



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

PUTONG GAODENG JIAOYU SHIERWU GUIHUA JIAOCAI GAOZHI GAOZHUAN JIAOYU

传热学（第三版）

CHUAN RE XUE

张天孙 卢改林 主 编 ●
郝丽芬 副主编 ●



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

PUTONG GAODENG JIAOYU SHIERWU GUIHUA JIAOCAI GAOZHI GAOZHUAN JIAOYU

传热学（第三版）

CHUAN RE XUE

主 编 张天孙 卢改林

副主编 郝丽芬

编 写 马小霞

主 审 吕 萍



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

全书共分十一章。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；单相流体对流换热；相变对流换热；换热器及发电厂典型传热现象分析；典型实验和实训。各章附有例题、思考题和习题。附录给出了相应的习题解答。

本书可作为高职高专院校电力技术类、能源类、土建类、机械类、环境工程类，交通运输类等各专业的教材或教学参考书，还可作为电力行业培训教材，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

传热学/张天孙，卢改林主编. —3 版. —北京：中国电力出版社，2011.6

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1795 - 6

I. ①传… II. ①张… ②卢… III. ①传热学—高等职业教育—教材 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 120244 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998 年 6 月第一版

2011 年 8 月第三版 2011 年 8 月北京第十四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 424 千字

定价 29.80 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言

当前高等职业教育改革与发展波澜壮阔, 气势恢弘, 为适应高职教育发展的需要, 对高职高专的教材建设提出了新要求。作者学习了教育部有关大力推进职业教育的有关文件和具体要求, 明确了教材修订的指导思想, 在广泛征求意见的基础上, 根据高等技术应用型和技能型人才培养目标和传热学课程教学的基本要求, 完成了本书的修订工作。

修订后本教材有以下特点:

(1) 教材为适应高职高专人才培养要求, 加强了对学生工程思维的培养和操作能力的训练, 增加了典型实验和实训一章。这一章可根据教学进度适时按章节对应嵌入教学中, 也可在理论教学之后, 集中一周安排实验与实训教学。第十章从实验的基本概念和基本技能引入到典型实验研究项目的选取, 自成一体。

(2) 保持第二版教材的特色, 以工程应用传热过程为主线。注重对学生工程意识的培养, 强调对物理概念的理解, 力图使学生在掌握基本理论的基础上对电厂热力设备的传热问题具有分析和计算能力。

(3) 本书有较宽的适用范围。本书可作为高职高专电力技术类火电厂集控运行、电厂热能动力装置专业的教材, 也可兼作该专业中级工、高级工的培训教材。教材章节前带*号的内容, 可根据需要选修。带*号的内容不讲, 不影响后续章节的学习。

(4) 本书各章节后有小结, 以多种形式归纳各章内容, 指出对学生的基本要求, 以便学生自查。附录后给出了习题答案和解题思路, 有助于培养学生和学员自学。

本书主审人太原理工大学吕萍同志仔细审阅了书稿, 提出了许多宝贵的意见和建议, 使本书的质量得到保证和提高, 对此编者表示衷心的感谢。

本书前言、第一、第五、第六章由张天孙编写; 第二~四章、第十章由卢改林编写; 第七~九章由郝丽芬编写; 第十一章由马小霞编写。全书由张天孙、卢改林担任主编, 郝丽芬担任副主编。

由于编者水平有限, 书中疏漏在所难免, 敬请读者批评指正。来信请寄: 030013 太原电力高等专科学校动力工程系张天孙。

编 者

2011 年 5 月

主要符号表

英文字母表

A	面积、截面积, m^2	p	压力, Pa
a	热扩散率, m^2/s	Q	热量, J
b	宽度, m	q	热流密度, W/m^2
C	热容, J/K	q_m	质量流量, kg/s
c	比热容, J/($\text{kg} \cdot \text{K}$)	R	半径, m; 总面积的热阻, K/W
D	直径, m	r	半径, m; 单位面积的热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; 汽化潜热, J/kg
d	直径, m	S	导热形状因子
E	辐射力, W/m^2	s	管间距, m
F	力, N	T	热力学温度, K
G	投入辐射, W/m^2	t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
g	重力加速度, m/s^2	U	周长, m
H	宽度, m	V	体积, m^3
h	对流换热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	v	比体积, m^3/kg
J	有效辐射, W/m^2	X	角系数; 无量纲坐标
K	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	P	湿周, m
L	长度、高度, m	u	速度, m/s
m	质量, kg		

