



CECS 118 : 2000

---

中国工程建设标准化协会标准

## 冷却塔验收测试规程

Specification for acceptance test of water-cooling tower

**中国工程建设标准化协会标准**

**冷却塔验收测试规程**

**specification for acceptance test of water-cooling tower**

**CECS 118:2000**

**主 编 单 位:西安建筑科技大学**

**批 准 单 位:中国工程建设标准化协会**

**施 行 日 期:2000 年 12 月 1 日**

## 前 言

根据中国工程建设标准化协会(92)建标协字第 14 号《关于下达推荐性工程建设标准规范计划的通知》的要求,制订本规程。

现批准协会标准《冷却塔验收测试规程》,编号为 CECS 118:2000,推荐给工程建设设计、制造及施工单位采用。本规程由中国工程建设标准化协会工业给水排水委员会归口管理,由西安建筑科技大学(西安市雁塔路 13 号,邮编 710055)负责解释。在使用中如发现需要修改和补充之处,请将意见和资料径寄解释单位。

**主 编 单 位:**西安建筑科技大学

**参 编 单 位:**国家电力公司东北电力设计院

国家电力公司热工研究院

机械工业部第四设计研究院

**主要起草人:**王大哲、李志悌、史佑吉、傅敬远

中国工程建设标准化协会

2000 年 9 月 20 日

# 目 次

1	总则 .....	(1)
2	术语、符号 .....	(2)
2.1	术语 .....	(2)
2.2	符号 .....	(3)
3	测试前准备 .....	(6)
4	测试大纲 .....	(8)
5	测试条件和要求 .....	(9)
6	测试仪表和测量方法 .....	(13)
6.1	环境风速和风向测量 .....	(13)
6.2	环境空气干湿球温度测量 .....	(13)
6.3	大气压测量 .....	(13)
6.4	进塔空气干湿球温度测量 .....	(14)
6.5	进塔水流量测量 .....	(15)
6.6	进塔水温测量 .....	(16)
6.7	出塔水温测量 .....	(16)
6.8	进塔空气流量测量 .....	(17)
6.9	补充和排污水流量和水温测量 .....	(18)
6.10	出塔空气干湿球温度测量 .....	(19)
6.11	淋水密度及冷却后水温分布测量 .....	(19)
6.12	塔内风速分布测量 .....	(19)
6.13	塔内各部分阻力及风机全压测量 .....	(20)
6.14	风机轴功率测量 .....	(20)
6.15	其它参数测量 .....	(20)
7	测试数据处理 .....	(22)
8	测试结果评价 .....	(29)

8.1 冷却水量对比法	(29)
8.2 冷却水温对比法	(30)
8.3 冷却能力评价	(32)
9 小型玻璃钢冷却塔测试及评价	(33)
10 测试报告	(35)
附录 A 冷却数近似计算公式	(36)
附录 B $\Delta t \sim \tau$ 关系曲线	(41)
附录 C 冷却塔评价计算例题	(42)
附录 D 噪声测试	(53)
附录 E 飘滴损失水量测试	(55)
附录 F 冷却塔验收测试常用仪表	(56)
本规程用词说明	(57)
附:条文说明	(59)

# 1 总 则

1.0.1 本规程为循环水冷却塔热力性能验收测试、噪声测试和飘滴损失水量测试提供统一的程序,各项参数的测量方法及测试数据的处理方法。

1.0.2 本规程适用于湿式冷却塔安装现场的验收测试,不适用于干式冷却塔、干湿式冷却塔及喷射式冷却塔的验收测试。非验收性质的冷却塔测试可参照本规程执行。

1.0.3 除本规程规定的冷却塔验收测试内容外,冷却塔验收的其他内容应按现行相关标准的规定执行。

1.0.4 冷却塔的验收测试工作应委托具有冷却塔测试能力和经验,并具有资格的独立单位承担。测试单位应与冷却塔的设计、制造及运行管理单位无隶属关系。冷却塔测试时,设计、制造和运行管理单位应派人参加。

1.0.5 验收测试应按以下步骤进行:

- 1 编写测试工作大纲;
- 2 作好测试前各项准备工作;
- 3 现场测试;
- 4 对测试数据进行处理分析计算;
- 5 编写验收测试报告。

## 2 术语、符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 湿式冷却塔 wet cooling tower

水和空气直接接触,同时进行热、质交换的冷却塔。

#### 2.1.2 冷却塔群 group of cooling towers

由多个机械通风冷却塔单列或多列布置而成的群或组。

#### 2.1.3 冷却塔格 cell of cooling tower

冷却塔群中的一个独立单元。具有单独的配水系统和风机,可以单独工作。

#### 2.1.4 冷却塔热力性能曲线 thermal performance

冷却塔散热性能特性数  $\Omega'$  与气水比  $\lambda$  的关系曲线 [ $\Omega' = f(\lambda)$ ]。在双对数坐标纸上为一直线。

#### 2.1.5 冷却塔工作特性曲线 performance curve

在设计气象参数和进出塔水温一定的条件下,由不同气水比  $\lambda$  计算出的冷却数  $\Omega$  和气水比  $\lambda$  的关系曲线 [ $\Omega = f(\lambda)$ ]。在双对数坐标纸上为一曲线。

#### 2.1.6 气水比 air/water ratio

指进塔干空气质量流量  $G$  与进塔冷却水质量流量  $Q$  之比,即  $\lambda = G/Q$ 。

#### 2.1.7 淋水密度 water derching density

在单位淋水填料横断面积上冷却水的流量。

#### 2.1.8 冷却能力 cooling capacity

冷却塔的散热量。设计冷却能力是指在设计工况条件下塔的散热量;测试冷却能力是指在测试工况条件下塔的散热量;实测冷却能力是指将实测进塔气象参数和进出塔水温,或进塔水温和水

量修正到与设计工况相同时塔的散热量。

**2.1.9 冷却塔评价指标** assessment index of a cooling tower

实测冷却能力与设计冷却能力之比。以符号  $\eta_{\text{AQ}}$  或  $\eta_{\text{st}}$  表示。

**2.1.10 环境空气干湿球温度** ambient dry-wet bulb temperature

在冷却塔上风向且不受出塔空气回流影响条件下测得的空气干湿球温度。

**2.1.11 进塔空气干湿球温度** inlet air dry-wet bulb temperature

包括湿空气回流和外部干扰影响在冷却塔进风口测得的空气干湿球温度。

**2.1.12 飘滴损失水量** drift loss

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。

**2.1.13 进塔水压** tower pumping head

进塔水管中心线处的总压力。包括静压、动压和以集水池上缘为基准面的位置压力。

**2.1.14 风机轴功率** fan driver output power

作用在风机叶片传动轴上的功率。不包括传动部分消耗的功率。

## 2.2 符号

$Q$ ——进塔水流量

$t$ ——水温

$\Delta t$ ——水温差

$Q_{\text{bo}}$ ——补充水流量

$t_{\text{bo}}$ ——补充水水温

$Q_{\text{po}}$ ——排污水流量

$t_{\text{po}}$ ——排污水水温

$\theta$ ——空气干球温度



$\tau$ ——空气湿球温度  
 $\phi$ ——空气相对湿度  
 $P$ ——大气压  
 $G$ ——进塔空气流量  
 $N$ ——风机轴功率  
 $P_w$ ——塔进水压力  
 $q$ ——淋水密度  
 $g$ ——单位面积空气质量流量  
 $\lambda$ ——气水比  
 $\Delta h$ ——焓差  
 $K_s$ ——以焓差为动力的容积散热系数  
 $X_d$ ——淋水填料深度  
 $Z_d$ ——淋水填料高度  
 $V_l$ ——淋水填料体积  
 $T_h$ ——出塔水温滞后测定时间  
 $V_w$ ——集水池水体积  
 $\rho_w$ ——水的密度  
 $\rho$ ——空气密度  
 $v_g$ ——空气比容  
 $C_w$ ——水的比热  
 $\Delta \epsilon$ ——热平衡误差  
 $h$ ——空气焓  
 $h''$ ——饱和空气焓  
 $x$ ——空气含湿量  
 $G_g$ ——干空气比热  
 $C_q$ ——水蒸汽比热  
 $\gamma_0$ ——温度  $0^\circ\text{C}$  时水的汽化热  
 $P''$ ——饱和空气水蒸汽分压力

- $K$ ——蒸发水量带走热量系数  
 $\Omega$ ——冷却数  
 $\Omega'$ ——特性数  
 $\eta_Q$ ——水量对比法冷却塔评价指标  
 $\eta_{st}$ ——水温对比法冷却塔评价指标  
 $\delta_h''$ ——饱和空气焓修正值  
 $\Phi$ ——综合数  
 $Q_z$ ——蒸发水量  
 $P_f$ ——漂滴损失水量占循环水量的百分数  
 $\beta_{xv}$ ——以含湿差为动力的容积散质系数

注：本规程中脚标 1—表示进塔参数，2—表示出塔参数，d—表示设计参数，t—表示测定参数，b—表示标准工况，m—表示平均值，(DA)—表示干空气。

### 3 测试前准备

3.0.1 测试单位在测试前应到冷却塔安装现场调查,有条件时宜参加冷却塔施工结束时的工程验收工作。

3.0.2 试验塔一般由委托单位指定,但应征求测试单位意见。冷却塔群中的单格塔测试,应避免相邻格和周围环境对其产生的影响。

3.0.3 测试前应对冷却塔进行全面检查,并消除缺陷,包括下列内容:

1 配水系统应清洁、通畅、无杂物堵塞,无漏水和溢水现象,喷头应无脱落、损坏且喷溅正常。

2 淋水填料应无缺损、无变形,填料表面不应有藻类、油污及其它杂物。

3 除水器不应有破损且表面清洁,不应有阻碍空气正常流动的杂物、油污及其它沉积物。

4 进塔水管上的控制阀门、冷却塔之间联络管阀门应启闭灵活,关闭严密。

5 冷却塔集水池水位应处于正常运行水位或测试要求水位。

3.0.4 循环水水质化验结果应符合本规程第 5.0.3 条的规定。

3.0.5 测试现场应进行下列准备工作:

1 确定各测试项目的测点位置;

2 搭设测试平台和气象亭;

3 架设临时电源;

4 加工及安装测试装置;

5 清理妨碍冷却塔正常运行和测试工作的杂物。

3.0.6 测试使用的仪表应按仪表使用说明书要求进行校验,并附有校验合格证书和校正曲线。

**3.0.7** 准备测试数据记录表格,仪器放置台架,以及塔上下的通讯联络工具。

**3.0.8** 测试准备工作完成后,参加测试人员应熟悉测试仪表,根据需要可进行预测试。

## 4 测试大纲

4.0.1 冷却塔测试前测试单位应编制测试大纲,并征得委托单位同意。测试大纲应包括下列内容:

- 1 测试目的和要求;
- 2 测试塔概况,循环水场平面图,冷却塔平、剖面图,冷却塔设计参数及性能曲线,冷却塔运行及循环水水质化验报告等资料;
- 3 测试内容及工况;
- 4 测定项目,测点布置,测试方法与使用仪表,以及需加工制作的设备;
- 5 资料处理及评价方法;
- 6 委托单位现场测试配合事项;
- 7 测试人员组成及分工;
- 8 测试工作进度计划;
- 9 安全操作注意事项及应采取的措施。

## 5 测试条件和要求

5.0.1 冷却塔验收测试应在冷却塔建成,或改造完工投入运行后一年内进行。

5.0.2 验收测试时环境气象条件应符合下列规定:

1 测试宜在气温较高季节、无雨天进行;

2 自然通风冷却塔不宜在雨后立即测试,测定开始时间应在雨停后 1h 以上;

3 机械通风冷却塔测试时,环境平均风速不得大于  $4.0 \text{ m/s}$ ,阵风每分钟平均风速不得大于  $6.0 \text{ m/s}$ ;

4 自然通风冷却塔测试时,环境平均风速不得大于  $3.0 \text{ m/s}$ ,阵风每分钟平均风速不得大于  $5.0 \text{ m/s}$ 。从风筒排出的雾气团,目测宜充满风筒出口;

5 自然通风冷却塔不应在大气温度存在逆温层条件下进行测试,必要时可按本规程第 6.15.1 条判定逆温层是否存在。

5.0.3 循环水水质应符合下列规定:

1 总溶解固体不超过  $5000 \text{ mg/L}$ ;

2 油、焦油或其它油脂性物质不超过  $10 \text{ mg/L}$ ;

3 循环水水质不符合要求时,应考虑水质对散热效果的影响。

5.0.4 验收时必须测试下列参数:

1 环境气象参数,包括空气干湿球温度、大气压及风速、风向;

2 进塔水流量;

3 进出塔水温;

4 进塔空气流量;

5 进塔空气干湿球温度;

- 6 补充水流量、水温；
- 7 排污水流量、水温；
- 8 风机轴功率。

5.0.5 进塔空气流量为验收测试必须确定的参数,确定方法如下:

1 自然通风冷却塔,进塔空气流量宜根据测定进塔水流量,进出塔水温及进塔气象参数用计算方法确定,如委托单位要求也可以直接测定;

2 机械通风冷却塔,进塔空气流量宜采用直接测定方法。当设计单位给出设计风机轴功率,且委托单位同意,进塔空气流量也可根据测定风机轴功率,以及设计进塔空气流量由计算确定。

5.0.6 验收测试时,如果补充水或排污影响冷却后水温测定,应停止向集水池补充水和排污。否则应测定补充水和排污水流量及水温。

5.0.7 验收测试可选测下列参数:

- 1 出塔空气干湿球温度;
- 2 塔内各部分阻力及风机全压;
- 3 进塔水压力;
- 4 塔内风速分布;
- 5 淋水密度及冷却后水温分布;
- 6 配水池或水槽水深。

5.0.8 测量参数值允许偏离设计值的范围如表5.0.8所示。当进塔水温偏离设计值较大,水温差达不到要求,评价时应计算进塔水温对散热性能的影响。

表 5.0.8 参数值允许偏离设计值范围

参数名称	允许偏离设计值
进塔湿球温度 $\tau_1$	+5℃ -10℃
进塔水流量 $Q$	±10%
进出塔水温差 $\Delta t$	±20%

**5.0.9** 工况调整到测试参数后,需稳定运行一段时间再进行测定,单格机械通风冷却塔稳定时间不宜小于 30 min,机械通风冷却塔群和自然通风冷却塔稳定时间不宜小于 1 h。

**5.0.10** 测定过程中每一工况参数的每次测定值,对该工况参数的起始值允许变化范围如表 5.0.10 所示。

表 5.0.10 测定参数允许变化值范围

参数名称	允许变化值
进塔湿球温度 $\tau_1$	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$
进塔水温 $t_1$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
进塔水流量 $Q$	$\pm 5\%$

**5.0.11** 每一工况测定延续时间不得少于 1 h。参数测定次数和时间间隔不得少于表 5.0.11-1 和表 5.0.11-2 的规定值。

表 5.0.11-1 必测参数测定次数及间隔

序号	参 数 名 称	次数(次)	间隔(min)
1	环境风速、风向	6	10
2	大气压及环境空气干湿球温度	6	10
3	进塔水流量	6	10
4	进塔水温	6	10
5	出塔水温	2~6	10~30
6	进塔空气流量	1~2	
7	进塔空气干湿球温度	6	10
8	补充水流量、水温	2	30
9	排污水流量、水温	2	30
10	风机轴功率	2	30

注:当采用集水容器测水温时,由于布点多,测定 6 次有困难时,可不少于 2 次。



表 5.0.11-2 选测参数测定次数及间隔

序号	参 数 名 称	次数(次)	间隔(min)
1	出塔空气干湿球温度	1~2	
2	各部分阻力及风机全压	2	30
3	进塔水压力	2	30
4	塔内风速分布	1	
5	淋水密度及冷却后水温分布	1~2	
6	配水池或水槽水深	2	30

5.0.12 每一工况各项参数应同时进行测定。当出现规程中第 6.7.2 条第 4 款情况时,出塔水温测定时间按该条规定进行。

5.0.13 冷却塔验收测试有效工况不宜少于3组。由改变进塔水流量来调整工况时,流量变化不宜大于设计进塔水流量的 $\pm 10\%$ 。

5.0.14 原始测定数据宜经委托单位参加测试的代表确认并签字。

## 6 测试仪表和测量方法

### 6.1 环境风速和风向测量

6.1.1 测量仪表宜采用带风向标的旋杯式风速风向计或带连续记录的风速风向计。

6.1.2 测点布置在冷却塔的上风向,距塔约 30~50 m 处的开阔地带。

6.1.3 风速风向计的测点高度在地面上 1.5~2.0 m 处。

### 6.2 环境空气干湿球温度测量

6.2.1 测量仪表宜选用机械通风干湿表,或精度不低于该表的其它测温仪表,表的最小刻度值不得大于  $0.2^{\circ}\text{C}$ ,精度不低于 0.5 级。

6.2.2 机械通风冷却塔仪表安装宜在距地面 1.5~2.0 m 处;自然通风冷却塔仪表宜安装在进风口高度的  $1/2$  处。

6.2.3 仪表设在气象亭内,避免阳光直接照射以及其它强辐射源照射。仪表操作应按使用说明书要求进行。

6.2.4 机械通风冷却塔可布置一处测点,距塔 30~50 m;自然通风冷却塔,根据塔的尺寸大小宜布置 2~6 处测点,测点布置在距塔外沿 15~30m 的圆周上,且圆心角相等。

