

高等学校教材

# 传热学

第二版

山东工业大学 俞佐平 编

高等教育出版社

高等学校教材

# 传 热 学

第 二 版

山东工业大学 俞佐平 编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书是在山东工学院俞佐平编《传热学》1979年第一版的基础上,总结作者本人及兄弟院校使用该书的教学经验,参照高等工业学校70学时《传热学教学大纲》(草案)中有关50学时教学大纲内容的规定修订而成的。经过修订,本书无论是在内容安排上,还是对物理概念的阐述,都较第一版有较大改进。并根据科学技术的发展和新的教学要求,书中删去了部分陈旧的内容,增补了一些新内容。例题和习题的质量也有一定提高。因此,修订后本书更符合教学要求。

全书共八章,即绪言、导热的基本定律及稳态导热的分析计算、非稳态导热的分析计算、对流换热原理及分析、流体无相变时对流换热的分析计算、流体有相变时对流换热的分析计算、热辐射及辐射换热、传热过程与换热器。每章有例题和习题,书末有附录。全书采用我国的法定计量单位。

本书经热工教材编审委员会传热学编审小组会议审查通过,可作为动力类专业及有关专业传热学教材,也可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材

传 热 学

第 二 版

山东工业大学 俞佐平

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

顺义永利印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张10.875 字数270,000

1979年9月第1版 1985年10月第2版

1985年10月第1次印刷

印数 00,001—7350

书号 15010·0688 定价 2.25元

## 再 版 前 言

本书第一版是根据 1977 年 12 月青岛教材会议所制订的编写大纲编写的。编者在前言中，殷切地希望使用本书的同志，对书中不妥和谬误之处提出批评和指正。几年来，陆续收到这方面的意见。正由于这些同志对教学负责和关心教材的热忱，才使本书的修订工作能如期完成。

编者在总结上述同志和编者本人几年来的教学实践经验的基础上，根据“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”十六字教材建设方针和教学大纲，写出了本书的修订初稿。经主审人华中工学院钱壬章同志审阅后，于 1984 年 6 月提交传热学教材编审小组在泰安召开的审稿会审查。与会同志除指出其中某些不足之处外，一致认为初稿在内容的安排、物理概念的阐述以及例题和习题的质量等方面都比原书有较大的改进。会后，编者对初稿又作了适当的修改。

全书习题已予更新，由肖筑芝同志负责选编；尹薇同志为本书的编写做了不少工作；我校动力系有关同志也对初稿提供了宝贵的意见。更需指出的是，华中工学院钱壬章同志以及该院热工教研室卢任等同志，为提高本书的质量进行了认真的审阅和修改。

编者认为，本书修订工作的顺利完成是与上列同志的帮助不可分的。在此，谨对他们致以衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中无疑还存在不妥和谬误之处。更由于教学改革不断深入、科学技术飞速发展，必然要求教材与之适应。为此，编者依然期待着来自各方面的批评和指正。

