

641

TK 124  
P49

全美经典学习指导系列

# 传 热 学

(原第二版)

[美] D. 皮茨 L. 西索姆 著

葛新石 等译



A0961585

**科 学 出 版 社**

麦格劳-希尔教育出版集团

2 0 0 2

## 内 容 简 介

本书为《全美经典学习指导系列》之一。

本书是一本优秀的教辅读物,同时也是一本理想的自学教材.主要介绍了导热、对流和辐射等课程内容的相关概念、定律、公式等.全书的重点是相关内容的例题详解和补充习题.269个例题详解可以帮助读者掌握解决问题的方法.带有答案的补充习题可帮助读者自我评估学习状况.

读者对象:热能工程、工程热物理专业的本科生,在热工、化工、机械及建筑等领域工作的科技人员.

本书由葛新石(序言、第一、八、九、十、十一章)、叶宏(第四、五、六、七章)和陈则韶(第二、三、四章、附录)译,葛新石整理了全书.

Donald Pitts, Leighton Sissom: Schaum's Outline of Theory and Problems of Heat Transfer, Second Edition

ISBN:0-07-050207-2

Copyright © 1998 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Authorized translation from the English language edition published by McGraw-Hill Companies, Inc.

All rights reserved.

本书中文简体字版由科学出版社和美国麦格劳-希尔教育出版集团合作出版.未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分.

版权所有,翻印必究.

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售.

图字:01-2001-1766号

图书在版编目(CIP)数据

传热学/(美)皮茨,西索姆著;葛新石等译.一北京:科学出版社,2002  
(全美经典学习指导系列)

ISBN 7-03-009783-1

I. 传… II. ①皮… ②西… ③葛… III. 传热学 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 070141 号

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2002年3月第一版 开本:A4(890×1240)

2002年3月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—4 000

字数:537 000

定价:28.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 序 言

和第一版一样,传热学第二版旨在起到以下的作用:(1)作为一本独立的教材和(2)供修大学传热学课程的低年级或高年级学生用的补充辅助读物.为完成上述双重任务,必须考虑几个因素.一是长期以来一直有争论的有关论述问题的方法,也就是,应着重热能传输速率方程的数学推导还是经验公式的收集和应用?仍然和第一版一样,我们相信在这两种途径之间我们所采用的折中方案是行之有效的.

另一个相当重要的问题是单位制的选取.单位制必须和现在大学里传热学教材中所用的相一致.许多传热学教材(虽然不是大多数)现只用 SI 制(国际单位制).美国机械工程师学会(ASME)从 1974 年 7 月 1 日起要求学会的所有出版物必须用 SI 制.但从英制到 SI 制的缓慢过渡注定会使大多数现在正在学传热学的学生在今后许多年需要同时熟悉这两种单位制.本书中有 208 个有单位的例题和 63 个无单位的例题.SI 制与英制的习题数比率大约是 75/25,而在第一版中英制与 SI 制的习题数比率大约是 60/40.但本书包含了足够的英制单位的例题,以满足只使用英制或想获得使用两种单位制经验的学生和专业人员的需要.为支持这种需要,我们综合了一种非常有用的得到物性参数的方法,大致说来,我们收录了相当全的 SI 制和英制的物性表.英制物性表所在页的底部仍给出单位制的转换因子.

在传热学不断地扩大其实用知识的同时,我们有意识地重视处理本学科每一个主要分支专题的很传统和常用的方法.在许多领域,我们注意到那些新的经验关系式所给出的结果与原有的经验关系式给出的几乎是相同的.凡是适用的地方我们采用简单一些的方法.

和第一版一样,我们仍然采用原先的方法,每一章从叙述传热方式或需要讨论的相关专题开始.然后是对主题作简要的基于数学和(或)实验的论述.接下来很快地将重点转向例题,后者正是所讲述的核心.要指出的是相关专题中包括了流体力学(第 5 章).虽然大多数传热学教材并无此章,但许多没有流体力学的基础的读者也将使用本书.流体力学对理解第 6、第 7 和第 8 章的内容及第 10 章的一些内容确实是重要和必需的.

总起来说,对每一章我们的做法是:(i)对主要的子专题作简明的论述,着重理论、分析和对此专题重要的基于实验的认识;(ii)提出一组数量大的例题,有理论的,有实用意义的,包括在许多题中不同的单位制混在一起而同时需要考虑单位的统一.最后,(iii)列出一组待求解的补充习题(一般有答案),以增多自我评估的机会.

我们相信传热学第二版能满足本领域的在职业务人员和学生希望自学教材能有所改进的愿望及作为辅助读物适应大学低年级和高年级学生的需要.祝每位读者能从学习本书的过程中感受到一种满足.

