

内 容 提 要

本书是热机人员提高专业理论知识较好的参考书。全书分八章，有插图270余幅。书中结合热力设备的实际介绍传热学知识，由浅入深地阐明导热、对流和辐射换热三种热传递基本方式的规律，对热力设备有关部件的传热问题进行了重点分析；阐述了强化传热、传热计算和传热实验测定的基本方法。本书文字通俗、插图丰富，对重要公式的应用都举了例题，各章都安排了思考题并给出答案，书末有附录和传热学问题索引，以便读者查阅和参考。

本书可供热机专业人员和大、中专院校师生学习和参考。

传 热 学 基 础

陶文铨主编

*

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

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 12.5印张 327千字

1981年10月第一版 1981年10月北京第一次印刷

印数 0001—9100册 定价 1.20元

书号 15036·4231

前 言

传热学是研究热量传递规律的学科。热量传递现象普遍地存在于各个生产部门与自然界里，因而传热学的理论广泛地应用于工农业生产及科学研究的各个领域。尤其是热动力部门，掌握传热学的理论对设备的合理设计与正常运行都有重要的意义。为帮助广大热机专业人员更好地掌握热力设备的结构原理和工作特性，以提高管理与运行水平，并为大、中专院校热机专业师生提供一本有用的参考书，我们编写了这本《传热学基础》。

本书首先从读者所熟悉的一些热传递现象出发，由浅入深地介绍几种热传递基本方式的规律（第一章到第五章），着重讲清传热学的基本概念和主要计算方法；在此基础上，再运用传热学的知识对一些较复杂的问题进行分析（第六章到第八章），旨在培养读者分析问题与解决问题的能力。对比较深入或较新的内容，都用小字排印，读者初学时可以跳过去，不会影响以后内容的学习。

由于热传递现象的复杂性与多样性，传热学中计算公式较多。我们选择了几种热交换现象进行讨论与分析，较为详细地介绍了过程的物理本质，计算公式中各项的意义，指出公式的适用范围，及在一定条件下如何使公式简化等。这样做既有利于初学者把主要精力集中到掌握基本概念和培养分析问题、解决问题的能力上；当需要解决其他传热问题时，熟悉了上面这些方法后也能起到举一反三的作用。

为适应自学的需要，本书的文字叙述比较详尽，不采用高等数学来推导或演算，对那些必须补充的数学知识则在附录中作了扼要的介绍。对重点内容，如热阻、热阻叠加原则、强化热传递的方法等，前后反复强调，多次实际应用，必要的地方还举了计

算例题。读者在阅读过程中若能结合生产实际需要进行一些传热测试（尤其在学习第八章时），将能收到更好的效果。

在本书编写过程中曾得到江苏望亭发电厂、上海杨树浦发电厂、吴泾热电厂、辽宁清河发电厂、陕西户县热电厂、西安坝桥热电厂、西安电力学校、北京电力学校、南京工学院、华中工学院、上海机械学院、上海锅炉厂、上海汽轮机厂、西安热工研究所等单位的有关同志及我校热能、锅炉、涡轮、发电等专业的一部分教师和学生的的大力支持和热情帮助，对初稿提出了许多宝贵意见，提供了不少试验资料，我们谨向这些单位和同志表示衷心感谢。

本书的编写工作是由李妩、陈钟硕、陶文铨、王允中四同志完成的，并由陶文铨负责全书的统一与定稿工作。

本书原名《火力发电厂传热原理与实践》于1977年秋由水利电力出版社出版，现经修订，并改名为《传热学基础》。限于编者能力，书中错误之处希望读者批评指正。

编 者

1980年7月于西安交通大学

常用符号

基本符号

- A* 物体对热辐射的吸收率。
- a* 导温系数, 米²/时; 物体的黑度。
- B* 燃料消耗量, 公斤/时。
- C₀* 黑体辐射系数, 千卡/米²·时·K⁴。
- c* 比热, 千卡/公斤·°C。
- c_p* 流体的等压比热, 千卡/公斤·°C。
- D* 辐射能在物体中的穿透率; 蒸汽流量, 公斤/时或吨/时。
- d* 直径, 米或毫米。
- E* 物体的辐射力, 千卡/米²·时。
- F* 表面积, 米²。
- f* 横截面积, 米²; 作用力, 公斤。
- G* 液体的重量流量, 公斤/时或吨/时。
- g* 重力加速度, 米/秒²。
- H* 高度, 米; 辐射受热面, 米²。
- I* 电流强度, 安培。
- i* 物体的焓, 千卡/公斤。
- J_λ* 单色辐射强度, 千卡/米³·时。
- k* 传热系数, 千卡/米²·时·°C; 气体辐射减弱系数, 1/米·绝对大气压。
- L* 定形尺度, 米; 距离, 米; 有效辐射层厚度, 米。
- l* 长度, 米。
- m* 凝汽器冷却倍率。
- p* 压力, 公斤/厘米²; 计算平均温差的无因次参数。
- Δp* 压差, 公斤/厘米²。
- Q* 传热量, 千卡/时。
- q* 热流密度, 千卡/米²·时。

