

〔东德〕艾·汉佩

胡 贤 章 译

程积高 章德昌校

冷 却 塔

冷 却 塔

[东德] 艾·汉佩

胡贤章译 程积高 章德昌校

电力工业出版社

内 容 提 要

本书比较系统和全面地介绍了近二十年来许多国家的大型自然通风冷却塔和机力通风塔的设计和试验研究成果。全书共分七章，第一、二章介绍冷却过程重要性、现状与发展趋势，冷却塔及其组件概述；第三章是冷却过程的物理学原理；第四、六章是本书的核心部分，重点介绍近二十年来许多国家的冷却塔的热力计算方法和双曲线冷却塔壳体的设计原理，并附有大量试验成果和图表；第五章为各种冷却塔方案的经济分析；第七章收集了近年来一些国家已施工的各种冷却塔的图片。

本书可供从事冷却塔设计的工程技术人员、科研人员及高等院校有关师生参考。

E. Hampe

Kühltürme

VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1975

冷 却 塔

[东德] 艾·汉佩

胡贤章译 程积高 章德昌校

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 11 $\frac{1}{2}$ 印张 228千字 插页8张

1980年2月第一版 1980年2月北京第一次印刷

印数 0001—8145册 每册 1.45元

书号 15036·4016

译者的话

本书由程积高和章德昌同志校核，并由何蓬江工程师从专业技术上作了全面审校，谨此致谢。

审校过程中对前言部分及一些句段作了删节和修改。

为了方便读者，译者在正文前增加了符号说明。

由于译者水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，希读者批评指正。

胡贤章

1978年6月30日

前 言 (节译)

不同的国家，工业化的方向、程度和目标是各不相同的，但有一点是共同的，即要考虑它对人类生活环境的许多基本问题的影响，如维护有限的水资源的保存和洁净、保持空气的纯洁、防止噪音以及防止破坏人类生活环境的美观等。

水、空气、噪音和美观这四个问题，都与工业规划和设计有关。如要考虑上述四个问题的要求而又要保证现有的生产规模，就必须额外增加国民经济支出的50~100%。这样的估计并不夸张。

冷却塔是工业设施的一部分，设计时必须考虑到它可能影响环境的全部因素。大量可再利用的水流经冷却塔而蒸发掉相当大的一部分，所产生的水汽（湿式冷却塔）和噪音能造成对环境的干扰和破坏；但如利用得当，也能美化环境。

本书进一步阐明我在《工业烟囱》一书中的观点，以促进土木工程师和工业建筑师们理解使用者的要求，并让使用者对冷却塔的各种施工方法、存在的问题和特点也有所了解。

艾·汉佩

1973年7月于魏玛

主要符号说明

<i>s</i> , <i>sec</i>	秒	<i>cal</i>	卡
<i>h</i>	时	<i>kcal</i>	大卡
<i>m</i>	米	<i>Gcal</i>	百万卡
<i>m³</i>	立方米	<i>BTU</i>	英热单位
<i>Mrd·m³</i>	十亿立方米	<i>Hz</i>	赫芝
<i>kg</i>	公斤	<i>KHz</i>	千赫
<i>kp</i>	公斤力	<i>W</i>	瓦
<i>t</i>	吨	<i>kW</i>	千瓦
<i>Mp</i>	吨力	<i>MW</i>	兆瓦
<i>ft³</i>	立方英尺	<i>phon</i>	方
<i>N</i>	牛顿	<i>M</i>	马克
<i>lb</i>	磅	<i>DM</i>	德国马克
<i>lb/in²</i>	磅/英寸 ²	<i>DPf</i>	芬尼
<i>imp.gal</i>	英加仑	<i>fr</i>	法郎
<i>U.S.gal</i>	美加仑	<i>\$/U.S.g.p.m.</i>	美元/美加仑·每分钟
<i>barrel</i>	桶	<i>₤</i>	英镑
<i>inch mercury</i>	英寸汞柱	<i>DH</i>	高压
<i>in Hg</i>	英寸汞柱	<i>Jahr</i>	年
<i>foot of water</i>	英尺水柱	<i>ρ_L</i>	空气密度
<i>mm Quecksilbersäule</i>	毫米汞柱	<i>g</i>	重力加速度
<i>mm Wassersäule</i>	毫米水柱	<i>Aus</i>	出口
<i>at</i>	工程大气压	<i>Ein</i>	进口
<i>°F, degF</i>	华氏度	<i>eff</i>	有效的
<i>°C, grd</i>	摄氏度		

目 录

译者的话

前言(节译)

