对冷却池、河道冷却和海湾冷却均适用。

5.2 冷却池

5.2.1 冷却池是水面冷却的一种方式，它包括工业企业利用的既有水体（水库、湖泊等）；还包括工业企业根据当地的自然条件新建的以冷却循环水为主要任务的蓄水体，如库、湖、池等。习惯上把后一种称之为自建冷却水库、冷却湖或冷却池。

新建冷却池是在天然条件下增加了一个庞大的调蓄水体，由于修建堤坝形成水体，也改变了地表径流和地下径流的原有状态，同时，堤坝及水池本身也将遭受蓄水和径流的破坏作用。本条提出设计中应注意由此而带来的一切后果，要采取相应的防护措施，确保冷却池本身的运行安全和减少对周围环境与建（构）筑物的影响。

5.2.2 综合利用水库或湖泊常为多种对象服务，枯水年水体供水量的分配对工业企业来说是至关重要的。利用这种水体作为冷却池时，除应得到水利工程管理单位的供水保证以外，还应根据被利用水体的水文气象资料、水利计算、运行方式和水工建（构）筑物的设计标准等资料，分析在不同用水户要求的枯水频率条件下，考虑了工业企业消耗水量以后可供给其他用水户的水量，并了解保证水体最低水位有关的条件。如：保证最低水位时的水量平衡；放水洞口的高程；沿岸泵站的取水能力等。需要时，应根据工业企业冷却水的运行需要，对水体的运行方式提出相应的要求。

5.2.3 冷却池的设计最低水位是保证工业企业正常运行的情况下，允许冷却池削落的最低水位，亦称死水位或垫底水位。设计最低水位以下的水池容积称为死库容。

本条指出了水体仅作为冷却池使用时，确定最低水位应考虑的一些基本条件。当水体另有其他使用目的时，应同时考虑其他

部门对最低水位的技术要求,综合分析确定。

5.2.4 本条确定冷却池夏季的最小水深,考虑了以下各种因素:

(1)为使冷却池的水力热力条件能具有较完整的温差异重流,充分发挥水体的散热能力,降低取水温度,希望冷却池能有比较大的水深。能形成稳定的温差异重流的水深值,视冷却池承受热负荷的大小而异。

(2)为避免冷却池内水草的繁殖生长而影响排水的热扩散运行,希望冷却池的水深大于2m。

(3)沿水池深度方向,水体对太阳辐射的吸收率逐渐减弱。水深不足3m时,正处于吸收太阳短波辐射量较多的范围,该处水温较高;水深超过3m时,水温递减速度快,形成自然条件下的冷热水分层。水池愈深,分层愈明显,表层与底层的温差也愈大。水深为2m~3m的浅水型冷却池,只能依靠水面散热来降低取水温度,而水深为4m~5m以上的深水池则具有热调节作用,虽然仍依靠水面散热,但由于有水体的延时均化作用,取水温度比水面面积相同的浅水池为低,利于节约工程投资和提高运行的经济性。

(4)苏联1976年出版的《给水设计规范》СНиЛ II-31-74中规定“冷却池中水流循环区的平均水深,在夏季最低水位时,不应小于3m”。

(5)我国《火力发电厂水工设计规范》DL/T 5339—2006中规定“冷却池在夏季最低水位时,水流循环区的水深不宜小于2.0m”。

(6)本条规定了冷却池在夏季最低水位时,水流循环区的水深不宜小于2m,在条件可能的情况下,均以大于此值为宜。

当水体的冷却能力比要求的冷却能力大得很多,经论证浅水域并无很不利的影响时,水深也可以小于2m。已经运行的这种浅水冷却池有:

- 1)山东省某发电厂,利用微山湖冷却循环水,水流循环区的水

深为1m~1.5m。

2)云南省某发电厂,利用滇池的草海冷却循环水,草海的平均水深约1.5m,最低水位时,水流循环区的水深仅为0.3m~0.4m。

5.2.5 正常水位(或称正常蓄水位)是指冷却池在正常运用的情况下,满足设计的蓄水量要求应蓄到的高水位,是死库容与调节库容之和相对应的水位。

洪水位是防洪特征水位的统称,包括:设计洪水位——遇到堤坝的设计标准洪水时,冷却池堤坝前达到的最高水位;校核洪水位——遇到堤坝的校核标准洪水时,冷却池堤坝前达到的最高水位。

