

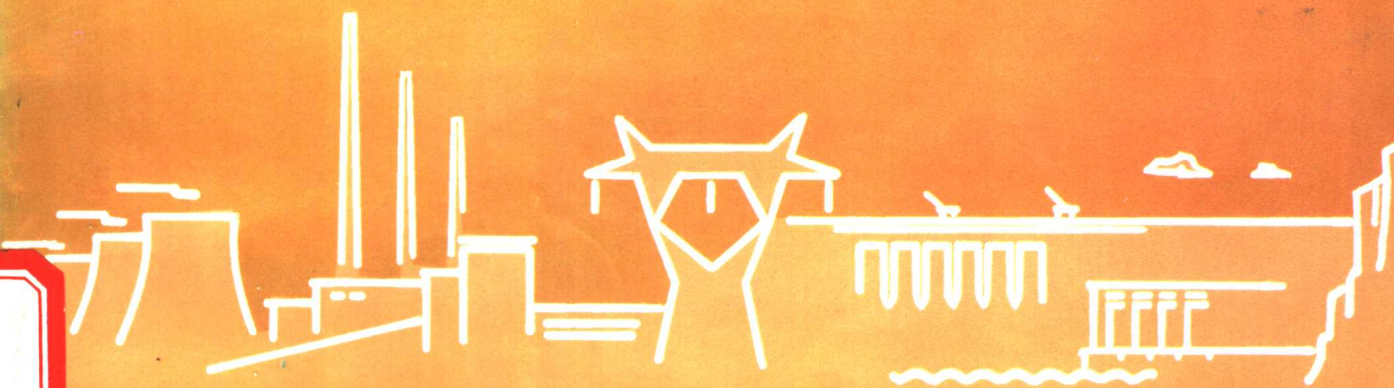


普通高等专科热能动力类专业教学委员会推荐使用教材

高等学校教材(专科适用)

传 热 学

太原电力高等专科学校 张天孙 主编



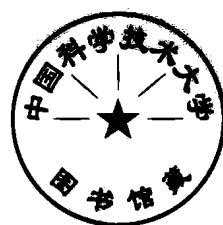
中国电力出版社

普通高等专科学校热能动力类专业教学委员会推荐使用教材

高等学校教材(专科适用)

传 热 学

太原电力高等专科学校 张天孙 主编



中国电力出版社

内 容 提 要

全书共分十章。主要内容包括导热的基本概念和微分方程式；稳态导热；非稳态导热；热辐射的基本概念及基本定律；辐射换热计算；对流换热概论；单向流体对流换热；相变换热；换热器及发电厂典型传热现象分析。各章均附有例题、复习思考题和习题。

本书可作为专科学校热能动力专业教材，亦可供其它有关专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

传热学/张天孙主编. — 北京：中国电力出版社，1998

高等学校教材·专科适用

ISBN 7-80125-469-4

I. 传… II. 张… III. 传热学-高等学校-教材
IV. TK124

中国图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 19190 号

 中国电力出版社出版
(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)
涿州一中印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1998 年 6 月第一版 1998 年 6 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 337 千字
印数 0001—3770 册 定价 15.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据中国电力企业联合会教高[1996] 10号文件关于热能动力类教材建设规划而编写的。

本书以中国电力企业联合会教育培训部热能动力专科教学指导委员会 1994 年天子山会议研究通过的传热学教学大纲为主要编写依据。1995 年以校内讲义在南京会议上交流, 经过专家评议和全体委员推荐, 列入中国电力企业联合会教育培训部(1996~1997 年)教材出版计划。本书在正式出版时, 作者反复研究了专家评审意见和各委员的建议, 对讲义进行了认真地修改。

本书立足改革, 面对 21 世纪对热动类专业人员的基本要求, 注意体现专科特色和专业特色, 认真研究工程专科类工程传热学的基本构成, 克服理论脱离实际的倾向, 强调对物理概念的理解, 注重对学生工程意识的培养, 力图使学生在掌握基本定律的基础上, 对电厂热力设备的传热问题具有分析和解决能力。

本书内容以工程应用传热过程为主线, 由浅入深, 循序渐近, 重点突出, 目的明确。由于工程中大量的传热问题都是传热过程的应用, 作者紧紧抓住这一主要内容, 结合电厂实际, 通俗易懂, 易于阅读。各章有例题、小结、思考题和习题, 便于学生自学和复习巩固。

本书的名词、术语、符号及计量单位均采用国家最新规定(或标准), 便于学生拓宽知识范围和参看同类书籍。

本书在编写过程中, 得到了中国电力企业联合会教育培训部高等工程专科热动类教学委员会、中国电力出版社、沈阳电力高等专科学校、南京电力高等专科学校、北京电力高等专科学校、山东电力高等专科学校等单位的大力支持和帮助, 在此表示衷心的感谢。