我们对麦格劳-希尔公司的 M.L.贾尔斯女士对持续支持出版此书的努力表示感谢,也感谢詹宁斯女士打印了书稿.

D. R. 皮茨  
田纳西州克诺斯维尔  
L. E. 西索姆  
田纳西州库克维尔

# 目 录

<b>第一章 导论</b> .....	( 1 )
1.1 导热 .....	( 1 )
1.2 对流 .....	( 1 )
1.3 辐射 .....	( 2 )
1.4 材料的性质 .....	( 2 )
1.5 单位 .....	( 4 )
例题详解 .....	( 5 )
补充习题 .....	( 9 )
<b>第二章 一维稳定导热</b> .....	( 11 )
2.1 引言 .....	( 11 )
2.2 通用导热能量方程 .....	( 11 )
2.3 平板:定表面温度 .....	( 12 )
2.4 径向系统:定表面温度 .....	( 13 )
2.5 平板:变导热系数 .....	( 13 )
2.6 含内热源系统 .....	( 14 )
2.7 对流边界条件 .....	( 16 )
2.8 肋片传热 .....	( 18 )
例题详解 .....	( 22 )
补充习题 .....	( 40 )
<b>第三章 多维稳定导热</b> .....	( 42 )
3.1 引言 .....	( 42 )
3.2 解析法 .....	( 42 )
3.3 导热形状因子 .....	( 44 )
3.4 数值解 .....	( 47 )
例题详解 .....	( 54 )
补充习题 .....	( 67 )
<b>第四章 不稳定导热</b> .....	( 69 )
4.1 引言 .....	( 69 )
4.2 毕奥数与傅里叶数 .....	( 69 )
4.3 集总分析方法 .....	( 70 )
4.4 一维系统:固定表面温度 .....	( 70 )
4.5 一维系统:对流边界条件 .....	( 72 )
4.6 图解法:对流边界条件 .....	( 73 )
4.7 多维系统 .....	( 78 )
4.8 数值分析 .....	( 78 )
例题详解 .....	( 82 )
补充习题 .....	( 97 )
<b>第五章 流体力学</b> .....	( 98 )
5.1 流体静力学 .....	( 98 )
5.2 流体动力学 .....	( 99 )
5.3 质量守恒 .....	( 101 )
5.4 沿流线的运动方程 .....	( 102 )

5.5 能量守恒	(102)
例题详解	(103)
补充习题	(113)
<b>第六章 强迫对流:层流</b>	<b>(115)</b>
6.1 水力(等温)边界层:平板	(115)
6.2 热边界层:平板	(119)
6.3 管内等温流动	(121)
6.4 管内流动换热	(123)
6.5 估算物性所用的温度	(126)
例题详解	(126)
补充习题	(145)
<b>第七章 强迫对流:湍流</b>	<b>(146)</b>
7.1 运动方程	(146)
7.2 传热与表面摩擦:雷诺比拟	(148)
7.3 沿平板流动	(149)
7.4 管内流动	(151)
7.5 绕过物体的外部流动	(155)
7.6 液态金属传热	(159)
例题详解	(160)
补充习题	(174)
<b>第八章 自然对流</b>	<b>(175)</b>
8.1 垂直平板	(175)
8.2 经验关系式:等温表面	(180)
8.3 封闭空间内的自然对流	(181)
8.4 混合的自然对流和强迫对流	(184)
8.5 新的关系式	(185)
例题详解	(186)
补充习题	(193)
<b>第九章 沸腾和凝结</b>	<b>(194)</b>
9.1 沸腾现象	(194)
9.2 池内沸腾	(195)
9.3 流动(对流)沸腾	(197)
9.4 凝结	(199)
例题详解	(202)
补充习题	(211)
<b>第十章 热交换器</b>	<b>(213)</b>
10.1 热交换器类型	(213)
10.2 换热计算	(214)
10.3 热交换器有效度(NTU法)	(218)
10.4 污垢系数	(220)
例题详解	(221)
补充习题	(229)
<b>第十一章 辐射</b>	<b>(230)</b>
11.1 引言	(230)
11.2 性质和定义	(230)

---

11.3 黑体辐射 .....	( 232 )
11.4 实际表面和灰体 .....	( 235 )
11.5 辐射换热:黑表面 .....	( 236 )
11.6 辐射换热:灰表面 .....	( 243 )
11.7 防辐射屏 .....	( 246 )
11.8 气体和蒸汽辐射 .....	( 248 )
例题详解 .....	( 251 )
补充习题 .....	( 262 )
<b>附录</b> .....	<b>( 263 )</b>

# 第一章 导 论

经常被称为热科学的工程领域包括热力学和传热学. 传热学的作用是利用可以预测能量传递速率的一些定律去补充热力学分析, 因后者只讨论在平衡状态下的系统. 这些附加的定律是以三种基本的传热方式为基础的, 即导热、对流和辐射.