主要符号说明

1. 冷却过程的重要性、现状和发展趋势	I
1-1 冷却对实现工业过程的必要性	1
1-2 冷却过程对用水规划的重要性	4
1-3 工业冷却过程的现状和发展趋势	6
1-4 技术上确定冷却系统的着眼点	15
2. 冷却塔及其组件概述	22
2-1 冷却过程的作用原理	22
2-2 冷却塔功能的划分	26
2-3 功能单元和组件的基本关系	26
2-4 水(汽)引进与排出的组件	26
2-5 空气进入和排出的组件	36
2-6 热交换和物质交换的组件	38
2-7 自然通风冷却塔和机力通风冷却塔的结构构件	43
2-8 冷却塔发展概况	46
3. 物理学原理	54
3-1 与冷却塔分析有关的物理问题	54
3-2 热力学原理	56
3-3 流体力学原理	69
3-4 声学原理	70
3-5 模型理论的基础	71
4. 冷却塔的热力计算方法	76
4-1 麦克尔方程	76
4-2 施潘格马赫的冷却塔特性曲线	84
4-3 克伦克的冷却塔特性曲线	85
4-4 用辛哈姆和施帕尔丁的方法确定自然通风冷却塔尺寸	89
5. 冷却塔方案的经济分析	93
5-1 冷却系统和电厂设备的投资比例	93
5-2 采用自然通风冷却塔还是机力通风冷却塔	95
5-3 采用湿式冷却塔还是干式冷却塔	100
5-4 自然通风冷却塔设计的经济参数	107
5-5 机力通风冷却塔设计的经济参数	109
6. 双曲线冷却塔壳体设计原理	113
6-1 形状与功能之间的关系	113
6-2 冷却塔的荷载分类	120
6-3 在静荷载作用下双曲线冷却塔壳体的承载能力	129
6-4 冷却塔壳体的动稳定和静稳定	142
6-5 对冷却塔壳体设计的建议	150
7. 已施工的冷却塔	152
参考文献	171

1. 冷却过程的重要性、现状和发展趋势

冷却过程是工业生产全过程的一部分。它与全过程有密切关系，其各项参数是根据全过程来确定的。

另一方面，冷却过程通常又是工业生产全过程和环境之间的一个环节。由于冷却介质的取用、消耗及排放而影响环境，甚至使环境受到污染。

经过近年来的不断努力，对环境的保护和改善得到重视。那种只顾完成大工业的冷却任务而忽视环境保护的观点，其后果是不堪设想的。

工业冷却所用的主要冷却介质是水，它对环境的影响将涉及到水利和水生物方面。随着工业的迅速发展，人类在生产和生活方面的需要不断增长（主要是能量的增长）；这引起了工业过程的增长，其中许多是放热的过程，并且，为了经济运行大都需要进行冷却。

随着工业的发展，对冷却介质（水或空气）的需要也在增长。过去十年，用水量的增长只是个数量上的问题，而现在已渐渐成为质量问题；即对于与过去相同的科学技术或国民经济项目来说，不能再简单的扩大供水量来解决问题了。因此，规划、设计人员在设计冷却塔时，不仅要解决技术问题，而且还要考虑它对生活环境的影响。

