

CHUAN  
RE  
XUE

徐尚龙◎编著

传  
热  
学



科学出版社

# 传 热 学

徐尚龙 编著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书是一本以机械、电子及热能与动力工程专业本科生为教学主体的教材，在内容上既有深度又有广度，力求简洁、精炼，并将传热学理论与电子散热应用结合，培养学生实际运用知识的能力。本书包括传热学与热设计两部分，共13章，主要内容包括绪论、热传导、热对流、热辐射、换热器及其计算、冷却方法的选择、热测量及热设计应用等。大部分章节有一定数量的例题和习题，可帮助学生加深对知识的理解。

本书适合作为高等学校机械电子、航空航天、能源动力、化工、土建等专业的教材，也可作为从事传热学与电子设计人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

传热学/徐尚龙编著. —北京: 科学出版社, 2016.5

ISBN 978-7-03-048281-5

I. ①传… II. ①徐… III. ①传热学 IV. ①TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第103632号

责任编辑: 张 展 李 娟/责任校对: 张怡君

责任印制: 余少力/封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年6月第一版 开本: 787 × 1092 1/16

2016年6月第一次印刷 印张: 16 3/4

字数: 390 000

定价: 39.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

传热学是一门研究热量传递规律的科学,传热学课程几乎是具有工科类专业的高等学校必须开设的专业基础课程之一。由于传热学课程教学面向的学科专业背景具有不同的特点,所以现有传热学教材也各具特色。本书按照教育部制定的“高等学校工科传热学课程教学基本要求”,并结合机械工程与电子技术的专业特点编著而成。

随着芯片尺寸的不断缩小和集成电路封装元件数量及功率的增加,整个微电子系统的热流密度急剧增加,导致电子设备的工作温度逐渐提高。热设计工程是在现代工业生产和科学研究的需求下蓬勃发展起来的先进技术,是保证电子器件性能和可靠性方面的重要手段,在计算机、通信设备微型化中起着关键的作用。美国政府和军方从20世纪70年代就颁布了一系列有关电子设备热管理和热设计的规范,目前热设计已经成为电子元器件、设备和系统可靠性设计的一项主要内容。传热学是热设计的理论基础,也是本书的重点,同时教学内容还包括一些热设计规则和实例。

本书在编写过程中,注重从以下几个方面把握本书的特点。

(1) 教学内容是在学生理解学习大学物理和高等数学的基础上进行的,是对热学的进一步深入和拓展,又为后面学习电子设备热管理知识奠定了基础。全书内容共13章,基础传热学由第1章~第8章组成,主要介绍导热、对流传热、辐射传热的基本概念与基本应用;第9章为传质学简介;第10章为工业上重要的传热设备——换热器及其计算。第11章~第13章重点为传热学应用,包括冷却方法的选择、热测量及热设计应用、热设计及工程实例,这部分尽可能让读者掌握传热学理论的工程应用和热设计方法。

(2) 根据课程的特点,结合学生的实情,本书的教学目标确定为:知识与能力目标。通过让学生经历观察、类比、猜测、动手实践、合作交流、展示等过程,培养学生的观察能力、分析能力、计算能力和有条理的表达能力。进一步体会传热学表达方法、数值求解导热问题方法、分析求解、形成解决问题的途径。与现有的传热学教材相比,本书特别结合一些作者的科研成果,充实了对流换热强化内容。

(3) 注重吸取国内外教材的精华,启迪学生的研究性学习能力。本书精选了大量的思考题,在例题和练习题上也仔细筛选,力图深化学生对基本概念和物理过程本质的认识,培养学生的创新思维能力。