## 1.1 导热

均匀物质内存在温度梯度时会导致其内部能量传递, 能量传递的速率可由下式计算:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.1)$$

式中  $\partial T/\partial n$  为在面积  $A$  的法线方向的温度梯度. 导热系数  $k$  是由实验得到的所论物质的常数, 它与温度和压力等其他参数有关, 将在 1.4 节讨论.  $k$  的单位为  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ .

式(1.1)为傅里叶(Fourier)定律, 式中负号是基于热力学第二定律的要求: 由温度梯度引起的热能传递的方向必须是从热区至冷区.

若物质内部的温度分布是线性的(图 1-1), 就可由下式代替由偏导数表示的温度梯度:

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (1.2)$$

在  $k$  为定值的均匀物质的稳态传热过程中, 这种线性关系总是存在的.

若包括表面在内的物体中每个点的温度不随时间变化, 热能的传递就是稳态过程. 如果温度随时间变化, 能量或是在物体中贮存, 或是从物体中传走. 能量贮存的速率是

$$q_{\text{stored}} = mc_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.3)$$

式中  $m$  是体积  $V$  和密度  $\rho$  的乘积.

## 1.2 对流

当固体与和它温度不同的运动流体相接触时, 流体将从物体带走能量或通过对流将能量传给物体.

若流体的上游温度为  $T_\infty$ , 固体的表面温度为  $T_s$ , 单位时间的传热量由下式计算:

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (1.4)$$

上式就是牛顿(Newton)冷却定律. 此式定义了对流换热系数  $h$ , 是单位时间单位面积的换热量与总温差之间关系的比例常数.  $h$  的单位为  $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ . 重要的是必须记住: 在固体-流体的边界, 基本的能量交换是导热, 然后通过流体的流动以对流方式将这些能量带走. 比较式(1.1)和(1.4)对  $y = n$  的情况可得

$$hA(T_s - T_\infty) = -kA \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \quad (1.5)$$

式中温度梯度的下标表示: 要计算的是在固体表面的流体内的温度梯度\*.

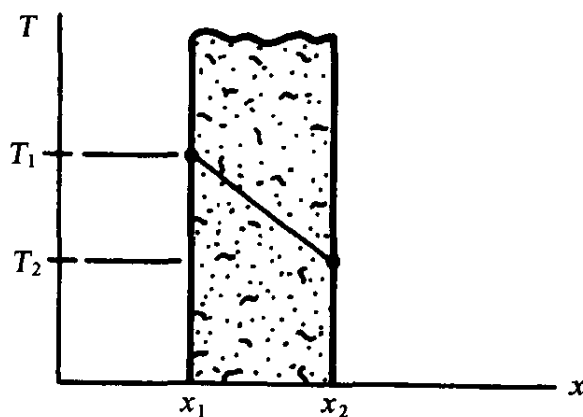


图 1-1

\* 指在固体表面的流体边界层的温度梯度,  $k$  为流体的导热系数. ——译注

### 1.3 辐射

第三种传热方式是基于电磁波的传播,这种传播能在真空中进行,也能在介质中进行.实验结果表明,辐射传热与绝对温度的4次方成正比,而导热和对流换热与线性温差成正比.重要的斯忒藩-玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)定律的表示式为

$$q = \sigma AT^4 \quad (1.6)$$

式中  $T$  为绝对温度.常数  $\sigma$  与表面、介质及温度无关;其值为  $5.6697 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  或  $0.1714 \times 10^{-8} \text{Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4$ .理想的发射体,或称黑体,所发出的辐射能按式(1.6)确定.所有其他表面发出的辐射能都少于黑体的辐射能,许多表面(灰体, gray bodies)发出的辐射能可用下式计算:

$$q = \epsilon \sigma AT^4 \quad (1.7)$$

式中  $\epsilon$  为表面的发射率,其值在 0 与 1 之间.

### 1.4 材料的性质

#### 固体的导热系数

许多纯金属和合金的导热系数列于表 B-1(SI)和 B-1(Engl.).已知其成分的固态金属的导热系数主要只与温度有关.一般来说,纯金属的  $k$  随温度之增高而减小;合金成分则正好与此相反.金属的导热系数在相当大的温度范围内通常可由下式计算:

$$k = k_0(1 + b\theta + c\theta^2) \quad (1.8)$$

式中  $\theta = T - T_\infty$ ,  $k_0$  为在参考温度  $T_{\text{ref}}$  时的导热系数.对许多工程应用来说,温度范围相对较小,为几百度,因此,可近似为

$$k = k_0(1 + b\theta) \quad (1.9)$$

非均匀材料的导热系数通常明显地与表观体积密度(apparent bulk density)——物体的质量与其所占有的体积之比值——有关.这个体积指包括了空隙的总体积,如物体全部界面内的一些气孔.导热系数也随温度而变.一般来说,非均匀物体的  $k$  随温度的增高和表观体积密度的增大而增大.表 B-2(SI)和 B-2(Engl.)收集了一些非均匀材料的导热系数数据.