全书由华北电力大学吕邦泰教授主审, 他对本书提出了许多宝贵的意见和建议, 在此表示感谢。

本书第一、二、三、四、七、八、九章由太原电力高等专科学校的张天孙编写, 第五、六、十章由太原电力高等专科学校的阎润生编写。全书由张天孙主编。由于编者水平有限, 书中难免有错误之处, 恳切希望广大师生及读者批评指正。

编 者

1997.6

主要符号表

英文字母

A	面积、截面积, m^2	L	长度、高度, m
a	热扩散率 (导温系数), m^2/s	m	质量, kg
b	宽度, m	G	质量流量, kg/s
C	热容, J/K	p	压力, Pa
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 或 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Q	热量, W
D	直径, m	$\dot{Q}_v$	内热源强度, W/m^3
d	直径, m	q	热流密度, W/m^2
E	辐射力, W/m^2	R	半径, m ; 总面积的热阻, $^\circ\text{C/W}$
F	力, N	r	半径, m ; 单位面积的热阻, $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$; 汽化潜热, J/kg
G	投入辐射, W/m^2	S	导热形状因子, m
g	重力加速度, m/s^2	T	热力学温度, K
H	宽度, m	t	摄氏温度, $^\circ\text{C}$
h	高度, m	U	周长, m
I	定向辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{Sr})$	V	体积, m^3
J	有效辐射, W/m^2	v	速度, m/s
K	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 或 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Z	角系数

希腊字母

α	换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$; 吸收率	μ	动力粘度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
β	体胀系数, K^{-1}	ν	运动粘度, m^2/s
δ	厚度, m	ρ	密度, kg/m^3 ; 反射率
ϵ	黑度; 换热器的传热有效度	σ	表面张力, N/m
η_f	肋片效率	σ_b	黑体辐射常数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
η_t	肋壁效率	τ	时间, s ; 穿透率
θ	过剩温度, $^\circ\text{C}$	ω	立体角, Sr
λ	热导率 (导热系数), $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; 波长, μm		

角 标

上角标	f	流体的
进口的	m	平均的
出口的	s	饱和状态的
下角标	w	壁面的
b	$\max$	最大的
c	$\min$	最小的

相 似 准 则

$$Bi = \frac{\alpha (V/A)}{\lambda}, \text{ 毕渥 (Biot) 准则}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{(V/A)^2}, \text{ 傅里叶 (Fourier) 准则}$$

$$Gr = \frac{g\beta L^3 \Delta t}{\nu^2}, \text{ 格拉晓夫 (Grashof) 准则}$$

$$Nu = \frac{aL}{\lambda}, \text{ 努塞尔准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \text{ 普朗特 (Prandtl) 准则}$$

$$Re = \frac{v_f L}{\nu}, \text{ 雷诺 (Reynolds) 准则}$$

目 录

前 言

主要符号表

第一章 绪论	1
第一节 火电厂中的热传递现象	1
第二节 热量传递的三种方式	2
第三节 传热过程和热阻	5
第四节 学习传热学的目的与任务	7
小结思考题习题	9
第二章 导热的基本概念和导热微分方程式	11
第一节 导热的基本概念	11
第二节 导热的基本定律	12
第三节 热导率	13
第四节 导热微分方程式和单值性条件	15
小结思考题习题	19
第三章 稳态导热	21
第一节 通过平壁的导热	21
第二节 通过圆筒壁的导热	26
第三节 通过球壁的导热	32
第四节 接触热阻	34
第五节 通过肋片的导热	35
第六节 二维、三维稳态导热	43
小结思考题习题	50
第四章 非稳态导热	55
第一节 非稳态导热的基本概念	55
第二节 集总参数法	56
第三节 一维非稳态导热的图解法	61
第四节 特殊多维导热体非稳态导热的求解	67
第五节 火电厂非稳态导热实例分析	71
小结思考题习题	72
第五章 热辐射的基本概念及基本定律	75
第一节 热辐射的本质和辐射换热特点	75
第二节 热辐射表面的一般性质	76
第三节 辐射力、辐射强度及兰贝特定律	77
第四节 黑体辐射基本定律	79
第五节 实际物体的辐射和吸收特性	83