本条指出了确定冷却池的正常水位和洪水位的方法和应该考虑的一般性原则。对于新建冷却池,应如此考虑,而对于利用已有的水库或湖泊也应该按照本条的规定,提出相应的要求,供水利工程管理单位统一考虑。

5.2.6 冷却池的淹没处理内容有可能是多方面的,当淹没情况较复杂时,可参照现行行业标准《水电工程建设征地移民安置规划设计规范》DL/T 5064的有关规定进行设计。本条仅就工业企业自建的冷却池,从自身生产工艺要求出发,规定了对池底进行必要的清理要求。这种清理工作主要有:取水口附近和库底树丛的清理及削平局部突出高丘,以免影响取水和排水的流动扩散;当池底在注水后有易浮起的草皮时,应予以清除;根据卫生防疫部门的要求,对池底进行卫生处理。

5.2.7 冷却池容积较大时,灌水到所需水位要有一定的时间,为了不影响工业企业的试运和投产,应安排好施工进度和灌水的时间,对于人工补水的冷却池和径流量较少且年内分配不均的径流补给的冷却池更应注意。

5.2.8 计算冷却池的设计能力或冷却水最高温度的水文气象条件,亦即其设计的标准,应满足生产工艺提出的要求,即应根据不同工业部门生产工艺的要求确定。

目前,冷却池主要在电力工业中应用比较广泛,本条引用了电力工业现行的设计标准,推荐为其他工业企业设计时参照使用,对有特殊要求的工业企业,应当根据需要,予以适当提高或降低。

1 深水型冷却池是指池水较深(一般水深大于4m)且有明显和稳定的温差异重流的冷却池。条文中的“多年平均的年最热月月平均自然水温……”为在各年的月平均自然水温当中,选取其最高值,然后计算它的多年平均值。

2 浅水型冷却池是指池水较浅(一般水深小于3m)、水流以平面流为主,仅在局部池区产生微弱的温差异重流或完全不产生温差异重流的冷却池。条文中的“多年平均的年最炎热连续15天平均自然水温……”为各年的最炎热连续15天平均自然水温的多年平均值。

5.2.9 冷却水温是经济比较中计算年运行费用的必要数据。本条规定用于经济比较的冷却水温宜采用月平均值,冷却水温度的计算是以多年逐月月平均水文和气象条件为依据的。这个规定是假设多年12个月的水文气象参数的月平均值,基本上代表了典型的全年水文气象过程,依此计算的冷却水温度能够反映出运行期间冷却池实际运行的多年平均工况。

5.2.10 可靠的补充水源,不仅是工业企业正常生产的保证,也是冷却池达到要求冷却能力的必要条件,不容忽视。

补充水量不足,必将使冷却池水位降低,影响冷却池的冷却能力和取水建(构)筑物的运行。冷却池补充水源的设计标准,应根据工业企业的重要性及生产工艺的要求确定。

冷却池补充水的保证程度,应同工业企业供水水源的设计枯水流量的保证程度基本一致。本条规定的枯水年设计保证率是我国工业企业采用比较多的设计标准,各设计单位可结合本行业的实际需要进行选用。对于个别有特殊要求的工业企业,当有充分论证时,设计标准也可适当地提高或降低。

5.2.11 冷却池本身的损失水量由三部分组成,即蒸发、渗漏和排

水。冷却池一般不考虑风吹损失。

蒸发损失分别按自然蒸发和附加蒸发两项考虑,计算简单,应用方便。

排水量是循环水系统所要求的,应在全厂的水量平衡中统一考虑,此处根据习惯,仍作为冷却池损失水量的一部分列入。

从循环水系统中引出用于其他目的而不能返回冷却池的水量,应在循环水系统的水量平衡计算中予以考虑,不计人冷却池的损失水量中。

在水库的水量损失中,还常考虑有结冰损失一项。北方地区气候寒冷,冬季水库水面形成冰盖,随着水位下降,水库水面缩小,有一部分冰盖附着库岸,相当于这部分冰盖的水量,当时不能被利用,即视为结冰损失。冷却池的设计中,一般都未计及结冰损失,所以目前还没有计算结冰损失的经验和可以借鉴的计算方法,在此处提示说明一下,以引起注意。