#### 液体的导热系数

表 B-3(SI)和 B-3(Engl.)列出了一些工程上重要的液体的导热系数数据.对这些液体来说,  $k$  通常与温度有关,但对压力的变化不敏感.表中所列的是饱和状态下的数据,即对于给定的流体,其压力对应于给定温度的饱和压力.大多数液体的导热系数随温度之增高而减小.水则例外,一直到  $150^\circ\text{C}$  其  $k$  都是随温度之增高而增大的.除了所谓液态金属,在所有常见的液体中水的导热系数最大.

#### 气体的导热系数

气体的导热系数随温度增高而增大,但在大气压附近基本上与压力无关.表 B-4(SI)和 B-4(Engl.)给出了一些气体在一个大气压下的  $k$  的数据.对于很高的压力(即临界压力的量级或更高),压力的影响可能会很显著.

空气和水蒸气是两种最重要的气体(在本章中不去区别气体和蒸汽之间的差异).表 B-4(SI)中列出的一个大气压下的空气的值作为大多数工程应用适用于下述范围:(i)  $0^\circ\text{C} \leq T \leq 1650^\circ\text{C}$  和  $1\text{atm} \leq p \leq 100\text{atm}$ ; (ii)  $-75^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$  和  $1\text{atm} \leq p \leq 10\text{atm}$ .

水蒸气的导热系数显示出与压力有很大的关系.作为近似计算,表 B-4(SI)和 B-4(Engl.)给出的一个大气压的数据可与图 B-3 一起使用.对其他气体,应借助内容更丰富的物性表.



### 密度

密度的定义是单位体积的质量. 本书中所讨论的所有系统对有物理意义的统计平均来说是足够大的, 也即我们只讨论连续区 (continuum), 在这个区域内, 物质是连续分布的. 对于密度不同的系统, 我们定义在一个点处 (特定位置) 密度 (density at a point) 为

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V_c} \frac{\partial m}{\partial V} \quad (1.10)$$

式中  $\delta V_c$  是连续区有物理意义的最小的体积. 大多数固体和液体的密度只是稍微随温度变化, 而在 100 个大气压以下可忽略压力的影响. 固体和液体的密度数据列于表 B-1, B-2 和 B-3, 包括 SI 制和英国工程制. 但是气体的密度不仅与压力有很大的关系, 还随温度而变. 在缺乏特定气体的数据时, 表 B-4 的一个大气压下的密度可利用理想气体定律按下式处理:

$$\rho = \rho_1 \left( \frac{p}{p_1} \right) \quad (1.11)$$

密度的倒数是比体积 (specific volume)

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.12)$$

而比重是所论物质的密度与纯水在 4°C 和一个大气压下 (760mmHg) 水的密度之比值. 因此,

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1.13)$$

式中  $S$  是比重.

### 比热容

比热容 (specific heat) 是度量物体贮存的能量随温度变化的一个物性. 由热学可知, 两个重要的比热容是

$$\text{定容比热容: } c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v \quad (1.14)$$

式中  $u$  为单位质量的内能\*

$$\text{定压比热容: } c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \quad (1.15)$$

$h$  为比焓.

一般来说,  $u$  和  $h$  分别是两个变量的函数: 温度和比容及温度和压力. 对于不可压缩的物体, 也即固体和液体,  $c_p$  和  $c_v$  在数值上是相同的. 但对于气体, 这两个比热的差别很大.  $c_v$  和  $c_p$  的单位为  $\text{J/kg} \cdot \text{K}$  或  $\text{Btu/lb}_m \cdot \text{F}$ .

对固体, 比热容只是稍微随温度有所变化, 受压力的影响更小, 在相当大的温度和压力范围内, 采用表 B-1 (SI), B-1 (Engl.) 和 B-2 (SI), B-2 (Engl.) 中有限的  $c_p$  数据通常是容许的.

和固体相比, 压力对液体的比热容的影响甚至更小, 但温度对它有些影响.

一些液体的数据列于表 B-3 (SI), B-3 (Engl.).