第六节 气体辐射	87
第七节 太阳辐射	93
小结思考题习题	95
第六章 辐射换热计算	98
第一节 角系数	98
第二节 黑体间的辐射换热	104
第三节 封闭体内漫射—灰表面辐射换热计算	106
第四节 遮热板及其应用	113
第五节 炉内辐射简介	117
小结思考题习题	119
第七章 对流换热概论	123
第一节 对流换热过程简介	123
第二节 边界层概念	126
第三节 对流换热过程微分方程组	131
第四节 相似理论与对流换热准则关系式	133
第五节 对流换热准则关系式的实验建立方法	139
小结思考题习题	140
第八章 单相流体对流换热	142
第一节 流体在管槽内强迫流动时的换热	142
第二节 流体沿平壁流动时的对流换热计算	146
第三节 流体横向绕流管束的换热	148
第四节 流体自然对流换热计算	155
小结思考题习题	161
第九章 相变换热	164
第一节 大容器沸腾换热	164
第二节 管内沸腾换热	168
第三节 凝结换热	171
第四节 传热系数的计算	178
第五节 热管	181
小结思考题习题	185
第十章 换热器	189
第一节 换热器的类型	189
第二节 对数平均温压	192
第三节 效率—传热单元数	200
第四节 换热器计算举例	205
第五节 传热的强化及削弱	210
第六节 锅炉过热器传热特点分析	212
第七节 表面式凝汽器传热过程分析	214
小结思考题习题	217
附录	220
参考文献	230

第一章 绪 论

第一节 火电厂中的热传递现象

在生产实践和日常生活中有大量的热传递现象。如果将一根金属棒的一端伸入火炉中，棒的另一端很快会变热而不能手握；夏天房间里打开电风扇会感到凉爽；太阳释放的能量穿过广阔的宇宙空间，把能量送到地球上，……；自然界中，热量总是自发地从高温物体传向低温物体，或由物体的高温部分传向低温部分。只要有温度差存在就会有热量的传递。传热学是研究热量传递规律的一门科学。

火力发电厂是将燃料的化学能转变为电能的工厂。图 1-1 所示为火电厂电能生产过程。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，燃料的化学能转变成高温烟气的热能；高温烟气把一部分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、再热器以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，将机械能转变成电能。蒸汽在汽轮机内膨胀做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，并除去水中所含的气体，再由给水泵将除氧后的水经高压加热器进一步提高温度，然后送入锅炉，如此完成一个循环。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，在其中吸收热量后返回冷却塔，在那里循环水得到冷却以供循环使用。

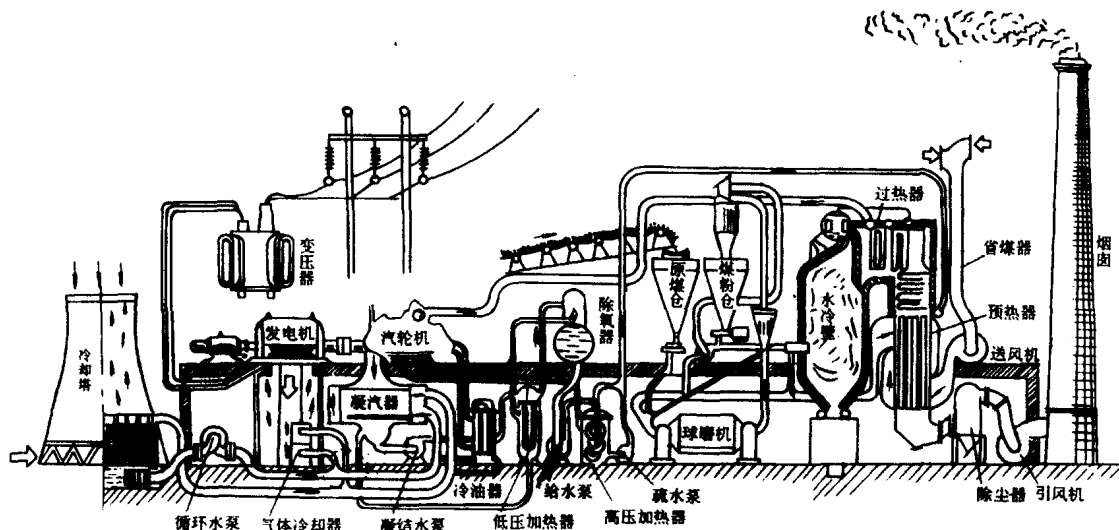


图 1-1 火力发电厂生产过程示意图

从以上叙述中, 可以看到锅炉是火力发电厂中的一个主要换热设备。它除了要组织好燃料在炉内的燃烧外, 还要求把燃烧所产生的热量通过锅炉受热面传递给水 and 蒸汽。这就是炉内过程和锅内过程。如果传热过程组织得好, 可以强化炉内传热, 减小锅炉受热面金属的消耗量, 并提高锅炉的热效率。如果传热过程组织得不好, 不仅影响锅炉的技术经济指标, 还严重影响锅炉的安全可靠运行。例如亚临界压力的锅炉, 特别是直流锅炉的沸腾管中, 受热面热负荷过高时, 会发生沸腾换热恶化烧毁管壁的现象。因此, 锅炉各种受热面的布置和结构型式, 锅炉正常运行操作和变工况运行及启停过程都与传热问题有密切的联系。同样汽轮机的结构、运行和启停过程也涉及到传热问题。因此研究和掌握热量传递的规律, 对电厂机炉的安全运行有着重要意义。