### 6.3 大气压力测量

6.3.1 大气压力测量宜采用空盒式或水银式大气压力表。

6.3.2 测量仪表宜放在气象亭内。

## 6.4 进塔空气干湿球温度测量

6.4.1 自然通风冷却塔宜采用环境空气干湿球温度测定值。

6.4.2 机械通风冷却塔,除应按本规程第6.2.1、6.2.3条的规定进行外,尚应符合下列规定:

### 1 单格逆流式冷却塔:

1) 测点布置不应少于2处,矩形冷却塔单侧进风时,测点布置在进风口宽度的1/4及3/4处;双侧进风时,测点布置在两侧进风口宽度的1/2处;圆形塔周边进风时,测点可对称布置。

2) 测点在集水池上缘高1.5 m处,且与进风口距离在2.0 m之内。

### 2 单格横流式冷却塔:

1) 当进风口高度小于或等于4m时,测点应不小于2处,即每侧不少于1处,测点布置在进风口宽度1/2、集水池上缘高1.5 m处,距进风口百叶窗在2.0 m之内。

2) 当进风口高度大于4 m时,测点不少于4处,即每侧不少于2处,测点布置在进风口宽度1/2处,进风口高度的1/4和3/4处,距进风口百叶窗在2.0 m之内。

### 3 冷却塔群:

1) 逆流式冷却塔群,测点布置高度及与进风口距离与单格塔相同,测点数量每侧不宜少于3处,每一测点负担进风口面积应相等。

2) 横流式冷却塔群,测点布置高度及与进风口距离与单格塔相同,进风口高度小于或等于4 m时,测点数量每侧不宜少于3处,进风口高度大于4 m时,测点数量每侧不宜少于6处,每一测点负担进风口面积应相等。

## 6.5 进塔水流量测量

6.5.1 进塔水流量宜在冷却塔进水管上测量。当在进水管上测

定有困难时,也可在冷却塔出水管或渠道中测量,但要考虑冷却过程损失水量。

6.5.2 在进水管测流量时宜采用皮托管、超声波流量计,以及安装在管道上的插入式涡轮流量计,电磁流量计或文丘里管等,测试精度不低于 $\pm 2\%$ 。当进水管径小于200 mm时,也可采用孔板流量计。

6.5.3 在出水渠道中测流量时,宜采用堰或流速仪。

6.5.4 当流量较小时,可采用容积法或体积法测定。

6.5.5 测量仪表安装使用时,应严格按照仪器使用说明书要求进行,测点前后应有足够长的直段,在此直段上不得安装截流阀门。当测流直段无法满足要求时,测点可设在从进水侧算起直管段长的 $2/3$ 处,但应考虑对测量精度带来的影响,并应与委托单位协商决定。

6.5.6 采用皮托管测流量时应符合下列规定:

1 应在进水管测试断面上划分等面环,测点布置在该断面相互垂直的两条直径上。当管径小于500 mm时,测点可布置在一条直径上;

2 各等面环测点与管中心的距离按下式计算:

$$R_n = R \sqrt{\frac{2n-1}{2m}} \quad (6.5.6)$$

式中  $R_n$ ——从管中心到各测点的距离(m);

$R$ ——测试断面管道半径(m);

$n$ ——从中心算起的测点编号;

$m$ ——等面环数(个)。

3 等面环划分数目不应小于表6.5.6的规定值。

表 6.5.6 等面环划分数

管径(mm)	$\leq 300$	300~900	1000~1500	$\geq 1600$
等面环数(个)	3	5	7	9

## 6.6 进塔水温测量

6.6.1 测温仪表宜采用水银温度计,或热电偶、热电阻温度计。仪表的最小分度值不大于 $0.1^{\circ}\text{C}$ ,精度不低于0.2级。

6.6.2 测点宜设在进塔水管或配水竖井内,横流式冷却塔也可在配水池内测定。

6.6.3 在进塔水管测温时,需预先在水管上安装测温套管,并在套管内注入少量机油,油面应淹没温度计的感温元件。也可从上塔水管的放空管放水到容器中,在容器中测定水温。

6.6.4 采用水银温度计在配水池、竖井或渠道中测温时,温度计宜装保护性套管,套管内存水应淹没温度计的感温元件。

6.6.5 当自然通风冷却塔进水管为敷设在集水池水面下的钢管时,则应视测温点位置不同,考虑钢管散热量对进出塔水温的影响,并进行修正,其修正值不大于 $0.1^{\circ}\text{C}$ 。

## 6.7 出塔水温测量

6.7.1 温度仪表应符合第6.6.1条规定。

6.7.2 单座冷却塔或冷却塔群测试时,水温可在出塔水管、渠道或水泵出口测定,并应符合下列规定:

1 在出水管测定时,可以装测温套管或将水接到容器中测定;

2 在出水渠道中测定时,测点布置沿宽度方向不宜少于3处,沿深度方向不宜少于2处,当测试断面水温分布不均或成层分布时,应沿渠道宽度和深度方向增加测点;

3 在水泵出口测温时,应计入水泵能量损失引起的水温升高;

4 在冷却水落到集水池流到测温点时间大于5 min时,则温度测定时间要较其它参数测定时间推迟,推迟的时间按下式计算:

$$T_h = \frac{60\rho_w V_w}{Q} \quad (6.7.2)$$

式中  $T_h$ ——推迟时间(min);  
 $\rho_w$ ——水的密度(kg/m<sup>3</sup>);  
 $V_w$ ——集水池中水的体积(m<sup>3</sup>);  
 $Q$ ——进塔水流量(kg/h)。

6.7.3 逆流式机械通风冷却塔群中的单格塔测试时,如果集水池相互连通,应在被测格集水池水面上设集水槽或集水容器,在集水槽出口或集水容器中测定水温。集水槽及集水容器的设置应符合下列规定:

1 设集水槽时,根据集水池面积大小,集水槽可布置4~14条,槽宽不宜大于300 mm,集水槽受水面积不宜小于集水池面积的15%;

2 设集水容器时,每个容器受水面积不宜小于0.05 m<sup>2</sup>,集水容器等间距布置,每一测点负担的淋水面积不宜大于4 m<sup>2</sup>。

6.7.4 横流式机械通风冷却塔群中的单格塔测温时,可设置集水槽或集水容器,水温在集水槽或集水容器中测定。

## 6.8 进塔空气流量测量

6.8.1 自然通风冷却塔进塔空气流量测量应符合下列规定:

1 测量仪表宜采用旋桨式风速仪或其它测量仪表;

2 测试断面宜选在风筒的喉部,或接近风筒出口不受外界风速影响的断面上,逆流式冷却塔也可布置在塔内除水器上不低于4.0 m处;

3 宜采用划分等面环的方法布置测点,视测试断面的尺寸大小划分10~20个等面环,测点布置在有代表性两条相互垂直的直径上。等面环上测点与塔中心距离按本规程公式(6.5.6)计算。

6.8.2 机械通风冷却塔进塔空气流量测量应符合下列规定:

1 测量仪表宜采用皮托管及微压计;

2 测点宜布置在风机吸入侧的风筒断面上,被测定断面气流应稳定,且气流方向与断面垂直,测试断面与风机叶片轴线间垂直

距离不宜小于 0.4 m;

3 测点布置采用等面环方法,每个等面环面积不宜大于 3.0 m<sup>2</sup>,并选择两条有代表性相互垂直的直径上布置测点,各等面环测点与风筒中心距离按下式计算:

$$R_n = \sqrt{\frac{R^2 - r^2}{2m}(2n-1) + r^2} \quad (6.8.2)$$

式中  $r$ ——测试断面无效区半径(m)。

4 计算风量时应扣除无效区面积;

5 当无条件在风机吸入侧风筒内测量时,也可在下列部位测量:

1) 当冷却塔进风口不装进风百叶窗时,在冷却塔进风口测量。采用旋桨式或热球式等风速仪表时,应视进风口尺寸大小,划分若干个等面积或不等面积的方格,在每个方格中心测风速,方格尺寸不宜大于 1.0 m×1.0 m。

2) 在冷却塔风筒出口测量,采用旋桨式等风速仪表,并按本条采用划分等面环方法规定布置测点。

6 逆流式机械通风冷却塔不淋水时可进入塔内,在淋水填料上方或除水器上方 0.5 m~0.8 m 处测量空气流量,测量仪表可采用旋桨式或热球式等风速仪表。

## 6.9 补充水、排污水流量及水温测量

6.9.1 补充水和排污水流量及水温宜在补充水管和排污水管上测量。

6.9.2 补充水和排污水流量测量应按照本规程第6.5节有关规定进行。

6.9.3 补充水和排污水温测量应按照本规程第6.6节有关规定进行。

## **6.10 出塔空气干湿球温度测量**

**6.10.1** 测量仪表宜采用遥测通风干湿表、热电阻温度计和水银温度计等测温仪表。温度计的最小读数值不应大于  $0.2^{\circ}\text{C}$ ，仪表精度不应低于 0.5 级。

**6.10.2** 当测量空气干球温度有困难时，可仅测空气湿球温度，出塔空气视为接近饱和，其相对湿度可取 98%。

**6.10.3** 自然通风冷却塔测点宜布置在风筒喉部，或接近风筒出口不受外界风速影响的断面上，对于逆流式自然通风冷却塔也可布置在除水器之上、气流稳定及便于测定的高度处。

**6.10.4** 机械通风冷却塔测点可布置在风筒出口，或风机进风侧的风筒内。

**6.10.5** 宜按本规程第 6.8.2 条规定采用划分等面环方式布置测点。

**6.10.6** 出塔空气温度取各测点温度的算术平均值，当测试断面风速和温度分布相差较大时，宜采用温度和风量的加权平均值。

## **6.11 淋水密度及冷却后水温分布测量**

**6.11.1** 在集水池水面上采用集水容器或自动记数式翻板雨量计测定水量及水温。

**6.11.2** 自然通风冷却塔测线不宜少于 4 条半径，且圆心角相等，并视塔底部直径大小每条测线上等间距布置 8~15 个测点。机械通风冷却塔在集水池上布置测线，测线不宜少于 4 条，视塔的尺寸大小每条测线布置 6~12 个测点。

**6.11.3** 测温仪表按本规程第 6.6.1 条选用。

## **6.12 塔内风速分布测量**

**6.12.1** 自然通风冷却塔塔内风速分布宜和进塔空气流量合并测量，详见本规程第 6.8.1 条。



**6.12.2** 逆流式机械通风冷却塔塔内风速分布仅在不淋水时进入塔内测量,宜和不淋水时进塔空气量合并测量,详见本规程第6.8.2条。

### **6.13 塔内各部分阻力及风机全压测量**

**6.13.1** 塔内各部分阻力及风机全压测量宜采用笛形管或皮托管与微压计。

**6.13.2** 根据测试要求笛形管可布置在冷却塔进风口,淋水填料上下,除水器上,以及风机进风与风机出风口等位置。

**6.13.3** 笛形管宜由钢管、铝管或铜管制作,测压孔直径不宜小于5 mm,孔距宜在250 mm左右,测压孔总面积不宜大于笛形管断面积。

**6.13.4** 测压管在测试断面上应均匀布置,每个测试断面笛形管数目不宜少于3条,且孔眼应正对气流方向。

**6.13.5** 为了避免淋水时水滴堵塞孔眼,可在孔眼上作防水帽。

### **6.14 风机轴功率测量**

**6.14.1** 风机轴功率宜采用功率表直接测定,或测定电动机的电流、电压和功率因数后由计算确定。

**6.14.2** 当在控制室测定功率时,如果配电线路距电动机较远,应考虑线路的电压降,并对读数进行修正。

### **6.15 其它参数测量**

**6.15.1** 大气逆温层判定,可采用遥测通风干湿表、热电偶或电阻温度计等测温仪表,在塔的上风向且不受热辐射及其它热源干扰处,用绳索、梯子或氢气球将感温元件升高到8~10 m高度进行测定。

**6.15.2** 冷却塔进水压力测点宜布置在进塔水管中心线处,静压可由压力表测定,动压可通过进塔水流量和测压点处的管断面面积计算确定。测点至水池上缘垂直距离所产生的压力,可根据垂直距离计算。

**6.15.3** 配水槽或配水池深,可用直尺直接测量。

## 7 测试数据处理

7.0.1 每一工况各项参数测定值,取该工况历次测定值的算术平均值作为该工况参数值。

7.0.2 出塔水温在水管或渠道中测定时,如果集水池有补充水和排污水,且补充水仅考虑排污水量和蒸发水量,则冷却后出塔水温度按下式计算:

$$t_2 = \frac{Q t_2' + Q_{po} t_{po} - Q_{bo} t_{bo}}{Q + Q_{po} - Q_{bo}} \quad (7.0.2)$$

式中  $t_2$ ——出塔水温(℃);

$t_2'$ ——测点实测出塔水温(℃);

$t_{po}$ ——排污水温度(℃);

$t_{bo}$ ——补充水温度(℃);

$Q$ ——进塔水流量(kg/h);

$Q_{po}$ ——排污水流量(kg/h);

$Q_{bo}$ ——补充水流量(kg/h)。

7.0.3 当以测得出塔空气干湿球温度进行热平衡计算时,有效工况的热平衡误差不宜大于 $\pm 7\%$ ,热平衡误差按下式计算:

$$\Delta\epsilon = \left[ 1 - \frac{KG(h_2 - h_1)}{C_w Q(t_1 - t_2)} \right] \times 100\% \quad (7.0.3)$$

式中  $\Delta\epsilon$ ——热平衡误差(%);

$G$ ——进塔空气流量[kg(DA)/h];

$h_1$ ——进塔空气焓[kg(DA)/h];

$h_2$ ——出塔空气焓[kg(DA)/h];

$C_w$ ——水的比热[kJ/(kg·℃)];

$K$ ——蒸发水量带走热量系数;

$t_1$ ——进塔水温(℃)。

7.0.4 进塔空气流量根据风机轴功率,按下式计算:

$$G_t = G_d \left[ \frac{v_d}{v_t} \right] \left[ \frac{N_t}{N_d} \right]^{1/3} \left[ \frac{\rho_d}{\rho_t} \right]^{1/3} \quad (7.0.4-1)$$

式中  $G_t, G_d$ ——实测和设计进塔空气流量[kg(DA)/h];

$N_t, N_d$ ——实测和设计风机轴功率(kW);

$v_t, v_d$ ——实测和设计空气比容[m<sup>3</sup>/kg(DA)];

$\rho_t, \rho_d$ ——实测和设计空气密度(kg/m<sup>3</sup>)。

风机进风口处空气的比容  $v$  和密度  $\rho$  按下式计算:

$$v = \frac{0.4615T}{P} (0.622 + x) \quad (7.0.4-2)$$

式中  $v$ ——空气比容[m<sup>3</sup>/kg(DA)];

$x$ ——空气含湿量[kg/kg(DA)];

$T$ ——空气绝对温度(K);

$P$ ——大气压(kPa)。

$$\rho = \frac{x+1}{v} \quad (7.0.4-3)$$

式中  $\rho$ ——空气密度(kg/m<sup>3</sup>)。

7.0.5 当在风机吸入侧的风筒中,由划分等面环方法测定空气动力学风量时,测定断面的平均风速按下式计算:

$$V_t = \frac{1}{n} (\sqrt{P_{d1}} + \sqrt{P_{d2}} + \dots + \sqrt{P_{dn}}) \sqrt{\frac{2}{\rho_t}} \quad (7.0.5)$$

式中  $V_t$ ——测定断面的平均风速(m/s);

$\rho_t$ ——测定断面空气密度(kg/m<sup>3</sup>);

$P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dn}$ ——分别为各测点动压(Pa)。

7.0.6 由测定工况参数计算自然通风冷却塔进塔空气流量步骤如下:

1 根据设计工况参数计算进塔空气密度  $\rho_{d1}$ , 出塔空气密度  $\rho_{d2}$ , 空气平均密度  $\rho_{dm}$ , 以及密度差  $\Delta\rho_d$ 。

2 根据实测工况参数计算进塔空气密度  $\rho_{t1}$ , 并假定 4 组进塔空气量  $G'_i$ , 分别计算出 4 组出塔空气密度  $\rho_{d2}$ , 空气平均密度  $\rho_{tm}$ , 以及密度差  $\Delta\rho_{t0}$ 。

3 按下式计算密度差  $\Delta\rho_c$ 。

$$\frac{\Delta\rho_c}{\Delta\rho_d} = \left[ \frac{G'_t}{G_d} \right]^2 \left[ \frac{\rho_{dm}}{\rho_{tm}} \right] \left[ \frac{Q_t}{Q_d} \right]^{K_0} \quad (7.0.6)$$

式中  $\Delta\rho_c$ ——满足阻力和抽力相等的密度差( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\Delta\rho_d$ ——设计进塔空气密度差( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$G'_t$ ——假定进塔空气流量[ $\text{kg}(\text{DA})/\text{h}$ ];

$G_d$ ——设计进塔空气流量[ $\text{kg}(\text{DA})/\text{h}$ ];