1-1 冷却对实现工业过程的必要性

现以电厂运行过程为例来说明冷却（放热）的必要性。

根据目前的技术水平，使用化石燃料的热电厂能达到的最大热效率约为30%，使用核燃料的为45%。其余60%左右的原始能量将损失掉。

表1-1以一个火力发电厂的主要循环为例来说明这种损失。

在汽轮机的蒸汽冷凝过程中损失了大量未经利用的热能，这直接影响到电厂的效率。

通常可用下式计算冷却过程的热效率：

$$\eta_{th} = T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$$

式中 T_1 —— 载热体的输入温度 [K]；

T_2 —— 载热体的排出温度 [K]。

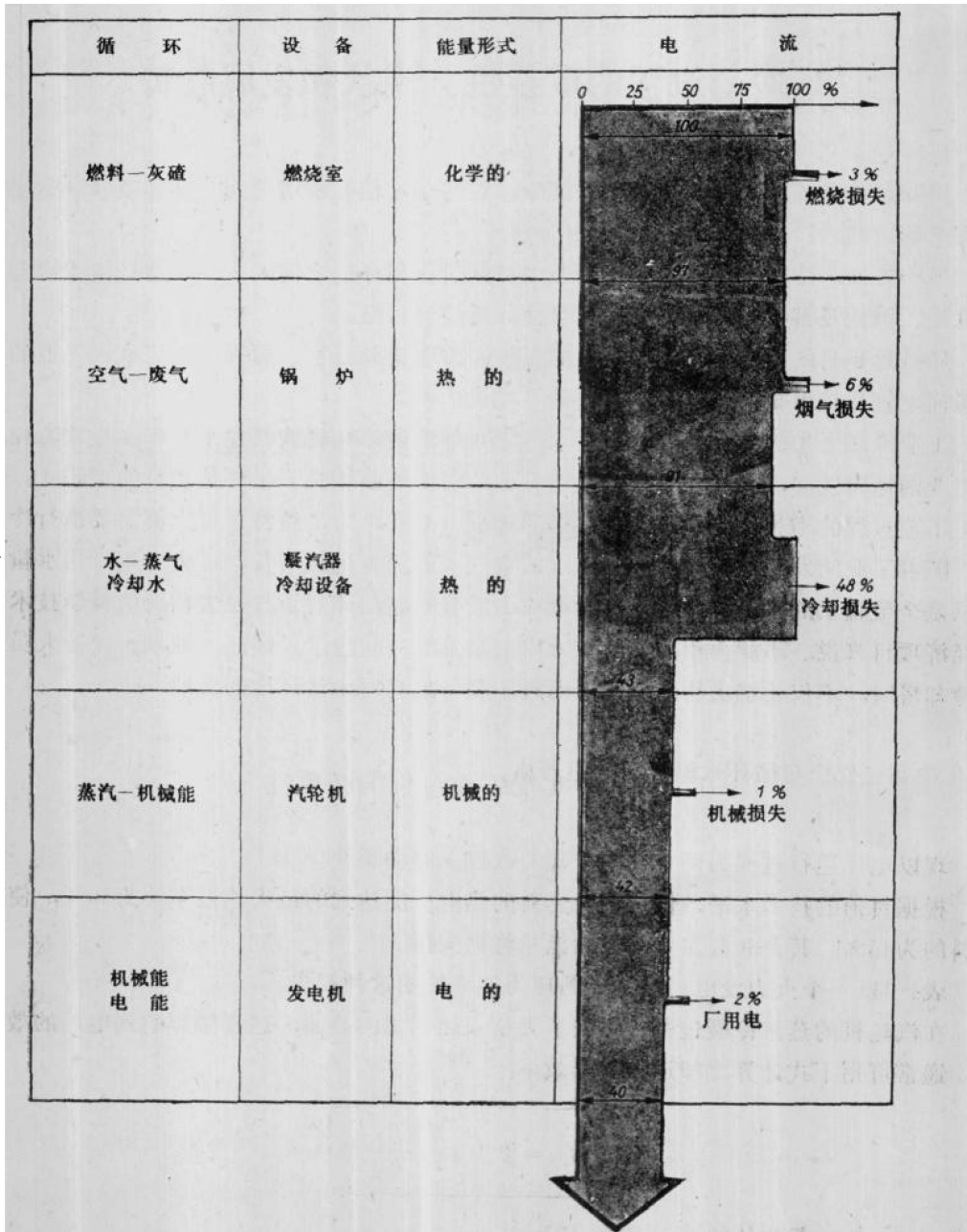
热效率是随载热体的温度降低而提高的。

下面引用奥登哈尔（Odenthal）和施潘格马赫（Spangemacher）^[78]的公式来说明温度变化对电厂运行过程中功率增量的影响。

汽轮机的微增功率 ΔN 与下列因素有关：

（1）进入凝汽器中的蒸汽量 G_D [公斤/小时]；

表 1-1 使用化石燃料的火力发电厂的能量损失 (摘自文献[93])



(2) 蒸汽温度变化一度时的绝热焓差 Δi [大卡/公斤·度] (见节 3-2);

(3) 汽轮机效率 η_T 。

$$\Delta N = \frac{G_D \Delta i \eta_T}{800} \text{ [千瓦/度]}$$

假定 $\eta_T = 75\%$ 并引入凝汽器热平衡时的冷却幅宽 Δt [度] 和进水量 m_w [公斤/小时], 则微增功率 ΔN 可按式近似计算:

$$\Delta N = 2.8 \times 10^{-6} m_w \Delta t \text{ [千瓦/度]}$$

因此，效率的提高，是与进水量和冷却幅宽成正比，也就是说与循环水温度的下降成正比。使用化石燃料电厂的中压机组，温度每降低一度能够提高效率0.47%，高压机组能提高0.35%；使用核燃料的电厂约为0.7%。

在此指出：为达到理想的冷却效果，一台机组的冷却设备投资占该机组总投资的百分比，与机组参数、机组容量和不同的冷却系统有关，其值可高达25%。

很明显，通过冷却系统的最佳设计既能提高设备效率，又能降低冷却系统所占的投资比例。这个问题近年来已引起人们的重视（见节1-4和1-5）。

表1-2是摘自文献[71]中一台30万千瓦机组附属设备的冷却水用量，该用水量约为2000米³/小时，只占电厂总循环水量的一小部分（见节1-2）。

表 1-2 电厂附属设备的冷却水用量

附属设备	冷却水量 [米 ³ /小时]
氢冷却器	500
给水泵传动机构油冷却器	330
汽轮机主油冷却器	260
发电机定子冷却器	280
变压器冷却器	140