第二节 热量传递的三种方式

热量传递的三种方式为导热、对流、辐射。

一、导热

两个相互接触的物体或同一物体的各部分之间由于温度不同而引起的热传递现象, 称为导热。这种热传递方式的特点是物体各部分之间不发生相对位移, 依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动进行能量传递。

早在 1822 年, 法国数学—物理学家傅里叶 (Joseph Fourier) 从实验中发现导热量 Q 与导热面积 A 及壁面两侧温差 ($t_{w1} - t_{w2}$) 成正比, 与壁厚 δ 成反比, 提出了平板导热的傅里叶公式, 即

$$Q = \lambda A \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad (1-1)$$

式中: 比例系数 λ 为热导率, 其数值反映了材料导热能力的大小, $W/(m \cdot ^\circ C)$; A 为垂直于导热方向的截面积, m^2 ; δ 为平壁的厚度, m 。如图 1-2 所示。

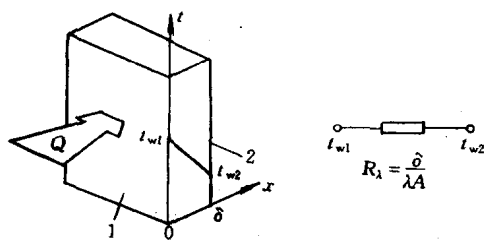


图 1-2 穿过平壁导热的示意图

单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量, 记为 Q , 单位为 W 。单位时间内通过单位面积的热流量称为热流密度, 记为 q , 单位为 W/m^2 。傅里叶公式按热流密度形式表示为

$$q = \frac{Q}{A} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad (1-2)$$

热导率是一种物性参数, 不同材料的热导率差别很大。即使是同一种材料, 热导率还与温度、密度和湿度有关。这将在第二章进一步讨论, 这里仅指出: 金属材料的热导率最高, 如银和铜; 液体次之; 气体最小。这正是手握铁棒和木棒冷热的感觉不同的原因, 在相同的温度下, 铁棒的热导率是木棒的 540 倍。

二、对流

炎热的夏天, 打开电风扇, 房间里会感到凉爽; 冬天暖气片的散热又会使房间里暖和

起来,这是由于温度不同的流体发生对流作用的结果。

对流是指流体各部分之间发生相对位移,冷热流体相互掺混所引起的热量传递方式。对流仅能发生在流体中,它是流体的流动和导热联合作用的结果,单纯的对流方式并不重要,工程上应用最多的热量传递方式是对流换热。

流体流过与之温度不同的固体壁面时,与壁面之间发生的热量传递过程,称为对流换热。对流换热所传递的热量 Q 采用英国科学家牛顿(Isaac Newton)于 1701 年提出的公式,即牛顿冷却公式,如图 1-3 所示。

$$\text{流体被加热时} \quad Q = \alpha A(t_w - t_f) \quad \text{W} \quad (1-3)$$

$$\text{流体被冷却时} \quad Q = \alpha A(t_f - t_w) \quad \text{W} \quad (1-4)$$

$$\text{或统一写成} \quad Q = \alpha A \Delta t \quad \text{W} \quad (1-5)$$

$$q = \alpha \Delta t \quad \text{W/m}^2 \quad (1-5a)$$

式中: α 称为对流换热系数,简称换热系数,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,它的数值大小表示对流换热的强弱; A 为与流体接触的壁面面积,单位为 m^2 ; t_w 及 t_f 分别为壁面温度和流体温度, $^\circ\text{C}$; Δt 恒取正值。

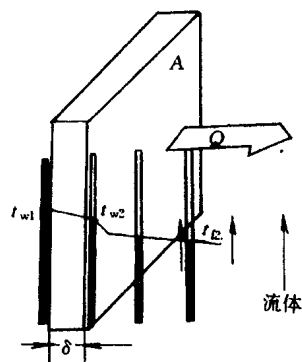


图 1-3 对流换热示意图

换热系数的大小与换热过程中的许多因素有关。它不仅取决于流体的物理性质 (λ, μ, ρ, c_p 等) 以及换热面的形状与位置,而且还与流速有密切的关系。换热系数 α 值的确定是对流换热问题研究的主要内容。