- q_i 每米长管道上所传递的热量, 千卡/米·时。
- R 传递过程的阻力(热阻、电阻); 物体对辐射能的反射率; 计算平均温差的无因次参数。
- r 半径, 米; 汽化潜热, 千卡/公斤; 气体容积百分比。
- s 节距, 毫米。
- T 绝对温度, K。
- t 摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$ 。
- Δt 温差, $^{\circ}\text{C}$ 。
- δt 凝汽器的端差, $^{\circ}\text{C}$ 。
- U 电压, 伏; 周界长, 米。
- V 体积, 米^3 ; 体积流量, $\text{米}^3/\text{时}$ 。
- W 升温速度, $^{\circ}\text{C}/\text{时}$ 。
- w 流速, 米/秒。
- x 汽水混合物中的蒸汽的重量百分数。
- Z 管束排数。
- α 放热系数, $\text{千卡}/\text{米}^2\cdot\text{时}\cdot^{\circ}\text{C}$ 。
- β 体积膨胀系数, $1/^{\circ}\text{C}$; 气流对管束的冲刷角, 度。
- γ 比重, $\text{公斤}/\text{米}^3$ 。
- δ 厚度, 米或毫米。
- ε 污垢热阻, $\text{米}^2\cdot\text{时}\cdot^{\circ}\text{C}/\text{千卡}$ 。
- η 效率。
- θ 平面角, 度。
- λ 导热系数, $\text{千卡}/\text{米}\cdot\text{时}\cdot^{\circ}\text{C}$; 波长, 微米。
- μ 动力粘性系数, $\text{公斤}\cdot\text{秒}/\text{米}^2$ 。
- ν 运动粘性系数, $\text{米}^2/\text{秒}$ 。
- ξ 受热面利用系数。
- ρ 密度, $\text{公斤}\cdot\text{秒}^2/\text{米}^4$ 。
- σ 表面张力, 公斤/米。
- σ_0 黑体辐射常数, $\text{千卡}/\text{米}^2\cdot\text{时}\cdot\text{K}^4$ 。
- τ 在换热器中同一流体的温度变化, $^{\circ}\text{C}$ 。
- φ 辐射角系数; 圆筒壁导热简化计算式中修正系数。
- ϕ 管子直径习惯符号。

上 下 标 通 用 符 号

<i>min</i>	最小的	<i>max</i>	最大的
<i>s</i>	饱和的		

汉 语 拼 音 符 号

b	壁面 (bimian)	l	流体 (liuti)
d	当量 (dangliang)	lj	临界 (lingjie)
dl	对流 (duiliu)	lp	肋片 (leipian)
dr	导热 (daore)	lt	炉膛 (lutang)
fs	辐射 (fushe)	n	凝结 (ningjie)
g	光管 (guangguan)	nl	逆流 (niliu)
gs	管束 (guanshu)	r	热 (re)
h	灰 (hui)	sg	水垢 (shuigou)
hy	火焰 (huoyan)	tr	投入 (touru)
jb	局部 (jubu)	xt	系统 (xitong)
k	空气 (kongqi)	y	烟 (yan)
ky	可用 (keyong)	yn	允许 (yunxu)
		yx	有效 (youxiao)

相 似 准 则

雷诺准则
$$\text{Re} = \frac{wL}{\nu} = \frac{\rho wL}{\mu} = \frac{\gamma wL}{\mu g}。$$

普朗特准则
$$\text{Pr} = \frac{\mu g c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha}。$$