下面谈谈化工用水的问题。

电厂的循环水温度，不论是进水温度还是出水温度，其变化范围都是很小的（ $t_{w1} \approx 32 \sim 40^\circ\text{C}$ ， $t_{w2} \approx 25 \sim 27^\circ\text{C}$ ），而化工生产过程的循环水温度则要求更严。许多化工生产，不但其经济性受循环水温度的影响，而且在生产过程中要保证所规定的温度，因此在冷却过程中对循环水温度要求很严格。

一些大型化工企业的循环水用量甚至超过一些大城市的用水量。这种企业往往由于生产规模不断扩大，而把当地的水资源耗尽，致使其它企业不得不改为水损失很少的循环冷却或没有水损失的干式冷却。

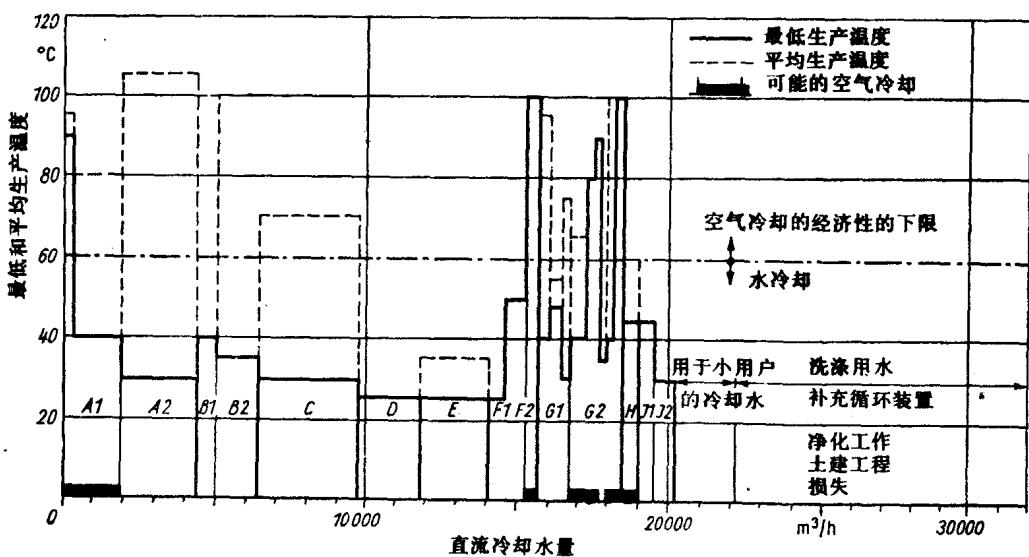


图 1-1 一个大型化工企业的冷却要求（直流冷却）

据施勒格尔 (Schlegel)、奥托 (Otto) 和西贝尔 (Sieber) 指出 (见文献[81]), 仅仅洛伊拉 (Leuna) 和布拉 (Buna) 化工厂每小时的用水量就高达 5 万立方米。大型化工企业冷却要求如图 1-1 和 1-2 所示 (摘自文献[81])。化工企业的冷却温度与电厂是不同的, 通常可根据要冷却的介质、冷却介质 (制冷剂、水、空气)、冷却设备的布置, 以及各种换热器的结构、材料来选择冷却系统。