编 者

1984 年 11 月

## 主要符号表

|                                                               |                                                |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| $A$ 面积、截面积, $m^2$                                             | $S$ 导热形状因子, $m$                                |
| $a$ 热扩散率(导温系数), $m^2/s$                                       | $T$ 温度, $K$                                    |
| $b$ 宽度, $m$                                                   | $t$ 温度, $^{\circ}C$                            |
| $C$ 热容比                                                       | $U$ 周长, $m$                                    |
| $c$ 比热容, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$                             | $V$ 体积, $m^3$                                  |
| $D$ 直径, $m$                                                   | $v$ 速度, $m/s$                                  |
| $E$ 辐射力, $W/m^2$                                              | $W$ 宽度, $m$                                    |
| $F$ 力, $N$ ; 角系数; 换热器的校正系数                                    | $\alpha$ 换热系数, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ; 吸收率 |
| $G$ 投射辐射, $W/m^2$                                             | $\beta$ 体胀系数, $K^{-1}$                         |
| $g$ 重力加速度, $m/s^2$                                            | $\delta$ 厚度, $m$                               |
| $I$ 定向辐射强度, $W/(m^2 \cdot sr)$                                | $\epsilon$ 黑度; 换热器有效度                          |
| $J$ 反射辐射, $W/m^2$                                             | $\eta_r$ 肋片效率                                  |
| $k$ 传热系数, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$                           | $\eta_s$ 肋壁效率                                  |
| $L$ 长度、高度, $m$                                                | $\theta$ 过剩温度, $^{\circ}C$                     |
| $m$ 质量, $kg$                                                  | $\lambda$ 导热系数, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$        |
| $\dot{m}$ 质量流量, $kg/s$                                        | 波长, $\mu m$                                    |
| $p$ 压力, $N/m^2$                                               | $\mu$ 动力粘度, $kg/(m \cdot s)$                   |
| $Q$ 热量, $J$ ; 热流量, $W$                                        | $\nu$ 运动粘度, $m^2/s$                            |
| $\dot{Q}$ 内热源强度, $W/m^3$                                      | $\rho$ 密度, $kg/m^3$ ; 反射率                      |
| $q$ 热流密度, $W/m^2$                                             | $\sigma$ 表面张力, $N/m$                           |
| $R$ 半径、 $m$ ; 总面积的热阻, $^{\circ}C/W$                           | $\sigma_s$ 斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$     |
| $r$ 半径, $m$ ; 单位面积的热阻, $m^2 \cdot ^{\circ}C/W$ ; 汽化潜热, $J/kg$ | $\tau$ 时间, $s$ ; 透射率                           |
|                                                               | $\omega$ 立体角, $sr$                             |

## 相 似 准 则

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

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

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

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \text{——努谢尔特(Nusselt) 准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \text{——普朗特(Prandtl) 准则}$$

$$Re = \frac{v L}{\nu} \text{——雷诺(Reynolds) 准则}$$

$$St = \frac{Nu}{Re Pr} \text{——斯坦顿(Stanton) 准则}$$

$$Ra = Gr Pr = \frac{\rho^2 \beta g L^3 c_p \Delta t}{\mu \lambda} \text{——雷利(Rayleigh) 准则}$$

$$Gz = Re Pr \frac{D}{L} \text{——格莱兹(Graetz) 准则}$$

# 目 录

## 主要符号表

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| <b>第一章 绪言</b> .....                | <b>1</b>   |
| § 1-1 概述 .....                     | 1          |
| § 1-2 热传递的基本方式 .....               | 3          |
| <b>第二章 导热的基本定律及稳态导热的分析计算</b> ..... | <b>11</b>  |
| § 2-1 导热的概念和定律 .....               | 11         |
| § 2-2 导热微分方程式 .....                | 18         |
| § 2-3 一维稳态导热 .....                 | 23         |
| § 2-4 伸展体的稳态导热 .....               | 38         |
| § 2-5 多维稳态导热 .....                 | 54         |
| <b>第三章 非稳态导热的分析计算</b> .....        | <b>72</b>  |
| § 3-1 概述 .....                     | 72         |
| § 3-2 数学分析法 .....                  | 75         |
| § 3-3 数值解法 .....                   | 94         |
| <b>第四章 对流换热原理及分析</b> .....         | <b>105</b> |
| § 4-1 对流换热过程简介 .....               | 105        |
| § 4-2 边界层概念 .....                  | 106        |
| § 4-3 对流换热系数 $\alpha$ 及其确定方法 ..... | 116        |
| § 4-4 对流换热过程的数学描述 .....            | 119        |
| § 4-5 对流换热的准则方程式 .....             | 125        |
| § 4-6 模型实验和数据的综合法 .....            | 136        |
| <b>第五章 流体无相变时对流换热的分析计算</b> .....   | <b>144</b> |
| § 5-1 流体在管道内作强迫对流时的换热 .....        | 144        |
| § 5-2 流体外绕壁面作强迫对流时的换热 .....        | 159        |
| § 5-3 流体自然对流时的换热 .....             | 174        |