5.2.14 实践表明系数 K_e 不仅与水温有关,还与气温、风速和空气的相对湿度有关。本规范水面蒸发系数和水面综合散热系数公式(5.1.9-1)和(5.1.9-2),由此二公式即可推导出附加蒸发系数 K_e [见本规范第 5.2.14 条公式(5.2.14-2)]。

5.2.15 冷却池的渗漏水量应为设计者所重视。严重的渗漏不仅使水池难以保持所需的水位而影响冷却能力和取水设备的运行,也常引起水工建(构)筑物的损坏,从而影响运行的安全。在任何情况下,都应该慎重地考虑冷却池的渗漏损失,并采取措施,减少渗漏水量。

冷却池的渗漏水量包括有池底、坝身、坝基、坝的两翼、闸门不严密处的泄漏等项。由于不同工程地区的工程地质、水文地质、地形等条件和水工建(构)筑物形式的多样性以及地下水运动的复杂性,使冷却池的渗漏水量很难以理论计算方法确定。

估算水库渗漏损失的复杂性,还在于渗漏水量随时间和条件的变化。例如,对于设计和施工良好的水库,开始使用的年份,渗

漏损失水量可能较大,而随着使用年限的增长,库床淤积将使渗漏损失逐年减少,这种渗漏量的变化趋势就很难予以估算。从而看出,根据水文地质条件计算的渗漏损失水量只能是比较概略的数据。对于条件复杂的冷却池,也可以通过模拟试验研究来确定其渗漏水量。

国内外各种版本的书籍和参考资料,均介绍有根据水库的水文地质条件近似估算水库的渗漏损失的方法和经验数据,可以作为冷却池设计的参考。

5.2.16 冷却池一般不考虑风吹损失,而渗漏损失也将随着运行年限的增长而减少,因此,由于水面蒸发,池内水的总含盐量将与日俱增。根据工艺设备对循环水水质的要求,考虑一定的排水量,对控制循环冷却水系统内由于水质变化而引起的结垢和腐蚀,以保证工艺设备具有较高的热效率,是有好处的。

冷却池的排水量应按现行国家标准《工业循环冷却水处理设计规范》GB 50050 设计。

5.2.17 冷却池的泥沙淤积,无论是地表径流补水的冷却池抑或人工补水的冷却池,当补充水的含沙量较大时,都将给生产运行带来困难,因此,本条规定,设计中应充分考虑泥沙淤积对取水、排水和冷却能力的影响,必要时,应采取防止或控制淤积发展的措施。

对于补充水含沙量较大的冷却池,可研究采用预先沉沙或排沙疏浚等工程措施的必要性;如需采用挖泥船的排泥沙措施时,可根据淤积的发展情况,逐步增加和完善排泥沙的工作人员和设备。

5.2.18 地表径流补给水的冷却池,当上游有大量来水,且水温较低时,应合理利用上游来水,使部分热水排至冷却池的下游,以提高循环水系统运行的经济性;有些冷却池,在丰水季节上游来水量较大,甚至可能满足直流供水运行,此时应把热水全部排至冷却池下游,这些运行工况都要求有把热水排向冷却池下游的旁路设施。

5.2.19 无论是在冷却池的模型试验还是原型观测中,都能看到风对热水扩散流动的影响。冷却池的下风向水域常是水面温度的

骤降区。

浅水型冷却池，取水温度对风的影响特别敏感，当取水口处于下风向时，热水聚集于取水口附近，取水温度将明显升高，这已为冷却池的运行经验所证实。深水型冷却池，风对池内水流也有较大影响，如水面流态发生变化、局部水域的热水层厚度增加等，但在一般情况下，尚不足以破坏温差异重流的结构。

考虑到入池年径流量的变化和工艺设备运行的要求，需要的冷却池水面最大散热能力不一定都发生在炎热季节，所以，考虑风的影响问题，应以冷却池的热负荷最大期间的主导风向为主。

一般情况下，布置取水和排水工程时，要预计到不利风向对取水温度的影响。取水口的位置应避离高热负荷时期的主导风向和最大迎风吹程：深层取水口顶缘高程以设置在有风吹影响的热水层厚度以下为宜。有条件时，应进行风吹模型试验，以求得合理的工程布置方案。