本书主要由徐尚龙编写,在本书的编写和定稿过程中,得到了许多同行专家的热心指导,他们对书稿提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢。电子科技大学微流体与传热课题组的各位同学,特别是孙振涛、吴义昊、胡兴隆和李悦等为本书的编写提供了不少帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促且作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2015年11月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 热量传递的三种基本方式	1
1.2 传热过程和热阻	5
习题 1	7
第 2 章 稳态热传导	9
2.1 热传导基本定律	9
2.2 一维稳态导热	17
2.2.1 通过平壁的导热	17
2.2.2 通过圆筒壁的导热	21
2.3 通过多层圆筒壁的导热	23
2.4 通过肋片的导热	25
2.4.1 肋片的换热效率	25
2.4.2 等截面直肋片导热	27
2.5 有内热源的稳态导热	31
2.5.1 平板	31
2.5.2 圆柱体	33
2.6 二维和三维稳态导热	34
2.6.1 二维稳定热传导	34
2.6.2 二维热传导的数学分析	35
2.6.3 图解分析法	38
习题 2	41
第 3 章 非稳态热传导	45
3.1 非稳态热传导的基本概念及其特点	45
3.2 一维非稳态热传导的分析解	48
3.2.1 无限大平板的分析解	48
3.2.2 非稳态导热过程的正规状况阶段	49
3.3 二维与三维非稳态热传导	50
3.4 半无限大物体的非稳态导热	52
3.4.1 第一类边界条件下半无限大物体非稳态导热温度场的分析解	53
3.4.2 第二类边界条件下半无限大物体非稳态导热温度场的分析解	54
3.4.3 第三类边界条件下的非稳态导热	55
3.5 集总参数分析法	55
习题 3	58

<b>第 4 章 对流换热理论基础</b> .....	60
4.1 对流换热问题的概述.....	60
4.1.1 影响表面传热的主要因素.....	60
4.1.2 对流换热的研究方法.....	61
4.2 对流换热问题的基本方程组.....	62
4.3 对流换热的边界层方程组.....	64
4.3.1 速度边界层.....	65
4.3.2 热边界层.....	67
4.4 平板上的层流边界层和能量方程.....	67
4.5 量级分析与边界层微分方程.....	73
习题 4.....	77
<b>第 5 章 自然对流与强制对流</b> .....	80
5.1 自然对流.....	80
5.1.1 自然对流的数学描述.....	80
5.1.2 大空间自然对流换热.....	81
5.1.3 有限空间自然对流换热.....	86
5.2 强制对流.....	88
5.2.1 管内强制对流换热.....	88
5.2.2 外掠强制对流换热.....	95
5.3 混合对流换热.....	99
习题 5.....	103
<b>第 6 章 传热的数值方法</b> .....	108
6.1 简介.....	108
6.2 温度场区域的离散化.....	109
6.3 温度场节点方程的建立.....	111
6.3.1 控制体的内节点方程.....	111
6.3.2 控制体的边界节点方程.....	113
6.4 节点方程的求解.....	114
习题 6.....	116
<b>第 7 章 具有相变时的对流换热</b> .....	117
7.1 引言.....	117
7.2 凝结换热.....	117
7.2.1 水管上的凝结.....	120
7.2.2 紊流膜状凝结.....	121
7.2.3 蒸汽速度、过热度和不凝结气体对膜状凝结的影响.....	123
7.3 沸腾换热.....	124
7.3.1 饱和池内沸腾.....	124
7.3.2 饱和池内沸腾的应用公式.....	126

7.3.3 过冷核态沸腾	129
习题 7	130
<b>第 8 章 辐射换热</b>	<b>131</b>
8.1 热辐射的基本概念	131
8.1.1 物体的热辐射特性	131
8.1.2 辐射力和辐射强度	134
8.2 黑体辐射基本定律	136
8.2.1 斯特藩-玻尔兹曼定律	137
8.2.2 朗伯定律	137
8.2.3 普朗克定律与维恩位移定律	137
8.2.4 波段辐射与辐射函数	139
8.3 实际物体表面的辐射特性	140
8.3.1 实际物体的辐射与黑度	141
8.3.2 实际物体的吸收率	143
8.3.3 灰体	144
8.3.4 基尔霍夫定律	145
8.4 物体表面之间的辐射换算	146
8.4.1 物体表面的有效辐射	146
8.4.2 漫射灰表面之间的辐射热交换	147
8.5 由灰表面构成的封闭空间中的辐射换热	149
8.5.1 物体表面之间角系数的确定	150
8.5.2 由漫射灰表面构成封闭空间的辐射换热计算	152
习题 8	157
<b>第 9 章 传质学简介</b>	<b>159</b>
9.1 质扩散与菲克定律	159
9.1.1 混合物浓度的表示方法	159
9.1.2 速度和流率的定义	159
9.1.3 菲克扩散定律	160
9.1.4 扩散方程的求解	162
9.1.5 扩散的驱动力及上坡扩散	164
9.2 对流传质	165
9.2.1 传质系数	165
9.2.2 对流传质中的重要参数	166
习题 9	168
<b>第 10 章 换热器及其计算</b>	<b>170</b>
10.1 换热器的分类	170
10.2 各种类型的间壁式换热器	171
10.3 换热器的传热计算的两种方法	173