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| <b>第六章 流体有相变时对流换热的分析计算</b> .....                           | 191 |
| § 6-1 蒸气凝结时的换热 .....                                       | 191 |
| § 6-2 液体沸腾时的换热 .....                                       | 201 |
| <b>第七章 热辐射及辐射换热</b> .....                                  | 213 |
| § 7-1 热辐射的基本概念 .....                                       | 213 |
| § 7-2 黑体的辐射特性 .....                                        | 216 |
| § 7-3 实际物体的辐射特性 灰体 .....                                   | 225 |
| § 7-4 物体表面间的辐射换热 .....                                     | 231 |
| § 7-5 气体辐射、气体与壁面（包壳）间的辐射换热 .....                           | 255 |
| § 7-6 辐射表面的总换热系数 .....                                     | 268 |
| <b>第八章 传热过程与换热器</b> .....                                  | 274 |
| § 8-1 传热过程的分析计算 .....                                      | 274 |
| § 8-2 换热器概述 .....                                          | 286 |
| § 8-3 间壁式换热器的热计算 .....                                     | 291 |
| § 8-4 换热器的局部热阻和污垢热阻 .....                                  | 312 |
| <b>附录 A</b> .....                                          | 319 |
| 附录 A-I 单位换算表 .....                                         | 319 |
| 附录 A-II 几种材料的密度、导热系数、比热容和热<br>扩散率 .....                    | 322 |
| 附录 A-III 气体的物性参数 .....                                     | 323 |
| 附录 A-IV 油类的物性参数 .....                                      | 325 |
| 附录 A-V 双曲线函数 .....                                         | 326 |
| 附录 A-VI 饱和水的物性参数 .....                                     | 328 |
| 附录 A-VII 几种材料在表面法线方向上的辐射黑度 .....                           | 329 |
| 附录 A-VIII 水蒸气在饱和线上的物性参数 .....                              | 330 |
| 附录 A-IX 大气压力 ( $p=760\text{ mmHg}$ ) 下过热水蒸气<br>的物性参数 ..... | 332 |
| <b>附录 B 一维非稳态导热的分析解法</b> .....                             | 333 |
| <b>参考文献</b> .....                                          | 337 |

# 第一章 绪 言

## § 1-1 概 述

在自然界，人们所能观察或感觉到的物体，不论是固体、液体还是气体，往往由于自然或人为的原因而存在温度差。热力学第二定律指出，热量总是自发地从高温处传向低温处。因此，热的传递过程属于一种普遍的自然现象。

传热学研究有关热量传递的机理、规律以及计算和测试的方法，它是工程热物理的一个分支。在动力、化工、制冷、建筑、机械制造、新能源和宇航等工程中，涉及到热量转移时，有关热传递的理论知识和测试技术占有重要的地位。传热学已成为一门独立的学科，并正在迅速地发展。

热力学和传热学都以热物理现象的客观规律作为研究的对象。热力学着重研究，在热力学平衡状态下不同形式的能量之间相互转换的规律，而传热学则是研究由于存在温度差而引起的热量传递的规律。传热学不仅探求热传递过程的物理本质，而且在不同条件下热传递系统的温度分布和有关热流量（即单位时间所传递的热量）问题的分析计算和实验，也属于传热学的范畴。

学习并掌握热传递过程的理论和实验技能，能更有效地使用增强或减弱传热的措施来解决工程实际问题。例如，在内燃机中使高温的活塞顶、气缸壁等得到恰当的冷却，在动力厂广泛采用的冷凝器中使低压蒸汽迅速地凝结等，都要求增强传热。相反，在室外的蒸汽管道上外敷绝热材料，以及为了保存低温液化气体而采用保温作用良好的容器壁等，则都是利用热绝缘以减弱传热的

