

能源部西安热工研究所 史佑吉 主编

# 冷却塔运行与试验

水利电力出版社

79.5183

# 冷却塔运行与试验

能源部西安热工研究所 史佑吉 主编

水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书主要包括：冷却塔发展概况、运行与维护、冷却塔试验方法与计算方法以及国内冷却塔试验研究成果等。

本书可供从事冷却塔运行、管理、试验的工程技术人员阅读以及科研、设计人员和大专院校有关专业师生参考。

### 冷却塔运行与试验 能源部西安热工研究所 史佑吉 主编

\*

水利电力出版社出版、发行  
(北京三里河路6号)

各地新华书店经售  
水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 10.125印张 222千字 1插页

1990年6月第一版 1990年6月北京第一次印刷

印数0001—2250册

ISBN 7-120-01121-9/TK·173

定价7.00元

## 前 言

随着国民经济的发展，工业用水量迅速增加。工业用水大多是用于冷却方面。为了缓和紧张的水资源供需矛盾，节约工业用水，在各个工业部门中，尤其是在动力、石油、化工、冶金、轻工等部门中，已广泛采用循环冷却水系统。当今，最普遍的循环冷却水的冷却设备是冷却塔。

近几年来，由于火电厂的机组容量和各企业的设备容量不断增大，因此冷却塔也向大型化发展，例如在火电厂中，单塔处理的冷却水量已达40000~60000t/h，因此冷却塔在各工业部门的重要性已被越来越多的工程技术人员及企业管理人员所重视。

冷却塔运行管理的水平直接影响各工厂的经济性，如冷却塔及循环水系统的正确运行是降低发电厂煤耗和厂用电率的重要条件。为了进一步提高冷却塔运行和设计的水平，需要对冷却塔进行必要的鉴定、热力试验及运行监督，以便能及时分析冷却塔性能的优劣，发现缺陷，找出问题，达到改善运行和改进设计的目的。

近几年来，国内有关单位在冷却塔试验研究方面取得了不少成果，如新型塑料填料、除水器及喷溅装置的研制和推广应用，都对冷却塔技术的发展起到了积极推动作用。

编写本书的目的，旨在使有关工程技术人员较系统地了解冷却塔的运行维护知识，熟悉掌握试验方法及计算方法，推广应用冷却塔新技术和科研成果，以进一步提高冷却塔运行和试验研究水平。

本书第一、五、六章由史佑吉编写；第二、三、七章由王大哲编写；第四章由田兴达编写。

编写本书时，参考和吸取了有关单位的科研成果和经验，在此特向提供技术资料的单位和个人表示衷心的感谢。

在本书编写过程中，承蒙陈玉玲、张鹏、刘廷祥、高伟桐、胡三季、龙晓鸿等同志在插图和资料方面给予大力协助，在此谨致谢意。

由于笔者水平所限，错误在所难免，望读者批评指正。

编者

1989年5月

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 总论</b> .....	1
<b>第一节 冷却塔发展概况</b> .....	1
<b>第二节 冷却塔的分类</b> .....	10
一、开放式冷却塔 .....	10
二、风筒式冷却塔 .....	12
三、机械通风冷却塔 .....	14
四、辅助通风风筒式冷却塔 .....	18
五、干式冷却塔 .....	18
六、干湿式冷却塔 .....	24
<b>第三节 冷却塔的组成</b> .....	30
<b>第二章 水冷却原理</b> .....	33
<b>第一节 湿空气性质</b> .....	33
一、热力学基本概念 .....	33
二、湿空气性质 .....	34
三、空气状态参数 .....	37
<b>第二节 水冷却原理</b> .....	44
一、接触散热 .....	44
二、蒸发散热 .....	45
三、水蒸发的单膜理论 .....	45
四、刘易斯关系式 .....	47
五、冷却水散热的几种状况 .....	48
<b>第三节 水冷却极限</b> .....	49
<b>第三章 冷却塔的计算</b> .....	52