希腊字母表

α	吸收比	ν	运动黏度, m^2/s ; 频率, s^{-1}
β	体胀系数, K^{-1} ; 肋化系数	ρ	密度, kg/m^3 ; 反射比
δ	厚度, m	σ	表面张力, N/m
ϵ	黑度; 换热器的传热有效度	σ_b	黑体辐射常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
η	动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$	τ	时间, s; 透射比
η_f	肋片效率	τ_c	时间常数, s
η_t	肋壁效率	Φ	热流量, W
Θ	无量纲过余温度	$\dot{\Phi}$	内热源强度, W/m^3
θ	过余温度, $^{\circ}\text{C}$	ψ	对数平均温差修正系数
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 波长, m		

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	黑体的	max	最大的
c	临界的	min	最小的

相 似 准 则

$Bi=\frac{h(V/A)}{\lambda}$ ，毕渥准则， λ 为固体的导热系数

$Fo=\frac{a\tau}{(V/A)^2}$ ，傅里叶准则

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

$Nu=\frac{hL}{\lambda}$ ，努塞尔准则， λ 为流体导热系数

$Pr=\frac{\nu}{a}$ ，普朗特准则

$Re=\frac{u_tL}{\nu}$ ，雷诺准则



目 录

前言

主要符号表

第一章 概述	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	4
第四节 学习传热学的目的与任务	7
小结	8
思考题	8
习题	9
第二章 导热基础理论	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 导热系数	13
第四节 导热微分方程式及单值性条件	15
小结	20
思考题	20
习题	21
第三章 稳态导热	22
第一节 通过平壁的导热	22
第二节 通过圆筒壁的导热	27
第三节 通过球壁的导热	32
第四节 接触热阻	35
第五节 通过肋片的导热	36
* 第六节 二维、三维稳态导热	42
小结	48
思考题	48
习题	49
第四章 非稳态导热	51
第一节 非稳态导热的基本概念	51
第二节 集总参数法	52
第三节 一维非稳态导热问题的图解法	56
* 第四节 特殊多维体非稳态导热的求解	62
第五节 火电厂的非稳态导热实例分析	64

小结	66
思考题	66
习题	67
第五章 热辐射的基本概念及基本定律	69
第一节 热辐射的本质和辐射换热特点	69
第二节 热辐射表面的一般性质	70
第三节 辐射力和有效辐射	71
第四节 黑体辐射基本定律	72
第五节 灰体和基尔霍夫定律	76
第六节 气体辐射	79
第七节 太阳辐射	81
小结	83
思考题	83
习题	83
第六章 辐射换热计算	85
第一节 角系数	85
第二节 黑体间的辐射换热	88
第三节 封闭体内灰体表面间的辐射换热	89
第四节 遮热板及其应用	95
第五节 炉内辐射简介	99
小结	100
思考题	101
习题	101
第七章 对流换热概论	103
第一节 对流换热过程简介	103
第二节 边界层概念	107
第三节 对流换热过程微分方程组	111
第四节 相似理论与对流换热准则关系式	112
第五节 对流换热准则关系式的实验建立方法	117
小结	118
思考题	118
习题	119
第八章 单相流体的对流换热	121
第一节 流体在管槽内强迫流动时的对流换热	121
第二节 流体沿平壁流动时的对流换热	125
第三节 流体横向绕流管束的换热	127
第四节 流体自然对流换热	133
小结	137
思考题	137

习题	138
第九章 相变对流换热	140
第一节 大容器沸腾换热	140
第二节 管内沸腾换热	144
第三节 凝结换热	147
第四节 传热系数的计算	151
第五节 热管	153
小结	157
思考题	158
习题	158
第十章 换热器	160
第一节 换热器的类型	160
第二节 平均传热温差	162
第三节 换热器效率—传热单元数法	167
第四节 换热器的传热计算	170
第五节 传热的强化与削弱	175
第六节 火电厂换热器的传热分析	177
小结	181
思考题	182
习题	182
第十一章 典型实验和实训	185
第一节 测量与误差	185
第二节 常用测量仪器简介	188
第三节 稳态球体法粉粒状材料导热系数的测定	191
第四节 二维稳态温度场的电热模拟实验	195
第五节 中温辐射时物体黑度测试	198
第六节 太阳能集热器简介	201
第七节 对流换热实验数据处理	203
第八节 自然对流换热实验	204
第九节 大容器内水沸腾传热实验	207
第十节 换热器传热性能综合实验和设计计算实例	211
思考题	217
习题	218
附录	219
附录 1 单位换算表	219
附录 2 几种材料的密度、导热系数、比热容和热扩散率	220
附录 3 几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	221
附录 4 气体的热物理性质	222
附录 5 在大气压力 ($p=1.013\ 25\times 10^5\text{ Pa}$) 下烟气的热物理性质	223