三、热辐射

物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。物体会因各种原因发出辐射能,其中因热的原因而发出辐射能的现象称为热辐射。物体的温度越高,辐射能力越强,同一温度下不同物体的辐射能力也大不一样。在研究热辐射规律的过程中,一种称做黑体的理想物体的概念具有重要意义。黑体的辐射能力在同温度的物体中最大。

自然界中各个物体只要温度高于绝对零度,它都不停地向空间发出热辐射,同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射。辐射与吸收过程的综合结果就形成了以辐射方式进行物体间的热量传递——辐射换热。

热辐射与导热、对流这两种热量传递方式的区别是热辐射可以在真空中传播,而导热和对流都必须在物质存在的条件下才能实现。辐射换热区别于导热、对流的另一个特点是,它不仅产生能量的转移,而且还伴随着能量形式的转化,即发射时从热能转换为辐射能,而被吸收时又从辐射能转换为热能。

黑体在单位时间内发出的热辐射热量由斯蒂芬-玻尔兹曼定律表示为

$$Q = A \sigma_b T^4 \quad \text{W} \quad (1-6)$$

式中: T 为表面温度, K ; A 为物体参与辐射的表面积, m^2 ; σ_b 为黑体辐射常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

一切实际物体的辐射能力都小于同温度下黑体的值。实际物体的辐射能力与同温度下

黑体辐射能力的比值称为黑度，用 ϵ 表示，其值总是小于 1。不同物体的黑度值不同，黑度也是一个重要的物性参数。用实验测出物体的黑度值，实际物体的辐射能就可以采用式 (1-7) 方便地计算，即

$$Q = \epsilon A \sigma_b T^4 \quad \text{W} \quad (1-7)$$

物体间辐射换热量计算将在第六章中介绍。这里只介绍两种最简单的情况。一种是表面积为 A ，表面黑度为 ϵ ，温度为 t_{w1} 的物体与包围它的很大的表面（温度为 t_{w2} ）之间的辐射换热，例如测量炉膛内烟气温度的热电偶结点与炉膛四周水冷壁壁面的换热就属于这种情况，计算公式为

$$Q = A \epsilon \sigma_b (T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \quad (1-8)$$

另一种情况如图 1-4 所示的面积相同、平行放置的两黑体平面，其介质没有辐射和吸收能力，当两表面间距离很小时，任一表面辐射的能量可认为全部落在另一表面上，并被全部吸收。若表面 1 的温度 T_{w1} 大于表面 2 的温度 T_{w2} ，则

$$Q = \sigma_b A (T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \quad \text{W} \quad (1-9)$$

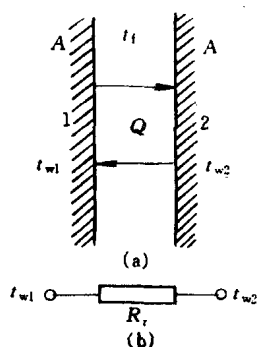


图 1-4 辐射换热公式图示

以上分别讨论了导热、对流和热辐射三种热量传递的基本方式。在实际工程问题中各种换热器的热传递过程都是几种基本传热方式同时作用的结果。下面对电厂中常见的换热器分析如下：

1. 过热器

高温烟气 $\xrightarrow{\text{对流换热和辐射换热}}$ 外壁 $\xrightarrow{\text{导热}}$ 内壁 $\xrightarrow{\text{对流换热}}$ 过热蒸汽。

2. 水冷壁

烟气 $\xrightarrow{\text{辐射换热}}$ 外壁 $\xrightarrow{\text{导热}}$ 内壁 $\xrightarrow{\text{对流换热}}$ 汽水混合物。

3. 管式空气预热器

烟气 $\xrightarrow{\text{对流换热}}$ 内壁 $\xrightarrow{\text{导热}}$ 外壁 $\xrightarrow{\text{对流换热}}$ 空气。

4. 冷油器

油 $\xrightarrow{\text{对流换热}}$ 外壁 $\xrightarrow{\text{导热}}$ 内壁 $\xrightarrow{\text{对流换热}}$ 水。

5. 凝汽器

水蒸气 $\xrightarrow{\text{有相变的对流换热}}$ 外壁 $\xrightarrow{\text{导热}}$ 内壁 $\xrightarrow{\text{对流换热}}$ 循环水。