第一节	热平衡方程式	52
一、	假设条件	52
二、	热平衡方程式	53
第二节	逆流式冷却塔焓差法计算公式	57
一、	焓差法公式	57
二、	冷却塔热力计算的基本方程式	58
三、	冷却数的图式表示法	61
第三节	冷却数的计算	64
一、	辛普森积分法	64
二、	切比雪夫积分法	67
三、	梯形积分法	69
第四节	逆流式冷却塔平均压差计算法	72
第五节	逆流式冷却塔分段积分计算法	74
第六节	横流式冷却塔的計算	77
一、	矩型横流式冷却塔计算公式	77
二、	冷却数的计算	80
三、	圆型横流式冷却塔计算公式	85
第七节	冷却塔空气动力计算	88
一、	机械通风冷却塔	88
二、	风筒式冷却塔	93
第八节	冷却塔水力计算	97
一、	槽式配水系统	98
二、	管式配水系统	99
三、	池式配水系统	99
第九节	冷却塔改造计算	100
一、	气象参数的确定	100
二、	淋水填料的选择	101
三、	出塔水温的计算	104

<b>第四章 冷却塔的运行与维护</b> .....	116
<b>第一节 冷却塔运行维护的意义</b> .....	116
<b>第二节 冷却塔的运行</b> .....	117
一、冷却塔的验收 .....	117
二、冷却塔的运行与管理 .....	125
三、冷却塔经济运行方式 .....	127
四、冷却塔日常运行工作 .....	141
<b>第三节 冷却塔的维护</b> .....	143
<b>第四节 冷却塔结冰及其防治</b> .....	145
一、容易结冰的部位 .....	146
二、结冰的危害性 .....	148
三、防冻措施 .....	149
<b>第五章 冷却塔的试验</b> .....	164
<b>第一节 试验分类及试验前准备工作</b> .....	164
一、试验分类 .....	164
二、试验前准备工作 .....	164
<b>第二节 冷却塔测定参数</b> .....	166
一、验收试验需测定的参数 .....	166
二、性能试验需测定的参数 .....	167
<b>第三节 试验条件及要求</b> .....	168
<b>第四节 测试仪表及测试方法</b> .....	170
<b>第五节 试验资料的整理与计算</b> .....	182
一、各工况测试数据的选择 .....	182
二、逆流式冷却塔热力特性试验资料的整理 .....	183
三、横流式冷却塔热力特性试验资料的整理 .....	188
四、淋水填料阻力特性试验资料的整理 .....	190
五、风筒式冷却塔总阻力系数的计算 .....	192
六、冷却塔操作曲线的整理 .....	192



第六节 冷却塔性能的评价 .....	194
一、按计算冷却水温评价 .....	194
二、按实测冷却水温评价 .....	195
三、日本特性曲线评价法 .....	195
四、美国CTI机械通风冷却塔特性曲线评价法 .....	197
五、美国CTI机械通风冷却塔操作曲线评价法 .....	197
六、美国CTI自然通风冷却塔特性曲线评价法 .....	201
七、美国CTI自然通风冷却塔操作曲线评价法 .....	202
八、自然通风冷却塔特性系数评价法 .....	204
<b>第六章 冷却塔的试验研究 .....</b>	<b>209</b>
<b>第一节 淋水填料的试验研究 .....</b>	<b>209</b>
一、淋水填料的发展概况 .....	209
二、试验装置 .....	210
三、新型淋水填料 .....	214
<b>第二节 喷溅装置的试验研究 .....</b>	<b>250</b>
一、喷溅装置的发展概况 .....	250
二、新型喷溅装置 .....	253
<b>第三节 除水器的试验研究 .....</b>	<b>268</b>
一、除水器的发展概况 .....	268
二、试验方法 .....	270
三、新型除水器 .....	274
<b>第七章 循环冷却水处理 .....</b>	<b>283</b>
<b>第一节 循环冷却水特性 .....</b>	<b>283</b>
一、污垢 .....	284
二、腐蚀 .....	287
<b>第二节 水质处理中常用术语与水质稳定判别 .....</b>	<b>289</b>
一、常用术语 .....	289
二、水质稳定判别 .....	291