10.3.1	平均温差法	173
10.3.2	效率-传热单元数法	177
10.4	换热器传热计算的步骤	183
10.5	换热器传热壁面的换热特性	184
	习题 10	187
<b>第 11 章</b>	<b>冷却方法的选择</b>	<b>189</b>
11.1	强迫空气冷却	189
11.1.1	强迫空气冷却设计基本原则	189
11.1.2	风机的选择	189
11.1.3	风道设计	193
11.2	液体冷却	195
11.2.1	液体冷却的方式	195
11.2.2	泵的选择	196
11.2.3	热交换器	196
11.2.4	冷却液	196
11.3	热电制冷	199
11.3.1	热电制冷的基本原理	199
11.3.2	热电制冷器结构	200
11.3.3	热电材料	201
11.3.4	热电冷却的应用	202
11.4	热管	204
11.4.1	热管结构组成	204
11.4.2	热管工作原理	205
11.4.3	热管的传热极限	205
11.4.4	热管的性能特点	207
11.4.5	热管的分类	208
11.4.6	热管在电子冷却中的应用	208
11.5	冷板散热	210
11.5.1	冷板散热的特点	210
11.5.2	冷板的结构与分类	211
11.5.3	各类冷板的选用原则	214
11.5.4	冷板散热器的应用	214
11.6	相变冷却	215
11.6.1	相变冷却的基本原理	215
11.6.2	相变冷却装置	216
11.6.3	液-气相变冷却系统	217
11.7	CPU 发热原理及基本散热方案	219
11.7.1	侧吹式/下压式散热特点	219



---

11.7.2 机箱风道组建	220
11.8 散热器选择及散热计算方法	221
11.8.1 散热计算	221
11.8.2 计算实例	222
<b>第 12 章 热测量及热设计应用</b>	<b>224</b>
12.1 热测量技术简介	224
12.1.1 温度的测量	224
12.1.2 流体的压力测量	225
12.1.3 空气和液体流量的测量	227
12.2 电子元器件热设计	228
12.2.1 管芯的热设计	229
12.2.2 封装键合的热设计	229
12.2.3 管壳的热设计	230
12.2.4 元器件在印制电路板上的安装	230
12.2.5 大功率元件的安装	231
12.3 毛细抽吸两相流体回路 (CPL) 技术	232
12.3.1 CPL 工作原理	232
12.3.2 CPL 主要组成	233
12.3.3 CPL 的特点	235
12.4 热开关	236
<b>第 13 章 热设计及工程实例</b>	<b>239</b>
13.1 热设计概述	239
13.2 热设计中相关概念	240
13.3 热设计的原则	242
13.4 热设计方法	243
13.5 工程应用实例	246
13.5.1 LED 灯的热管理	246
13.5.2 动力电池的热管理系统	250
13.5.3 服务器散热特性的仿真分析	253
<b>参考文献</b>	<b>257</b>

# 第 1 章 绪 论

热科学包括热力学和传热学。传热学是研究热量传递规律的科学。传热学的作用就是利用可预测能量传递速率的一些定律去补充热力学分析。热是一种传递中的能量,凡是有温度差的地方,就有热量自发地从高温物体传向低温物体,或从物体的高温部分传向低温部分。由于自然界和生产技术中几乎到处存在着温度差,所以热量传递就成为自然界和生产过程中一种非常普遍的现象。

传热学在工程领域中的应用十分广泛。在材料冶金、机械制造、电气电信、建筑工程、纺织印染、农业林业、交通运输、航空航天、生物工程、能源动力、化工制药、环境保护和气象预报等部门中存在大量的热量传递问题,而且常常还起着关键作用。例如,随着大规模集成电路集成密度的不断提高,电子器件的冷却问题越来越突出。20 世纪 70 年代每平方厘米集成电路芯片的功率最高约为 10W,20 世纪 80 年代增加到 20~30W,而进入 20 世纪 90 年代后这一数字则上升到  $10^2\text{W}$  的量级。芯片产生的这些热量如果不及时散出,将使芯片温度升高而影响电子器件的寿命和工作的可靠性,因而研究电子器件的有效散热方式已经成为当今比较热门的课题。

学习传热学就是要掌握各种热量传递现象的规律,从而为设计满足一定生产工艺要求的换热设备,提高现有换热设备的操作和管理水平,或者对一定的热过程实现温度场的控制打下理论基础。