措施。

热传递理论是人们在生产斗争和科学实验中逐步总结和积累所形成的。热传递现象较为复杂，影响因素较多，因此常用的研究方法是在工程许可的范围内，对热传递现象进行科学的简化，并作一些必要的假定，以求得合理的剖析和足够精确的计算。例如，反映物体导热能力的导热系数是随温度而变的，为了简化计算而又不致出现明显的误差，就把它取作定值或合适的平均值。又如，换热器设计中作传热计算时，考虑到由于连续运行，换热表面会因结垢而降低流体与表面间的换热量。为保证满意和可靠的运行，往往不深究积垢层的详细情况而引入一个经验性的所谓污垢系数（即污垢热阻），用以计及积垢层的影响。要能在实际计算中作到恰当的简化和假定，必须对各种物理现象作详细的观察和分析，以取得较深刻的理解。这就要求我们具有丰富的理论知识和实践经验。在处理工程传热问题时，必须熟悉和掌握传热的机理、有关的定律、测试的技能和分析计算的方法。当然，作为基础的数学、物理、热力学和流体力学等学科的知识则更是不可缺少的。

现在，热传递理论正紧随着科学技术和生产实践的进步而飞速发展，许多传热问题目前已可通过理论分析予以解决。例如，过去长期依靠试验研究的对流换热过程，由于对边界层机理的逐渐明确，理论求解的范围正在日益扩大。电子计算机作为一种先进的运算工具，已应用于热传递领域，使传热问题的数值解法变得更具有实用意义，这对传热学这门学科的发展具有很大的促进作用。理论的基础是实践，并又在不断实践中得到发展。所以，科学技术的进步和生产实践的经验，对于加深理论分析，进而解决生产中有关热传递的问题，确实是十分重要的。

理解各类热传递现象的机理，对典型热传递过程具备建立和求解方程式的能力，以及掌握有关传热试验的技能，将是本课程

学习的目的和要求。

## § 1-2 热传递的基本方式

如果在不同物体或物体的不同部分之间发生热量传递，并表现为温度升降或体积胀缩，甚至物相改变，等等，则必然是由于它们之间存在温度差。犹如导电现象中电位差是产生电流的动力一样，温度差是产生热流的动力。热传递通常是一种复杂的现象，在不同的条件下具有不同的机理。为便于分析，可把它区分为三种基本方式，即热传导、热对流和热辐射。在工程中所遇到的热传递现象，常常是由几种基本方式以不同的主次组合的结果。不同的组合确定了不同现象的特点。

### 一、热传导

热传导简称导热，它是相互接触而温度不同的物体或物体中温度不同的各部分之间，当不存在宏观的相对位移时，由微观粒子(分子、原子和它们的组成部分)的移动、转动和振动等热运动引起的热传递现象。这些热运动的强度与温度成正比，宏观上可概括地说：导热时热量从高温部分传给低温部分。

一般来说，固体和静止的液体中所发生的热传递完全取决于导热。流动的液体以及流动或静止不流动的气体中的热传递，导热虽也同样发生，但在大多数情况下起主导作用的可能是下面将要阐述的热对流或热辐射。

远在 1822 年，傅里叶 (Joseph Fourier) 就总结了稳态下固体导热的实践经验，对于如图 1-1 a 表示的大平壁，提出了导热热量  $Q$  的计算公式，或称为傅里叶简化导热定律：

$$Q = \lambda A \frac{\Delta t}{\delta} \quad \text{W} \quad (1-1)$$

式中  $A$ ——垂直于导热方向的截面积， $\text{m}^2$ ；  
 $\delta$ ——平壁厚度， $\text{m}$ ；

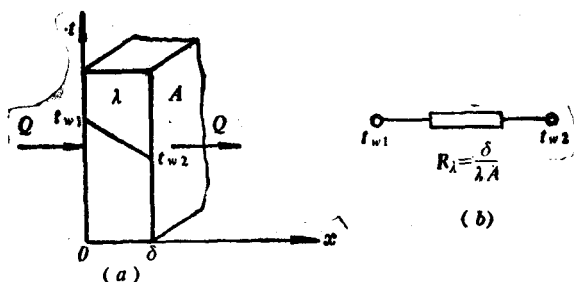


图 1-1 傅里叶导热公式图示

$\lambda$ ——取决于物性并反映物体导热能力的参数，称为  
导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ；