图 1-1、1-2 介绍了一个大型化工企业干式冷却塔与湿式冷却塔的经济性界限。图 1-1 为直流冷却, 图 1-2 为循环冷却。

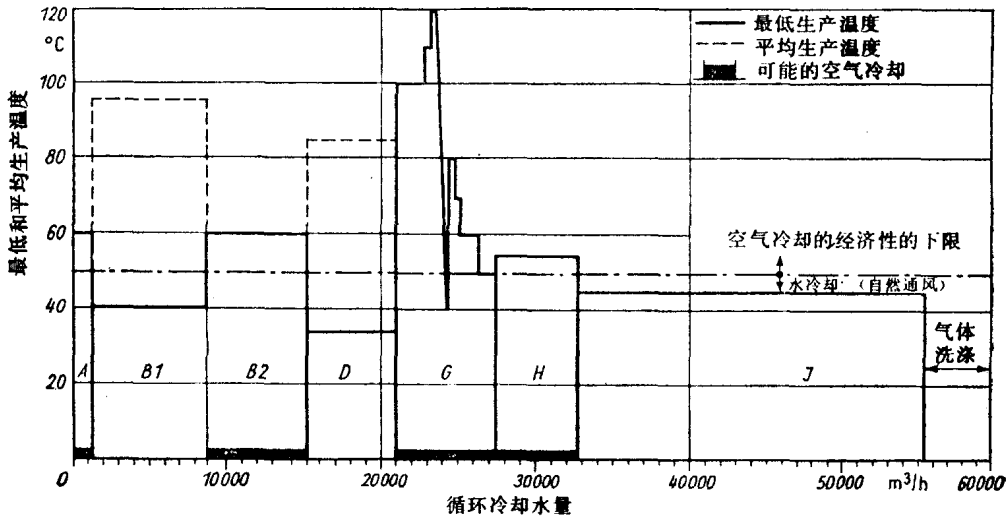


图 1-2 一个大型化工企业的冷却要求 (循环冷却)

1-2 冷却过程对用水规划的重要性

在节 1-1 中所述的大型化工厂用水量约为 50,000 米³/小时, 其中大部分用于冷却。如假定其蒸发损失为 2%, 则该厂的水损失就相当于一个有 20 万居民的城市生活用水量。

一个 300 万千瓦火力发电厂的用水量约为 45 万米³/小时, 而一个同容量的核电厂的用水量约为 55 万米³/小时。

用下面几条河流的流量作一比较:

易比河在阿肯的正常平均流量为 55 万米³/小时;

莱茵河在比布里斯的正常平均流量为 150 万米³/小时;

奥德尔河在艾森许滕施塔特的正常平均流量为 45 万米³/小时。

由此可知, 较大电厂的冷却用水可使大河流的流量发生变化。冷却水需要量与出力的关系如图 1-3 所示。

用水经济性是以实际水损失为标准的, 直流冷却和湿式冷却塔的水损失, 为冷却水量的 1~2%。

凝汽器排出的热量与汽轮机的单位热耗 w_{TB} [大卡/千瓦小时] 和额定出力 N_T (百万瓦)

有关，可由下式求出：

$$Q = 0.9 N_T \frac{w_{TB} - 860}{1000} \text{ [百万卡/小时]}$$

一台10万千瓦的汽轮机，在 $w_{TB} = 1900$ 大卡/千瓦小时，由上式得出的热量为
 $Q_{100} = 93.8$ 百万卡/小时。

这一热量必须通过具有比热 $c_w \approx 1$ [大卡/公斤·度]的水量 m_w [米³/小时]在冷却时围绕冷却幅宽 $4t$ [度]排出。由此可以根据冷却幅宽求出10万千瓦机组的每小时循环水量为

$$m_{w100} = 93800 / 4t \text{ [米}^3\text{/小时]}$$

由于蒸发，10万千瓦机组的水损失为120~150米³/小时。

下面的例子可以说明这些数字：

1972年，东德装机容量约1300万千瓦，如果用湿式冷却塔进行冷却，则每小时耗水量为1.5~2.0万米³。

假设每个居民每天的用水量为150公升，那么，由于电厂的冷却要求，大约需要消耗居民用水量的一倍。

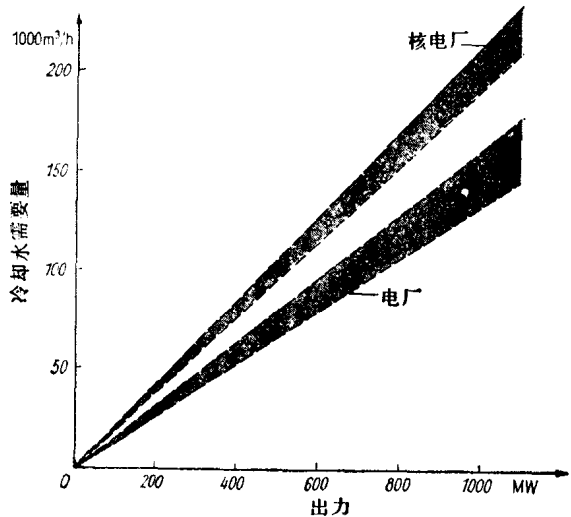


图 1-3 直流冷却时出力 and 冷却水需要量的关系

表1-3列出东德总用水量和工业用水量的数值。

可见，总用水量的70~80%为工业用水，而其中很大一部分（达70%）又是用于冷却。

表 1-3 用水量分类

年 分	总用水量 [10亿米 ³]	工业用水量 [10亿米 ³]
1965~1967	6.5	5.2~5.6
1970	8.8	7.0~7.5
1975	10.9	8.7~9.3
1980	13.0	10.4~11.1