附录 6	油类的热物理性质	223
附录 7	饱和水的热物理性质	224
附录 8	干饱和水蒸气的热物理性质	225
附录 9	大气压力 ($p=1.013\ 25\times 10^5\text{ Pa}$) 下过热水蒸气的物性参数	227
附录 10	几种材料在表面法线方向上的辐射黑度	227
附录 11	几种饱和液体的热物理性质	228
附录 12	双曲函数值	229
附录 13	边界层对流换热微分方程组	230
附录 14	相似第二定理理论推导	232
附录 15	流体自然对流换热的准则方程式推导	234
附录 16	竖壁层流和湍流膜状凝结换热系数的分析解	235
附录 17	平均传热温差的推导	238
附录 18	铜—康铜热电偶分度表	239
习题解答		241
参考文献		269

第一章 概 述

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。例如,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学科。

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,相继把热量传给蒸汽、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。在水冷壁管内产生的饱和蒸汽经过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过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供循环使用。

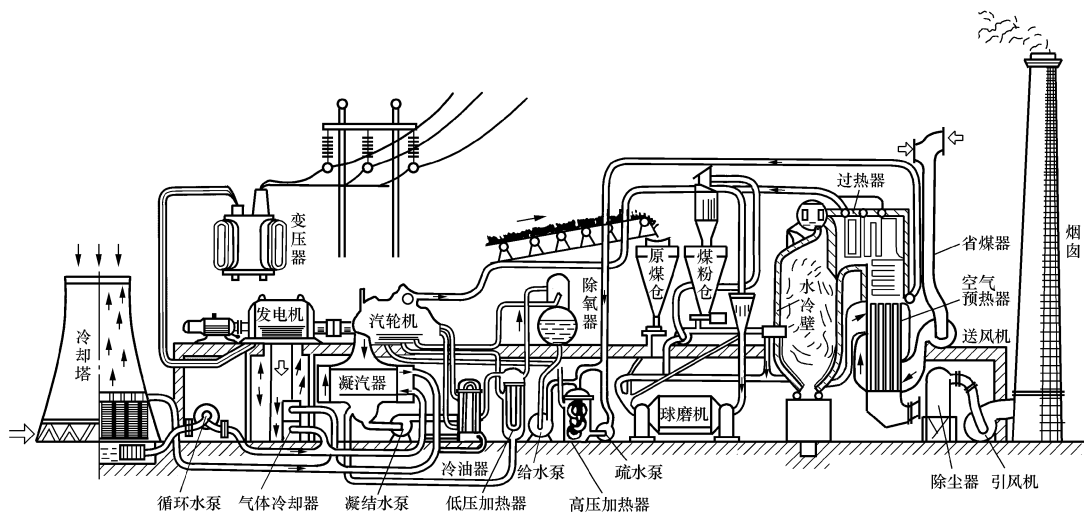


图 1-1 火力发电厂生产过程示意

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

料在锅炉中的燃烧,还要求把燃烧所产生的热量通过锅炉各受热面传递给水 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,减少锅炉受热面金属的消耗,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、对流和热辐射。

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热量传递。

早在 1882 年,法国数学—物理学家傅里叶 (Joseph Fourier) 从实验中发现导热量 Φ 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,提出了平壁导热的傅里叶公式,即

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

式中:比例系数 λ 为导热系数,又称热导率,其数值反映了材料导热能力的大小, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; A 为垂直于热流方向的截面积, m^2 ; δ 为平壁的厚度, m 。