$\Delta t = t_{w1} - t_{w2}$ ——平壁两侧的壁温之差， $^\circ\text{C}$ 。

由式 (1-1) 可知，从平壁导过的热流量与导热系数、截面积和温度差成正比，而与平壁的厚度成反比。图 1-1 a 中，壁内的温度按直线规律降落，其原因将在第二章中阐述。式 (1-1) 又可表示为

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{\Delta t}{R_\lambda} \quad \text{W} \quad (1-1 a)$$

上式和直流电路的欧姆定律  $I = \frac{U}{R}$  类似，能逐一对应。 $\Delta t$  与电压  $U$  相对应，可称为温压； $\frac{\delta}{\lambda A}$  与电阻  $R$  相对应，可称为导热截面积为  $A[\text{m}^2]$  时的导热热阻  $R_\lambda[^\circ\text{C}/\text{W}]$ ，参阅图 1-1 b。

## 二、热对流

流体中温度不同的各部分之间，由于相对的宏观运动而把热量从一处带到另一处的现象，称为热对流，所以热对流中热量的传递与流体的流动有密切关系。当然，因为流体中存在温度差，所以表现为微观粒子间能量传递的导热也必然存在。只是不处于

主导地位而已。

工程上，常把具有相对位移的流体与所接触的固体壁面之间的热传递过程称为对流换热。通常，根据流体是否存在相变，而把对流换热区分为无相变和有相变两类，它们都是比较复杂的过程。流体沿平板壁面流动，当流体与壁面温度不同时，它们之间必然会发生热量传递。由于流体的粘性和受壁面摩擦的影响，紧贴壁面处总会形成一薄层，即所谓边界层。对流换热的热阻主要存在于这一薄层内，所以工程应用中常采取各种措施，使薄层减薄或破坏，以提高换热强度。

对流换热过程中热流量的计算，目前依然沿用 1701 年牛顿 (Isaac Newton) 提出的牛顿冷却公式：

$$Q = \alpha A \Delta t = \alpha A (t_w - t_f) \quad \text{W} \quad (1-2) \textcircled{1}$$

式中  $A$  ——与流体接触的壁面面积， $\text{m}^2$ ；

$\alpha$  ——对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$\Delta t$  ——壁面温度  $t_w$  和薄层外流体温度  $t_f$  之差。

如果， $t_f > t_w$ ，则与式(1-2)相反，热量从流体传向壁面，并表示为

$$Q = \alpha A \Delta t = \alpha A (t_f - t_w) \quad \text{W} \quad (1-2a)$$

上二式又可写成

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\alpha A}} = \frac{\Delta t}{R_a} \quad \text{W} \quad (1-2b)$$

图 1-2a 为低温流体沿高温平板作层流流动换热时式(1-2)的示意图。如同式(1-1a)一样，式(1-2b)中的  $R_a [^\circ\text{C}/\text{W}]$  为换热壁面  $A [\text{m}^2]$  的对流热阻，见图 1-2b。

---

① 严格地说，当流体的速度很高时，该式是不甚恰当的(参阅文献[8]和[10]等有关高速流动中的换热)。由于本书所讨论的不属于高速流动，所以采用该式。

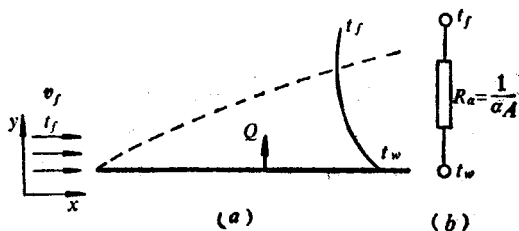


图 1-2 牛顿冷却公式图示

### 三、热辐射

凡温度高于 0[K] 的物体都有向外发射辐射粒子的能力, 辐射粒子所具有的能量称为辐射能。换言之, 凡物体都具有辐射能力。物体转化本身的热能向外发射辐射能的现象称为热辐射。物体的温度愈高, 辐射的能力愈强。温度相同, 但物体的性质和表面情况不同时, 辐射能力也不同。