<b>第三节 循环水处理</b> .....	294
一、防水垢处理 .....	294
二、防蚀处理 .....	297
三、防泥垢措施 .....	299
<b>第四节 循环冷却水综合处理</b> .....	299
一、清洗 .....	299
二、预膜 .....	301
三、药剂处理 .....	301
四、旁流水处理 .....	303
<b>第五节 循环冷却水水质管理</b> .....	303
一、浓缩管理 .....	303
二、水质监测与分析化验 .....	305
<b>附录</b> .....	307
附图 1 空气相对湿度计算图(大气压力99.32kPa)	
附图 2 湿空气密度计算图(大气压力99.32kPa)	
附图 3 空气比焓计算图( $\vartheta=10\sim 75^{\circ}\text{C}$ )	
附表 饱和水蒸汽压力(Pa)	
<b>主要参考文献</b> .....	312

# 第一章 总 论

## 第一节 冷却塔发展概况

在工业企业中，水的用途是很广的，统称为工业用水。在工业用水中，用量最大的是冷却用水。

当有充足的水源（江、湖或其它）时，大多采用直流供水系统，即从水源引来的水一次通过凝汽器、热交换器或其它散热设备后即行排走。这种供水系统的用水量相当大，如一座1000MW的火电厂，约需冷却水量 $40\sim 50\text{m}^3/\text{s}$ 。这样大的水量不仅难以取得，且从环境保护的要求看，大量的温排水所造成的热污染也是不允许的。因而火电厂和核电站采用直流供水系统将会遇到愈来愈多的困难。当前，各国解决这种困难的主要方法，除在海边建厂采用海水作冷却水外，多采用带各种冷却塔的循环供水系统。

冷却塔是通过空气与水接触，进行热、质传递，将水冷却的设备。水与空气直接接触的，称为湿式（蒸发式）冷却塔；水或蒸汽与空气间接接触（不发生质传递）的，称为干式冷却塔。

各种工业企业都要求冷却塔能将冷却水的水温降低到某一温度以下，这个温度是由生产过程的可靠性和经济性决定的。例如，在火力发电厂中，冷却水温度的升高将使发电用的燃料耗量增加，而在某些场合下，还会使设备出力降低；在炼油厂和化工厂中，冷却水温度的升高将使产量减少；对于空调、冷冻装置，冷却水温度的升高将使冷却能力降低。

近几十年来，随着工业技术的进步，冷却塔技术日趋完善。由原始的开放式冷却塔发展到带有通风筒的冷却塔。风筒的形状从圆柱形、多边形发展到目前普遍采用的双曲线型（图1-1）。随着机械制造业的发展和对工业冷却塔水温的严格要求，装有鼓风机或抽风机以增大流动风速的机械通风冷却塔（图1-2和图1-3）在一些工业部门中获得广泛应用。有的国家综合了自然通风塔和机械通风塔的各种优点，设计了通风筒和机械通风联合使用的混合式冷却塔，亦称辅助通风风筒式冷却塔，如图1-4所示。