从以上分析可知许多热量传递过程都是由基本传热方式互相串联起来的，即由许多传热环节组成。而且对于同一个传热环节也有多种传热方式参与换热。每一种换热方式对一个换热器的影响也不相同。因此对于实际热量传递问题的分析不仅需要扎实的理论基础，而且还要具有丰富的实际经验。例如对于锅炉为什么称炉膛内的受热面为辐射受热面，而称尾部烟道的受热面为对流受热面？屏式过热器又为什么称为半辐射式受热面？这些问题应如何解释呢？对这些问题必须在学完导热、对流和热辐射的全部内容后才能得到正确的解释。

第三节 传热过程和热阻

一、传热过程与传热系数

发电厂中所有的换热设备在正常运行时，各部分的温度、压力等参数基本上是不随时间而变的，称为稳定状态。对热传递现象来说，温度不随时间而变的过程为稳态过程。

上节所介绍的换热器，其热传递过程的特点都是高温流体通过固体壁面把热量传给低温流体的过程，这称为传热过程。下面分析稳态的传热过程。

一般来说，传热过程包括串联着的三个环节：

①从热流体到高温壁面的热量传递；②从高温壁面到低温壁面的热量传递；③从低温壁面到冷流体的热量传递。对于稳态传热过程，通过串联着的各环节的热流量 Q 应该是相同的。设平壁的表面面积为 A ，参看图 1-5 的符号，可以分别写出上述三个环节的热流量的表达式，即

$$Q = \alpha_1 A (t_{f1} - t_{w1}) \quad (1-10)$$

$$Q = \lambda A \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad (1-10a)$$

$$Q = \alpha_2 A (t_{w2} - t_{f2}) \quad (1-10b)$$

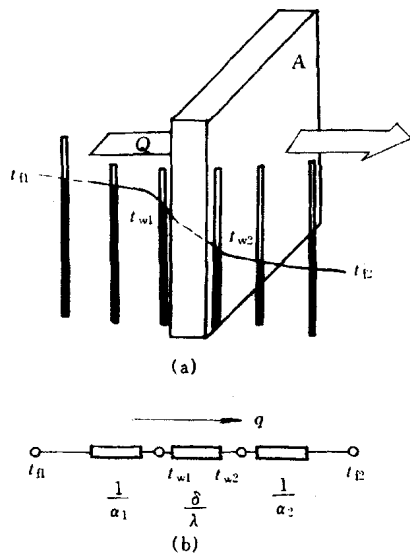


图 1-5 传热过程示意图

(a) 传热过程；(b) 传热过程热阻图

将式 (1-10)、式 (1-10a)、式 (1-10b) 改写成温压的形式

$$t_{f1} - t_{w1} = \frac{Q}{\alpha_1 A} \quad (1-10c)$$

$$t_{w1} - t_{w2} = \frac{Q}{\lambda A / \delta} \quad (1-10d)$$

$$t_{w2} - t_{f2} = \frac{Q}{\alpha_2 A} \quad (1-10e)$$

将式 (1-10c)、式 (1-10d)、式 (1-10e) 三式相加，消去温度 t_{w1} 和 t_{w2} 整理后得

$$Q = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1-11)$$

或

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1-11a)$$

也可表示成

$$Q = AK(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1-11b)$$

或

$$q = K(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1-11c)$$

式中： K 为传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ，数值上它等于冷热流体间温差为 $1^\circ C$ ，换热面积 $A = 1m^2$ 时的热流量的值。

式 (1-11b)、式 (1-11c) 称为传热方程式。比较式 (1-11a) 和式 (1-11c), 显然有

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1-12)$$

传热系数的大小取决于两种流体的物理性质、流速、换热表面的形状与布置、材料的热导率等。

二、热阻

式 (1-11b)、式 (1-11c) 可改写为

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{KA}} \quad (1-13)$$

$$q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{K}} \quad (1-13a)$$

以上两式与直流电路的欧姆定律 $I = \frac{U}{R}$ 相比, 形式完全对应。热流量 Q 或热流密度 q 对应于电流强度 I , 传热温差 Δt 对应于电压 U , $\frac{1}{KA}$ 或 $\frac{1}{K}$ 对应于电路中的电阻 R , 称为传热热阻, 简称热阻。其中 $\frac{1}{KA}$ 表示整个传热面上的热阻, $\frac{1}{K}$ 表示单位面积上的热阻, 分别用 R_t 和 r_t 表示, 单位分别为 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 和 $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, 下标 t 表示传热过程的总热阻。因此式 (1-13) 可改写为

$$Q = \frac{\Delta t}{R_t} \quad (1-14)$$

$$q = \frac{\Delta t}{r_t} \quad (1-14a)$$

正象欧姆定律既可用于一段电路也可用于由几段电路组成的复杂电路一样, 热阻、热流和传热温差的关系式对于传热过程的每一个环节都是成立的。因而式 (1-1)、式 (1-2)、式 (1-5) 都可改写为

$$Q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda A}} \quad (1-15)$$

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda}} \quad (1-15a)$$

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\alpha A}} \quad (1-16)$$

$$q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\alpha}} \quad (1-16a)$$

式中: $\frac{\delta}{\lambda A}$ 、 $\frac{\delta}{\lambda}$ 和 $\frac{1}{\alpha A}$ 、 $\frac{1}{\alpha}$ 为导热热阻和对流热阻。