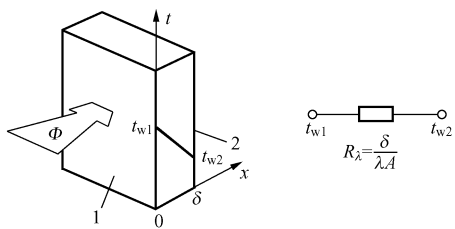


图 1-2 穿过平壁导热的示意

如图 1-2 所示,单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量,记为 Φ ,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

$$q = \frac{\Phi}{A} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (1-2)$$

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

二、对流

炎热的夏天,打开电风扇,房间里会感到凉爽;寒冷的冬天,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 Φ 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。

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

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

$$\text{或统一写成} \quad \Phi = hA\Delta t \quad \text{W} \quad (1-5)$$

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

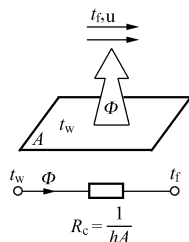


图 1-3 对流换热
示意

式中： h 为对流换热系数，或称表面传热系数，简称换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，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， m^2 ； t_w 及 t_f 分别为壁面温度和流体温度， $^{\circ}\text{C}$ ； Δt 表示壁面与流体的温差， $^{\circ}\text{C}$ ，恒取正值。

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 、 η 、 ρ 、 c_p 等) 和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 h 值的确定是对流换热问题的主要研究内容。

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，同一温度下不同的物体的辐射能量也大不一样。在研究热辐射规律的过程中，一种称为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的物体发出的热辐射。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忒藩-玻耳兹曼定律确定，表示为

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

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

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

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，例如测量炉膛烟气温度的热电偶与炉膛四周水冷壁壁面的换热就属于这种情况，计算

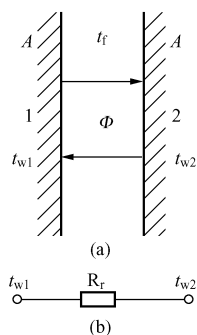


图 1-4 辐射换热图示

公式为

$$\Phi = A \varepsilon \sigma_b (T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \quad \text{W} \quad (1-8)$$

另一种情况是如图 1-4 所示的两个面积相同、平行放置的无限大黑体平表面，其间介质无辐射和吸收能力，当两表面间距很小时，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

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

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 → (对流换热和辐射换热) → 外壁 → (导热) → 内壁 → (对流换热) → 过热蒸汽

2. 水冷壁

高温烟气 → (辐射换热) → 外壁 → (导热) → 内壁 → (对流换热) → 汽水混合物

3. 管式空气预热器

烟气 → (对流换热) → 内壁 → (导热) → 外壁 → (对流换热) → 空气。

4. 冷油器

油 → (对流换热) → 外壁 → (导热) → 内壁 → (对流换热) → 水。

5. 凝汽器

水蒸气 → (有相变的对流换热) → 外壁 → (导热) → 内壁 → (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组合起来的，即由许多传热环节组成。而且对于某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，其热传递过程的共同特点都是高温流体通过固体壁面把热量传给壁面另一侧的低温流体的过程，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 Φ 是相同的。设平壁的表面积为 A ，参看图 1-5 的符号， h_1 为热流体与高温壁面的换热系数； h_2 为低温流体与低温壁面的换热系数； t_{f1} 、 t_{f2} 分别为高温流

体和低温流体的温度； t_{w1} 、 t_{w2} 分别为高温壁面和低温壁面的温度。可以分别写出上述三个环节的热流量的表达式，即

$$\Phi = h_1 A (t_{f1} - t_{w1}) \quad (1-10a)$$

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

$$\Phi = h_2 A (t_{w2} - t_{f2}) \quad (1-10c)$$

将式 (1-10a)、式 (1-10b)、式 (1-10c) 改写为温压的形式，即

$$t_{f1} - t_{w1} = \frac{\Phi}{h_1 A} \quad (1-10d)$$

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

$$t_{w2} - t_{f2} = \frac{\Phi}{h_2 A} \quad (1-10f)$$

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

$$\Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (1-11a)$$

$$\text{或} \quad q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (1-11b)$$

$$\text{也可表示成} \quad \Phi = AK(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1-12a)$$

$$\text{或} \quad q = K(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1-12b)$$

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

式 (1-12a)、式 (1-12b) 称为传热方程。显然有

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad W/(m^2 \cdot K) \quad (1-13)$$