努塞尔特准则
$$\text{Nu} = \frac{\alpha L}{\lambda}。$$

欧拉准则
$$\text{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho w^2}。$$

葛拉晓夫准则
$$\text{Gr} = \frac{g \beta \Delta t L^3}{\nu^2}。$$

目 录

前 言

常用符号

第一章 对热传递现象的初步认识	1
第一节 热传递现象	1
第二节 热量传递的三种基本方式	11
第三节 传热过程和热阻	16
第四节 平均传热温差	22
第二章 导热	37
第一节 平壁和圆筒壁的稳定导热	37
第二节 导热系数	44
第三节 多层壁的导热	49
第四节 复杂形状物体的导热	56
第五节 不稳定导热的概念	59
第三章 无相变时的对流换热	69
第一节 对流换热现象浅说	69
第二节 流体的粘性及流动边界层	73
第三节 层流与紊流	79
第四节 影响对流换热的因素	86
第五节 相似理论简介	91
第六节 管槽内紊流强制对流换热的计算	99
第七节 流体横向冲刷管束的换热	109
第八节 多次折流换热概述	116
第九节 自然对流换热	119
第四章 有相变时的对流换热	128
第一节 大容器沸腾时的换热	128
第二节 管内沸腾介绍	133
第三节 凝结换热	141

第四节	影响凝结换热的因素	145
第五章	辐射换热	152
第一节	关于热辐射的基本知识	152
第二节	黑体模型及辐射四次方定律	157
第三节	对热辐射规律的进一步认识	162
第四节	物体的黑度与吸收率的关系	166
第五节	角系数	172
第六节	两固体表面间的辐射换热	179
第七节	辐射换热的增强和削弱	186
第八节	气体与火焰的辐射	191
第九节	炉内换热	199
第六章	发电厂中一些典型传热现象的分析与计算	210
第一节	复合换热及辐射放热系数	210
第二节	换热壁面温度工况的分析	219
第三节	通过圆筒壁的传热	228
第四节	锅炉各受热面及汽轮机辅机中传热过程的特点	235
第五节	肋片的作用	240
第六节	汽轮机起、停过程中的传热现象分析	247
第七节	从电机冷却技术的改进看强化热表面散热的方法	254
第八节	表面式换热器传热过程的强化	262
第九节	换热器设计计算示例	269
第七章	过热器和凝汽器传热问题的分析	278
第一节	过热器的类型及强化传热的方法	278
第二节	过热蒸汽温度的变化特性及调温措施	283
第三节	过热器管壁温度的分析	288
第四节	内肋片管为什么能降低壁温	294
第五节	凝汽器工作过程的一般介绍	299
第六节	表面式凝汽器传热过程的分析及传热计算	303
第七节	影响凝汽器真空和端差的因素	310
第八节	凝结水过冷的原因及减少过冷度的方法	316
第八章	传热问题的实验测定	323
第一节	传热系数的实验测定	323

第二节	温度测量中的传热问题·····	333
第三节	炉内辐射热流测定方法简介·····	343
附录	·····	351
附录一	常用材料的导热系数·····	351
附录二	干空气在压力等于760毫米汞柱时的物性参数 ·····	354
附录三	烟气在压力等于760毫米汞柱时的物性参数 ·····	355
附录四	水在一个大气压或饱和线上的物性参数·····	356
附录五	水蒸汽在饱和线上的物性参数·····	358
附录六	几种液体的物性参数·····	360
附录七	有关数学知识的复习与补充·····	361
附录八	国际单位制与工程单位制的换算·····	374
附录九	常用字母的读音及名称·····	380
传热学问题索引	·····	382

第一章 对热传递现象的初步认识

第一节 热 传 递 现 象

在生产实践和日常生活中我们会遇到大量的热传递现象。例如，用手拿冰块时会感到冻手，这是由于冰的温度比手的温度低，手上的热量传给了冰块的缘故。如果拿一根捅焦棒去捅锅炉炉膛中的焦渣，整个捅焦棒很快就会变热；这是因为捅焦棒的一端在炉中受热后温度升高，热量就从温度高的一端迅速传到了温度低的一端。冬天，在装有暖气片的房间里感到比较暖和。当打开炉膛看火门时，会立即感到非常热……。人们把生产实践和日常生活中的许多经验加以总结，得出了这样的结论：凡有温度差的地方就一定有热量的传递、热量总是自动地由高温物体传向低温物体的。