三、热阻叠加原则

从式 (1-13) 和式 (1-14) 可看到, 传热系数的倒数即传热过程的总热阻。稳态传热

过程的总热阻等于各个环节分热阻之和，简称热阻叠加原则，即

$$r_t = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (1-17)$$

在实际换热器中，壁面上常会积有污垢，如省煤器管外侧有灰垢，管内侧有水垢，根据热阻叠加的原则，可以方便地写出这个复杂传热过程的总热阻

$$r_t' = \frac{1}{K'} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_h}{\lambda_h} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (1-18)$$

式中： $\frac{\delta_h}{\lambda_h}$ 为灰垢层热阻， $\frac{\delta_w}{\lambda_w}$ 为管壁热阻， $\frac{\delta_s}{\lambda_s}$ 为水垢层热阻。相应的传热过程的传热系数 K' 为

$$K' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_h}{\lambda_h} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1-19)$$

传热过程热阻的示意图如图 1-6 所示。

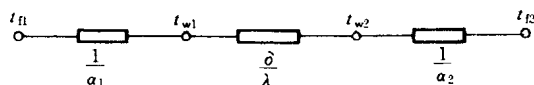


图 1-6 热阻示意图

第四节 学习传热学的目的与任务

火力发电厂的电能生产与热量的传递过程有密切的关系，电厂中的许多设备都是使热量从一种流体传递给另一种流体的装置，工业上把这类设备称为换热器。火力发电厂中的过热器、再热器、省煤器、空气预热器、除氧器、凝汽器、回热加热器、冷却塔等都是换热器。这些设备的设计、制造、安装和经济运行，对热工参数的准确测量、受热部件金属的监督等都与传热学的内容有关。

在生产实践和科学研究中遇到的传热问题主要有两种类型：一种是力求增强热量的传递；另一种则是力求削弱热量的传递。例如设计一个换热器要力求经济，即在一定的条件下能传递尽可能多的热量；炉膛内水冷壁的吹灰，凝汽器铜管的清洗是为了减小热阻从而增强热量的传递。又如对各种热力设备和蒸汽管道等进行保温以减小热损失和改善工作人员的劳动条件，这是增大热阻而削弱热量的传递。要能很好地解决上述两种问题，必须了解热量传递的规律，必须掌握传热的分析和计算，这是学习传热学这门课程的目的和任务。

【例 1-1】 一炉子的炉墙厚 13cm，总面积为 20m²，平均热导率为 1.04 W/(m·℃)，内外壁温分别为 520℃ 及 50℃。试计算通过炉墙的热损失。如果所燃用的煤的发热值为 2.09 × 10⁴ kJ/kg，问每天因热损失要用掉多少千克煤？

解 根据式 (1-1)，通过炉墙的热损失

$$Q = \frac{\lambda A (t_{w1} - t_{w2})}{\delta} = \frac{1.04 \times 20 \times (520 - 50)}{0.13} = 75.2 \text{ kW}$$

每天耗煤为 $B = 75.2 \times 24 \times 3600 / 2.09 \times 10^4 = 310.9 \text{ kg/d}$

【例 1-2】 在一次测定空气横向流过单根圆管的对流换热试验中, 得到下列数据: 管壁平均温度 $t_w = 69^\circ\text{C}$, 空气温度 $t_f = 20^\circ\text{C}$, 管子外径 $d = 14\text{mm}$, 加热段长 80mm , 输入加热段的功率为 8.5W 。如果全部热量通过对流换热传给空气, 试问此时的对流换热系数为多大?

解 根据式 (1-3), 对流换热系数为

$$\alpha = \frac{Q}{A\Delta t} = \frac{8.5}{\pi \times 0.014 \times 0.08 \times (69 - 20)} = 49.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

【例 1-3】 如图 1-7 所示的空腔由两个平行黑体表面组成, 空腔内抽成真空, 且空腔的厚度远小于其高度与宽度。其余已知条件如图 1-7 所示。表面 2 是厚 $\delta = 0.1\text{m}$ 的平板的一侧面, 其另一侧面 3 被高温流体加热, 平板的热导率 $\lambda = 17.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。试问在稳态工况下表面 3 的温度 t_{w3} 为多少?