辐射能力和吸收能力最强的理想辐射体称为黑体, 它向周围空间内所发射的辐射能为

$$Q = \sigma_b A T^4 \quad \text{W} \quad (1-3)$$

式中  $A$ ——物体的辐射表面积,  $\text{m}^2$ ;

$T$ ——表面的绝对温度,  $\text{K}$ ;

$\sigma_b$ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 其值为

$$5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)。$$

式(1-3)为斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 1879 年斯蒂芬(Stefen)利用他人的实验数据发现物体的辐射能与其绝对温度的四次方成比例, 玻尔兹曼(Boltzmann)于 1884 年从热力学原理导出该式①。

当二物体的表面具有不同的温度  $T_{w1}$  和  $T_{w2}$  时, 它们之间由于相互辐射可发生热量传递。这种物体本身不直接接触而传递热

① 文献[11]第五章。

量的现象，称为辐射换热。图 1-3a 表示面积  $A$  相同而平行放置的二黑体平表面，其间有绝对温度等于  $T_f$  的完全透射介质（例如没有辐射和吸收能力的纯净空气等）。

当二表面相隔距离与表面的宽和高相比为甚小，以致任一表面辐射的能量几乎全部投射到另一表面上并被吸收时，利用式 (1-3) 可计算它们之间相互辐射所引起的换热量，亦即表面 1 因辐射而损失的净热量（设  $T_{w1} > T_{w2}$ ）：

$$Q_r = \sigma_b A (T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \quad \text{W} \quad (1-3a)$$

考虑到表面与介质之间还会同时发生对流换热，而对流换热又必须计及时，为了在计算辐射和对流共同作用下的总换热量时使用上的方便，常将式 (1-3a) 写成以下形式：

$$\begin{aligned} Q_r &= \sigma_b A (T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \frac{T_{w1} - T_f}{T_{w1} - T_f} = \alpha_r A (T_{w1} - T_f) \\ &= \frac{\Delta T}{\frac{1}{\alpha_r A}} = \frac{\Delta T}{R_r} \quad \text{W} \end{aligned} \quad (1-3b)$$

式中， $\alpha_r = \frac{\sigma_b (T_{w1}^4 - T_{w2}^4)}{T_{w1} - T_f} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$  称为辐射换热系数，而

$R_r = \frac{T_{w1} - T_f}{\sigma_b A (T_{w1}^4 - T_{w2}^4)} [^\circ\text{C}/\text{W}]$ ，称为辐射面积  $A [\text{m}^2]$  的辐射热阻，见图 1-3 b。

上述由式 (1-1)、(1-2) 和 (1-3 a) 计算的热流量  $Q$ ，各代表总面积  $A$  的热流量。单位面积的热流量称为热通量或热流密度  $q$ ，并为

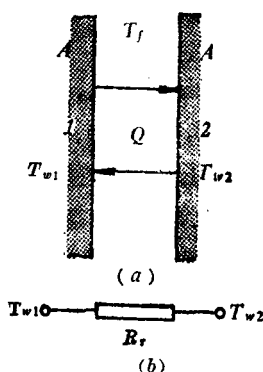


图 1-3 辐射换热公式图示

$$q = \frac{Q}{A} \quad \text{W/m}^2 \quad (1-4)$$

对于单位面积的热阻  $r$ ，有

$$r = AR \quad \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} \quad (1-5)$$

对于以上三种情况，上式中的  $R$  分别代表  $R_l$ 、 $R_a$  和  $R_r$ ，而  $r$  则与之对应，并为  $r_l$ 、 $r_a$  和  $r_r$ 。

上面已把热传递的三种基本方式作了简略的介绍，但是工程中的热传递过程总是比较复杂的，它们常常是几种基本方式同时作用的结果。例如，水冷式内燃机燃烧室内的高温燃气，实际上是以对流和辐射的方式把热量传给燃烧室内壁，再以导热的方式传至外壁，然后又以对流的方式由冷却水把热量从外壁带走。这种高温流体通过固体壁把热量传给低温流体的过程，称为传热过程，它的分析和计算将在第八章中介绍。