$\rho_{dm}$ ——设计进塔空气平均密度[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$\rho_{tm}$ ——测定参数及假定进塔空气流量下空气平均密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$Q_d$ ——设计进塔水流量( $\text{kg}/\text{h}$ );

$K_0$ ——由试验确定的系数, 当无实测资料时取  $K_0 = 0.4$ 。

假定 4 组进塔空气流量  $G'_i$  值, 计算出 4 组相应的密度差  $\Delta\rho_{c0}$ 。

4 将假定的进塔空气流量  $G'_i$  和密度差  $\Delta\rho_{t0}$  点绘在以空气流量  $G'_i$  为横坐标, 密度差  $\Delta\rho$  为纵坐标的方格纸上, 求得  $G'_t = f(\Delta\rho_t)$  关系曲线, 如图(7.0.6)所示。将假定的进塔空气流量  $G'_i$  和密度差  $\Delta\rho_c$  也点绘在该图上, 求得  $G'_t = f(\Delta\rho_c)$  关系曲线, 两曲线相交于 0 点, 其相应的空气流量  $G'_{t0}$  即为所求。

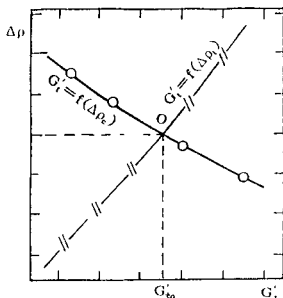


图 7.0.6 空气量计算图

7.0.7 逆流式冷却塔冷却数按下式计算:

$$\Omega_n = \frac{1}{K} \int_{t_2}^{t_1} \frac{C_w}{h'' - h} dt \quad (7.0.7)$$

式中  $\Omega_n$ ——逆流式冷却塔冷却数;

$h$ ——空气焓[kJ/kg(DA)];

$h''$ ——饱和空气焓[kJ/kg(DA)]。

冷却数  $\Omega_n$  的近似计算宜采用分段不少于 8 段的辛普逊积分法或切比雪夫积分法, 以及计算精度不低于上述公式的其它公式。

7.0.8 横流式冷却塔冷却数按下式计算:

$$\Omega_h = \frac{1}{K} \int_0^{Z_d} \int_0^{X_d} \frac{-C_w \partial t / \partial z}{h'' - h} dx dz \quad (7.0.8-1)$$

式中  $\Omega_h$ ——横流式冷却塔冷却数;

$X_d$ ——从进风口算起淋水填料深度(m);

$Z_d$ ——从淋水填料顶层表面向下算起的高度(m)。

冷却数  $\Omega_h$  的近似计算宜采用中心差分法,修正系数法及平均焓差法,或精度不低于上述公式的其它方法。

采用差分法时,按下式计算:

$$\frac{C_w \partial t}{K \partial z} Z_d = -\lambda \frac{\partial h}{\partial x} X_d = -\Omega'_h (h'' - h) \quad (7.0.8-2)$$

式中  $\Omega'_h$ ——横流式冷却塔特性数;

$\lambda$ ——气水比。

或按下式计算:

$$\frac{1}{K} C_w q \frac{\partial t}{\partial z} = -g \frac{\partial h}{\partial x} = -K_a (h'' - h) \quad (7.0.8-3)$$

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

$g$ ——单位进风面积质量风速 [ $\text{kg}(\text{DA})/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ];

$K_a$ ——以焓差为动力的容积散热系数 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot \Delta h)$ ]。

## 7.0.9 热力计算中各参数计算公式如下:

### 1 空气焓

$$h = C_g \theta + x(r_o + C_q \theta) \quad (7.0.9-1)$$

式中  $h$ ——空气焓 [ $\text{kJ}/\text{kg}(\text{DA})$ ];

$\theta$ ——空气干球温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$x$ ——空气含湿量 [ $\text{kg}/\text{kg}(\text{DA})$ ];

$r_o$ ——温度为  $0^{\circ}\text{C}$  时水的汽化热 ( $\text{kJ}/\text{kg}$ ); 取  $r_o = 2500.8$ ;

$C_g$ ——干空气比热 [ $\text{kJ}/(\text{kg}(\text{DA}) \cdot ^{\circ}\text{C})$ ]; 取  $C_g = 1.005$ ;

$C_q$ ——水蒸汽比热 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ]; 取  $C_q = 1.846$ 。

### 2 空气含湿量

$$x = 0.622 \frac{\phi P''_{\theta}}{P - \phi P''_{\theta}} \quad (7.0.9-2)$$

式中  $\phi$ ——空气相对湿度 (%);

$P$ ——大气压 ( $\text{kPa}$ );

$P''_{\theta}$ ——空气温度等于  $\theta^{\circ}\text{C}$  时, 饱和水蒸气分压力 ( $\text{kPa}$ )。

### 3 空气相对湿度

$$\phi = \frac{P''_{\tau} - 0.000662P(\theta - \tau)}{P''_{\theta}} \times 100\% \quad (7.0.9-3)$$

式中  $\tau$ ——空气湿球温度(℃)；

$P''_{\tau}$ ——空气温度等于  $\tau$ ℃ 时饱和水蒸汽分压力(kPa)。

### 4 饱和水蒸汽压力

$$\lg P'' = 2.0057173 - 3.142305 \left( \frac{10^3}{T} - \frac{10^3}{373.16} \right) + 8.21 \lg \frac{373.16}{T} - 0.0024804(373.16 - T) \quad (7.0.9-4)$$

式中  $T$ ——开尔文温度(K),  $T = 273.16 + \theta$ 。

### 5 出塔空气焓

$$h_2 = h_1 + \frac{C_w \Delta t}{K\lambda} \quad (7.0.9-5)$$

式中  $h_2$ ——出塔空气焓[kJ/kg(DA)]；

$\Delta t$ ——进出塔水温差(℃)。

### 6 出塔空气干球温度

$$\theta_2 = \theta_1 + (t_m - \theta_1) \frac{h_2 - h_1}{h_m'' - h_1} \quad (7.0.9-6)$$

式中  $\theta_2$ ——出塔空气干球温度(℃)；

$\theta_1$ ——进塔空气干球温度(℃)；

$t_m$ ——进出塔平均水温(℃)；

$h_m''$ ——空气温度等于平均水温  $t_m$  时饱和空气焓[kJ/kg(DA)]。

计算时假定出塔空气为饱和状态。

### 7 蒸发水量带走热量系数

$$K = 1 - \frac{t_2}{586 - 0.56(t_2 - 20)} \quad (7.0.9-7)$$

### 8 以焓差为动力容积散热系数

$$K_a = \frac{\dot{Q}}{V_1} \quad (7.0.9-8)$$



式中  $K_a$ ——以焓差为动力的容积散热系数( $\text{kJ}/\text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot \Delta h$ );

$\Omega'$ ——冷却塔的特性数;

$V_l$ ——淋水填料体积( $\text{m}^3$ )。

7.0.10 冷却塔测试时,当进塔水温  $t_{tl}$  与该塔设计水温  $t_{dl}$  不相等,且差值大于  $\pm 2^\circ\text{C}$  时,应将测定的特性数进行水温修正后再作评价计算,修正计算公式如下:

$$\Omega'_{tx} = \Omega'_t \left[ \frac{t_{dl}}{t_{tl}} \right]^{-P_0} \quad (7.0.10)$$

式中  $\Omega'_{tx}$ ——修正后特性数;

$\Omega'_t$ ——实测特性数;

$t_{dl}$ ——设计进塔水温( $^\circ\text{C}$ );

$t_{tl}$ ——实测进塔水温( $^\circ\text{C}$ );

$P_0$ ——系数,根据有关淋水填料实测值选用,无资料时

取  $P_0 = 0.4$ 。

7.0.11 冷却塔进水压力按下式计算:

$$P_w = P_j + P_d + P_z \quad (7.0.11)$$

式中  $P_w$ ——进水压力( $\text{kPa}$ );

$P_j$ ——冷却塔进水管测点或折算到该点的静压值( $\text{kPa}$ );

$P_d$ ——测点动压值( $\text{kPa}$ );

$P_z$ ——从测点到集水池上缘垂直距离所产生的压力( $\text{kPa}$ )。

## 8 测试结果评价

### 8.1 冷却水量对比法

8.1.1 根据实测工况参数,求出修正到设计工况条件下的气水比  $\lambda_c$  和冷却水量  $Q_c$ ,再与设计水量  $Q_d$  相比,评价指标按下式计算:

$$\eta_{sQ} = \frac{G_t}{Q_d \lambda_c} = \frac{Q_c}{Q_d} \times 100\% \quad (8.1.1)$$

式中  $\eta_{sQ}$ ——评价指标(%);

$G_t$ ——实测进塔空气流量[kg(DA)/h];

$Q_d$ ——设计冷却水流量(kg/h);

$\lambda_c$ ——修正到设计工况下气水比;

$Q_c$ ——修正到设计工况下进塔水流量(kg/h)。

8.1.2 当设计或制造单位提供设计工况参数及该塔的热力性能曲线或公式时,求修正气水比  $\lambda_c$  计算步骤如下:

1 根据实测进塔水流量  $Q_t$  和进塔空气流量  $G_t$ ,求测试气水比  $\lambda_t$ 。

2 根据气水比  $\lambda_t$  和实测工况参数计算实测工况的特性数  $\Omega'_t$ 。

3 将气水比  $\lambda_t$  和特性数  $\Omega'_t$  点绘在修正气水比计算图上求得 b 点,如图(8.1.2)所示,图中 I 为该塔热力性能曲线,II 为工作特性曲线。

4 过 b 点引热力性能曲线 I 的平等线 III,与工作特性曲线 II 相交于 C 点,其相应的气水比  $\lambda_c$  即为所求。

8.1.3 当设计制造单位仅提供设计工况参数,而未提供塔的热力性能曲线或公式时,修正气水比  $\lambda_c$  的计算步骤如下:

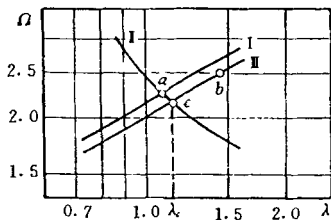


图 8.1.2 修正气水比计算图

- 1 取两组不同工况参数分别求出气水比  $\lambda_i$  和特性数  $\Omega'_i$ 。
- 2 将求得两组的气水比  $\lambda_i$  和特性数  $\Omega'_i$  分别点绘在修正气水比计算图上, 得  $b_1$  和  $b_2$  两点如图(8.1.3)所示。

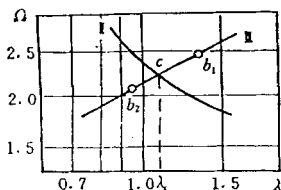


图 8.1.3 修正气水比计算图

- 3 连接  $b_1$  和  $b_2$  点得直线 III, 直线 III 与工作特性曲线 II 相交于 C 点, 其相应的气水比  $\lambda_c$  即为所求。

## 8.2 冷却水温对比法

### 8.2.1 根据实测工况参数, 按设计或制造单位提供冷却塔的热力

性能曲线或公式,计算出实测参数下冷却水温差  $\Delta t_d$  与该工况下的实测冷却水温差  $\Delta t_r$  之比,并按下式计算评价指标:

$$\eta_{st} = \frac{\Delta t_r}{\Delta t_d} \times 100\% \quad (8.2.1)$$

式中  $\eta_{st}$ ——评价指标(%);

$\Delta t_r$ ——实测冷却水温差( $^{\circ}\text{C}$ );

$\Delta t_d$ ——计算水温差( $^{\circ}\text{C}$ )。

8.2.2 按该方法评价时,设计或制造单位必须提供该塔的热力性能曲线或公式。

8.2.3 求计算水温差  $\Delta t_d$  步骤如下:

1 假定出塔水温  $t_2$ ,根据实测工况参数大气压  $P_1$ ,空气干湿球温度  $\theta_1$ 、 $\tau_1$ ,进塔水流量  $Q_1$ ,进塔水温  $t_{11}$ ,及进塔空气流量  $G_1$ ,计算相应的冷却数  $\Omega$ ,共假定 3 组出塔水温  $t_2$ ,计算出 3 组相应的冷却数  $\Omega$  值。

2 将上述假定 3 组出塔水温  $t_2$  和相应的冷却数  $\Omega$ ,点绘在以水温  $t_2$  为横座标,冷却数  $\Omega$  为纵座标的方格纸上,并给出  $\Omega = f(t_2)$  关系曲线,如图(8.2.3)所示。

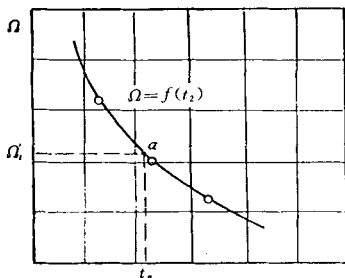


图 8.2.3 出塔水温计算图

3 根据该塔设计时采用的热力性能曲线或公式,由实测气水比  $\lambda_t$  求得相应的特性数  $\Omega'$ ,并在图 8.2.3 上由特性数  $\Omega'$  引水温座标的平行线,与图中  $\Omega = f(t_2)$  曲线相交于 a 点,其水温为  $t_a$ ,则该水温  $t_a$  与进塔水温  $t_{cl}$  之差,即为计算水温差  $\Delta t_{do}$ 。

### 8.3 冷却能力评价

8.3.1 当评价指标达到95%及以上时,应视为达到设计要求;当达到 105%以上时,应视为超过设计要求。

8.3.2 当评价指标达不到95%时,应分析原因,并会同有关各方提出改进意见及措施,改进后的冷却塔可再进行一次测试。如果测试再达不到要求时,则视为不合格产品。

## 9 小型玻璃钢冷却塔测试及评价

9.0.1 本章适用于具有标准设计工况,即进塔水温  $t_{b1} = 37^{\circ}\text{C}$ ,出塔水温  $t_{b2} = 32^{\circ}\text{C}$ ,水温差  $\Delta t = 5^{\circ}\text{C}$ ,进塔空气湿球温度  $\tau_{b1} = 28^{\circ}\text{C}$ ,以及大气压力  $P = 101.3\text{kPa}$  的小型玻璃钢冷却塔的测试及评价。

9.0.2 小型玻璃钢冷却塔,按本章所述方法进行测试和评价。当要求严格时,也可参照上述各章有关方法进行测试及评价。

9.0.3 测试时,进塔水流量  $Q$  应和标准设计工况水流量  $Q_b$  相等,进塔水温  $t_{t1}$  偏离标准设计工况值不得超过  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,湿球温度  $\tau_1$  不小于  $15^{\circ}\text{C}$ ,且大气压  $P_t$  应接近标准工况大气压力。

9.0.4 每一工况运行稳定时间不应少于  $30\text{ min}$ ,测定次数不少于 5 次,间隔  $10\text{ min}$ 。每次测定值允许变化范围如表 9.0.4 所示。

表 9.0.4 测定值允许变化表

水流量 $Q$	$\pm 2\%$
进塔水温 $t_1$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
进塔空气湿球温度 $\tau_1$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$

9.0.5 当测定进塔水温  $t_{t1}$  不等于标准工况进塔水温  $t_{b1}$  时,需将实测进塔水温差  $\Delta t_x$ ,修正到进塔水温等于标准工况进塔水温  $t_{b1}$  时的水温差  $\Delta t_x$ ,并按下式计算差:

$$\Delta t_x = \Delta t_t \left[ 1 + \frac{t_{t1} + 45 - \tau_{t1} - \Delta t_t}{45(t_{t1} - \tau_{t1}) - \Delta t_t^2/3} (37 - t_{t1}) \right] \quad (9.0.5)$$

式中  $\Delta t_x$ ——修正到标准进塔水温  $t_{b1}$  时的水温差( $^{\circ}\text{C}$ );

$\Delta t_t$ ——实测水温差( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_{t1}$ ——实测进塔水温( $^{\circ}\text{C}$ );

$\tau_{t1}$ ——实测进塔空气湿球温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

9.0.6 测定时湿球温度  $\tau_{t1}$  不等于标准工况湿球温度  $\tau_{b1}$  时,需将水温差修正到标准工况湿球温度  $\tau_{t1} = 28^{\circ}\text{C}$  时的水温差  $\Delta t_{x28}$ ,可

由公式计算或查  $\Delta t - \tau$  曲线图。

1 由公式计算：

$$\Phi_t = \frac{0.0254}{\Delta t_x} (37.0 - 0.5\Delta t_x - \tau_{t1}) (27.51 - 0.5\Delta t_x + \tau_{t1}) + 2.12 \times 10^{-3} \Delta t_x \quad (9.0.6-1)$$

式中  $\Phi_t$ ——综合数。

$$\Delta t_{x28} = 48.38 + 59.06\Phi_t - \sqrt{(48.38 + 59.06\Phi_t)^2 - 1498.82} \quad (9.0.6-2)$$

2 由查图方法求  $\Delta t_{x28}$  步骤如下：

在如图(9.0.6)所示的  $\Delta t - \tau$  关系曲线图上,在横坐标上根据实测的湿球温度  $\tau_{t1}$  向上引垂线,在纵坐标上由计算出的水温差  $\Delta t_x$  引横坐标的平行线,两条线相交于 A 点,过 A 点引曲线群的平行线,与从湿球温度  $\tau_{b1} = 28^\circ\text{C}$  所引垂线相交于 B 点,过 B 点引横轴的平行线所求出的水温差  $\Delta t_{x28}$  即为所求。

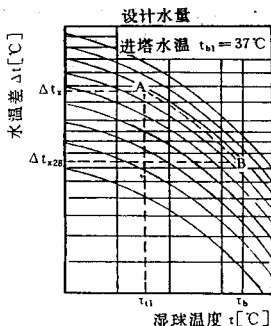


图 9.0.6  $\Delta t - \tau$  关系曲线图

9.0.7 冷却能力评价按下式计算：

$$\eta_{st} = \frac{\Delta t_{x28}}{\Delta t_b} = \frac{\Delta t_{x28}}{5} \times 100\% \quad (9.0.7)$$

## 10 测试报告

### 10.0.1 测试报告应包括下列内容:

- 1 测试任务,测试目的及要求;
- 2 冷却塔设计、施工及运行管理概况,测试冷却塔平面布置图,以及标明测点位置图;
- 3 测试项目、测试方法、测点布置及使用仪表名称、规格和精度;
- 4 测试范围及测试工况;
- 5 测试数据处理方法及测试数据汇总;
- 6 存在问题分析及建议;
- 7 参加测试单位及人员名单。

10.0.2 测试委托单位根据需要可邀请有关专家对测试工作进行评议和鉴定。



## 附录 A 冷却数 $\Omega$ 近似计算公式

### A. 1 逆流式冷却塔

#### A. 1.1 辛普逊积分法:

$$\Omega_n = \frac{C_w \Delta t}{3Kn} \left[ \frac{1}{\Delta h_0} + \frac{4}{\Delta h_1} + \frac{2}{\Delta h_2} + \frac{4}{\Delta h_3} + \cdots \cdots \frac{4}{\Delta h_{n-1}} + \frac{1}{\Delta h_n} \right] \quad (\text{A. 1. 1})$$

式中  $\Delta t$  —— 进出塔水温差 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$n$  —— 水温差  $\Delta t$  等分数,  $n$  取偶数;

$\Delta h_0, \Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \cdots, \Delta h_{n-1}, \Delta h_n$  —— 分别表示空气温度等于  $t_2, t_2 + \Delta t/n, t_2 + 2\Delta t/n, t_2 + 3\Delta t/n, \cdots, t_2 + (n-1)\Delta t/n, t_2 + \Delta t$  时饱和空气焓与相应空气焓的差 [ $\text{kJ/kg(DA)}$ ].