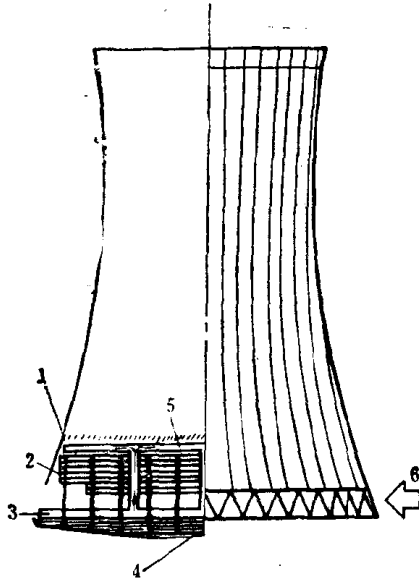


图 1-1 双曲线型风筒式冷却塔

- 1—除水器； 2—淋水填料； 3—热水进口； 4—集水池；  
5—配水装置； 6—空气进口

塔体的结构形式一般有圆形、多边形及矩形等。风筒式冷却塔塔体均采用圆形，机械通风式冷却塔塔体则以圆形和

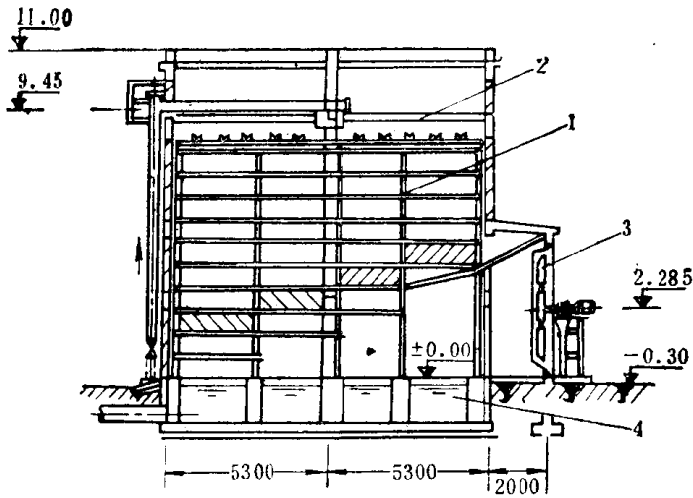


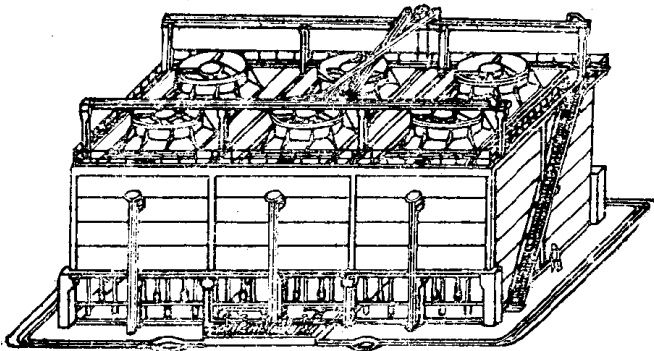
图 1-2 鼓风式机械通风冷却塔

1—淋水填料；2—配水装置；3—鼓风机；4—集水池

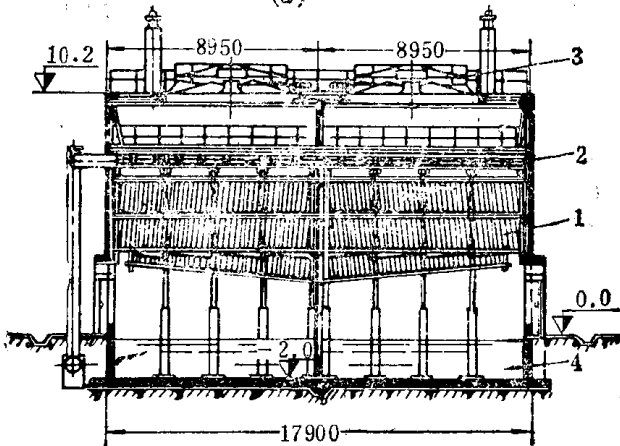
矩形为多。塔体材质由以往的木结构、钢架木护板发展为钢筋混凝土薄壳结构，中小型机力通风冷却塔的塔体材质则向玻璃钢材料发展。