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、材料的导热系数等。

二、热阻

式 (1-12a)、式 (1-12b) 可改写为

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{1}{KA}} \quad (1-14a)$$

$$q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{K}} \quad (1-14b)$$

以上两式与直流电路的欧姆定律 $I = U/R$ 相比，形式完全对应。热流量 Φ 或热流密度 q 对

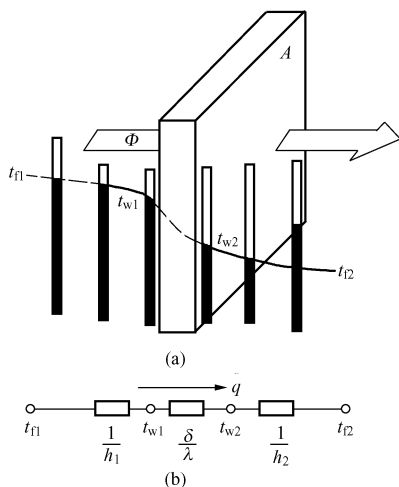


图 1-5 传热过程示意

(a) 传热过程；(b) 传热过程热阻图

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 K/W 和 $(m^2 \cdot K)/W$, 下标 t 表示传热过程的总热阻。因此式 (1-14) 可改写为

$$\Phi = \frac{\Delta t}{R_t} \quad (1-15a)$$

$$q = \frac{\Delta t}{r_t} \quad (1-15b)$$

正像欧姆定律既可以用于一段电路也可以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中的每一个环节都是成立的。因而式 (1-1)、式 (1-2) 和式 (1-5) 都可改写为

$$\Phi = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda A}} \quad (1-16a)$$

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda}} \quad (1-16b)$$

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{1}{hA}} \quad (1-17a)$$

$$q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{h}} \quad (1-17b)$$

式中: $\frac{\delta}{\lambda A}$ 、 $\frac{\delta}{\lambda}$ 为导热热阻; $\frac{1}{hA}$ 、 $\frac{1}{h}$ 为对流热阻。

三、热阻叠加原则

从式 (1-13) 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

$$r_t = \frac{1}{K} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (1-18)$$

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:

$$r'_t = \frac{1}{K'} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta_h}{\lambda_h} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{1}{h_2} \quad (1-19)$$

式中: $\frac{\delta_h}{\lambda_h}$ 为灰垢层热阻, $m^2 \cdot K/W$; $\frac{\delta_w}{\lambda_w}$ 为管壁热阻, $m^2 \cdot K/W$; $\frac{\delta_s}{\lambda_s}$ 为水垢层热阻, $m^2 \cdot K/W$ 。相应的传热过程的传热系数 K' 为

$$K' = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta_h}{\lambda_h} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{1}{h_2}} \quad (1-20)$$

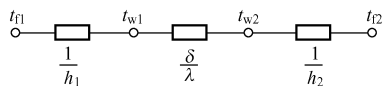


图 1-6 热阻示意

传热过程热阻式 (1-18) 的示意如图 1-6 所示。

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着密切的关系,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少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少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方法,这是学习传热学这门课程的目的和任务。

【例 1 - 1】 一炉子的炉壁厚为 13cm,总面积为 20m²,平均导热系数为 1.04W/(m·K),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 2.09×10⁴kJ/kg,问每天因热损失要用掉多少千克的煤?

解 根据式 (1 - 1),通过炉墙的热损失

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

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

$$h = \frac{\Phi}{A \Delta t} = \frac{8.5}{\pi \times 0.014 \times 0.08 \times (69 - 20)} = 49.3[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

【例 1 - 3】 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 是厚度 $\delta = 0.1\text{m}$ 的平板的一侧面,其另一侧表面 3 被高温流体加热,平板的热导率 $\lambda = 17.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。试问在稳态工况下表面 3 的温度 t_{w3} 为多少?

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

$$\sigma_b (T_{w2}^4 - T_{w1}^4) = \lambda \frac{t_{w3} - t_{w2}}{\delta}$$

$$t_{w3} = t_{w2} + \frac{\sigma_b \delta (T_{w2}^4 - T_{w1}^4)}{\lambda}$$

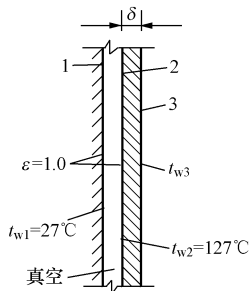


图 1 - 7 例 1 - 3 图