## 1.1 热量传递的三种基本方式

传热分为三种形式:热传导、热对流和热辐射。

### 1) 热传导

当物体内部存在温度差时,热量就会自发地从物体的高温部分传到低温部分;此外,不同温度的物体互相接触时,热量也会从高温物体传递到低温物体。这样一种热量传递的方式称为热传导或简称为导热。因此,当物体各部分之间不发生相对位移时,借助于分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而实现的热量传递过程称为导热。

从微观角度来看,气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是有所不同的。气体中,导热是气体分子不规则热运动相互碰撞的结果。众所周知,气体的温度越高,分子的运动动能越大,不同能量水平的分子相互碰撞的结果,使能量从高温处传向低温处。导电固体中有相当多的自由电子,它们在晶格之间像气体分子那样运动。自由电子的运动在导电固体的导热中起着主要作用。在非导电固体中,导热是通过晶格结构的振动,即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的。至于液体中的导热机理,还存在着不同的观点,有待于进一步的研究。

19 世纪初期毕奥 (Biot) 对导热这种热量传递的方式进行了研究,他在对大量的平板导热实验 (如图 1-1 所示) 的数据分析中得出如下的结论:

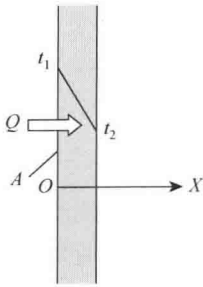


图 1-1 通过无限大平板的导热

$$Q = \lambda A \frac{t_1 - t_2}{\Delta x} \quad (1-1)$$

式中,  $Q$  为单位时间导热量, 又称热流量, 单位是  $W$ ;  $A$  为导热面积, 单位是  $m^2$ ;  $t_1 - t_2$  为大平板两表面之间的温差, 单位是  $^{\circ}C$  (或  $K$ );  $\lambda$  为相应的比例系数, 称为平板材料的导热系数 (或热传导率), 表示物体导热能力的大小的物性量, 单位是  $W/(m \cdot K)$ 。式 (1-1) 也可表示为

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\Delta x} \quad (1-2)$$

式中,  $q$  为单位面积热流, 又称热流密度, 单位是  $W/m^2$ 。

1822 年, 法国数学家傅里叶 (Joseph Fourier) 在对固体导热实验进行总结的基础上提出了著名的傅里叶定律, 即

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-3)$$

此式称为傅里叶定律, 在第 2 章中将对对其进行详细的论述。式中,  $\partial t / \partial n$  为温度梯度, 负号表示热流密度的方向与温度梯度的方向相反, 即热量传递的方向与温度升高的方向相反。当温度  $t$  沿  $x$  方向增加时,  $dt/dx > 0$ ,  $q < 0$ , 说明热量沿  $x$  减小的方向传递 (图 1-2); 反之,  $dt/dx < 0$ ,  $q < 0$ , 说明热量沿  $x$  增加的方向传递。

**例 1-1** 一块大平板, 高 3m, 宽 2m, 厚 0.2m, 导热系数为  $45W/(m \cdot K)$ , 两侧表面温度分别为  $t_{w1} = 150^{\circ}C$  及  $t_{w2} = 285^{\circ}C$ , 试求热流密度及热流量。

**解** 根据傅里叶定律, 热流密度为

$$q = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \left( \frac{t_{w2} - t_{w1}}{x_2 - x_1} \right) = -45 \left( \frac{285 - 150}{0.2} \right) = -30375 (W/m^2)$$

负号表示传热方向与  $x$  轴的方向相反, 如图 1-2、图 1-3 所示。

通过整个导热面的热流量为

$$Q = q \cdot A = -30375 \times (3 \times 2) = 182250 (W)$$

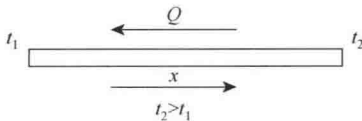


图 1-2 正向热传递

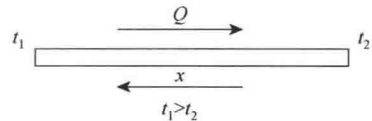


图 1-3 逆向热传递

## 2) 热对流

对流是指由于流体的宏观运动, 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过程。对流仅能发生在流体中, 而且由于流体中的分子同时在进行着不规则的热运动, 所以对流必然伴随有导热现象。工程上特别感兴趣的是流体流过一个物体表面时的热量传递过程, 并称其为对流换热, 以区别于一般意义上的对流。