气体的比热容显示出与温度有很大的关系. 除非接近临界状态, 压力的影响很小, 而随着温度的增高, 压力的影响减小. 对大多数工程计算, 当压力低于  $1.4 \times 10^6 \text{Pa}$  时可以用表 B-4 (SI) 中的数据.

### 热扩散率 (系数)

热扩散率 (系数) (thermal diffusivity)  $\alpha$  是上面已讨论过的几个物性的组合, 这是一个很有用的物性, 其定义为

\* 也称比热力学能或比内能. ——译注

$$\alpha \equiv \frac{k}{\rho c_p} \quad (1.16)$$

由上式可知,  $\alpha$  是材料的导热系数与热容的比值. 它的单位为  $\text{m}^2/\text{s}$  或  $\text{ft}^2/\text{h}$ . 在  $\alpha$  高的物质中热能的扩散很快, 在  $\alpha$  低的物质中热能的扩散缓慢.

附录 B 的一些表用 SI 制和英制给出了热扩散率的数据. 要指出的是, 温度和压力对气体的  $\alpha$  有很大的影响; 表中所列出的气体数据只适用于一个大气压, 并且它们只用于特定的温度.

### 黏度

涉及实际流体也即有黏度的最简单的流动状态是沿平板的层流(图 1-2). 对这种流动模式, 各流体层做平行的滑动. 紧贴壁面的分子层是静止的. 离开壁面的下一层沿着静止层滑动, 由于层与层之间有摩擦剪切力, 它的运动受阻和速度减小. 继续向外到某一距离时, 由壁面引起的使流体流动减缓的现象将不明显.

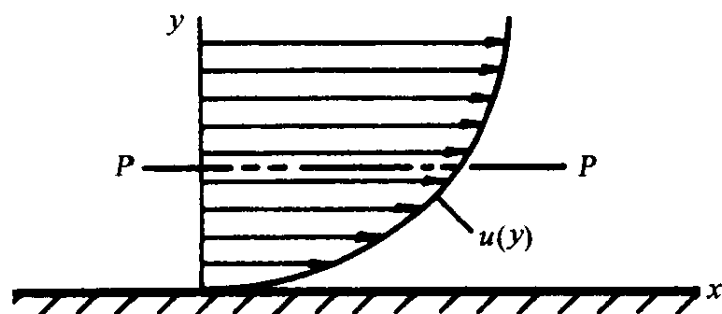


图 1-2

讨论平面  $P-P$ . 在此平面下方并紧靠它的流体层的速度为  $u - \delta u$ , 而在此平面上方并紧靠它的流体层的速度为  $u + \delta u$ .  $u$  是  $P-P$  平面所在的  $y$  坐标处流体沿  $x$  方向的速度. 两个相邻流体层之间的速度差产生一个切应力  $\tau$ . 牛顿认为这个切应力和垂直于平面的速度成正比:

$$\tau = \mu_f \frac{du}{dy} \quad (1.17)$$

比例系数称动力黏度系数 (coefficient of dynamic viscosity), 或更简单地称动力黏度或绝对黏度.

黏度单位由式(1.17)可知,  $\mu_f$  的单位为  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  或  $\text{lb}_f\cdot\text{s}/\text{ft}^2$ . 在许多应用中以质量单位来表示动力黏度要比以力为单位来表示使用方便. 本书中将以  $\mu_m$  表示基于质量的黏度系数,  $\mu_m$  的单位为  $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ .  $\mu_m$  和  $\mu_f$  在数值上相等. 在英国工程制中,  $\mu_m$  的单位是  $\text{lb}_m/\text{ft}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_m = (32.17)\mu_f$ . 当单位与所叙述的内容无关紧要时将简单地以  $\mu$  表示动力黏度.

对于气体和液体, 动力黏度与温度之间的关系很明显, 但压力对动力黏度的影响相当小. 表 B-3(SI), B-3(Engl.) 和 B-4(SI), B-4(Engl.) 列出了动力黏度数据.

像气体的导热系数一样, 当压力接近临界值或更高时, 气体的动力黏度将随压力而变化. 当没有在高压下特定气体的黏度数据时可以利用图 B-4 的通用曲线. 对于空气, 对许多工程问题来说其  $\mu$  随压力的变化可不于考虑; 特别是利用通用曲线会使黏度值矫枉过正.

动力黏度与密度之比值称为运动黏度(kinetic viscosity  $\nu$ ):

$$\nu = \frac{\mu_m}{\rho} \quad (1.18)$$

$\nu$  的单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ .

注意: 与动力黏度不同, 运动黏度与压力的关系很大(因为压力对密度的影响很大). 表 B-4(SI), B-4(Engl.) 给出的只是 1 个大气压(atm)下的数据; 用于高压时必须进行修正(如果要用的话).