火力发电厂是将燃料的化学能转变为电能的工厂。在其中可以遇到各种类型的热量传递现象。火力发电厂的电能生产过程如图1-1所示，现综述如下：原煤在制粉系统中被磨成煤粉后，在热空气的输送下，经燃烧器送入炉膛燃烧，在这里燃料的化学能转变成高温烟气的热能；高温烟气把一部分的热量传给炉膛四周的水冷壁，并在流过水平烟道内的过热器及尾部烟道内的省煤器、空气预热器时，继续把热量传给蒸汽、水及空气，被冷却了的烟气经除尘器除去飞灰，最后从烟囱排出。在水冷壁管子中产生的饱和蒸汽流经过热器时进一步吸收烟气的热量变成过热蒸汽，然后通过主蒸汽管道送到汽轮机中。蒸汽推动汽轮机旋转，将热能转变为机械能。汽轮机带动发电机旋转而发电，又将机械能变成电能。蒸汽在汽轮机内膨胀作功后进入凝汽器内凝结，凝结水由凝结水泵送入低压加热器，吸收热量温度升高后又进入除氧器继续受热，并除去了水中所含的气体，再由给水泵将除氧后的水经

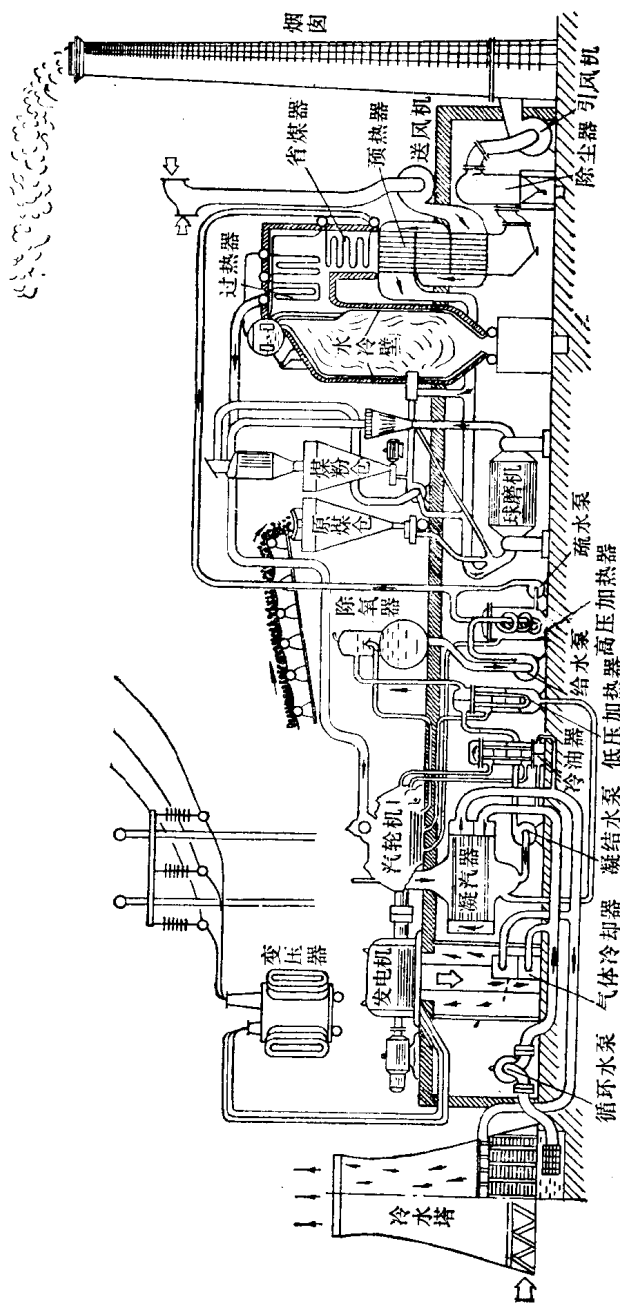


图 1-1 火力发电厂生产过程示意图

高压加热器进一步提高温度，然后送入锅炉，如此完成了一个循环。另一方面，为了使汽轮机的排汽凝结，由循环水泵把冷却水送入凝汽器，在其中受热温度升高后返回冷水塔，在那里又被冷却以供循环使用。

由此可见，发电厂的电能生产与热量传递过程密切联系在一起，发电厂的许多设备实质上都是两种流体进行热量交换的装置。工业上把这类将一种流体的热量传给另一种流体的设备统称为**换热器**。发电厂中的过热器、省煤器、空气预热器、凝汽器、回热加热器、除氧器、冷水塔等等都属于换热器之列，甚至可以说整台锅炉就是一个组合的换热器。尽管换热器的形式繁多，功用不一，但就其工作过程的基本原理来说，可以分成三种类型，分别叙述如下。