5.2.20 本条系新增条款。新建冷却池形状应尽量避免其长边走向与主风向、强风向重合，以减少风生浪等的影响。

5.2.21 提高冷却池水面冷却能力或降低取水温度的工程措施很多，导流堤、潜水堰和挡热墙是其中三种主要的工程措施。

导流堤的作用是导引水流方向，改变水池流态，提高水池水面散热能力。导流堤在浅水型冷却池中采用较多，深水型冷却池中也有采用。

潜水堰常置于排水口的扩散段内或排水口前的冷却池内。根据冷却池水位变化情况，一般设置一道或两道潜水堰。其作用为减少和均化排水口出流速度；消除折冲水流，改善扩散段内的水流特性；阻挡池内低温水入侵掺混。潜水堰用于深水型冷却池，其作用更为明显。

在冷却池中，为了取得低温水，常采用深层取水的方式。挡热墙的作用在于阻挡表层热水，引进底层冷水；导引表层热水流离取水口；吸取底层水，减少吸取水面漂浮物，改善水质；能起到扩大水

泵房取水口,减少进口流速的作用。挡热墙是吸取深层低温水的有效工程措施,为很多新建或扩建工程所采用。

其他工程措施还有截冷墙、挡热罩、分流设施和池心取水等。

冷却池设计的基础任务之一就在于合理地选择工程建(构)筑物及其布置,能以最少的工程投资和运行费用,获取最低的冷却水温度。上述各项工程措施,在具体工程中都起到过良好的作用。在工程设计中,要吸取前人的经验,又不拘泥于已有的模式,结合工程的具体条件,通过试验研究和技术经济比较,选择最佳的工程设计方案。

5.2.22 冷却池堤坝拦截地表径流时,为确保堤坝和其他水工建(构)筑物的安全,应设泄洪的建(构)筑物。

人工补水的冷却池,不像地表径流补水的冷却池那样必须设置泄洪建(构)筑物,但考虑到暴雨水量和运行工况不稳定等因素,可根据需要,设置溢流设施。

放水设施可根据排水、引水、放空等的实际需要设置。放水口的标高要尽量低些,以利排出含盐量较高的底部池水。

5.2.23 工业企业自建的冷却池是主要生产建(构)筑物之一,它的基本功能是冷却循环水,一般应设专人管理。必要时,也可根据管理工作量的大小,设置专业机构进行管理。

水务管理工作应首先保证工业企业的安全经济运行。其工作内容有计划调度、巡视检查、维护修理、观测预报等。随着蓄水体的兴建,也将带来一些其他方面的附属事业,诸如渔业生产、游览事业等综合利用项目,这也是水务管理工作的一部分内容。

兴建冷却池也将对周围环境及其他工业企业、农业、交通、渔业、市政等带来一些有利的和不利的影响,处理这些影响是工业企业责无旁贷的任务,设计中应预报这些影响的存在及影响的程度,作为工业企业冷却池水务管理工作的依据之一。

5.2.24 本条规定了确定冷却池枢纽工程等级的原则。

冷却池本身就是一座水库,应根据其库容、所服务的装机容量

及对下游工矿企业、城市的影响,按现行行业标准《水利水电工程等级划分及洪水标准》SL 252 的有关规定进行设计。

5.3 河道冷却

5.3.1 “河道冷却”是指循环水排入河道、利用河道水面散失热量,且取水温度高于上游来水温度的一种冷却方式。当上游来水量大于取水量,且取水温度等于上游来水温度时,习惯称为直流供水;而当上游来水量较少,需筑坝取水,取水温度主要取决于河道水面的散热能力时,即为河道型(一般为条带形)冷却池。河道冷却,就其水力热力特性来说,是介于直流供水和河道型冷却池之间的一种冷却方式,循环水的热排水在冷却过程中同时与上游来水进行混合,然后进入取水口,为其基本特征。利用河道冷却比起冷却池来,增加了上游来水这一重要因素。但是,对于利用河道冷却循环水所需解决的问题,如排水口附近上、下游河段的水面冷却能力;取水温度;取、排水口所在河段的热平衡状况和河道的水温分布;取水和排水工程的最优布置方案等内容与其他水面冷却方式类似。