对流换热按照不同的原因可分为多种类型。按照是否相变, 分为有相变的对流换热和无相变的对流换热; 按照流动原因, 分为强迫对流换热和自然对流换热; 按照流动状态,

分为层流和紊流。强迫对流换热是由外因造成的，如冷油器、冷凝器、风机或大自然中的风。自然对流换热是由于温度差造成密度差，产生浮升力，热流体向上运动，冷流体填充空位，形成的往复过程。例如，暖气片表面附近受热空气的向上流动；无风天气，一条晒热的路面与环境的散热。

1701年，牛顿（Isaac Newton）首先提出了计算对流换热热流量的基本关系式，常称为牛顿冷却定律，其形式为

$$Q = hA(t_w - t_f) = hA\Delta t \quad (1-4)$$

式中， $t_w$  是物体表面的温度； $t_f$  是流体的温度； $\Delta t = t_w - t_f$ ，这里认为  $t_w > t_f$ ，人为约定  $\Delta t$  取正值，称为对流换热系数或表面传热系数，单位为  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ，它是一个反映对流换热过程强弱的物理量。

由于对流换热是一个复杂的热量交换过程，影响因素很多，如引起流动的原因（自然或强迫流动）、流体流动的状态（层流或紊流）、流体的物理性质（密度、比热容等）、流体的相变（沸腾或冷凝）、换热边界的几何因素（形状、大小及相对位置等）。显然，单凭式（1-4）不可能描述或反映这些复杂因素对换热过程的影响，而只是把这些因素都集中到对流换热系数之中。因此，针对各种对流换热问题求解对流换热系数则是分析和研究对流换热问题的主要任务。

就传热学而言，掌握典型条件下表面传热系数的数量级是有必要的。表 1-1 给出了几种常见对流换热表面的换热系数。就换热方式而言，自然对流换热系数最小（空气为 1~10，水为 200~1000），有相变时最大（ $10^3 \sim 10^4$  量级），强迫对流居中。就介质而言，水比空气强烈。就换热方式而言，有相变的优于无相变的，强制对流高于自然对流。

表 1-1 表面传热系数的数值范围

过程	换热系数 $h/[W/(m^2 \cdot K)]$
自然对流	
空气	1~10
水	200~1000
强制对流	
气体	20~100
高压水蒸气	500~3500
水	1000~15000
水的相变换热	
沸腾	2500~35000
蒸汽凝结	5000~25000

**例 1-2** 室内暖气片的散热面积  $A=3m^2$ ，表面温度为  $t_w=50^\circ C$ ，与温度为  $20^\circ C$  的室内空气之间自然对流传热，表面传热系数  $h=4W/(m^2 \cdot K)$ ，试求暖气片相当于多大功率的电气。

**解** 暖气片与室内空气之间是稳态的自然对流传热，根据式（1-4），即

$$Q = hA(t_w - t_f) = 4 \times 3 \times (50 - 30) = 360(\text{W}) = 0.36(\text{kW})$$

### 3) 热辐射

物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。它不需要物体之间的直接接触，也不需要任何中间介质。当两个物体被真空隔开时，导热和对流均不会发生，只有热辐射。它不仅产生能量的转移，而且还伴随着能量的转换。即发射时从热能转化为辐射能，吸收时又从辐射能转化为热能。

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。自然界中各个物体都在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造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递——辐射换热。当物体与周围环境处于热平衡时，辐射换热量等于零，但这是动态平衡，辐射与吸收过程仍在不停地进行。

导热、对流这两种热量传递方式只有在有物质存在的条件下才能实现，而热辐射可以在真空中传递，而且实际上在真空中辐射能的传递最有效。这是热辐射区别于导热、对流换热的基本特点。当两个物体被真空隔开时，如地球与太阳之间，导热与对流都不会发生，只能进行辐射换热。辐射换热区别于导热、对流换热的另一个特点是，它不仅产生能量的转移，而且还伴随着能量形式的转换，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。

一个理想的辐射和吸收能量的物体称为黑体。黑体的辐射和吸收本领在同温度物体中是最大的。黑体向周围空间发射出去的辐射能由下式给出：

$$Q = A\sigma_0 T^4 \quad (1-5)$$

式中， $Q$  为黑体发射的辐射能； $A$  为物体的辐射表面积； $T$  为热力学温度，单位为 K； $\sigma_0$  为斯特藩-玻尔兹曼常量，其值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