一、表面式换热器

这种型式换热器的应用最普遍，主要的特点是**冷热两种流体被壁面隔开，在换热过程中两流体互不接触，热量由热流体通过壁面传递给冷流体**，如图1-2所示。

发电厂中的过热器、再热器、省煤器（见图1-3中的相应部件）、管式空气预热器（图1-4）、凝汽器（图1-5）、冷油器（图1-6）、表面式加热器、表面式减温器和发电机的气体冷却器等都是表面式换热器。在过热器、再热器中蒸汽所吸收的热量是由高温烟气通过管子壁面传递给蒸汽的。同样，在省煤器中烟气热量通过管子壁面传给低温的给水。读者对凝汽器、冷油器等换热设备可以作类似的分析。

从结构上来说，表面式换热器又可分为壳管式、套管式、螺旋板式等数种。其中壳管式换热器应用最广，上面提到的凝汽器、冷油器、表面式加热器等都属于壳管式。其他形式的表面式换热

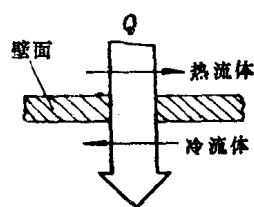


图 1-2 表面式换热器热量传递示意图

（图中的大箭头表示热量 Q 传递的方向）

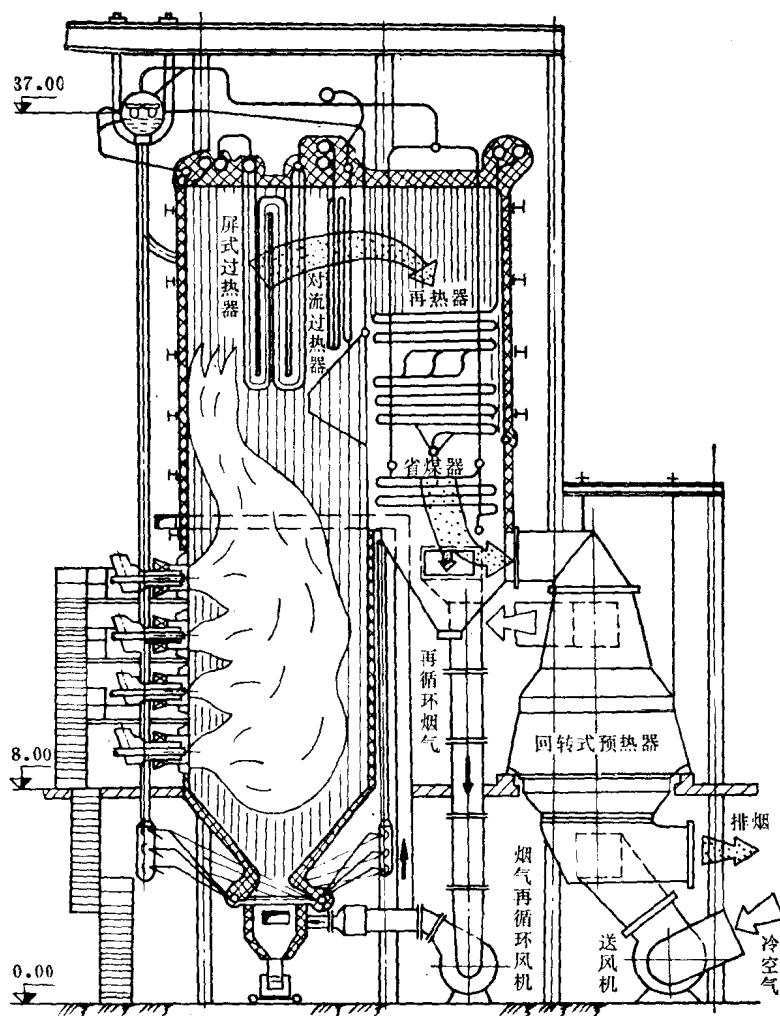


图 1-3 国产400吨/时超高压汽包锅炉简图

器在以后有关的地方再予以说明。

二、混合式换热器

在混合式换热器内的热量交换，是依靠热流体和冷流体直接

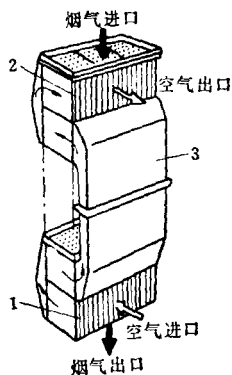


图 1-4 双级布置管式空气预热器

1—第一级空气预热器；2—第二级空气预热器；3—风道

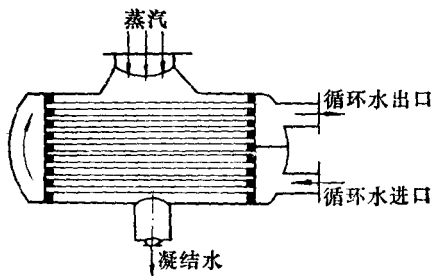


图 1-5 双流程凝汽器

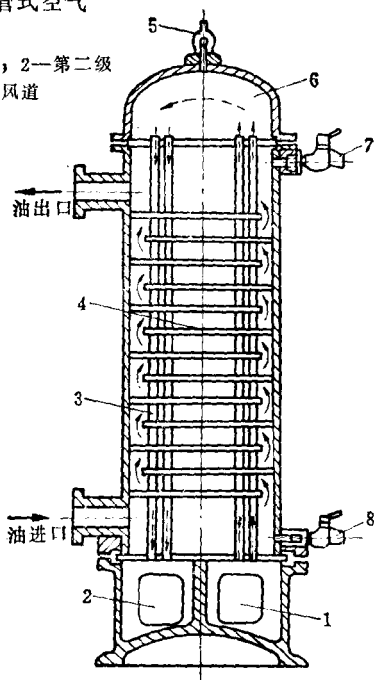