**例题 1-1** 厚度为  $0.1 \text{ m}$  的大平板，两侧温差保持  $40^\circ\text{C}$  不变。平板材料为：(a) 导热系数  $\lambda = 50 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$  的铸铁；(b)  $\lambda = 0.13 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$  的石棉。试计算单位面积所通过的热流量（即热流密度）。

**解** 利用式(1-1)和(1-4)，热流密度分别为

$$(a) \quad q = \frac{Q}{A} = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = 50 \times \frac{40}{0.1} = 2 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

$$(b) \quad q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = 0.13 \times \frac{40}{0.1} = 52 \text{ W/m}^2$$

**例题 1-2** 长  $L = 10 \text{ m}$ 、外直径  $D = 150 \text{ mm}$  的蒸汽管道，外壁温度为  $55^\circ\text{C}$ ，水平地通过室温为  $18^\circ\text{C}$  的车间。设管壁与空气间的对流换热系数  $\alpha = 9 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ ，如不考虑辐射的影响，试计算管道外壁对空气的对流换热量。

**解** 管道外壁面积  $A = \pi DL$ 。由牛顿冷却公式(1-2)，

$$Q = \alpha \pi DL(t_w - t_f) = 9 \pi \times 0.15 \times 10 \times (55 - 18) = 1.57 \times 10^4 \text{ W}$$

**例题 1-3** 面积相同的两平行黑体表面，其相隔距离与表面的宽和高相比为甚小，以致通过两表面边缘外射的能量可以忽略。表面温度分别为  $527^\circ\text{C}$  和  $27^\circ\text{C}$ 。试求两表面间单位面积的辐射换热量。

解 利用式(1-3 a)可得

$$q = \frac{Q}{A} = \sigma_0 (T_{w1}^4 - T_{w2}^4) = 5.67 \times 10^{-8} \times [(527 + 273)^4 - (27 + 273)^4] = 2.28 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

### 复习思考题

1-1 热传导、热对流和热辐射这三种热传递基本方式有何异同？并各举出几个实例。

1-2 试阐述导热系数  $\lambda$ 、对流换热系数  $\alpha$  和辐射换热系数  $\alpha_r$  的物理意义。

1-3 何谓热阻？单位面积的热阻和总面积的热阻有何区别？哪个大？

### 习 题

1-1 为测定一种材料的导热系数，用该材料做成厚 5 mm 的大平板（长和宽均大于厚度的 10 倍）。在稳定状态下，保持平板两表面间的温差为 30°C，并测得通过平板的热流密度为 6210 W/m<sup>2</sup>。试确定该材料的导热系数。

1-2 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，其间放置一块导热系数为 0.058 W/(m·°C) 的绝热平板，绝热平板二表面温度保持为 90°C 和 25°C。为使每平方米绝热平板的热损失小于 200 W/m<sup>2</sup>，试计算绝热平板所需的厚度。

1-3 机动车中机油冷却器的外表面积为 0.12 m<sup>2</sup>，表面温度为 65°C。行驶中，温度为 32°C 的空气流过机油冷却器的表面，使表面换热系数提高到 45 W/(m<sup>2</sup>·°C)。试计算机油冷却器散失的热量。

1-4 热平壁周围的环境温度  $t_f = 20^\circ\text{C}$ ，壁面敷设厚  $\delta = 30 \text{ mm}$  的隔热层。隔热材料的导热系数  $\lambda = 0.2 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ ，隔热层和平壁接触的表面温度  $t_{w1} = 230^\circ\text{C}$ ，而其外表面温度  $t_{w2} = 40^\circ\text{C}$ 。试求隔热层外表面与介质之间的对流换热系数  $\alpha$ 。

1-5 寒冷冬季的夜晚，保温良好的屋顶上结成一层霜，其温度为 -18°C。设霜层具有黑体的辐射能力，试计算此种有霜屋顶每单位面积所发射的辐射能。