#### A. 1.2 切比雪夫积分:

$$\Omega_n = \frac{C_w \Delta t}{4K} \left[ \frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right] \quad (\text{A. 1. 2})$$

式中,  $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4$  —— 分别表示各分点空气温度等于水温时饱和空气焓与相应空气焓之差 [ $\text{kJ/kg(DA)}$ ].

分点温度及相应焓差如表 A. 1. 2 所示。

A. 1.2 分点温度及相应焓差

分点温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	相应焓差 [ $\text{kJ/kg(DA)}$ ]
$t_2$	
$t_2 + 0.1\Delta t$	$\Delta h_1$
$t_2 + 0.4\Delta t$	$\Delta h_2$
$t_1 - 0.4\Delta t$	$\Delta h_3$
$t_1 - 0.1\Delta t$	$\Delta h_4$
$t_1$	

## A. 2 横流式冷却塔

### A. 2.1 修正系数法:

$$\Omega_h = \frac{\Omega_n}{F_0} \quad (\text{A. 2.1-1})$$

$$F_0 = 1 - 0.106 \left[ 1 - \frac{h''_2 - h_2}{h''_1 - h_1} \right]^{3.5} \quad (\text{A. 2.1-2})$$

式中  $F_0$ ——修正系数;

$\Omega_n$ ——按逆流式冷却数计算公式计算出的冷却数;

$h_1$ ——进塔空气焓[kJ/kg(DA)];

$h''_1$ ——空气温度等于进塔水温时饱和空气焓[kJ/kg(DA)];

$h_2$ ——出塔空气焓[kJ/kg(DA)];

$h''_2$ ——空气温度等于出塔水温时饱和空气焓[kJ/kg(DA)]。

### A. 2.2 平均焓差法:

$$\Omega_h = \frac{C_w \Delta t}{K \Delta h_m} \quad (\text{A. 2.2-1})$$

式中  $\Delta h_m$ ——平均焓差[kJ/kg(DA)]。

平均焓差按下式计算:

$$\Delta h_m = X, (h''_1 - \delta h'' - h_1) \quad (\text{A. 2.2-2})$$

式中  $X$ , 根据  $\eta$  和  $\xi$  从图(A. 2. 2)中查得。 $\eta$ 、 $\xi$  及  $\delta h''$  分别按下式计算:

$$\eta = \frac{h''_1 - h''_2}{h''_1 - \delta h'' - h_1} \quad (\text{A. 2.2-3})$$

$$\xi = \frac{h_2 - h_1}{h''_1 - \delta h'' - h_1} \quad (\text{A. 2.2-4})$$

$$\delta h'' = \frac{h''_1 + h''_2 - 2h''_m}{4} \quad (\text{A. 2.2-5})$$

式中  $h''_m$ ——空气温度等于平均水温时饱和空气焓[kJ/kg(DA)]。

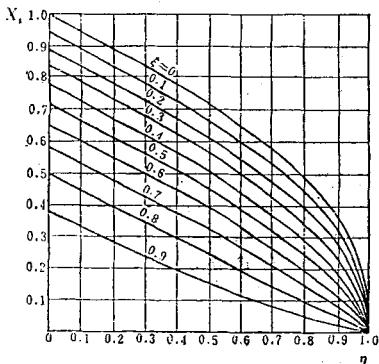


图 A. 2. 2  $X_i$  计算图

### A. 2. 3 中心差分法:

1 令  $\xi = \frac{X}{X_d}$ ,  $\zeta = \frac{Z}{Z_d}$ , 则 (7. 0. 8-2) 式变成下式:

$$\frac{C_w}{K} \frac{\partial t}{\partial \xi} = -\lambda \frac{\partial h}{\partial \xi} = -\Omega'_h (h'' - h) \quad (\text{A. 2. 3-1})$$

将交换断面  $\xi=0 \sim 1$ ,  $\zeta=0 \sim 1$  分成  $m$  和  $n$  等分, 则共有  $(m+1)(n+1)$  个格子点, 其位置以  $(i, j)$  表示, 分格为正方形, 如图 (A. 2. 3) 所示。

#### 2 计算公式

1) 当边界条件  $j=1, \zeta=0$  时,  $t_{(i,1)} = t_1, h''_{(i,1)} = h''_1, h_{(i,1)}$  按下式计算:

$$h_{(i,1)} = \frac{h''_1 \left\{ \exp\left[\frac{\Omega'_h}{\lambda m}(i-1)\right] - 1 \right\}}{\exp\left[\frac{\Omega'_h}{\lambda m}(i-1)\right]} \quad (\text{A. 2. 3-2})$$

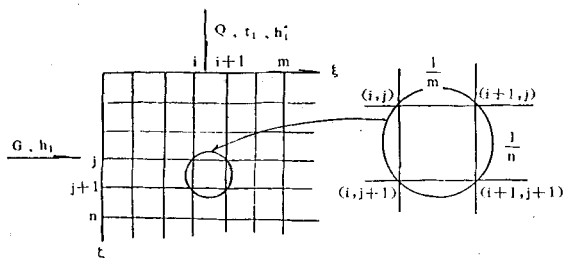


图 A.2.3 计算断面分格图

2) 当边界条件  $i=1, \xi=0$  时,  $h_{(1,j)}=h_1, t_{(1,j+1)}$  按下式计算:

$$t_{(1,j+1)} = t_{(1,j)} + (K_0 + 2K_1 + 2K_2 + K_3)/6 \quad (\text{A.2.3-3})$$

式中  $K_0, K_1, K_2, K_3$  按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} K_0 &= R_3 [h''_{(0,j)} - h_1] \\ K_1 &= R_3 [h''_{(k0)} - h_1] \\ K_2 &= R_3 [h''_{(k1)} - h_1] \\ K_3 &= R_3 [h''_{(k2)} - h_1] \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.2.3-4})$$

式中  $h''_{(k0)}, h''_{(k1)}, h''_{(k2)}$  —— 分别为水温  $t = t_{(1,j)} + K_0/2$ ,

$t = t_{(1,j)} + K_1/2, t = t_{(1,j)} + K_2$  时的饱和空气焓 [kJ/kg (DA)]。

$R_3$  按下式计算:

$$R_3 = \frac{-K\Omega'_b}{C_w n} \quad (\text{A.2.3-5})$$

3)  $t = t_{(i+1,j+1)}$  按下式计算:

$$t_{(i+1,j+1)} = t_{(i,j)} - (t_{(i,j+1)} - t_{(i+1,j)} + R_1 [2h''_{(i,j)} + h''_{(i,j+1)}])$$

$$+h''_{(i+1,j)}-2h_{(i,j)}-2h_{(i,j+1)}] \} / [1+R_1 C_{s(i,j)}] \quad (\text{A. 2. 3-6})$$

式中  $R_1$  及  $C_s$  分别按下式计算:

$$R_1 = \frac{K \Omega'_h \lambda m}{C_w (2 \lambda m + \Omega'_h) n} \quad (\text{A. 2. 3. -7})$$

$$C_{s(i,j)} = \frac{h''_{(i+1,j+1)} - h''_{(i,j)}}{t_{(i+1,j+1)} - t_{(i,j)}} \quad (\text{A. 2. 3-8})$$

4)  $h_{(i+1,j+1)}$  按下式计算:

$$h_{(i+1,j+1)} = h_{(i,j+1)} - h_{(i+1,j)} + h_{(i,j)} - \frac{C_w n}{K \lambda m} [t_{(i+1,j+1)} - t_{(i+1,j)} + t_{(i,j+1)} - t_{(i,j)}] \quad (\text{A. 2. 3-9})$$

5)  $t_2$  由下式计算:

$$t_2 = \frac{1}{m} [t_{(1,n+1)}/2 + t_{(m+1,n+1)}/2 + \sum_{i=2}^m t_{(i,n+1)}] \quad (\text{A. 2. 3-10})$$

3 当进塔空气干球温度  $\theta_1$ , 湿球温度  $r_1$ , 大气压  $P$ , 进塔水流量  $Q$ , 进塔水温  $t_1$ , 出塔水温  $t_2$ , 进塔空气流量  $G$ , 淋水填料的高度  $Z_d$ 、深度  $X_d$  已知时, 将交换面分成边长不大于 0.5m 的方格, 在假定特性数  $\Omega'_h$  的条件下, 按照由上到下, 从左到右的顺序计算出塔水温  $t_2$ , 如算出的  $t_2$  与已给出的  $t_2$  相差小于  $\pm 0.05^\circ\text{C}$  时, 假定的特性  $\Omega'_h$  即为所求, 否则需重新假定特性数  $\Omega'_h$ , 直到符合要求为止。

4 假定特性数  $\Omega'_h$  后求出水温度  $t_2$  步骤如下:

1) 当  $i=1, 2, 3 \cdots m+1$  时,  $t_{(i,1)} = t_1$ ,  $h''_{(i,1)} = h''_1$ , 由式 (A. 2. 3-2) 计算  $h_{(i,1)}$ ;

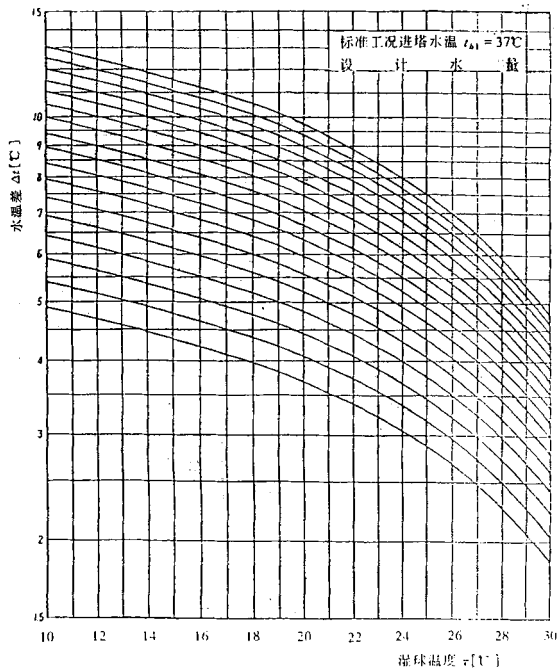
2) 当  $j=1, 2, 3 \cdots n+1$  时,  $h_{(1,j+1)} = h_1$ , 由式 (A. 2. 3-3) 计算  $t_{(1,j+1)}$ , 并根据  $t_{(1,j+1)}$  计算  $h''_{(1,j+1)}$ ;

3 当  $i=1, 2, 3 \cdots m$  和  $j=1, 2, 3 \cdots n$  时, 由式 (A. 2. 3-6) 计算  $t_{(i+1,j+1)}$  并由  $t_{(i+1,j+1)}$  计算  $h''_{(i+1,j+1)}$ ;

4) 由式 (A. 2. 3-9) 计算  $h_{(i+1,j+1)}$ ;

5) 由式 (A. 2. 3-10) 计算  $t_2$ 。

附录 B  $\Delta t - \tau$  关系曲线图



## 附录 C 冷却塔评价计算例题

### C.0.1 机械通风冷却塔

〔例题 1〕 已知某机械抽风逆流式冷却塔的设计和实测工况参数如表 C.0.1-1 所示,设计塔热力性能曲线 I,工作特性曲线 II,如图(C.0.1-1)所示,试对该塔进行评价。

表 C.0.1-1 设计工况和实测工况参数

项 目	设计工况	实测工况
进塔空气干球温度(℃)	30.0	26.8
进塔空气湿球温度(℃)	27.6	22.6
进塔水流量(t/h)	2271.0	2078.0
进塔水温(℃)	46.1	40.4
出塔水温(℃)	29.5	26.5
风机轴功率(kW)	175.0	157.5
进塔空气流量( $l_{(DA)}/h$ )	2641.2	
气 水 比	1.16	
大气压力(Pa)	$9.8 \times 10^4$	$9.8 \times 10^4$

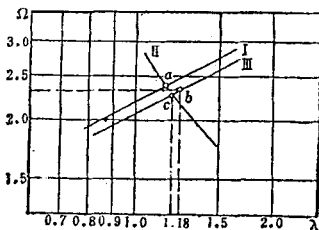


图 C.0.1-1 修正气水比计算图

[解]

1) 由本规程式(7.0.4-1)计算实测进塔空气流量  $G_1$  和气水比  $\lambda_1$ ,

$$\begin{aligned} G_1 &= G_d \left[ \frac{\nu_d}{\nu_1} \right] \left[ \frac{N_1}{N_d} \right]^{1/3} \left[ \frac{\rho_d}{\rho_1} \right]^{1/3} \\ &= 2641.2 \left[ \frac{0.919}{0.901} \right] \left[ \frac{157.5}{175.0} \right]^{1/3} \left[ \frac{1.112}{1.127} \right]^{1/3} \\ &= 2589.4 [t(DA)/h] \\ \lambda_1 &= \frac{G_1}{Q_1} = \frac{2589.4}{2078.0} = 1.25 \end{aligned}$$

2) 根据实测工况参数由式(A.1.1)计算特性数  $\Omega'_1 = 2.33$ 。

3) 在图(C.0.1-1)上根据计算出的特性数  $\Omega'_1$  和气水比  $\lambda_1$  求得 b 点, 过 b 点作平行于设计塔热力性能曲线 I 的直线 III, 直线 III 与工作特性曲线 II 相交于 C 点, 其相应的气水比  $\lambda_c = 1.18$ ;

4) 由本规程式(8.1.1)进行评价计算

$$\eta_Q = \frac{G_1}{Q_d \lambda_c} = \frac{2589.4}{2271.0 \times 1.18} \times 100\% = 96.6\%$$

5) 评价: 冷却塔的实测冷却能力达到设计冷却能力的 96.6%, 根据本规程第 8.3.1 条规定, 该塔已达到设计要求。

如果冷却塔直接测定进塔空气流量时, 其计算可以采用实测的空气流量  $G_1$  进行评价。

[例题 2] 某机械抽风逆流式冷却塔的设计工况及实测工况参数如表 C.0.1-2 所示, 设计单位未给出设计塔热力性能曲线, 试对该塔进行评价。



表 C.0.1-2 设计工况和实测工况参数

项 目	设计工况	实测工况 I	实测工况 II
进塔空气干球温度(℃)		24.4	26.3
进塔空气湿球温度(℃)	24.7	20.8	21.6
进塔水流量(t/h)	550.0	738.15	508.0
进塔水温(℃)	40.0	45.3	42.2
出塔水温(℃)	30.0	30.6	28.2
气 水 比		0.93	1.34
特 性 数		1.10	1.37
大气压力(Pa)	$9.8 \times 10^4$	$9.8 \times 10^4$	$10.04 \times 10^4$

[解]

1) 根据设计工况参数,假定不同的气水比 $\lambda$ ,计算相应的冷却数 $\Omega$ 如表 C.0.1-3 所示,并根据假定的气水比 $\lambda$ 和冷却数 $\Omega$ 绘制工作特性曲线 II,如图(C.0.1-2)所示;