图 1-6 冷油器

1—进口水室；2—出口水室；3—管束；4—隔板；5—水侧放气旋塞；6—上水室；7—油侧放气旋塞；8—放油旋塞

接触和互相混合来实现的；在热量传递的同时伴随着质量的交换或混合。所以，它具有传热速度快、效率高、设备简单等优点，但只能用于冷热流体可以混合的场合，如图1-7所示。

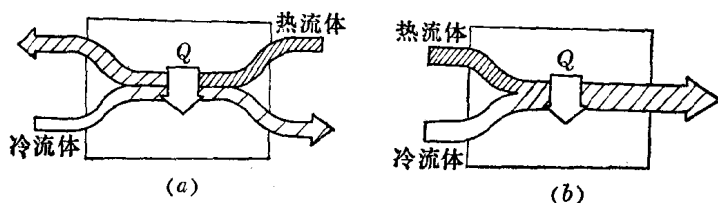


图 1-7 混合式换热器热量传递示意图
(a)直接接触、部分混合；(b)直接接触、完全混合

发电厂中的除氧器、冷水塔、喷水减温器都属于此类。下面具体说明在这些换热器中热量传递的过程。

在喷雾填料式除氧器中（图1-8），需要除氧的水由进水管流入环形配水管，经喷嘴播撒成雾状微粒下落，与加热蒸汽互相混合。雾状水滴与蒸汽接触面积很大，可以进行充分的热量交换。雾状的水滴在下落途中进入填料层时，又与不规则堆放的“Ω”形填料圈接触，并受到从下面进入的蒸汽进一步加热，因此可以较迅速地加热到相应的饱和温度，使溶解于其中的气体得到进一步的排除，除氧效果较好。

位在水源不很丰富的地区的发电厂往往采用自然通风冷水塔或机力通风冷水塔。我们以自然通风冷水塔为例来说明冷水塔的工作过程。在这种冷水塔中（图1-9），被冷却的水流向配水装置，通过淋水装置形成水柱，由上向下流入集水池。在这过程中与由下向上流动的冷空气互相接触、混合，在热量传递的同时进行着质量交换，即水柱表面一部分水分吸收水柱的热量而蒸发到空气中，使水柱温度降低；同时水柱与冷空气相接触时又把一部分热量传给冷空气。这两种作用均使水柱得到冷却。冷空气则被加热，于是塔内空气的比重就比塔外空气比重小，在风筒内形成了抽力。由于抽力的作用使塔外空气不断地流入。