式 (1-5) 称为斯特藩-玻尔兹曼 (Stefen-Boltzmann) 定律，它是从热力学理论导出并由实验证实的黑体辐射规律，又称为辐射四次方定律，是计算热辐射的基础。一切实际物体的辐射能力都小于同温度下黑体的辐射能力。实际物体发射的辐射能可以用辐射四次方定律的经验修正来计算，即

$$Q = \varepsilon A\sigma T^4 \quad (1-6)$$

式中， $\varepsilon$  为该物体的发射率（又称黑度），其值小于 1。一个物体的发射率与物体的温度、种类和表面状态有关。物体的  $\varepsilon$  值越大，表明它越接近理想的黑体。

自然界中的所有物体都在不断地向周围空间发射辐射能，与此同时，又在不断地吸收

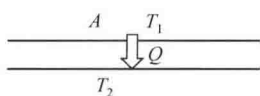


图 1-4 两平行黑平板间的辐射换热

来自周围空间其他物体的辐射能，两者之间的差额就是物体之间的辐射换热量。物体表面之间以辐射方式进行的热交换过程称为辐射换热。如图 1-4 所示，对于两个相距很近的黑体表面，由于一个表面发射出来的能量几乎完全落到另一个表面上，那么它们之间的辐射换热量为

$$Q = A\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (1-7)$$

当  $T_1 = T_2$  时，也就是物体和周围环境处于热平衡时，辐射换热量等于零。但此时是动态平衡，辐射和吸收仍在不断进行。此时物体的温度保持不变。温度不随时间变化的换热

过程称为稳态过程，温度随时间变化的换热过程称为非稳态过程。

**例 1-3** 宇宙空间可近似地看成 0K 的真空空间。一个航天器在太空中飞行，其外表面平均温度为 250℃，表面发射率为 0.7，试计算航天器单位表面上的换热量。

$$\text{解 } q = \varepsilon \sigma T^4 = 0.7 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \times 250^4 = 155 \text{ W}/\text{m}^2$$

## 1.2 传热过程和热阻

在许多工业换热设备中，进行热量交换的冷、热流体也常分别处于固体壁面的两侧。例如，汽轮机装置的冷凝器中的热量交换过程。这种热量由壁面一侧的流体通过壁面传到另一侧流体中的过程称为传热过程。传热过程是工程技术中经常遇到的一种典型热量传递过程，是本书讨论的重要内容之一。在深入讨论导热、对流换热和辐射换热之前，对传热过程有个概略的了解对于后面的学习是很有帮助的。

下面来考察冷、热流体通过一块大平壁交换热量的传热过程，导出传热过程的计算公式并加以讨论。本书的分析将限于稳态的传热过程。一般来说，传热过程包括串联着的三个环节：①从热流体到壁面高温侧的热量传递；②从壁面高温侧到壁面低温侧的热量传递，即穿过固体壁的导热；③从壁面低温侧到冷流体的热量传递。

传热过程中由热流体传给冷流体的热量通常表示为

$$Q = kA\Delta t \quad (1-8)$$

式中， $\Delta t$  为热流体与冷流体间的平均温差； $k$  为传热系数，单位为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。在数值上，传热系数等于冷、热流体间温差  $\Delta t=1^\circ\text{C}$ ，传热面积  $A=1\text{m}^2$  时的热流量值，是一个表征传热过程强烈程度的物理量。

以图 1-5 为例，屋内热空气的热量通过墙壁和保温层传递给屋外冷空气，这个过程就属于传热过程。若屋内空气温度为  $t_{f1}$ ，屋外的空气温度为  $t_{f2}$ ，传热温差  $\Delta t=t_{f1}-t_{f2}$ 。若屋内对流和辐射总换热系数为  $\alpha_1$ ，屋外侧的对流换热系数为  $\alpha_2$ ，墙壁、保温层的厚度分别为  $\delta_1$  和  $\delta_2$ ，墙壁、保温层的导热系数分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ 。