表 C.0.1-3 冷却数计算表

$\lambda$	0.6	0.8	1.0	2.0
$\Omega$	2.34	1.56	1.35	1.08

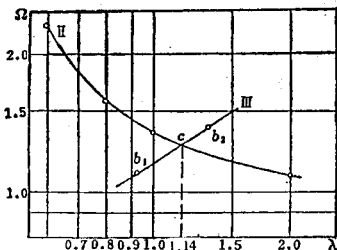


图 C.0.1-2 修正气水比计算图

2) 将两组实测工况的气水比和特性数分别点绘在图(C.0.1

-2)上,得实测工况点  $b_1$  和  $b_2$ , 连接  $b_1$ 、 $b_2$  两点的直线Ⅲ与工作特性曲线Ⅱ交于 C 点,其相应的气水比  $\lambda_c = 1.14$ 。

3) 由本规程式(8.1.1)进行评价

由实测工况 I 得

$$G_1 = Q_1 \lambda_1 = 738.15 \times 0.93 = 686.48 [t(DA)/h]$$

$$\eta_{AQ} = \frac{G_1}{Q_d \lambda_c} \times 100\% = \frac{686.48}{550.0} \times 1.14 = 109.5\%$$

由实测工况 II 得

$$G_2 = Q_2 \lambda_2 = 508.0 \times 1.34 = 680.72 [t(DA)/h]$$

$$\eta_{AQ} = \frac{G_2}{Q_d \lambda_c} \times 100\% = \frac{680.72}{550.0 \times 1.14} \times 100\% = 108.6\%$$

平均值  $\eta_{AQ} = 109.0\%$

4) 评价:冷却塔实测冷却能力达到设计冷却能力的 109.0%, 已超过设计要求。

[例题 3] 某机械抽风逆流式冷却塔,实测工况如表 C.0.1-4 所示,制造厂提供冷却塔热力性能公式  $\Omega' = 1.48\lambda^{0.57}$ , 由冷却水温对比法进行评价。

表 C.0.1-4 实测工况参数

项 目	数 值	项 目	数 值
进塔空气湿球温度(℃)	23.9	出塔水温(℃)	28.0
进塔水流量(kg/h)	$352.6 \times 10^3$	水温差(℃)	11.4
进塔空气流量[kg(DA)/h]	$405.5 \times 10^3$	气水比	1.15
进塔水温(℃)	39.4	大气压力(Pa)	$9.8 \times 10^4$

[解]

1) 在测定参数条件下,假定不同的出塔水温  $t_2$ , 计算相应的冷却数,计算步骤从略,计算结果如表 C.0.1-5 所示;

表 C.0.1-5 冷却数计算表

$t_2(^{\circ}\text{C})$	27.4	28.4	30
$\Omega$	2.12	1.59	1.06

2) 根据计算结果绘制  $\Omega = f(t_2)$  关系曲线, 如图(C.0.1-3)所示;

3) 根据厂方提供冷却塔热力性能公式, 在实测气水比  $\lambda_1 = 1.15$  时求特性数  $\Omega'$ ;

$$\Omega' = 1.48\lambda^{0.57} = 1.48 \times (1.15)^{0.57} = 1.60$$

4) 从图(C.0.1-3)求  $\Omega' = 1.6$  时, 出塔水温  $t_2 = 28.45^{\circ}\text{C}$ , 则水温差  $\Delta t_d = t_1 - t_2 = 39.4 - 28.45 = 10.95$ , 由本规程评价公式(8.2.1)计算, 则

$$\eta_s = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_d} = \frac{11}{10.95} = 100\%$$

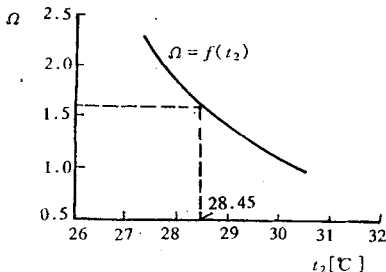


图 C.0.1-3 冷却水温计算图

5) 评价: 冷却塔实测冷却能力达到设计冷却能力。

[例题4] 某小型机械通风逆流式冷却塔标准工况和实测工况参数如表 C.0.1-6 所示, 未测定进塔空气流量, 用本规程第 9

章所给公式进行评价。

表 C.0.1-6 标准和实测工况参数

项 目	标准工况		实测工况	
	符号	数值	符号	数值
冷却水流量(kg/h)	$Q_b$	15600	$Q_i$	15600
进塔水温(℃)	$t_{u1}$	37.0	$t_{u1}$	38.5
出塔水温(℃)	$t_{i2}$	32.0	$t_{i2}$	29.7
水 温 差(℃)	$\Delta t_b$	5.0	$\Delta t_i$	8.8
进塔空气湿球温度(℃)	$\tau_{u1}$	28.0	$\tau_{u1}$	20.1
大 气 压(Pa)	$P_b$	$9.94 \times 10^4$	$P_i$	$9.94 \times 10^4$

[解]

1) 由式(9.0.5)求实测进塔水温  $t_{u1} = 38.5^\circ\text{C}$  修正到标准工况  $t_{u1} = 37.0^\circ\text{C}$  时水温差  $\Delta t_x$ 。

$$\begin{aligned}
 \Delta t_x &= \Delta t_i \left[ 1 + \frac{t_{u1} + 45 - \tau_{u1} - \Delta t_i}{45(t_{u1} - \tau_{u1}) - \Delta t_i^2/3} (37 - t_{u1}) \right] \\
 &= \Delta t_i \left[ 1 + \frac{38.5 + 45 - 20.1 - 8.8}{45(38.5 - 20.1) - \frac{(8.8)^2}{3}} (37 - 38.5) \right] \\
 &= 7.9(^\circ\text{C})
 \end{aligned}$$

2) 由式(9.0.6-1)计算综合数  $\Phi$

$$\begin{aligned}
 \Phi_i &= \frac{0.0254}{\Delta t_x} (37.0 - 0.5\Delta t_x - \tau_{u1}) (27.51 - 0.5\Delta t_x + \tau_{u1}) \\
 &\quad + 2.12 \times 10^{-3} \Delta t_x \\
 &= \frac{0.0254}{7.9} (37.0 - 0.5 \times 7.9 - 20.1) (27.51 - 0.5 \\
 &\quad \times 7.9 + 20.1) + 2.12 \times 10^{-3} \times 7.9 = 1.835
 \end{aligned}$$

3) 由式(9.0.6-2)计算修正到标准工况进塔湿球温度  $\tau_{u1} =$

28.0℃时的水温差  $\Delta t_{x28}$ 。

$$\begin{aligned}\Delta t_{x28} &= 48.38 + 59.06\Phi_1 - \sqrt{(48.38 + 59.06\Phi_1)^2 - 1498.82} \\ &= 48.38 + 59.06 \times 1.835 -\end{aligned}$$

$$\sqrt{(48.38 + 59.06 \times 1.835)^2 - 1498.82} = 4.86$$

4) 由式(9.0.7)进行评价计算

$$\eta_{st} = \frac{\Delta t_{x28}}{5} = \frac{4.86}{5} = 0.97\%$$

5) 由查附录 B 图得  $\Delta t_{x28} = 4.85$ , 则

$$\eta_{st} = \frac{\Delta t_{x28}}{5} = \frac{4.85}{5} = 97\%$$

6) 评价:该塔实测冷却能力达到标准工况冷却能力的 97%, 已达到设计要求。

这两种方法评价结果基本相同,因附录 B 图中水温差  $\Delta t$  为半对数坐标,查图时因人不同可能带来 1%左右的误差。

### C.0.2 自然通风冷却塔

[例题 5] 某自然通风冷却塔的有效抽风高度  $H_0 = 100$  m, 淋水面积  $F_0 = 8144$  m<sup>2</sup>, 设计工况和实测工况参数如表 C.0.2-1 所示, 设计塔的热力性能曲线如图(C.0.2-2)直线 I 所示。未直接测定进塔空气流量, 试对该塔进行评价。

[解]

1) 计算设计工况下参数

根据设计工况, 假定出塔空气饱和可求得以下参数(计算过程从略):

进塔空气焓  $h_1 = 56.9$  kJ/kg(DA)

出塔空气焓  $h_2 = 125.2$  kJ/kg(DA)

出塔空气干球温度  $\theta_2 = 31.7$  °C

进塔空气密度  $\rho_1 = 1.1964$  kg/m<sup>3</sup>

出塔空气密度  $\rho_2 = 1.1381$  kg/m<sup>3</sup>

平均密度

$$\rho_{\text{am}} = 1.1673 \text{ kg/m}^3$$

密度差

$$\Delta\rho_d = 0.0583 \text{ kg/m}^3$$

表 C.0.2-1 设计工况和实测工况参数

项 目	设计工况	实测工况
进塔空气干球温度(℃)	20.5	21.1
进塔空气湿球温度(℃)	15.6	17.8
进塔水流量(t/h)	45342.0	43981.0
进塔水温(℃)	38.9	39.2
出塔水温(℃)	25.6	27.0
进塔空气流量[t(DA)/h]	38586.0	
气 水 比	0.85	
淋水填料处风速(m/s)	1.1	
大气压力(Pa)	$9.8 \times 10^4$	$9.8 \times 10^4$

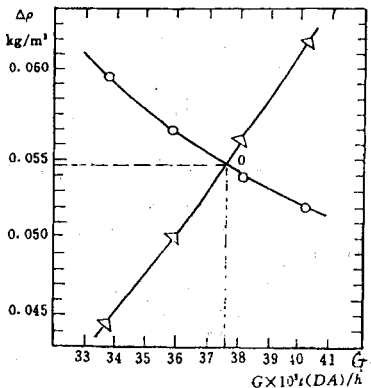


图 C.0.2-1 空气流量计算图

2) 确定测试工况下进塔空气流量

假定不同的进塔空气流量,根据实测工况参数计算进出塔空气密度差  $\Delta\rho_1$  和满足阻力和抽力相等的密度差  $\Delta\rho_c$ ,由图解法求空气流量,步骤如下:

(1) 假定进塔空气流量  $G_1' = 33748 t_{(DA)}/h$ , 气水比  $\lambda$  为

$$\lambda = \frac{G_1'}{Q_1} = \frac{33748}{43981} = 0.767$$

由实测的工况参数计算可得

进塔空气焓  $h_1 = 68.16 \text{ kJ/kg(DA)}$

出塔空气焓  $h_2 = 138.23 \text{ kJ/kg(DA)}$

出塔空气干球温度  $\theta_2 = 33.1^\circ\text{C}$

进塔空气密度  $\rho_1 = 1.1921 \text{ kg/m}^3$

出塔空气密度  $\rho_2 = 1.1318 \text{ kg/m}^3$

平均密度  $\rho_m = 1.1620 \text{ kg/m}^3$

密度差  $\Delta\rho_1 = 0.0603 \text{ kg/m}^3$

(2) 由本规程式(7.0.6)计算密度差  $\Delta\rho_c$

$$\begin{aligned}\Delta\rho_c &= \left[ \frac{G_1'}{G_d} \right]^2 \left[ \frac{\rho_m}{\rho_1} \right] \left[ \frac{Q_1}{Q_d} \right]^{0.4} \Delta\rho_1 \\ &= \left[ \frac{33748}{38586} \right]^2 \left[ \frac{1.1673}{1.1620} \right] \left[ \frac{43981}{45342} \right]^{0.4} 0.0583 \\ &= 0.04426 (\text{kg/m}^3)\end{aligned}$$

(3) 假定 4 组不同的空气流量并分别按上述步骤进行计算,其计算结果见表 C.0.2-2。

表 C.0.2-2 空气参数计算结果表

序号	进塔空气量 $G_1'$ [t(DA)/h]	气水比 $\lambda$	出塔空气焓 $h_2$ [kJ/kg(DA)]	出塔气温 $\theta_2$ [ $^\circ\text{C}$ ]	出塔空气密度 $\rho_2$ [kg/m <sup>3</sup> ]	空气密度差 $\Delta\rho_1$ [kg/m <sup>3</sup> ]	平均密度 $\rho_m$ [kg/m <sup>3</sup> ]	密度差 $\Delta\rho_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	33748	0.767	138.23	33.1	1.1318	0.0603	1.1620	0.04426
2	35925	0.817	132.96	32.3	1.1352	0.0569	1.1637	0.05008
3	38102	0.866	130.35	31.7	1.1382	0.0539	1.1652	0.05626
4	40280	0.916	127.00	31.2	1.1411	0.0510	1.1666	0.06280

(4) 在方格纸上绘制空气流量  $G$  和进出塔空气密度差  $\Delta\rho_i$ , 空气流量  $G$  和密度差  $\Delta\rho_e$  的关系曲线  $G_i = f(\Delta\rho_i)$  和  $G_e = f(\Delta\rho_e)$ , 相交于 O 点, 如图 (C.0.2-1) 所示, 其相应的空气流量  $G_i = 37600 t_{(DA)}/h$  即为所求, 则气水比为

$$\lambda_i = \frac{G_i}{Q_i} = \frac{37600}{43981} = 0.855$$

3) 求修正到设计工况下的气水比  $\lambda_e$ 。

根据实测工况参数及由计算确定的进塔空气量  $G_i$  和气水比  $\lambda_i$ , 由本规程附录 A 式 (A.1.1) 计算实测冷却数  $\Omega_i = 1.33$ 。

在图 (C.0.2-2) 上, 根据冷却数  $\Omega_i = 1.33$ , 气水比  $\lambda_i = 0.855$  求得 b 点, 过 b 点作平行于设计塔热力性能曲线 I 的平行线 III, 该线与工作特性曲线 II 交于 C 点, 其相应的气水比  $\lambda_e = 0.951$ 。

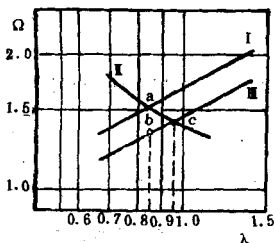


图 C.0.2-2 修正气水比计算图

4) 由本规程式 (8.1.1) 进行评价计算

$$\eta_{AQ} = \frac{G_i}{Q_d \lambda_e} = \frac{37600}{45342 \times 0.951} = 87.2\%$$

5) 评价: 冷却塔实测冷却能力仅为设计冷却能力的 87.2%, 该塔未达到设计要求。

[例题 2] 某自然通风冷却塔, 设计单位提供了设计塔的热



力性能曲线,测试时共作了3组工况,每组工况参数如表 C.0.2-3 所示,试对该塔进行评价。

表 C.0.2-3 实测工况参数

项 目	实 测 工 况		
	1	2	3
进塔空气干球温度(℃)	32.0	32.5	33.0
进塔空气相对湿度(%)	70.0	65.0	65.0
进塔水流量(t/h)	4000.0	4000.0	4000.0
进塔水温(℃)	40.3	40.5	41.0
出塔水温(℃)	32.0	32.1	32.5
冷却水温差(℃)	8.3	8.4	8.5
大气压力(Pa)	$9.8 \times 10^4$	$9.8 \times 10^4$	$9.8 \times 10^4$

[解]

1) 根据各组实测工况参数以及设计单位给出设计塔的热力性能曲线,由本规程第 8.2.3 条方法步骤计算出塔水温  $t_2$ ,以及冷却水温差  $\Delta t$ ,如表 C.0.2-4 所示。

2) 由本规程式(8.2.1)求出各工况的评价指标  $\eta_a$  分别为 103.8%, 101.2%, 102.4%, 3 组工况的平均值为  $\eta_a = 102.5\%$ 。

3) 评价:冷却塔实测冷却能力达到了设计要求。

表 C.0.2-4 设计出塔水温和冷却水温差

项 目	计 算 值		
	1	2	3
出塔水温(℃)	32.3	32.3	32.7
冷却水温差(℃)	8.0	8.3	8.3

## 附录 D 噪声测试

**D.0.1** 本附录规定了自然通风冷却塔和机械通风冷却塔噪声测试方法。

**D.0.2** 测量仪表应采用精密声级计,并在使用前和使用后进行标定。

**D.0.3** 噪声测试应在设计水量和风机功率下进行,其水量和功率变化不超过 10%。且不受水泵运行噪声影响。

**D.0.4** 应在冷却塔进风口处两个以上不同方向布置测点。

**D.0.5** 当塔体为圆形时测点与塔边缘的水平距离应等于塔体直径;当塔体为矩形时,测点与塔边缘的水平距离可取塔的当量直径  $D_d$ ,并按下式计算:

$$D_d = 1.13 \sqrt{BL} \quad (\text{D.0.5})$$

式中  $B$  ——塔宽度(m);

$L$  ——塔长度(m);

测点距地面高度取 1.5 m。

**D.0.6** 噪声测试时环境应满足下列规定:

- 1 环境风速不大于 4.5 m/s;
- 2 环境温度应在扩音器允许范围之内;
- 3 外界不下雨。

**D.0.7** 测定噪声时,环境应保持安静,当环境噪声与冷却塔运转的噪声相差不足 10 dB·A 时,应对测得的冷却塔噪声进行修正,其修正值如表 D.0.7 所示。

表 D.0.7 噪声修正值

差 值 $\text{dB}\cdot\text{A}$	3	4~5	6~9	$\geq 10$
修正值 $\text{dB}\cdot\text{A}$	3	2	1	0