如发电量年增长率为7%，则在十年内，冷却水的需用量就要增加一倍，因此必须大力节约用水，至少要压缩用水，方能适应用水量多方面增长的趋势。

在夏季月份，水的利用系数现在平均已超过100%，在沙漠地区甚至为200%。如果不在冷却方法上采取相应的技术措施，那么

到1985年用水量可能增长5~7倍。这类技术措施不仅包括减少湿式冷却塔的水损失（例如在大型冷却塔内增设除水器），而且也包括从湿式冷却塔向干式冷却塔过渡，以及干、湿塔联合使用的方法。多数技术高度发达的国家也面临着类似的情况。

例如，美国兴建某电厂时（见参考文献[88]），拟将电厂布置在能源附近，但不能满足供水要求，因此设计时往往要考虑采用干式冷却塔。

为了解决未来的缺水问题，英国在大型电厂中采用干式冷却方面迈出了第一步，即在

拉格莱于 (Rugeley) 电厂采用了干式冷却塔。苏联在拉兹丹 (Razdan) 的一座有5台 22 万千瓦机组的大型电厂中采用了干式冷却装置, 这是解决冷却方法和水务管理问题的重要发展方向。

图1-4说明了一个大型化工企业的用水量和水损失的情况 (摘自参考文献[81])。

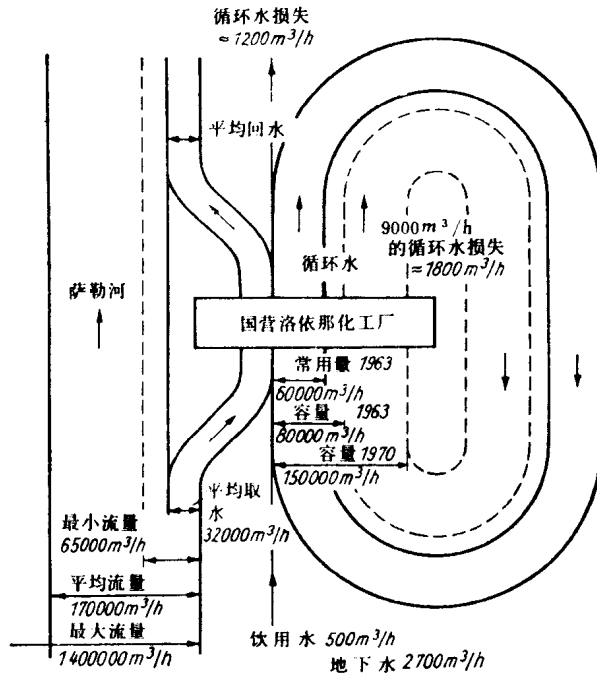


图 1-4 一个大型化工企业的用水量和水损失

1-3 工业冷却过程的现状和发展趋势

在热交换和物质交换问题方面所进行的科学研究工作使得对冷却过程 (混合、对流和热辐射) 有定量的了解。

1952年, 麦克尔 (Merkel) 证实了引起热交换与物质交换的综合活动的原因不是被冷却的介质和冷却介质之间的温度差, 而是焓差 (见节3-2)。

目前, 直流冷却和循环冷却、干式冷却和湿式冷却、自然通风冷却和机力通风冷却、逆流冷却和横流冷却等冷却方案大都有了例子。

如果把最近二十年所发展的间接空冷理解为干式冷却的话, 那么可以认为, 最近四十年来, 解决冷却问题的技术水平没有取得什么发展。

如果说在某些方面有所进展, 并在近年来也收到了明显的效果的话, 那就是:

- (1) 在大量研究的基础上, 对冷却过程做出了解释, 并进一步掌握了冷却理论。
- (2) 利用模型试验对理论计算进行了检验, 这对冷却理论的发展与改进具有很大的影响。
- (3) 在全过程中冷却过程的作用以及冷却过程的参数与全过程的技术经济参数之间

的关系的研究。

(4) 随着机械制造技术和施工技术的进一步发展, 可将冷却设备当作建筑物的一个单元, 或当作辅助设备和附属设备, 或当作机组的一部分。

表1-4说明冷却过程的发展情况。另外的几个问题列于表2-12(自然通风冷却塔发展概况)、表2-13(干式冷却塔发展概况)、表4-1(麦克尔方程发展过程)之中。

下面对直流冷却(河水冷却、湖泊冷却、海水冷却)和循环冷却(原理上的可能性)作综合说明。

直流冷却的冷却过程的一些问题在本章要详细阐明, 因为这种冷却方式在后面的章节中不再阐述了。

循环冷却的原理、量纲问题、设计和计算问题是本书的重点, 在后面将作详细的阐述。

1-3-1 直流冷却

贝克尔(Becker)^[6]、弗林斯帕赫(Flinspach)、弗莱格(Fleig)^[80]和克罗勒夫斯基(Krolewski)^[57, 59]提供了有关直流冷却过程及其使用限度、危害性等重要论文。在这方面所达到的水平可见参考书[11*], 书中有实例和计算。