随着冷却塔技术的发展，冷却塔的主要部件——淋水填料的结构型式和材质也在不断地革新和发展。制作淋水填料的材质从早期的木材、竹材发展为铅丝水泥、石棉水泥、浸渍纸直至现在的塑料、玻璃钢等。淋水填料的型式也从原来冷却效率较低的板条型填料（木质板条、石棉水泥板条）发展到冷却效率较高的铅丝水泥格网板、纸蜂窝及塑料等淋水填料。塑料淋水填料具有质量轻和成型容易的特点。如点波、斜波、折波、人字波、梯形波、斜梯波、斜折波、复合波等，这些型式众多的塑料淋水填料在国内外冷却塔上先后得到了广泛采用。塑料填料也是今后发展的方向。

冷却塔的配水装置对配水均匀性及冷却效果有着极其重



(a)



(b)

图 1-3 抽风式机械通风冷却塔 (风机直径4.7m)

(a)总图; (b)横剖面图

1—淋水填料; 2—配水装置; 3—抽风机; 4—集水池

要的作用。过去,在我国电力部门的冷却塔中,特别是在风筒式冷却塔中,大多采用槽式配水系统,只是在一部分机械通风冷却塔中采用了管式配水系统,在一些小型的机械通风冷却塔中亦有采用旋转式配水系统。槽式配水系统的喷溅装置,早期多采用分离式的管嘴和溅水碟,用陶瓷制成;70年

代开始，研制和生产了用塑料制成反射型喷嘴、旋流式喷嘴，提高了喷溅性能。由于冷却塔的水流量愈来愈大，配水装置的重要性也就更加突出，国外已广泛采用管式配水系统，我国在1985年~1987年也相继建成了带有管式配水系统的风筒式冷却塔，如秦岭电厂的4000m<sup>2</sup>冷却塔，邹县电厂的6500m<sup>2</sup>冷却塔，贵溪电厂的4000m<sup>2</sup>冷却塔。喷嘴结构型式也有了新的发展，如近几年研制的反射型、XPH型及TP-II型等，都具有良好的喷溅性能，适用于低压管式配水系统。图1-5为贵溪电厂4000m<sup>2</sup>带管式配水系统的风筒式逆流冷却塔简图，淋水填料为塑料折波填料。

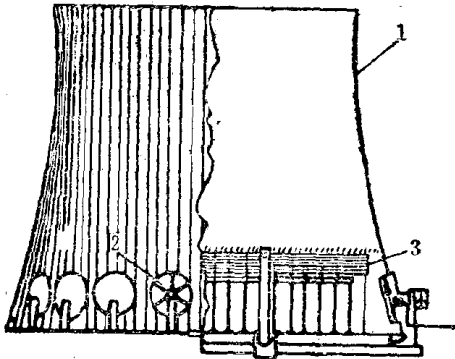


图 1-4 辅助通风风筒式冷却塔

1—钢筋混凝土通风筒； 2—风机及电动机； 3—淋水填料

在我国火力发电厂中，采用自然通风冷却塔的较多。在50年代，只能建造淋水面积为1250~1500m<sup>2</sup>，塔高约60m的风筒式冷却塔，到60年代已能建造淋水面积为2000m<sup>2</sup>，塔高约70m的风筒式冷却塔。到70年代，在设计和建造自然通风冷却塔方面又得到了迅速的进展，已能自行设计和建造淋水面积为3500~5000m<sup>2</sup>，塔高约90~110m的风筒式冷却