从热流体  $t_{f1}$  到  $t_{w1}$  为

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

则

$$t_{f1} - t_{w1} = \frac{Q}{A\alpha_1}$$

$t_{w1}$  到  $t_{w2}$  为

$$Q = A\lambda_1(t_{w1} - t_{w2}) / \delta_1$$

则

$$t_{w1} - t_{w2} = \frac{Q}{\frac{A\lambda_1}{\delta_1}}$$

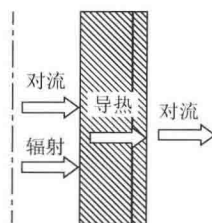


图 1-5 墙壁传热图

$t_{w2}$  到  $t_{w3}$  为

$$Q = A\lambda_2(t_{w2} - t_{w3}) / \delta_2$$

则

$$t_{w2} - t_{w3} = \frac{Q}{\frac{A\lambda_2}{\delta_2}}$$

$t_{w3}$  到冷流体为

$$Q = A\alpha_2(t_{w3} - t_{f2})$$

则

$$t_{w3} - t_{f2} = \frac{Q}{A\alpha_2}$$

相加整理得

$$Q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{A_1\alpha_1} + \frac{\delta_1}{A_1\lambda_1} + \frac{\delta_2}{A_2\lambda_2} + \frac{1}{A_2\alpha_2}} = \frac{\Delta t}{\frac{1}{Ak}} \quad (1-9)$$

将式 (1-9) 表示成热阻的形式, 有

$$Q = \frac{\Delta t}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{\Delta t}{R_t} \quad (1-10)$$

式中,  $R_i (i=1, 2, 3, 4)$  为传热过程的各个分热阻, 单位为  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;  $R_t$  为传热过程的总热阻。式 (1-9) 相当于电学中的欧姆定律 (电流=电压/电阻:  $I=\Delta U/R$ ), 且式中总热阻和分热阻的关系也具有电学中串联电路的电阻叠加特性: 总电阻等于各串联分电阻之和。

热阻是传热学的基本概念之一。用热阻的概念分析各种传热现象, 不仅可使问题的物理概念更加清晰, 而且推导和计算也更简便。热量在热流路径上遇到的阻力, 反映介质或介质间的传热能力的大小, 表明了 1W 热量所引起的温升大小, 单位为  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$  或  $\text{K}/\text{W}$ 。用热功耗乘以热阻, 即可获得该传热路径上的温升。可以用一个简单的类比来解释热阻的意义, 换热量相当于电流, 温差相当于电压, 则热阻相当于电阻。对于某个传热问题, 如果要增强传热, 就应设法减少所有热阻中最大的那个热阻; 若要减弱传热, 就应该加大所有热阻中最小的那个热阻, 或者再增加额外的热阻, 即增加保温层。

**例 1-4** 有一台气体冷却器, 气体侧表面传热系数为  $h_1=95\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , 壁面厚  $\delta=2.5\text{mm}$ ,  $\lambda=46.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 水侧表面传热系数  $h_2=5800\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。设传热壁可以看成平壁, 试计算各个环节单位面积的热阻及从气到水的总传热系数。能否指出, 为了强化这一传热过程, 应首先从哪一环节着手?

解

$$R_1 = \frac{1}{h_1} = 0.010526, \quad R_2 = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0.0025}{46.5} = 5.376 \times 10^{-5}$$

$$R_3 = \frac{1}{h_2} = \frac{1}{5800} = 1.724 \times 10^{-4}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{\delta}{h_3}} = 94.7(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$$

应强化气体侧表面传热。

## 习 题 1

1-1 夏天的早晨，一个大学生离开宿舍时的温度为  $20^\circ\text{C}$ 。他希望晚上回到房间时的温度能够低一些，于是早上离开时紧闭门窗，并打开了一个功率为  $15\text{W}$  的电风扇，该房间的长、宽、高分别为  $5\text{m}$ 、 $3\text{m}$ 、 $2.5\text{m}$ 。如果该大学生  $10\text{h}$  以后回来，试估算房间的平均温度是多少？

1-2 一个宇宙飞船，其中外遮光罩是凸出于飞船体之外的一个光学窗口，其表面的温度状态直接影响到飞船的光学传感器。船体表面各部分的表面温度与遮光罩的表面温度不同。试分析，飞船在太空中飞行时与遮光罩表面发生热交换的对象可能有哪些？换热的方式是什么？

1-3 某砖墙的表面面积为  $12\text{m}^2$ ，厚度为  $260\text{mm}$ ，平均导热系数为  $1.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。设面向室内的表面温度为  $25^\circ\text{C}$ ，而外表面温度为  $-5^\circ\text{C}$ ，试确定此砖墙向外界散失的热量。