在规划和设计直流冷却设备时要考虑以下主要问题:

(1) 取水河流的初始状态(初始热负荷、污染率、河流中的动物区系和植物区系、河流现在和将来用于游览和渔业等等);

(2) 河流与周围环境的关系(静止的、流动的、潮汐水域, 水位的波动, 水和周围环境的热交换条件, 风的状况, 四周的覆盖, 辐射平衡, 空气温度、湿度的大小及随时间的变化);

(3) 与河流有关的工厂的热负荷及热负荷的发展(容量扩大、产品改变等等);

(4) 采用哪些技术可减少热负荷(长的进水渠道、串联布置的冷却塔等等);

(5) 排入河流的热量影响哪些水域范围(静止水域的水层、流动水域的冷却距离)。

采用直流冷却应遵循以下两个标准:

(1) 冷却水排入后河水的允许最高温度;

(2) 自然河水的最大温升。

除了河水温度升高以外, 由于附加蒸发而产生的水损失和可能产生的雾对交通安全的影响, 这些都具有重要意义。

1-3-1-1 一般原理

在冷却过程中静止水域和流动水域具有各种不稳定的因素(风速、周围的湿度和温度、水中的温度分布), 因此只能用估算的方法进行计算。循环水排入河道加热河水的问题也是这样。这种计算的原理, 就是水域的热平衡。计算热平衡必须有以下资料:

(1) 由循环水带进来的热量 $W_{Kü}$;

(2) 由蒸发带走的热量 W_v ;

(3) 由对流损失的热量 W_L ;

(4) 由辐射和反射之差得到的“辐射平衡” W_{SB} 。

表 1-4

关于冷却过程发展及其工业应用的主要论文

物理基础、冷却原理	冷却塔的设计、结构、计算和施工
	1910年: 依特尔松(Iterson)提出钢筋混凝土壳体用于冷却塔的建议
	1920年: 混凝土锥形壳体冷却塔(法国)
1923年: 莫里尔(Mollier)的湿空气表	
1925年: 麦克尔方程	
	1934年: 伏留格(Flügge)研究负曲率壳体
	1938年: 第一个双曲线冷却塔(德国)
	1949年: 第一个预制(装配式)双曲线冷却塔(匈牙利)
1952年: 希尔顿(Chilton)的量纲法	
	1953年: 罗比锡(Rabich)的薄膜理论
1956年: 进行直接空气冷却的黑勒(Heller)的报告	
	1958年: 第一个100米的双曲线冷却塔(美国)
	1962年: 干式自然通风冷却塔(英国拉格莱于电厂, 12万千瓦)
1964年: 施潘格马赫的冷却塔特性	
	1965年: 渡桥冷却塔倒塌(英国)
1966年: 辛哈姆(Singham)和施帕尔丁(Spalding)的量纲法 克伦克(Klenke)的冷却塔特性曲线	1966年: 第一个滑模施工的双曲线冷却塔(东德, 里彭多夫Lippendorf)
	1967年: 高尔德(Gould)和莱(Lee)研究风荷载和地震荷载

因而得出热平衡为

$$W_{Ku} = W_v + W_L + W_{SB}$$

每平方米面积与周围交换的热量为

$$Q_w = W_v + W_L + W_{SB}$$

根据文献[11*], 蒸发量可用下式求出:

$$W_v = \frac{r\beta}{R_d T_{KL}} (p_s - p_L) \text{ [卡/厘米}^2 \cdot \text{小时]}$$

- 式中 r —— 蒸发热[卡/公斤];
 β —— 物质传热系数[米/小时];
 R_d —— 气体常数[米·公斤/公斤·度];
 T_{KL} —— 水面空气层的平均绝对温度[K];
 p_s —— 相应水温时空气界面的饱和压力[公斤/厘米²];
 p_L —— 在水表面上的空气的蒸汽压力[公斤/厘米²].

根据文献[11*]由下式得出对流附加的热量:

$$W_L = \alpha(t - t_L) \text{ [卡/厘米}^2 \cdot \text{小时]}$$

式中 α —— 导热系数[卡/厘米²·小时·度].