计算河道的设计冷却能力或冷却水最高温度的水文气象条件,亦即其设计的标准,应根据生产工艺的要求确定。本规范规定的设计标准是频率为 5%~10% 的日平均水温和相应的水文气象条件,以供设计选用。

影响河道冷却能力和冷却水温的因素众多,如上游的来水量与水温、自然水温、风速、气温和湿度等。诸多因素同时出现最不利条件的概率是比较少的。条文规定了按影响取水温度较为重要的因素,即上游来水温度的统计频率作为设计的基本参数。

采用这种以水温频率计算时,应注意上游来水量的影响。上游来水量也是影响冷却能力和冷却水温度的重要因素,它能把排水的热量带向下游,相应地提高了河道的冷却能力,所以,枯水期上游来水量很小时,也可能是计算河道冷却能力的控制条件,应予

以注意。

5.3.2 河网是在一定的范围内,以分段分片的控制措施,形成纵横交错、互相沟通的河道系统。一般以天然河道为主,与湖泊、人工河渠、坑塘、平原水库等相互连接,具有蓄水、消防洪涝灾害、调节水量、引水灌溉、发展和改善航运等多种作用。河网的水位除受天然径流影响以外,人工的引、排和调蓄也起着重要的作用。工业企业利用河网冷却循环水时,要认真研究河网的规划设计,除应分析注入河网系统水量的保证程度以外,更重要的是分析人为因素对冷却循环水的河网段的入流量和出流量的控制作用,来论证和选择设计最低水位。

5.3.3 在河道中取水,取水口一般均设在排水口上游。当由于工程条件限制,取水口布置在上游很困难而需布置在下游时,应该慎重地研究取水的具体位置和型式,尽量减少热水回归取水口,这时,一般应通过物理模型试验来确定取水口和排水口的布置及其型式。

当工程水域具备深水排放条件时宜采用水体底层排放方式,以增强温排水与环境水体的掺混稀释效应,减少温排水高温升影响区范围。对于垂直向上排水出流稳定性的判别条件如下:

当排口相对淹没深度(H/D)满足: $H/D \geq 0.22F_0$ 且 $H/D \geq 6$ 条件下,排水可满足水体底层稳定出流要求。排水出口密度弗氏数 F_0 可按式(117)计算。

$$F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_0} g D}} \quad (117)$$

式中: H —排口淹没深度(m);

D —排口直径(m);

U_0 —排口流速(m/s);

ρ_0 —排水密度(kg/m^3);

ρ_a —环境水体密度(kg/m^3)。

5.3.4 本条系新增条款。温排水对环境水体温升以及取水温升影响研究应考虑泥沙冲淤引起的河床地形变化对温排水扩散及取水温升等的影响，在河口区域还应考虑盐水入侵引起的水动力、排水出流浮力效应变化对温度场、取水温升等的影响。

5.3.5 具有双向水流的潮汐河道，水位、流量和流速均处于不恒定过程中。冷却水排入潮汐河道段，经局部掺混扩散后，伴随潮流在排水口上、下游河段来回游荡。冷却水的取水温度，除受潮汐流引起的排水对取水的直接影响外，还受排水在随潮汐流动的散热过程中，剩余热量积蓄而引起的水体温度的升高的影响，影响程度取决于潮流量、潮差、涨落潮历时、上游来流量、水面散热能力和取、排水口距河口的远近等因素。取、排水口的位置和型式，可根据河道的水文特征、地形和地质等条件采用分列式、重叠式、差位式和重叠双向排水等型式，一般可通过潮汐模型试验和局部正态模型试验并结合技术经济比较择优选用。

5.3.6 利用河道或河网冷却循环水，除了水温条件外，河道或河网的不利水文条件下，工业企业可能取得的必需的最小水量是应当加以认真研究的。虽然在不利水文条件下，河道的上游来水流量可以满足工业企业对循环水量的需求，但是在不采取任何措施的情况下，按一般经验，从天然河道的可取水量只占上游来流量的15%~25%，如果再增加取水量就需针对河道的具体条件，采取必要的措施如修建斗槽、丁坝、拦河坝等。必要时，也应通过模型试验确定。