当差值小于  $2 \text{ dB}\cdot\text{A}$  时,噪声可不测定。

**D.0.8** 应取各测点的算术平均值作为测试噪声值。

## 附录 E 飘滴损失水量测试

**E.0.1** 冷却塔飘滴损失水量可以通过测定补充水流量、排污水流量以及蒸发水量,由下式计算:

$$P_t = \frac{Q_{w} - Q_{p} - Q_e}{Q} \times 100\% \quad (\text{E.0.1})$$

式中  $P_t$ ——飘滴损失水量占循环水量的百分数(%);

$Q_w$ ——补充水流量(kg/h);

$Q_p$ ——排污水流量(kg/h);

$Q_e$ ——蒸发水量(kg/h);

$Q$ ——进塔水流量(kg/h)。

**E.0.2** 蒸发水量  $Q_e$  可以通过测定进塔水流量、进出塔水温度由计算确定,此时水的散热仅考虑由蒸发散出的热量。

**E.0.3** 当冷却塔群中的单格塔测试时,因集水池相互连通不能按 E.0.1 条规定测试时,可采用滤纸吸湿称重法进行确定。

**E.0.4** 滤纸吸湿称重法测定步骤如下

1 将直径 11 cm 滤纸放入称量皿中,并在分析天平上称量;

2 机械通风冷却塔在风筒出口,自然通风冷却塔可在除器之上划分 5~10 个等面环,沿相互垂直的两条直径上布置测点,测定时将滤纸从称量皿中取出并固定在支架上,然后水平方向送入测点,使滤纸平面与风速方向垂直,视飘滴情况停留 1~5 min,然后将吸湿滤纸从固定支架上取出放入称量皿中。

3 将放吸湿后滤纸的称量皿称量,吸湿前后称量值之差,即为该滤纸整个面积上的飘滴损失水量,该工况滤纸所占面积的飘滴损失水量为各测点损失水量的平均值,由此根据测试断面面积可算出整个塔的飘滴损失水量。

4 在测定飘滴损失水量时,其进塔水量与空气量变化不应超过设计值的 5%。

## 附录 F 冷却塔验收测试常用仪表

仪 器 名 称	型 号 规 格
机动通风干湿表	DHM <sub>2</sub> 型 -26 ~ +51℃, 0.2℃
电动通风干湿表	HM <sub>3</sub> 型 -25 ~ +50℃, 0.2℃
遥测通风干湿表	HIS <sub>1-1</sub> 型 -30 ~ +45℃, 0.1℃
轻便三杯风速风向表	DEM 型 1 ~ 30 m/s
电传风速风向表	EYI 型 0 ~ 12 m/s
热球式风速计	QDF-2A 型 0.05 ~ 10 m/s QDF-3 型 0.05 ~ 30 m/s
电子翼轮式风速计	MSF-1 型 0.2 ~ 5.0 m/s MSF-2 型 0.5 ~ 25 m/s
中速风表	DFA-2 型 0.5 ~ 10 m/s
高速风表	DFA-4 型 0.8 ~ 25 m/s
空盒气压表	DYM <sub>3</sub> 型 (800 ~ 1064 hPa) DYM <sub>3-1</sub> 型 370 ~ 770 mb YM <sub>4</sub> 810 ~ 1050 mb
补偿式微压计	DJM <sub>5</sub> 型 0 ~ 150 mm
斜管压力计	YYT-200B
倾斜式微压计	Y61 型 0 ~ 200 mmH <sub>2</sub> O
二级标准温度计	0 ~ 50℃ 0.1℃
实验水银温度计	0 ~ 50℃ 0.1℃
深水温度计	591 型 SWM <sub>1-1</sub> 型
精密声级计	DN <sub>2</sub>
电容传声器	CH-11
传声器放大器	FDC-2
超声波流量计	FLB 便携式 ZCL-15 型便携式

## 本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待,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”。

2 条文中指定应按其它有关标准执行的写法为“应按……执行”或“应符合……的要求(或规定)”。

中国工程建设标准化协会标准

# 冷却塔验收测试规程

CECS 118:2000

条 文 说 明

# 目 次

1 总则 .....	(59)
2 术语、符号 .....	(60)
2.1 术语 .....	(60)
3 测试前准备 .....	(61)
4 测试大纲 .....	(62)
5 测试条件和要求 .....	(63)
6 测试仪表和测量方法 .....	(68)
6.1 环境风速和风向测量 .....	(68)
6.2 环境空气干湿球温度测量 .....	(68)
6.4 进塔空气干湿球温度测量 .....	(69)
6.5 进塔水流量测量 .....	(70)
6.6 进塔水温测量 .....	(71)
6.7 出塔水温测量 .....	(71)
6.8 进塔空气流量测量 .....	(74)
6.13 塔内各部分阻力及风机全压测量 .....	(75)
6.14 风机轴功率测量 .....	(75)
6.15 其它参数测量 .....	(75)
7 测试数据处理 .....	(77)
8 测试结果评价 .....	(84)
9 小型玻璃钢冷却塔测试及评价 .....	(85)
附录 A .....	(86)



# 1 总 则

**1.0.1** 本规程是为循环水冷却塔热力性能验收提供统一的测试程序,参数测量,测试数据处理和测试结果的评价方法,因为验收测试不同于其它试验,它是履行工程合同的一部分,涉及工程是否可以验收,所以制订统一的验收标准是非常必要的。美国、英国、德国、日本等国家都有关于冷却塔的验收试验标准。有一些冷却塔测试,如工厂为了解运行一段时间的冷却塔热力性能,或设计制造单位为了获得新投入运行塔的热力性能曲线,或某些参数所作的测试,它不属于验收测试,但可以参照进行。

**1.0.2** 本条给出了适用塔型范围,即仅适用于湿式冷却塔,不适用于干式冷却塔、干湿式冷却塔及喷射式冷却塔,目前国内主要使用湿式冷却塔,其它塔型虽然也有使用,但数量很少。

**1.0.3** 冷却塔验收测试除本规程规定内容之外,尚有淋水填料、风机以及塔体材质、结构等方面内容,其验收应执行相关标准的规定。

**1.0.4** 国内过去冷却塔验收测试作的不够规范,有的是由设计或制造单位自己作测试,为了保证验收测试的公正性,本规程规定由与被测试塔的设计、制造及运行管理单位无关的第三方来进行。并对测试单位提出了要求,即应具有测试经验和能力以及测试资格,以保证测试结果的准确性。国内经常作冷却塔测试工作的单位不多,有科研院所及大专院校,这些单位测试仪表齐全,技术力量比较强。也有一些设计院作过冷却塔测试。随着冷却塔使用量增加,需要作测试的塔增多,选择合适的测试单位也是十分必要的。

## 2 术语、符号

### 2.1 术 语

本节共给出 14 条术语,除个别术语在国家标准《给水排水设计基本术语标准》GBJ 125-89 列出外,大部分为本规程专用的。

**2.1.6** 气水比定义不统一,有的资料中横流式冷却塔气水比,定义为单位面积进塔空气质量流量与单位面积进塔冷却水质量流量之比,本规程不再分横流式和逆流式冷却塔,均指总的进塔干空气质量流量和进塔冷却水质量流量之比。

**2.1.14** 这一条明确风机轴功率是指作用在风机叶片传动轴上的功率,不包括传动部分所消耗的功率,目前国内有的风机制造厂给出的风机轴功率与该条相同。

### 3 测试前准备

**3.0.2** 测试塔一般由委托单位指定,但应与测试单位协商,所选冷却塔群中的单格塔应避免其它格对其产生不利影响,靠边塔易受外界风速的影响,另外紧靠测试格塔因风机损坏停运,而进塔水管阀门又关闭不严进水时,则该格从进风口散出的湿热空气容易进入测试格,给测试格带来不利影响。

**3.0.7** 测试仪表应按仪器使用说明的要求进行检验。不一定每次使用前都去校验,有的仪器规定多长时间校验一次,只要在规定时间内,则应认为仪器是合格的。当然使用中要注意仪器读数有无异常,如发现存在读数不准等问题应查明原因或去校验。

## 4 测试大纲

冷却塔试验是一项技术性很强的工作,涉及到运行塔现状、测试内容、使用仪表、性能评价方法以及有关各方相互配合等问题,为了作好测试工作,编制测试大纲是十分必要的,本章就测试大纲编制作了规定。

## 5 测试条件和要求

**5.0.1** 冷却塔测试时间应在建成或改造完工投入运行后一年之内进行,这样可以保证在温度高的季节进行,运行超过一年以上冷却塔性能可能降低,所以一年之内验收是比较合理的,当然,由于某种原因,也有超过一年的情况,如需要延长时,可双方协商决定。

**5.0.2** 本条规定了验收时外界的环境风速,机械通风冷却塔由于通风是靠风机来保证的,所以受外界风速的影响相对较小,而自然通风冷却塔由于通风是靠密度差不同产生的抽力通风的,塔内风速比较小,易受外界风速的影响,所以对机械通风冷却塔和自然通风冷却塔外界风速分别作了规定,机械通风冷却塔测试工况的平均风速不大于  $4.0 \text{ m/s}$ ,阵风每分钟平均风速不大于  $6.0 \text{ m/s}$ ;自然通风冷却塔测试工况的平均风速不大于  $3.0 \text{ m/s}$ ;阵风每分钟平均风速不大于  $5.0 \text{ m/s}$ 。为保证自然通风冷却塔风筒出口风速不致过大而影响进塔风量,同时规定了出口排出的雾气团目测宜充满塔出口。目前国外对环境风速的规定如表 5.0.2 所示,其中德国 DIN 验收标准与其它国家不相同,要连续测试 10 多个小时,测点距地面高度  $10 \text{ m}$ ,测试周期平均风速不超过  $3 \text{ m/s}$ ,一小时内  $5 \text{ m/s}$  以上高风速出现频率不超过 10 次。国外其它标准不分机械通风冷却塔和自然通风冷却塔,环境风速规定值相同。表 5.0.2 中 BS4485 为英国标准,CTI 为美国冷却塔协会标准,ASME 为美国机械工程师协会标准。

表 5.0.2 国外标准环境风速值

项 目	BS4485	CTI	ASME
平均风速(m/s)不大于	5.0	4.4	4.4
1 分钟平均风速(m/s)不大于	7.0	6.7	6.7
测点距地面高(m)	1.5~2.0		
测点距集水池上缘高(m)		1.5	

此外,为保证测试的准确性,本条还对测试季节作了规定。

**5.0.3** 本条对循环水水质作了两条规定,即总溶解固体不超过 5000 mg/L,油、焦油或其它油脂性物质不超过 10 mg/L,这是美国一研究所提出来的限值,因为溶解固体以及油、焦油或油脂性物质会影响水的蒸发散热,在上述限值范围内对蒸发散热影响可不予考虑,原苏联的 H·阿里也夫曾就水中石油产品的含量浓度  $C_p$  对散热性能的影响作过试验,建议在计算出塔空气焓时引入修正系数  $K_{ap}$ ,出塔空气焓  $h_{\pi}$ 按下式计算:

$$h_{\pi} = h_1 + (1 - K_{ap}) \frac{C_w \Delta t}{K\lambda} \quad (5.0.3)$$

式中  $h_{\pi}$ ——修正后出塔空气焓[kJ/kg(DA)];

$h_1$ ——进塔空气焓[kJ/kg(DA)];

$K_{ap}$ ——修正系数;

$\Delta t$ ——进出塔水温差(℃);

$K$ ——蒸发水量带走热量系数;

$\lambda$ ——气水比。

式中修正系数  $K_{ap}$ 由图(5.0.3)查得。

目前国内淋水填料热力性能测试一般在溶解固体较低条件下进行的,关于溶价固体及含油类物质对蒸发散热的影响作的研究工作不多,尚无更多的资料。

**5.0.4** 本条规定了验收测试的必测项目,这些项目是评价中必不

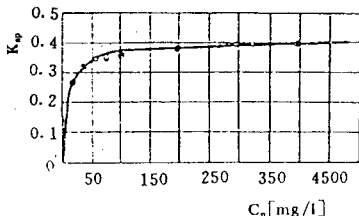


图 5.0.3 浓度  $C_p$  与系数  $K_{ap}$  关系曲线

可少的。进塔空气量是必须确定的参数。

**5.0.5** 这一条对是否直接测定进塔空气流量作了说明,因为空气流量值对评价计算是必不可少的,但目前的测试方法均难准确测定,对自然通风冷却塔宜采用由其它参数测定值来计算风量的方法,则可不直接测定风量,直接测定风量不仅工作环境恶劣,而且工作量大。机械通风冷却塔宜采用直接测定进塔空气流量方法,根据国内多年测试经验,如果测试断面选择合适,测得进塔风量值还比较准确,如果设计单位给出设计风机轴功率值,由测定风机轴功率来计算风量值也可以,则可不直接测风量,目前有的设计单位给的风机轴功率值不准确,特别是老塔改造,给不出风机轴功率,所以宜采用直接测风量进行评价方法。

**5.0.7** 验收测试时委托单位为了对冷却塔进行改进或总结经验,要求多测一些项目,所以这些项目也列出,以备测试时有章可循。

**5.0.8** 冷却塔验收测试应尽量在接近设计参数值条件下进行,但要完全达到设计参数值是不可能的,所以允许有一定偏差值,其偏离设计值规定如下:

湿球温度 $\tau$ 不大于	+ 5℃ - 10℃
进塔水流量 $Q$ 不大于	± 10%

冷却水温差  $\Delta t$  不大于  $\pm 20\%$

国内过去的一些文献中对湿球温度允许偏差值规定比较小,这样就使冷却塔测试的时间范围变窄,扩大湿球温度的范围,使能测试冷却塔的时间延长,不仅夏季,只要湿球温度在该范围内其它季节也可作测试。放宽湿球温度范围其原因是湿球温度对冷却塔的热力性能几乎没影响。美国 CTI 标准 1982 年版规定湿球温度  $\tau$  偏离设计值不超过  $\pm 10^{\circ}\text{F}$  ( $5.0^{\circ}\text{C}$ ),在 1990 年版规定湿球温度偏离设计值不超过  $\pm 15^{\circ}\text{F}$  ( $8.5^{\circ}\text{C}$ ),也在扩大湿球温度试验范围。对进塔水量的规定是考虑配水系统能正常工作,流量过小或过大使配水不均匀。对于水温差  $\Delta t$  的规定主要控制进塔水温  $t_1$  不要过低。进塔水温对塔热力性能有影响。国外标准中测量参数允许偏离设计值范围如表 5.0.8 所示。表中 JIS 为日本标准, DIN 为德国标准。

表 5.0.8 国外标准测量参数允许偏离设计值表

项 目	BS4485	CTI	ASME	DIN	JIS	
					(1)	(2)
干球温度 $\theta(^{\circ}\text{C})$		$\pm 14.0$				
湿球温度 $\tau(^{\circ}\text{C})$	$\pm 5.0^{①}$	$\pm 8.5$	$+3$ $-9$	$\pm 10^{②}$	$10 \sim 30^{⑤}$	$10 \sim 30^{⑤}$
进塔水流量 $Q(\text{kg/h})$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	设计值	
水温差 $\Delta t(^{\circ}\text{C})$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$		
进塔水温 $t_1(^{\circ}\text{C})$					$37 \pm 2$	$37 \pm 2$
进塔水压力 $P_w(\text{kPa})$	$\pm 20\%$					
风机轴功率 $N(\text{kW})$			$\pm 15\%$	$\pm 5\%^{③}$ $\pm 20\%^{④}$		
大气压 $P(\text{kPa})$		$\pm 3.5$				

注:①湿球温度  $\tau > 3^{\circ}\text{C}$ ; ②湿球温度  $\tau > 4^{\circ}\text{C}$ ; ③风机可调叶片角度;

④风机不可调叶片角度; ⑤湿球温度  $\tau$  在  $10 \sim 30^{\circ}\text{C}$  范围内变化。



**5.0.10** 为了保证测试过程中工况的稳定性,以工况调整稳定后的起始值为标准,对工况的每次测定值允许偏差值作了规定,其允许变化值如下:

进塔空气湿球温度  $\tau_1$  不大于  $\pm 1.0^\circ\text{C}$

进塔水流量  $Q$  不大于  $\pm 5\%$

进塔水温  $t_1$  不大于  $\pm 1.0^\circ\text{C}$

因为对进塔水温变化范围作了规定,所以对水温差  $\Delta t$  未作规定,从过去测试的资料来看一般变化均能控制在该范围内,国外标准规定值如表 5.0.10 所示。

表 5.0.10 国外标准中参数允许变化值

项 目	BS4485	CTI	ASME	JIS
空气干球温度 $\theta(^{\circ}\text{C})$		$\pm 3.0^\circ\text{C}/\text{h}$	$\pm 3.0^\circ\text{C}/\text{h}$	
空气湿球温度 $\tau(^{\circ}\text{C})$	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.0^\circ\text{C}/\text{h}$	$\pm 1.0^\circ\text{C}\%$	$\pm 1.0$
进塔水流量 $(\text{kg}/\text{h})$	$\pm 5.0\%$	$\pm 2.0\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 2\%$
进塔水温				$\pm 0.4$