对流附加的热量可用以蒸发热量代替的假定, 由下式计算:

$$W_L = 2.03 \frac{t - t_L}{p_s - p_L}$$

蒸发量与风速 v 有关, 一般可用下式求出:

$$V = f(v)(p_s - p_L)$$

在文献[11*]中列出了不同的研究者建议采用的函数 $f(v)$ 的分析对比。在 $1 \leq v \leq 4$ [米/秒]范围内, 特拉贝尔特 (Trabert) 于1896年提出如下关系式是适用的:

$$V = 0.41 \sqrt{v} (p_s - p_L)$$

文献[11*]和[6]中列出了用于中欧静止水域的公式:

$$V_v = 0.00103(t_{w1} - t_{w2})m_w \text{ [公斤/小时]}$$

这里, $(t_{w1} - t_{w2})$ 为循环水进入所产生的温升, m_w 为每小时的流量。

辐射平衡包括以下几种:

- (1) 直接的日照辐射;
- (2) 扩散的热辐射;
- (3) 由水反射的辐射;
- (4) 由水辐射的热量;
- (5) 大气反射。

在中欧气候条件下，随每天和季节时间的变化，由直接的日照辐射和扩散的热辐射（两者均视为球体辐射）每小时辐射出的热量可达80卡/厘米²。日平均为500卡/厘米²（参见文献[11*]）。

剩余热量（反射的热量、辐射的热量和反射热量）——包括在“热辐射平衡”概念中——与地区、气候和时间条件有很大关系。各个分量的估算公式参见文献[11*]。

关于湖泊与河流的辐射平衡计算，可见文献[6]。盛夏白天的特征值为：晴天最大平均值为80卡/厘米²，阴天为50卡/厘米²，晚秋的相应数值为40卡/厘米²或10卡/厘米²。在文献[6]中提出了一种计算算法语言（Rechenalgorithmus），可求出由于热量排入而受负荷的水域实际温度状况，已用于莱茵河的热量计算。图1-5摘自文献[30]，它概括说明了莱茵河的温度预测。

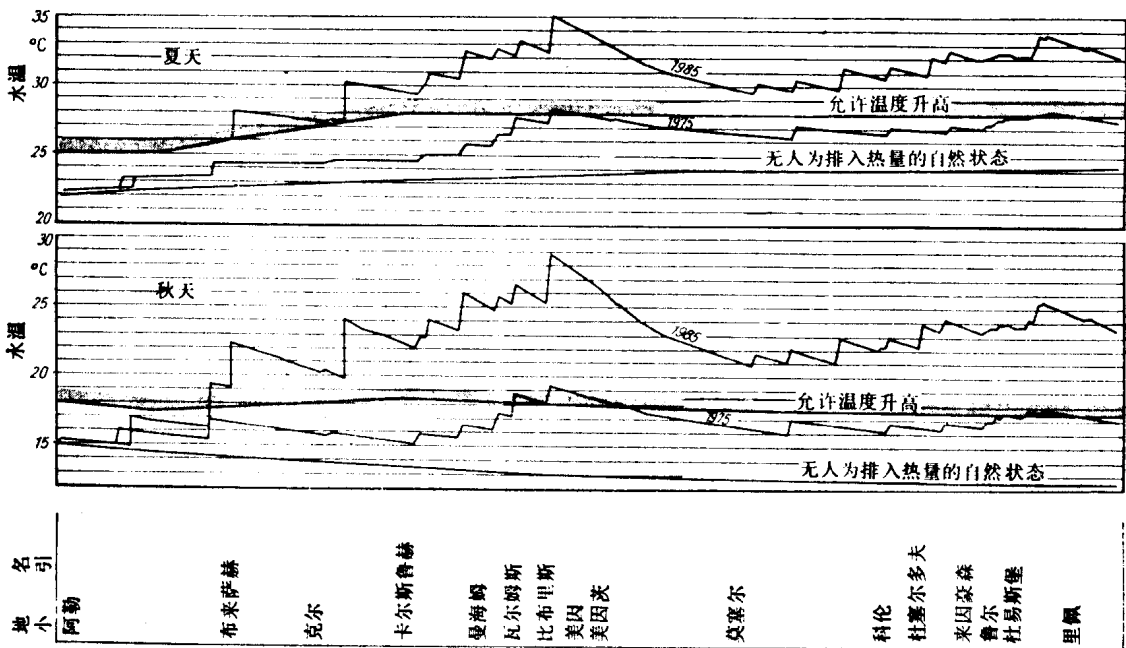


图 1-5 莱茵河的热负荷

除了温度本身和与温度有关的其它条件外，由于直流冷却造成的生物条件和化学条件的影响，是水域受热污染的标准。另一方面，直流冷却又影响动物区系、植物区系，并影响水域利用的可能性。

由于热量的排入而加速了氧的分解过程，因此湖泊中的含氧会大大减少。与此同时出现的对流循环使得含有营养物质的深水层也产生循环，并能引起深水层的化学分解和废料的沉积。

在有高温水排入的河段，由于分解过程的加速以及由于加热而引起氧饱和值的降低，使得河流的含氧量减少。另一方面，由于扩散系数的增大，也提高了氧的吸收程度。

河流中氧的平衡，可通过一系列措施给予有效的改善，例如，在冷却循环中采用附加