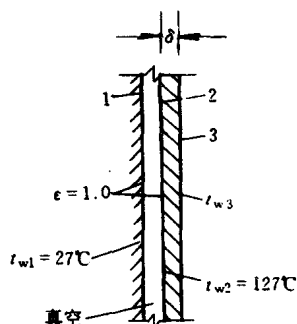


图 1-7 稳定导热过程

解 在稳态导热的条件下, 通过表面 1 和 2 之间的辐射换热量等于通过 δ 厚平板的导热量, 根据式 (1-2) 和式 (1-9) 得

$$\begin{aligned} \sigma_b(T_{w2}^4 - T_{w1}^4) &= \lambda \frac{t_{w3} - t_{w2}}{\delta} \\ t_{w3} &= t_{w2} + \frac{\sigma_b(T_{w2}^4 - T_{w1}^4)}{\lambda} \delta \\ &= 127 + \frac{5.67 \times (4^4 - 3^4) \times 0.1}{17.5} \\ &= 132.7 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

【例 1-4】 压缩空气在中间冷却器的管外横掠流过, $\alpha_0 = 90 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 冷却水在管内流过, $\alpha_i = 6000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。冷却管是外径为 16mm 、厚 1.5mm 的黄铜管, 黄铜管 $\lambda = 111 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。求: ①此时的传热系数; ②如管外换热系数增加一倍, 传热系数有何变化; ③如管内换热系数增加一倍, 传热系数又作何变化。按平壁考虑。

解 (1) 由式 (1-12), 平壁单位面积的传热系数为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_0}} = \frac{1}{\frac{1}{6000} + \frac{1.5 \times 10^{-3}}{111} + \frac{1}{90}} = 88.56 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

(2) 略去管壁热阻, 管外换热系数增加一倍则传热系数为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{6000} + \frac{1}{90 \times 2}} = 174.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

传热系数增加了 97%。

(3) 若管内换热系数增加一倍, 传热系数为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{12000} + \frac{1}{90}} = 89.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

传热系数增加还不到 1%。

由【例 1-4】可知，气侧热阻所占比例最大，是传热过程的主要热阻。因此，要强化一个具体的传热过程，必须降低热阻最大环节的热阻进行强化。上例说明强化气侧换热比强化水侧换热效果明显。

小 结

本章简要介绍了热量传递的三种基本公式和热量计算的基本公式，即导热的傅里叶公式、牛顿冷却公式和斯蒂芬—玻尔兹曼定律。

本章强调了传热过程和热阻概念的重要性，介绍了穿过平壁传热过程传热系数的计算和热阻叠加原则，这对今后传热计算有重要意义。

思 考 题

1. 导热与对流换热相比，在热量的传递上各有什么特点？
2. 辐射换热与导热及对流换热相比，有什么特点？
3. 为什么说对流换热系数不是物性参数？
4. 冬天，在同样的气温下，为什么有风时比无风时感到寒冷？
5. 说明热水瓶中的热水向环境空间的散热包括哪些传热基本方式？
6. 试对穿过炉墙的传热过程和省煤器中的传热过程进行分析，它们各是哪些基本热量传递方式的组合？
7. 如果水冷壁管子里结了一层水垢，而蒸汽参数及热流密度均不变，试问管壁温度比无水垢时高还是低？为什么？

习 题

1. 为测定一种材料的热导率，用该材料制成厚 5mm 的大平板。在稳态下，保持平板两表面间的温差为 30℃，并测得通过平板的热流密度为 6210W/m²，试确定该材料的热导率。
2. 金属板上放置一个小型加热炉，为减少炉底对板面的热损失，其间放置一块热导率为 0.058 W/(m·℃) 的绝热平板，绝热平板两表面温度分别保持为 90℃ 和 25℃。为使每平方米绝热平板的热损失小于 200W/m²，试计算绝热平板所需的厚度。
3. 穿过一绝热层的热流密度为 3kW；该绝热层的横截面积 A 为 10m²，厚度 δ 为 2.5cm。如果内表面（热面）的温度是 415℃，绝热材料的热导率 λ 为 0.2 W/(m·℃)，问外表面的温度是多少？
4. 窗玻璃厚度 δ 为 5mm，其内外表面温度分别为 $t_1=15^\circ\text{C}$ 和 $t_2=5^\circ\text{C}$ 。窗子的尺寸为 1m×3m，玻璃的热导率 λ 为 1.4 W/(m·℃)，试求穿过玻璃窗的热流损失。
5. 温度 t_∞ 为 300℃ 的空气在长 0.5m、宽 0.25m 的平板上流过。若对流换热系数 α