**5.0.11** 本条规定了测试一组工况的最少时间以及测定次数,一般项目都容易办到,对单格机械通风冷却塔测试时,如果采用容器接水方法测出塔水温,布置测点又比较多,测 6 次有困难时可适当减少,但不宜少于 2 次。

**5.0.13** 本条规定了有效工况不少于 3 组。冷却塔测试工作,从准备到测试工作量比较大,如果测的组少,出现错误则补测比较困难,所以提出了测定 3 组数据。目前调整工况一般均采用调节水量的办法,因为调整风机叶片安装角度方法改变工况比较困难,调整水量过大易引起配水不均匀,所以提出调整设计水量的  $\pm 10\%$ 。

**5.0.14** 冷却塔验收测试涉及到工程是否可最后验收,测定原始数据应有委托单位代表签字,以便能够得到有关各方的确认,出现问题便于解决,所以增加了本条。

## 6 测试仪表和测量方法

### 6.1 环境风速风向测量

本节规定了测量环境风速、风向仪表及测点位置,目前国内测风速、风向多采用三杯式风速风向表测定,最好采用带连续记录风速、风向的仪表,这样可测出阵风。测点位置应在冷却塔的上风向,距地面高 1.5~2.0 m,距塔 30~50 m,本规定与英国 BS4485 相同。在 DIN 中规定距地面 10 m 高处测风速,除用自动记录仪表外,其它仪表则测试不方便,CTI 规定距冷却塔水池上缘高 1.5 m,ASME 规定在冷却塔进风口高的 1/2 处布置测点,这样测风速会好一些,但一般仪器测试不方便。另外,冷却塔距建筑物较近时,有时会出现测点风速与塔进风口附近风速相差较大,建议在进风口附近增加测点。

### 6.2 环境空气干湿球温度测量

干湿球温度测定宜采用机械通风干湿表,这种仪表装有小风扇,通过测温元件感热部分的风速可达 2.5 m/s 以上,风速高低直接影响湿球温度的读数值,风速低读数值高,风速高读数值低,风速超过 3~5 m/s 时,则对读数没影响,我国气象台站已考虑在百叶箱内装风速 3.5 m/s 的通风干湿表,目前尚无普遍采用,另外风速 2.5 m/s 与 3.5 m/s 时湿球温度读数相差不大,考虑到冷却塔的测点布置较多,使用机械通风干湿表测试比较方便,所以主要仪表仍提出采用机械通风干湿表。目前已有一些精度高的仪表投入使用,有条件时应选用风速在 3.5 m/s 以上精度高的仪表。当然应注意设计采用气象参数干湿球温度值的测试仪表,与试验时使用

的仪表相一致,否则会产生误差。

因为机械通风冷却塔环境空气干湿球温度不参加热力计算,仅作参考,所以布置一点即可,而自然通风冷却塔同时作为进塔空气干湿球温度,所以视冷却塔尺寸大小测点不少于2~6处,布置少了会影响测试的准确性。

## 6.4 进塔空气干湿球温度测量

自然通风冷却塔由于有很高的通风筒,湿空气回流可不予考虑,而机械通风冷却塔必须考虑湿空气回流可能对进塔空气干湿球温度的影响,所以测点距进风口要近,而且布点也不能少,因为逆流式冷却塔和横流式冷却塔进风口高度不同,所以分别作了规定。对于单格逆流式机械通风冷却塔规定测点不少于2处,单侧进风时放在同一侧,双侧进风时每侧一处测点对称布置,测点距进风口在2 m以内,仪器安装在集水池上缘高1.5 m处,因为逆流式冷却塔进风口不是很高,安装高度1.5 m也便于测量,而单格横流式冷却塔因进风口较高,以4 m高作一界线,进风口的高度等于或小于4 m时每侧布置一处测点,当超过4 m时沿高度方向每侧布置两处测点,对于塔群测试也作了规定。国外标准中测点数规定也不完全相同,现介绍如下:

(1) CFI 标准:其测点数用下式来计算:

$$n = 0.5(A)^{0.4} \quad (6.4)$$

式中  $n$ ——测点数(个);

$A$ ——进风口面积  $m^2$ 。

根据计算出的测点数将进风口划分  $n$  个方格,在距进风口1.2 m之内每个方格中心处测定。

(2) BS4485 标准:测点个数视塔的尺寸大小而定,单格塔可设1处测点,机械通风冷却塔群及自然通风冷却塔不少于3处测点,测点在集水池上缘高1.5~2.0 m,距塔进风口1.5 m之内测定。

(3) ASME 标准:对于塔群试验,每侧在与塔距离 2.0 m 之内,塔排长  $L$  的  $\frac{1}{2}L$  及距边缘  $\frac{1}{6}L$  处,沿进风口高  $Z$  的  $\frac{1}{6}Z$ 、 $\frac{1}{2}Z$ 、 $\frac{5}{6}Z$  处共设 9 处测点,则两侧共 18 处测点。小型塔群试验,根据塔排长度及进风口高度,每侧测点数如表 6.4 所示。

自然通风冷却塔,在距进风口 2 m 之内,在塔周边对称且连线相互垂直布置 4 处测位,沿进风口高  $Z$  的  $\frac{1}{6}Z$ 、 $\frac{1}{2}Z$  及  $\frac{5}{6}Z$  共设置 12 处测点。

从国外进塔空气温度的测点来看,ASME 标准测点最多,考虑目前国内仪表情况,本标准规定的测点较少,但为最低值,有条件时也可增加测点的数目。

表 6.4 塔群测温点数(单侧)

塔群长 $L$ (m)	进风口高 $Z$ (m)	测点数(个)	测点高度	布 点 处
< 3.66	< 3.66	1	$\frac{1}{2}Z$	$\frac{1}{2}L$
3.66 ~ 30.48	< 3.66	2	$\frac{1}{2}Z$	距塔边 $\frac{1}{4}L$
> 30.48	< 3.66	3	$\frac{1}{2}Z$	距塔边 $\frac{1}{6}L$ 、 $\frac{1}{2}L$
3.66 ~ 30.48	3.66 ~ 7.32	4(双排)	$\frac{1}{4}Z$ 、 $\frac{3}{4}Z$	距塔边 $\frac{1}{4}L$
> 30.48	3.66 ~ 7.32	6(双排)	$\frac{1}{4}Z$ 、 $\frac{3}{4}Z$	距塔边 $\frac{1}{6}L$ 、 $\frac{1}{2}L$
< 22.86	> 7.32	6(3 排)	$\frac{1}{6}Z$ 、 $\frac{3}{6}Z$ 、 $\frac{5}{6}Z$	距塔边 $\frac{1}{4}L$

## 6.5 进塔水流量测量

本节给出了进塔水流量的测量方法和常用仪表。测流量方法比较多,有的塔在系统设计时就考虑了测流量仪表,因而测试前仪

表已经装好,如电磁流量计、插入式涡轮流量计、孔板等,有的测流量仪表需测试前在现场安装,目前国内现场测试采用的主要测流量仪表是超声波流量计,以及皮托管与压差计,而孔板、文丘里管目前极少采用。根据测定水泵扬程由水泵特性曲线求水流量的方法,是在其它测试方法条件不具备时而采用的,其准确性不高。一般测量仪表安装时均需一定直管段和测量位置,如超声波流量计安装点要求沿水流方向有前10倍后5倍管道直径的直段,皮托管安装点要求有前5倍后3倍管道直径的直段,所以设计时就应加以考虑,自然通风冷却塔主进水管一般埋在地下,所以管道不仅要留有足够长的直段,还应作专门的测试井。用超声波流量计测流量时,流量计易受外界环境因素干扰,有时测不出读数,所以还应考虑其它备用测流量方法。在进塔水管测流量有困难时,也可考虑在冷却水出水管或渠道中测水流量。进塔水量较小的塔也可安装孔板,或采用容积法与体积法测量,容积法即找一容器且先装满水称重量,测定出一段时间流满容器数,以此来计算流量,体积法即水流入某水池或容器一定时间后,测量水的体积,以此计算进塔水的流量。

## 6.6 进塔水温测量

进塔水温测定比较容易,测试值也准确,如果自然通风冷却塔,进水管敷设在集水池水面下,则应考虑钢管散热量对测试水温的影响,如果进塔水温是在集水池外进水管上测定,则测定水温要比在竖井或渠道中测温数值高,另外出塔水温由于钢管水散热量影响,测定值要高,所以对水温应适当修正,其修正值不大于 $0.1^{\circ}\text{C}$ 。

## 6.7 出塔水温测量

对于自然通风冷却塔或机械通风冷却塔群,出塔水温容易测

定,而对于集水池相互连通的冷却塔群中的单格冷却塔测试时,出塔水温测试比较困难,我国过去采用的办法是在所测格集水池水面上作集水槽;或设集水容器水温在水槽或集水容器中测定,根据国内经验提出了设集水槽及集水器的数量,逆流式冷却塔集水槽根据塔尺寸大小取4~14条,集水槽的总面积占淋水面积不少于15%,因为目前设计的逆流式机械通风冷却塔规格比较多,根据冷却塔的规格,当集水槽取不同宽度时,其水槽尺寸及条数如表6.7所示。

表 6.7 集水槽尺寸及条数

序号	塔平面尺寸 (m <sup>2</sup> )	水槽宽 (m)	水槽长 (m)	水槽个数 (个)	水槽面积 (m <sup>2</sup> )	占淋水面积 百分数(%)
1	6.5×6.5	0.20	6.5	6	7.8	18.5
		0.25	6.5	4	6.5	15.4
2	8.0×8.0	0.20	8.0	6	9.6	15.0
		0.30	8.0	4	9.6	15.0
		0.25	8.0	5	10.0	15.6
3	8.2×8.2	0.20	8.2	6	9.8	14.6
		0.25	8.2	6	12.3	18.3
4	8.4×8.4	0.25	8.4	6	12.6	17.9
5	8.5×8.5	0.25	8.5	6	12.8	17.6
6	9.0×9.0	0.25	9.0	6	13.5	16.7
		0.25	16.0	10	40.0	15.6
7	16.0×16.0	0.25	16.0	10	40.0	15.6
		0.30	16.0	8	38.4	15.0
8	16.5×16.5	0.25	16.5	10	41.3	15.2
9	22.4×22.4	0.25	22.4	14	78.4	15.6
		0.30	22.4	12	80.6	16.1

从上表可以看出冷却塔水槽最少4条,最多14条,设双数便于布置,水槽宽度不易超过0.3 m,否则在集水池上架设水槽比较

困难。

在集水池水面上设接水容器,水温在容器中测定时,规定了集水容器的面积不宜小于  $0.05 \text{ m}^2$ ,如果采用圆形容器直径应大于  $0.25 \text{ m}$ ,每个容器负担面积不宜大于  $4.0 \text{ m}^2$ ,这样对于  $8.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$  塔则测 16 点,对于  $16.0 \text{ m} \times 16.0 \text{ m}$  的塔则要测 64 个点。

对于集水池连通的横流式冷却塔,如淋水填料下方为水池,可参照逆流式冷却塔测温方式布置集水槽,如图 6-7(a) 所示,如果淋水填料下方为集水盘,可按图 6.7(b) (c) (d) 所示,布置集水槽或集水容器。

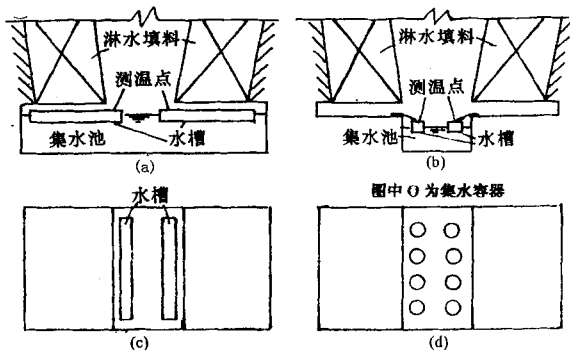


图 6.7 测温点布置图

从以上分析可以看出集水池相连通的单格冷却塔水温测定比较困难,所以建议冷却塔在作系统设计时,测试格水池可与其它格隔开,单独出水,这样可以方便出塔水温测定和提高测温的准确度。

## 6.8 进塔空气流量测量

**6.8.2 机械通风冷却塔进塔空气流量**国外一般不采取直接测量方法,多数采用测定风机轴功率的方法,以此来确定空气流量。根据目前国内实际情况宜采用实测空气量的方法,对于机械抽风式冷却塔一般在风机进风侧的风筒内测量,选择测试断面气流稳定,测试结果相对来说比较准确,由测功率方法来求进塔空气流量国内使用还不普遍,因为有一些设计制造单位给不出准确的设计功率。由于在风筒内测流量要将皮托管伸入风筒内,所以要在风筒上开孔,最好是在风筒制造时预先留孔,本条规定测试断面与风机叶片轴线垂直距离不宜小于 0.4 m,主要是考虑操作上方便,距离小操作稍有不慎便会损坏皮托管。

目前,国内生产的冷却塔风筒均由玻璃钢材料制造,常用的风机有直径  $\Phi 4.7$  m、 $\Phi 8$  m、 $\Phi 8.53$  m、 $\Phi 9.14$  m 等型号风机,风筒高度及风筒底部与风机叶片轴线距离如表 6.8.2 所示。风机叶片轴线与测试面的垂直距离一般在 0.4 m~0.8 m 之间。

在风筒测空气流量时,由于风机本身构造等原因在测试断面存在无风区,测试前可由皮托管伸入到风筒内确定,计算风量应扣除无风区面积。

一些小型玻璃钢冷却塔不具备在风机风筒测空气流量的条件,可在冷却塔风筒出口测定。

表 6.8.2 目前常用风机风筒高度

风机型号	风筒高度(mm)	风筒底距风机叶片轴线高度(mm)
$\Phi 4.7$ m	4050	1100
	4000	1500
	3900	1300
	3060	960
$\Phi 8.53$ m	5705	
$\Phi 8.0$ m	6000	2072
	5000	1150
$\Phi 9.14$ m	5000	1600



### 6.13 塔内各部分阻力及风机全压测量

塔内各部分阻力及风机全压不属于验收测试的必测项目,一般为设计单位要求测试内容,测定比较粗略,因为淋水时测压管孔眼容易堵塞,机械通风冷却塔可在不淋水时进行测定。

### 6.14 风机轴功率测量

机械通风冷却塔风机轴功率一般可用功率表测定,如目前国内生产的多功能电机在线检测仪,也可由测定电动机的电流、电压、功率因数后由计算确定,如果电压不在电机接线盒测定时,应考虑测压点到电机接线盒之间的电压降,并对功率进行修正,其计算公式如下:

$$N_1 = \frac{N_1' U_1 \eta_d \eta_c}{U_x} \quad (6.14.1)$$

式中  $N_1$ ——风机轴功率(kW);  
 $N_1'$ ——测得电机输入功率(kW);  
 $U_x$ ——测站电压(V);  
 $U_1$ ——电机电压(V);  
 $\eta_d$ ——电机效率(%);  
 $\eta_c$ ——传动效率(%)。

如果通过测定电机的电流、电压、功率因数(或给定),并已知电机效率和传动效率时,风机轴功率由下式计算:

$$N_1 = \sqrt{3} I_1 U_1 \eta_d \eta_c \cos \varphi \quad (6.14.2)$$

### 6.15 其它参数测量

#### 6.15.1 大气逆温层判定测量

自然通风冷却塔是靠空气密度差产生的抽力进行通风的,当空气出现逆温层时冷却效果会降低,因而当测试数据出现异常时,应判定是否存在逆温层,本条是参照了国外标准,以较简单的方法判定逆温层是否存在。空气温度随着高度升高而降低,温度梯度的递减速率,作为估算值每升高 100 m 约降低  $0.64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 7 测试数据处理

7.0.2 一般在冷却塔群测试中,有时集水池需要连续补充水和排污,当在出水管或渠道测出水温度时,本条给出了计算冷却后水温  $t_2$  的公式,这一公式是从水平衡和热平衡关系中推导出来的,如图 7.0.2 所示。

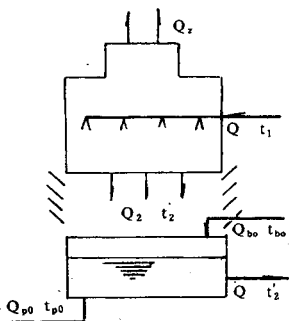


图 7.0.2

其水量和热量平衡关系式如下:

水量平衡

$$Q_2 = Q + Q_{p0} - Q_{b0} \quad (7.0.2 - 1)$$

热量平衡

$$C_w Q_2 t_2 = C_w Q t_1 + C_w Q_{p0} t_{p0} - C_w Q_{b0} t_{b0} \quad (7.0.2 - 2)$$

式中  $t_2'$ ——测点出水温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

由上两式便可推导出  $t_2$  计算公式:

$$t_2 = \frac{Q t_2' + Q_{10} t_{10} - Q_{10} t_{10}}{Q + Q_{10} - Q_{10}} \quad (7.0.2 - 3)$$

**7.0.4** 对于同一型号风机,当转速变化时,其风量、风压和功率有如下关系:

$$\frac{G_{v2}}{G_{v1}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (7.0.4 - 1)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \left[ \frac{n_2}{n_1} \right]^3 \quad (7.0.4 - 2)$$