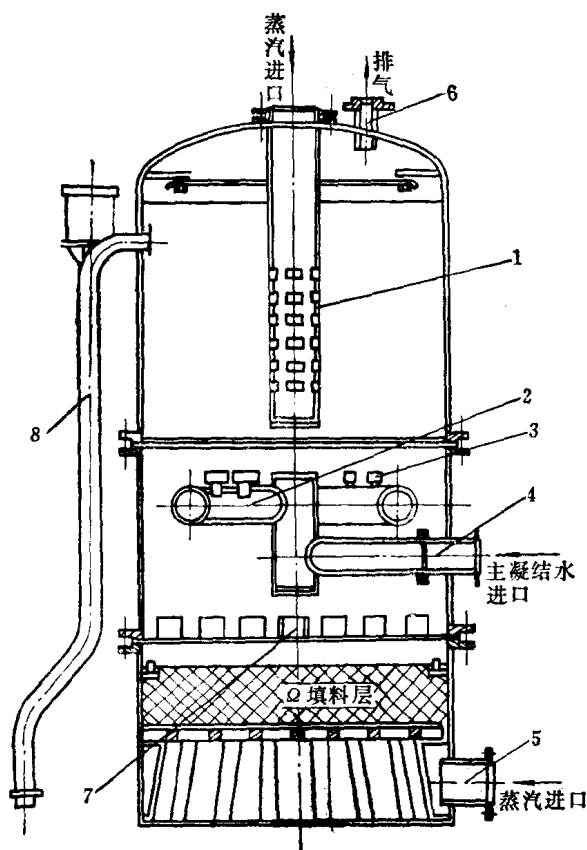


图 1-8 喷雾填料式除氧器

1、5—进汽管；2—环形配水管；3—喷嘴；4—进水管；6—排气管；7—淋水盘；8—水封管

在喷水减温器（图1-10）中，联箱内装置缩放式喷管，过热蒸汽从联箱右端进入喷管，减温水从直径最小的喉部直接喷到过热蒸汽中，利用高速汽流的雾化和混合作用，蒸汽与水充分混合，水吸收过热蒸汽的热量而汽化，使混合后的过热蒸汽温度降低，并从联箱左端引出。

三、蓄热式换热器

在这种换热器中，流过同一换热面（壁面）的一会儿是热流

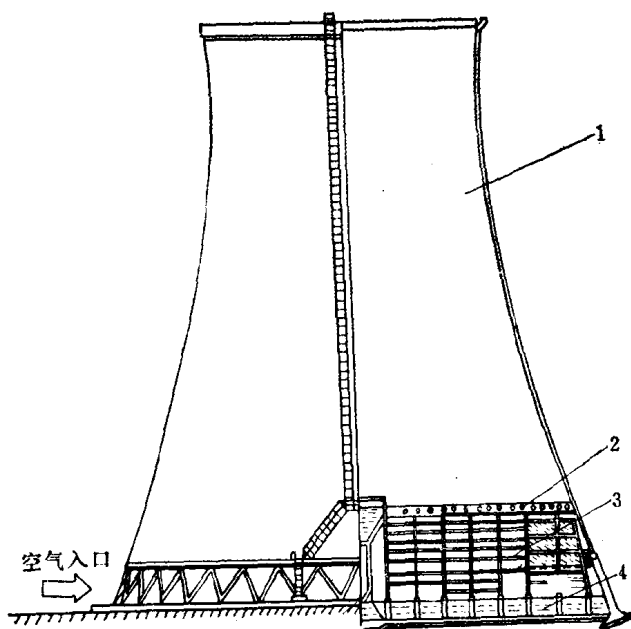


图 1-9 自然通风冷水塔

1—通风筒；2—配水装置；3—淋水装置；4—集水池

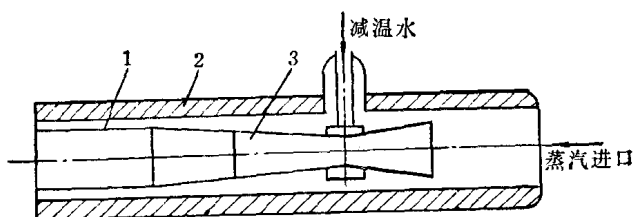


图 1-10 缩放管形喷水减温器

1—直筒；2—联箱；3—缩放式喷管

体，一会儿是冷流体。当热流体流过时是加热期，热量被壁面吸收，而且就储蓄在壁面内；在冷流体流过时为冷却期，壁面把所储蓄的热量又传给冷流体，如图1-11所示。因此，在蓄热式换热器中的热量传递是通过壁面周期的加热和冷却来实现的。这类设备一般用于气体介质之间的换热，如锅炉中的回转式空气预热