1-4 一个炉子的炉墙厚  $13\text{cm}$ ，总面积为  $20\text{m}^2$ ，平均导热系数为  $1.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，内、外壁温分别是  $520^\circ\text{C}$  和  $50^\circ\text{C}$ 。试计算通过炉墙的热损失。如果所燃用的煤的发热量是  $2.09 \times 10^4 \text{kJ}/\text{kg}$ ，问每天因热损失要用掉多少千克煤？

1-5 夏天，阳光照耀在一扇厚度为  $40\text{mm}$  的用层压板制成的木门外表面上，用热流计测得木门内表面热流密度为  $15\text{W}/\text{m}^2$ 。外表面温度为  $40^\circ\text{C}$ ，内表面温度为  $30^\circ\text{C}$ 。试估算此木门在厚度方向上的导热系数。

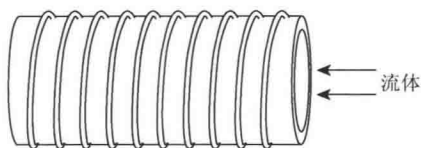
1-6 在一次测定空气横向流过单根圆管的对流换热实验中，得到下列数据：管壁平均温度  $t_w=69^\circ\text{C}$ ，空气温度  $t_f=20^\circ\text{C}$ ，管子外径  $d=14\text{mm}$ ，加热段长为  $80\text{mm}$ ，输入加热段的功率为  $8.5\text{W}$ ，如果全部热量通过对流换热传给空气，试问此时的对流换热表面传热系数多大？

1-7 对置于水中的不锈钢管束采用电加热的方法进行压力为  $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$  的饱和水沸腾换热实验。测得加热功率为  $50\text{W}$ ，不锈钢管束外径为  $4\text{mm}$ ，加热段长为  $10\text{mm}$ ，表面平均温度为  $109^\circ\text{C}$ 。试计算此时沸腾换热的表面传热系数。

1-8 一个长、宽各为  $10\text{mm}$  的等温集成电路芯片安装在一块地板上，温度为  $20^\circ\text{C}$  的空气在风扇作用下冷却芯片。芯片最高允许温度为  $85^\circ\text{C}$ ，芯片与冷却气流间的表面传热系数为  $175\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。试确定在不考虑辐射时芯片最大允许功率是多少？芯片顶面高出底板的高度为  $1\text{mm}$ 。

1-9 用均匀地绕在圆管外表面上的电阻带作为加热元件，以进行管内流体对流换热的实验，如题图 1-1 所示。用功率表测得外表面加热的热流密度为  $3500\text{W}/\text{m}^2$ ；用热电偶测得某一截面上的空气温度为  $45^\circ\text{C}$ ，内管壁温度为  $80^\circ\text{C}$ 。设热量沿径向传递，外表面绝热良好，试计算所讨论截面上的局部表面传热系数。圆管的外径为  $36\text{mm}$ ，壁厚为  $2\text{mm}$ 。





题图 1-1

1-10 有两块无限靠近的黑体平行平板，温度分别为  $T_1$ 、 $T_2$ 。试按黑体的性质和斯特藩-玻尔兹曼定律导出单位面积上辐射换热量的计算式（提示：无限靠近意味着每一块板发出的辐射能全部落到另一块板上）。

1-11 半径为 0.5m 的球状航天器在太空中飞行，其表面发射率为 0.8。航天器内电子元件的散热总共为 175W。假设航天器没有从宇宙空间接收任何辐射能量，试估算其表面的平均温度。

1-12 一扇玻璃窗，尺寸为 60cm×30cm，厚 4mm。冬天，室内和室外温度分别为 20℃和-20℃，内表面的自然对流换热表面系数为 20W/(cm<sup>2</sup>·K)，外表面强制对流换热表面系数为 50W/(cm<sup>2</sup>·K)。玻璃的导热系数  $\lambda=0.78\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。试确定通过玻璃的热损失。

1-13 一个储存水果的房间的墙用软木板做成，厚 200mm，其中一面墙的高与宽各为 3m 和 6m。冬天设室内温度为 2℃，室外为-10℃，室内墙壁与环境之间的表面传热系数为 6W/(m·K)，室外刮强风时的表面传热系数为 60W/(m·K)。软木的导热系数  $\lambda=0.044\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。试计算通过这面墙所散失的热量，并讨论室外风力减弱对墙散热量的影响（提示：可以取室外的表面传热系数值为原来的 1/2 或 1/4 来估算）。