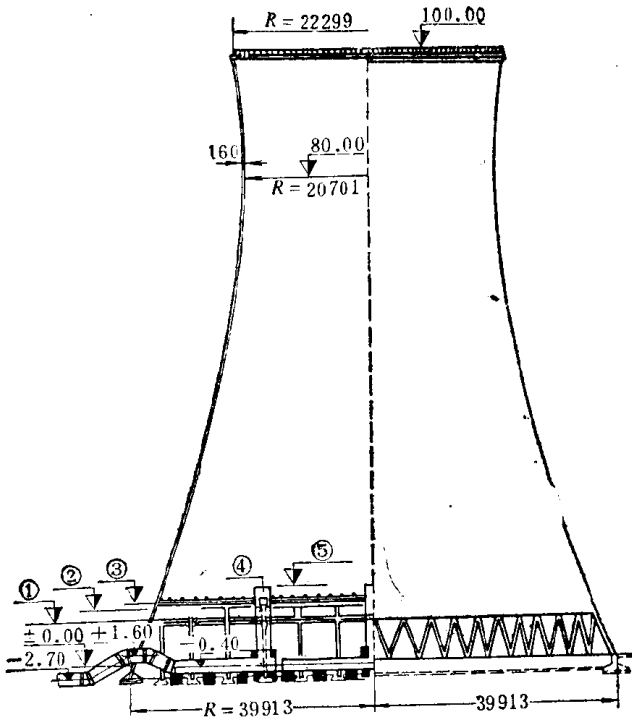


图 1-5 4000m<sup>2</sup>风筒式逆流冷却塔  
(管式配水系统及塑料折波填料)

- ①—进风口顶标高7.00；②—折波填料顶标高9.00；③—配水管中心标高10.25；④—最高供水水位12.00，主水槽尺寸1.1×1.2；⑤—主水槽内顶标高10.70，竖井顶标高12.50

塔。近几年来，为了满足火力发电厂容量和单元发电机组容量不断增大的需要，风筒式自然通风冷却塔亦向大型化方向发展，如配300MW发电机组的淋水面积为6500m<sup>2</sup>和7000m<sup>2</sup>风筒式冷却塔已于1985年相继在山东邹县电厂和安徽洛河电厂投运，塔的高度分别为125m和130m，底部直径为105m，这两座塔都是我国自己设计和建造的，亦是目前我国容量最



大的两座冷却塔。以上所述风筒式冷却塔都是逆流式自然通风冷却塔，而风筒式横流冷却塔在我国应用较晚。1976年在河南长葛电厂首先建成一座小型试验性横流式自然通风冷却塔。1978年在开封电厂建成了我国第一座较大型的风筒式横流冷却塔，塔的淋水面积为 $1750\text{m}^2$ ，塔高90m。其后，相继在几个电厂建成了 $1750\text{m}^2$ 左右的风筒式横流冷却塔。在湖南金竹山电厂建成的淋水面积为 $2500\text{m}^2$ 风筒式横流冷却塔，塔高110m，是我国目前最大的一座风筒式横流冷却塔（见图1-6）。风筒式横流冷却塔与逆流冷却塔相比，各有特点。目前，苏联、英国、联邦德国等国家广泛采用自然通风逆流冷却塔；而美、法等国家过去主要采用横流冷却塔，但近年来也有转为采用逆流冷却塔的趋势。据有关文献所述，主要原因是逆流冷却塔虽然造价和耗用材料多一些，但所需循环水泵的扬程相对较低，可以节省厂用电，在燃料价格不断上涨的情况下，经济上变得比较有利；此外，逆流冷却塔在冬季严寒时受冰冻危害的程度比较轻。在我国，风筒式横流冷却塔目前应用得还不多，时间也不长，但我国幅员广大，条件各异，横流冷却塔作为循环水冷却设备型式之一，可以进一步摸索和积累设计、施工和运行方面的经验，根据国情适当选用。

随着机械工业的发展，机械通风冷却塔的容量不断增大，冷却性能也有了提高。50年代~60年代，我国有不少火力发电厂采用了机械通风冷却塔，配用的轴流风机直径一般有4.7m和8.0m两种，淋水填料通常采用木质板条、钢丝网水泥或石棉水泥板条。1972年陕西秦岭电厂建造了5座 $500\text{m}^3$ 逆流式机械通风冷却塔，配用了沈阳鼓风机厂生产的直径为12.5m轴流通风机，其淋水填料原为纸质蜂窝型，后改