根据上两式可得出

$$\frac{G_{v2}}{G_{v1}} = \left[ \frac{N_2}{N_1} \right]^{1/3} \quad (7.0.4 - 3)$$

式中  $n_1$ 、 $G_{v1}$ 、 $N_1$ ——风机原来的转速、体积流量和功率;

$n_2$ 、 $G_{v2}$ 、 $N_2$ ——改变转速后的转速、体积流量和功率。

考虑到空气密度不同的影响,并以空气质量流量代替体积流量,则式(7.0.4-3)可变成条文中给出的公式,即:

$$G_1 = G_d \left[ \frac{v_d}{v_1} \right] \left[ \frac{N_1}{N_d} \right]^{1/3} \left[ \frac{\rho_d}{\rho_1} \right]^{1/3} \quad (7.0.4 - 4)$$

**7.0.7** 本条给出了自然通风冷却塔由测定进塔空气参数计算进塔空气流量的公式及步骤,给出了满足阻力和抽力相等时密度差  $\Delta\rho_c$  计算公式,即

$$\frac{\Delta\rho_c}{\Delta\rho_d} = \left[ \frac{G_1'}{G_d} \right]^2 \left[ \frac{\rho_{dm}}{\rho_m} \right] \left[ \frac{Q_1}{Q_d} \right]^{k_0} \quad (7.0.7 - 1)$$

该公式推导过程如下:由于设计塔运行时阻力和抽力相等,即

$$H_0 \Delta\rho_d g = \frac{\zeta}{2\rho_{dm}} \left[ \frac{G_d}{F_0} \right]^2 \quad (7.0.7 - 2)$$

式中  $H_0$ ——塔有效高度(m);

$\Delta\rho_d$ ——设计进出塔密度差(kg/m<sup>3</sup>);

$g$ ——重力加速度(m/s<sup>2</sup>);

$\zeta$ ——总阻力系数；

$\rho_{\text{dm}}$ ——进出塔平均密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$G_d$ ——设计进塔空气流量[ $\text{kg}(\text{DA})/\text{h}$ ]。

冷却塔实际运行阻力和抽力也相等,即:

$$H_0 \Delta \rho_c g = \frac{\zeta}{2\rho_{\text{m}}} \left[ \frac{G'_1}{F_0} \right]^2 \quad (7.0.7-3)$$

式中  $\Delta \rho_c$ ——实际运行阻力和抽力相等时的密度差( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$\rho_{\text{m}}$ ——实测进出塔平均密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$G'_1$ ——假定进塔空流量[ $\text{kg}(\text{DA})/\text{h}$ ]。

式(7.0.7-3)两边同时除以式(7.0.7-2),测得式:

$$\frac{\Delta \rho_c}{\Delta \rho_d} = \left[ \frac{G'_1}{G_d} \right]^2 \left[ \frac{\rho_{\text{dm}}}{\rho_{\text{m}}} \right] \quad (7.0.7-4)$$

假如设计进出塔平均密度  $\rho_{\text{dm}}$  与测试时平均密度  $\rho_{\text{m}}$  近似相等,即  $\rho_{\text{dm}} = \rho_{\text{m}}$ ,则上式便为:

$$\frac{\Delta \rho_c}{\Delta \rho_d} = \left[ \frac{G'_1}{G_d} \right]^2 \quad (7.0.7-5)$$

式(7.0.7-5)为英国 BS4485 中采用的公式。从以往的测试结果来看,淋水密度对空气的阻力有影响,即总阻力系数值并不是常数,如果考虑淋水密度的影响,式(7.0.7-4)可以写成如下形式,即本规程给出的公式:

$$\frac{\Delta \rho_c}{\Delta \rho_d} = \left[ \frac{G'_1}{G_d} \right]^2 \left[ \frac{\rho_{\text{dm}}}{\rho_{\text{m}}} \right] \left[ \frac{Q_1}{G_d} \right]^{K_0} \quad (7.0.7-6)$$

式中  $K_0$  值应由试验来确定,如无试验资料时可取  $K_0 = 0.4$ 。

**7.0.8 逆流式冷却塔冷却数计算**,本条推荐了两种近似计算公式,分段不少于8段的辛普逊积分方法和切比雪夫积分方法,在确定计算方法时曾选取10组不同工况参数,分别取  $n$  等于偶数,从  $n=2$  直到  $n=100$ ,并与切比雪夫方法进行比较,从10组数的计算结果来看,切比雪夫积分法与辛普逊积分法相比,取小数点后3位数字计算结果相等,而切比雪夫积分法相当于6~8段辛普逊积分

法,另外分成 20 段的辛普逊积分法与切比雪夫积分法之误差最大为 0.336%。所以本条推荐采用不少于 8 段辛普逊积分法或切比雪夫积分法,从分析来看 2 段辛普逊积分法在工程上也能满足要求。

**7.0.9 横流式冷却塔冷却数计算**,虽然给出了积分表达式,但无法直接计算,目前主要采取近似计算方法,本标准给出三种计算方法,即平均焓差法,修正系数法及中心差分法,前两种方法计算比较简单,其中平均焓差法要查图表,易于出偏差,为过去习惯采用方法,而横流式冷却塔冷却数按逆流式冷却塔进行计算,然后除修正系数方法,经几种方法比较认为计算误差比较小,而中心差分法计算比较复杂一些,但较其它差分法相比,即使分割尺寸比较大也可取得较高的精度。

**7.0.10 热力计算中各参数计算公式说明如下:**

(1) 空气焓计算公式

$$h = C_g \theta + x(r_0 - C_q \theta) \quad (7.0.10 - 1)$$

该公式本身没什么问题,而目前国内各种有关资料或书中水蒸汽和干空气的比热不同,汽化热也不一样,现摘录如下:

1981 年美国暖气制冷及空调工程师协会

$$h = 1.005\theta + x(2501 + 1.805\theta) \quad (7.0.10 - 2)$$

日本内田秀雄公式

$$h = 1.005\theta + x(2500.8 + 1.846\theta) \quad (7.0.10 - 3)$$

苏联公式

$$h = 1.005\theta + x(2491.1 + 1.9678\theta) \quad (7.0.10 - 4)$$

工程热力学(吉林大学版)

$$h = 1.004\theta + x(2501.1 + 1.859\theta) \quad (7.0.10 - 5)$$

赵振国著冷却塔一书

$$h = 1.005\theta + x(2501.1 + 1.842\theta) \quad (7.0.10 - 6)$$

从上述资料中可看出国内外计算焓值公式尚不一致,但这些公式对工程计算都能满足要求,本规程建议采用内田秀雄公式,该

公式的水蒸汽和干空气的比热是如下推得的,作为理想气体比热应不随温度而变化,1973 年国际科学技术委员会(CODATA)推荐气体常数为  $R = 8.31441 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$ ,从空气组成得到干空气分子量  $m_g = 28.9641 \text{ kg/kmol}$ ,水蒸汽分子量  $m_q = 18.015 \text{ kg/kmol}$ ,取比热比为  $k$ ,则莫尔定压比热为  $C = kR/k - 1$ ,以双原子为主要成分的干空气  $k = 7/5$ ,三原子的水蒸汽  $k = 8/6$ ,则干空气和水蒸汽的莫尔定压比热分别为  $\bar{C}_g = 3.5R$ 、 $\bar{C}_q = 4R$ ,则可得出干空气和水蒸汽的比热:

$$C_g = 3.5 R / m_g = \frac{3.5 \times 8.31441}{28.9641} = 1.005 [\text{kJ}/(\text{kg}(\text{DA})) \cdot ^\circ\text{C}]$$

$$C_q = 4R / m_q = \frac{4 \times 8.31441}{18.015} = 1.846 [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$$

作为理想气体比热不随温度而变化,实际上比热随温度的不同略有变化。

(2) 饱和水蒸汽分压力计算采用纪利公式,原纪利公式计算出的压力单位为  $\text{kgf/cm}^2$ ,该单位在国际制单位中已不采用,所以将纪利公式中的单位作了变化,改为  $\text{kPa}$ ,因为

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 98.0665 \text{ kPa} \quad (7.0.10 - 7)$$

饱和水蒸气分压力  $P''$  的单位为  $\text{kPa}$ ,则  $P''/98.0665$  其单位变为  $\text{kgf/cm}^2$ ,则可用纪利公式计算:

$$\begin{aligned} \lg(P''/98.0665) = & 0.0141966 - 3.142305 \left( \frac{10^3}{T'} + \frac{10^3}{373.16} \right) \\ & + 8.2 \lg \left( \frac{373.16}{T} \right) - 0.0024804(373.16 - T) \end{aligned} \quad (7.0.10 - 8)$$

因为

$$\lg(P''/98.0665) = \lg P'' - \lg 98.0665 = \lg P'' - 1.9915207 \quad (7.0.10 - 9)$$

所以

$$\lg P'' = 2.0057173 - 3.142305 \left( \frac{10^3}{T} - \frac{10^3}{373.16} \right) \\ + 8.2 \lg \frac{373.16}{T} - 0.0024804(373.16 - T) \quad (7.0.10 - 10)$$

此时计算出的饱和水蒸汽分压力  $P''$  的单位为 kPa

(3) 以焓差为动力的容积散热系数  $K_a$ , 国内冷却塔设计时一般采用不多, 而多用特性数  $\Omega'$  计算, 系数  $K_a$  是由容积散质系数推导而来的, 即:

$$dQ_z = \beta_w (x_1 - x_2) dV_1 \quad (7.0.10 - 11)$$

式中  $dQ_z$ ——蒸发水量(kg/h);  
 $x_1, x_2$ ——进出塔空气含湿量[kg/kg(DA)];  
 $dV_1$ ——淋水填料体积( $m^3$ );  
 $\beta_w$ ——以含湿差为动力的容积散质系数  
 [kg/( $m^3 \cdot h \cdot kg/kg(DA)$ )].

在麦克尔推导水散热量公式时得出下式, 即:

$$dH = \beta_w (h'' - h) dV_1 \quad (7.0.10 - 12)$$

式中  $dH$ ——水散热量(kJ/h);  
 $h''$ ——饱和空气焓[kJ/kg(DA)];  
 $h$ ——空气焓[kJ/kg(DA)].

以  $K_a$  代替式(7.0.10-12)中的容积散质系数  $\beta_w$ , 即:

$$dH = K_a (h'' - h) dV_1 \quad (7.0.10 - 13)$$

式中的  $K_a$  称为以焓差为动力的容积散热系数, 单位为[kJ/ $m^3 \cdot h \cdot \Delta h$ ]. 式(7.0.10-12)是引入留易斯比例系数后导出的, 虽然  $\beta_w$  和  $K_a$  数值相同, 也可以导出同样的因次单位, 但是称为以焓差为动力的容积散热系数物理意义要更明确一些。

**7.0.11** 国内冷却塔测试时, 特别是机械通风冷却, 经常出现进塔水温达不到设计要求的情况, 这样条件下得出的散热特性数偏高, 所以进行冷却塔评价时, 其散热特性数需要进行修正, 关于进塔水温对散热特性的影响, 国内外均作过不少工作, 影响的存在是不容



怀疑的,就某种填料进塔水温不同其影响值多少实测资料还不多,本规程给出了计算公式,关于公式中的系数  $P_0$ 。如有实测资料采用实测值,如无资料时建议取  $P_0 = 0.4$ 。国外点滴式填料试验有  $P_0 = 0.45$  的报导,国内水科院冷却水所对某横流点滴淋水填料试验结果  $P_0 = 0.54$ 。

## 8 测试结果评价

本章给出了测试结果的评价方法,冷却塔评价主要是比较实测冷却塔的散热能力达到设计散热能力的程度,为此则需要将测试参数修正到和设计条件相同时进行评价,当修正到气象参数,进出塔水温和设计工况相同,则为比较冷却水量方法,修正到气象参数、进塔水温及进塔水流量和设计工况相同时,为比较冷却水温方法,目前主要用冷却水量对比方法,但这两种方法均给出。国外标准中,如 CIL、ASME 及日本标准均给出两种评价方法供选用,有的评价方法要求设计制造单位给出一套性能曲线,然后由查性能曲线进行比较,目前国内一般设计单位还作不到,所以在国内尚不适用。在冷却水量对比方法中,即

$$\eta_{sq} = \frac{G_i}{Q_d \lambda_c} = \frac{Q_c}{Q_d} \times 100\% \quad (8-1)$$

式中的进塔空气流量  $G_i$  为实测空气流量,国外标准中采用设计空气流量  $G_d$ ,我们认为风机调到设计状态,用实测空气流量计算,它反映了冷却塔实际冷却能力,如果委托单位要求也可用设计进塔空气流量来评价,即:

$$\eta'_{sq} = \frac{G_d}{Q_d \lambda_c} = \frac{Q'_c}{Q_d} \times 100\% \quad (8-2)$$

式中  $Q'_c$ ——设计空气流量下冷却水流量, (kg/h);

$G_d$ ——设计进塔空气流量, [kg(DA)/h];

由于测试中的各种误差因素,测定值的可重现性很小,所以规定了评价指标等于或超过 95% 则认为冷却热力性能合格可以验收。

## 9 小型玻璃钢冷却塔测试及评价

该种塔是指具有标准工况,由工厂生产的小型玻璃钢或其它材质冷却塔,小型塔一般指风机直径在 $\Phi 4.7\text{ m}$ 以下的逆流式及横流式冷却塔,这种塔使用数量比较多,测试也比较容易一些。在征求意见时,有的单位建议也给出一些简单的测试及评价方法。

本章在编制中参照了日本 JIS 标准,进塔湿球温度规定  $\tau_{t1} \geq 15^\circ\text{C}$ 。在测定时调整进塔水流量和标准塔水流量相同,进塔水温在  $t_{t1} = 37 \pm 2^\circ\text{C}$ ,进塔空气量不变,如果  $t_{t1} \neq 37^\circ\text{C}$  时,测出的水温差先修正到  $t_{t1} = 37^\circ\text{C}$  时的水温差,由于实测进塔湿球温度  $\tau_{t1}$  一般与标准工况湿球温度不同,需修正到湿球温度  $\tau_{t1} = 28^\circ\text{C}$  水温差  $\Delta_{t28}$ ,除由查附录 B 图方法之外,并给出了由公式计算水温差  $\Delta_{t28}$  的方法。该方法是根据内田秀雄公式导出的,并与查图方法进行了比较,一般误差小于 2%,但查图方法由人为因素,结果会有出入。

本方法由于不测进塔空气流量,也不必计算冷却数,只要将测试结果代入公式中进行简单计算就可进行评价,对现场安装塔验收比较方便,有利于对工厂生产的小型冷却塔进行测试评价。

## 附录 A

本附录给出了冷却数计算公式,在横流式冷却塔冷却数计算时,给出了平均焓差法和修正系数法,其中由查图表方法计算平均焓差,是过去国内习惯采用的方法,修正系数方法具有较高的计算精度,在推荐的差分法计算公式中,给出了 Poppe, M·K 提出的方法,在德文及日文文献中均有介绍,另外差分法计算公式还有水利水电科学院冷却水所推荐的公式,以及“中小型冷却塔设计与计算”一书中介绍的公式,这三种差分基本公式是一样的,边界条件也相同,主要是计算推动力焓差  $h'' - h$  的公式不同,如图 A 所示,不同方法的焓差  $h'' - h$  如下。

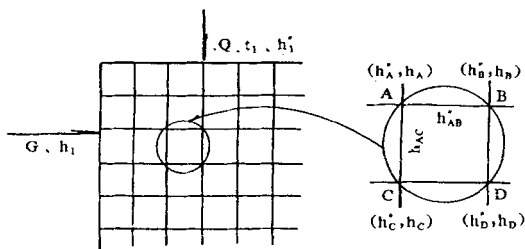


图 A 差分计算图

中小型冷却塔设计与计算公式

$$h'' - h = h''_{AB} - h_{AC} \quad (A-1)$$

水科院推荐的公式

$$h'' - h = (h''_c + h''_D - h_c - h_D)/2 \quad (A-2)$$

Poppe, M·K·方法也称中心差分法。

$$h''-h = (h''_A + h''_B + h''_C + h''_D - h_A - h_B - h_C - h_D)/4 \quad (A-3)$$

曾选择不同尺寸以及不同进塔参数值,由以上三种差分方法及修正系数法进行了计算,当分割尺寸比较小时,分格尺寸取  $0.02\text{m} \times 0.02\text{m}$  时,三种差分法如取小数点后两位有效数字,则冷却数完全相同,修正系数法与中心差分法比较差值一般不超过 1%,其中有 1 组误差为 1.3%,当差分法分割尺到  $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$  时,中心差分法与分割为  $0.02\text{m} \times 0.02\text{m}$  相比,误差一般不超过 1%,有 1 组达到 1.1%,以“中小型冷却塔设计计算”一书差分法计算出的冷却数与上述分割相比,有两组误差在 1.5% 以上,有 3 组在 2% 以上,水科院推荐公式计算结果,有 4 组误差在 1.0% 以上,而且由于分割不尽,计算结果会出现跳跃现象,所以推荐 Poppe, M·K 提出的中心差分法,修正系数也有较高的精度。