### 1.5' 单位

表 1-1 汇总了通用的单位制. 表中最后一列给出了牛顿第二运动定律中的比例常数  $g_c$ :

$$F = \frac{1}{g_c} ma \quad (1.19)$$

本书只使用国际工程单位制和英制工程单位制. 为方便起见, 附录 A 中给出了由非国际

单位制转为国际单位制的转换因子表。

表 1-1

单位制	定义单位	导出单位	比例常数, $g_c$
绝对公制 (Metric Absolute)	质量, g 长度, cm 时间, s 温度, K	力: 达因(dyne) = $\frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}$	$1 \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{dyne} \cdot \text{s}^2}$
绝对英制 (English Absolute)	质量, lb 长度, ft 时间, s 温度, °R	力: 磅达(poundal) = $\frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{s}^2}$	$1 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{磅达} \cdot \text{s}^2}$
英技术制 (British Technical)	力, lb <sub>f</sub> 长度, ft 时间, s 温度, °R	质量: 斯勒格(slug) $= \frac{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2}{\text{ft}}$	$1 \frac{\text{slug} \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2}$
英工程制 (English Engineering)	力, lb <sub>f</sub> 质量, lb <sub>m</sub> 长度, ft 时间, s 温度, °R	无	$32.17 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2}$
国际单位制(SI)	长度, m 质量, kg 时间, s 温度, K	力: $\text{N} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$	$1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}$

### 例题详解

- 1.1 求通过 4cm 厚均质板单位面积的稳态传热速率, 板的两个表面保持 38°C 和 21°C 均匀温度. 板材的导热系数为 0.19W/(m·K).

**解** 此题的物理示意图见 1-3, 对稳定态, 联立式(1.1)和(1.2)可得

$$\begin{aligned} \frac{q}{A} &= -k \left( \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \right) = -0.19 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \left( \frac{21 - 38}{0.04} \right) \frac{\text{°C}}{\text{m}} \\ &= +80.75 \text{W/m}^2 \end{aligned}$$

- 1.2 对一个特定问题, 已知热流体在一个冷表面上流过时的强迫对流换热系数为 225W/(m<sup>2</sup>·°C). 冷表面上游的流体温度为 120°C, 冷表面保持在 10°C, 求由流体至表面的单位面积的传热速率.

**解**

$$q = hA(T_\infty - T_s), \quad \frac{q}{A} = 225 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C}) [(120 - 10) \text{°C}] = 24750 \text{W/m}^2$$

- 1.3 太阳落山后站在靠近砖墙的人可以感受到辐射能. 这类墙的表面温度通常在 44°C 左右, 典型的砖的发射率约为 0.92. 在此温度下单位面积的辐射热流量是多少?

**解** 利用式(1.7), 有

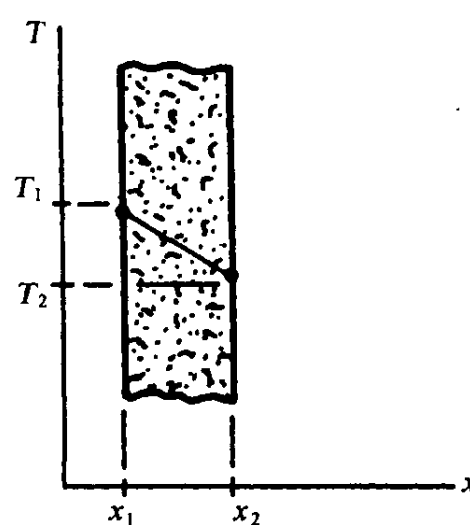


图 1-3

$$\begin{aligned}\frac{q}{A} &= \epsilon\sigma T^4 = (0.92)(5.6697 \times 10^{-8})\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)(44 + 273)^4\text{K}^4 \\ &= (0.92)(5.6697 \times 10^{-8})(317)^4 = 527\text{W}/\text{m}^2\end{aligned}$$

注意:在辐射能的所有计算中都必须用绝对温度.另外, $\sigma$ 通常可以近似为 $5.67 \times 10^{-8}\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ .

1.4 求氢气在  $90^\circ\text{R}(50\text{K})$  和  $38.4\text{atm}$  时的动力黏度  $\mu_m$  和运动速度  $\nu$ .