5.4 海湾冷却

5.4.1 本条为新增条文。给出了工程海域冷却能力计算需采用的设计水文、气象条件。其中典型潮一般可根据海域特点选取工程海域有代表性大、中、小潮或连续半月潮。具体可参见现行行业标准《冷却水工程水力、热力模拟技术规程》SL 160 的有关规定。对于水温要求较高的核电工程按核电厂水工设计规范执行。

5.4.2 为减少温排水对环境水体的影响区范围,宜采用深水区底层排水方式,以增强温排水与环境水体的掺混、稀释效应,削减温排水高温升区影响范围。排水出流方式对掺混稀释效果影响较敏感,宜采用物理模型试验手段加以研究确定。其他要求详见本规范条文说明第5.1.6条及第5.3.5条有关规定。

水体底层排放条件可参照第5.3.3条的条文说明。

5.4.3 靠近河口的海域,海水的盐度分布受淡水汇入的影响,海水表层盐度低,深层盐度高,尤其在河流的丰水期这种差别更大。因此,位于河口附近的海水密度同时受到水温和盐度两个方面的影响。在这种情况下如果采用深层取水,表面排水的重叠式取、排水口,排出的热水虽然水温升高,但由于盐度高,温排水的密度比表层冷水的密度大。例如某电厂位于靠近河口的海湾,在河流的丰水期,-8m水深处海水的盐度为20%, -2m水深处海水的盐度为4%~5%,当水温为22°C盐度为5%的海水密度小于 1.005g/cm^3 ,而水温为30°C、盐度为20%的海水密度大于 1.01g/cm^3 。如果采用重叠式取、排水口,从-8m处取水温22°C盐度为20%的水,经过凝汽器后虽然水温升高至30°C,但盐度并未变化,温排水的密度大于海湾水域表层水的密度,热水排出后不但不能在海域表面扩散冷却,由于密度大,再加上风浪作用,反而会很快掺入下层海水中被重新吸入取水口。因此,在靠近河口的海湾作为循环冷却水的冷却水域时,要注意海水盐度的垂直分布,采用妥善的取、排水口型式和布置。

5.4.4 有些利用海水作为循环冷却水的工业企业往往利用已建或结合新建的港池,在港池内布置取、排水口。取水口设在港池内可以充分利用港池内的水深取深层低温水,还可利用港池的防浪、防淤措施,减少风浪和泥沙对取水口的不利影响。排水口设在港池内或可利用排水冲淤,减少港池内的淤积。在港池内取水往往是可行的,往港池内排水则需慎重。对于环抱式港池,由于港池的口门比较窄,涨潮时港池内水面面积不能满足表面散热的要求,造

成港池内热量积蓄、水温升高。退潮时,由于口门小,港池内表层的热水只能退出一部分,仍有部分热水留在港池内,因此而形成港池内的海水温升超过环境保护要求的许可值。由于温排水的流量相对于港池的总容积是很小的,且排水进入港池后流速迅速降低,对港池的冲淤作用甚微。某两个电厂的港池排水模型试验表明,由于港池内的热量难以全部排出,港池内海水温升达 $5^{\circ}\text{C} \sim 8^{\circ}\text{C}$,超出环境保护允许值。因此,一般情况下不宜把循环水的排水口设在港池。有些北方的港口在冬季引入部分或全部温排水用以化冰,以利冬季通航则是另一回事。此种情况下,应考虑其他季节温排水对取水水温的影响,必要时应采取措施,非化冰季节,温排水另有排水口。

5.4.5 利用海湾冷却循环水的取、排水口工程布置必须考虑泥沙淤积和温排水回流对取水水温的影响。温排水的回流所影响的多数是设备运行的经济性,而泥沙淤积则往往涉及取水的安全性,因此应当首先研究和论证泥沙对取水口的淤积影响。同时,温排水通常伴随着余氯一同排放,受余氯等影响排水中所携带的大量气泡易对工程海域造成“感官污染”,故此,排水工程设计需考虑大幅度减少或消除泡沫措施。如:排水设计时尽量减少虹吸井堰上游水位与堰后水位间的落差;采用封闭空间内的扩散消能方式,尽量减少排水出流的掺气量;加入消泡剂等。具体措施宜结合工程实际由模型试验确定。

S/N:1580242·650



9 158024 265002



统一书号：1580242·650

定 价：45.00元