解 由表 B-4(SI)查得在  $1\text{atm}$  下  $50\text{K}$  时氢气的动力黏度  $\mu_{m_1}$  和密度  $\rho_1$  分别为

$$\mu_{m_1} = 2.516 \times 10^{-6}\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}), \quad \rho_1 = 0.50955\text{kg}/\text{m}^3$$

由表 B-5 气体的临界参数和分子量知,氢气的临界参数为  $P_c = 12.8\text{atm}$ ;  $T_c = 33.3\text{K}$ ,以临界状态为基准点时本题所论状态的无量纲压力  $P_r$  和无量纲温度  $T_r$  分别为

$$P_r = \frac{38.4}{12.8} = 3.0, \quad T_r = \frac{50}{33.3} = 1.50$$

由图 B-4 查得  $\mu_m/\mu_{m_1} \approx 1.55$ , 因此

$$\mu_m \approx 1.55 \times 2.516 \times 10^{-6}\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) = 3.70 \times 10^{-6}\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$$

在高压( $P_r = 30$ )时,为计算  $\rho$  和  $\nu$  必须对理想气体定律进行修正.对实际气体我们可以将气体状态方程写成  $Pv = ZRT$ , 式中  $Z$  为压缩因子(compressibility factor),  $R = \mathcal{R}/M$  为通用气体常数与分子量之比.由此可得

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \frac{v_1}{v} = \frac{p/Z}{p_1/Z_1}$$

对本题,标准的热力学性质表给出  $Z_1 \approx 0.81$ ,  $Z_1 \approx 1$ . 因此:

$$\frac{\rho}{0.50955\text{kg}/\text{m}^3} \approx \frac{38.4/0.81}{1/1}$$

$$\rho \approx 24.156\text{kg}/\text{m}^3, \quad \nu = \frac{\mu_m}{\rho} = \frac{3.76 \times 10^{-6}\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}}{24.156\text{kg}/\text{m}^3} = 1.56 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$$

一般来说,当压力对黏度  $\mu$  或导热系数  $k$  影响很大时,偏离理想气体的性质将会对  $\rho$  值有很大影响.

1.5 夏天,停放的汽车其表面的温度通常平均达  $40 \sim 50^\circ\text{C}$ . 设为  $45^\circ\text{C}$ , 表面发射率为  $0.90$ , 求车子顶面单位面积发射的辐射功率.

解 由表 B-4(SI)查得在  $1\text{atm}$  下  $45^\circ\text{C}$  时汽车表面的发射率  $\epsilon = 0.90$ .

$$\frac{q}{A} = \epsilon\sigma T^4 = (0.90)(5.67 \times 10^{-8})\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)(318\text{K})^4 = 522\text{W}/\text{m}^2$$

注意:计算辐射能时都必须用绝对温度.

1.6 求氮气在  $27^\circ\text{C}$  和  $136\text{atm}$  下的  $\mu$  (这是通常的商用瓶压力).

解 由表 B-5 查得氮气的  $p_c = 33.5\text{atm}$ ,  $T_c = 126\text{K}$ . 因此,

$$P_r = \frac{136\text{atm}}{33.5\text{atm}} = 4.06, \quad T_r = \frac{(27 + 273.15)\text{K}}{126\text{K}} = 2.38$$

由图 B-4, 查得  $\mu/\mu_1 = 1.25$ , 再由表 B-4(SI)查得

$$\mu_1 = 11.99 \times 10^{-6} \times 1.488164 = 17.84 \times 10^{-6}\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$$

$$\mu = 1.25 \times 17.84 \times 10^{-6}\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} = 22.3 \times 10^{-6}\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$$

1.7 估算水蒸气在  $1283^\circ\text{R}(713\text{K})$  和  $130\text{atm}(13.7 \times 10^6 \text{帕})$  时的导热系数.

解 由表 B-4(SI)利用内插法得在  $1\text{atm}$  和  $713\text{K}$  时的导热系数为  $k_1 = 0.0516\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

利用确定水蒸气导热系数比  $k/k_1$  的图 B-3, 知

$$P_r = p/p_c = \frac{130\text{atm}}{218.3\text{atm}} = 0.5955 = 0.60, \quad T_r = T/T_c = \frac{700\text{K}}{647.4\text{K}} = 1.10$$

由图 B-3 查得  $k/k_1 = 1.3$ , 因此  $k = 1.3 \times (0.0516)\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}) = 0.0671\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

1.8 估算在  $712\text{K}$  和  $13.272\text{MPa}$  状态下水蒸气(过热蒸气)的导热系数.

解 由表 B-4(SI)一个大气压下气体的物性表,可查得  $700\text{K}$  和  $750\text{K}$  时水蒸气的导热系数.利用线性内插,可得  $712\text{K}$  时的导热系数为

$$k_1 = 0.0516 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

由表 B-3, 对水蒸气, 知

$$P_r = \frac{p}{p_c} = \frac{13.272 \text{ MPa}}{22.12 \text{ MPa}} = 0.6$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{712 \text{ K}}{647.4 \text{ K}} = 1.0998 \approx 1.1$$

利用  $P_r$  和  $T_r$ , 可由图 B-3 查得

$$\frac{k}{k_1} = 1.3$$

所以

$$k = (1.3)(k_1) = (1.3)(0.0516) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) = 0.0671 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

### 1.9 试近似计算氮气在 $27^\circ\text{C}$ 和 $13.79 \times 10^6 \text{ Pa}$ (通常的商用气瓶的温度和压力) 下的密度.

**解** 由表 B-3(SI), 在 1 个大气压和  $27^\circ\text{C}$  (300K) 下

$$\rho_1 = 1.421 \text{ kg}/\text{m}^3$$

利用式(1.11),  $\rho_1 = 1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,

$$\rho = \rho_1 \left( \frac{p}{p_1} \right) = 1.421 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left( \frac{13.79 \times 10^6}{1.013 \times 10^5} \right)$$

$$\rho = 155.5 \text{ kg}/\text{m}^3$$

- 1.10** 重  $17.79 \text{ N}$  的空心圆柱沿一根竖杆滑动, 竖杆上涂有一层很薄的润滑油 (见图 1-4(a)) 滑块端部的稳定速度为  $0.9144 \text{ m}/\text{s}$ , 滑块内孔的直径为  $0.0254 \text{ m}$ , 滑块与竖杆的径向间隙为  $2.54 \times 10^{-5} \text{ m}$  ( $0.001 \text{ in}$ ), 滑块的长度为  $0.127 \text{ m}$ . 除了滑块内表面的黏性切应力, 忽略所有阻力, 并设润滑油层内的速度分布是线性的, 试估算润滑油的动力黏度. 将所得结果与物性表中  $70^\circ\text{C}$  的机油的动力黏度相比较.

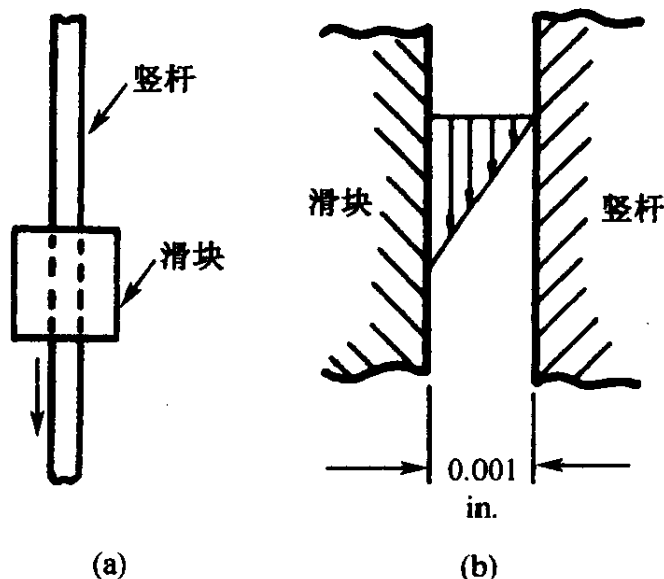


图 1-4

**解** 由于径向间隙很小, 所以图 1-4(b) 所示的线性速度分布将是一种合理的一级近似. 在竖杆表面和滑块表面的润滑油的速度分别为 0 和  $0.9144 \text{ m}/\text{s}$ , 因此

$$\frac{du}{dy} = \frac{\Delta u}{\Delta r} = \frac{(0.9144 - 0) \text{ m}/\text{s}}{2.54 \times 10^{-5} \text{ m}} = 3.6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$$

根据滑块的自由落体图, 所有向下的力就是重力, 所有向上的力是内表面积和切应力之乘积. 因此,

$$\tau A = 17.79 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{17.79 \text{ N}}{\pi(0.0254 \text{ m})(0.127 \text{ m})} = 1755.4 \text{ N}/\text{m}^2$$

由式(1.17)

$$\tau = \mu_f \frac{du}{dy} = 1755.4 \text{ N}/\text{m}^2$$

$$\mu_f = \frac{1755.4 \text{ N}/\text{m}^2}{du/dy} = \frac{(1755.4 \text{ N}/\text{m}^2) \text{ s}}{3.6 \times 10^4} = 48.76 \times 10^{-3} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

由于  $\mu_f = \rho\nu$ , 由表 B-3(SI) 利用内插法查  $70^\circ\text{C}$  下机油的  $\rho, \nu$ , 可按上式算得

$$\mu_f = 5.21 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

与估算结果相当接近.

### 1.11 $20^\circ\text{C}$ 时一种压力表液体的比重 $S = 2.95$ , 确定这种液体的密度.

解 在 1atm 和 4℃ 下纯水的密度为  $\rho_w \approx 1000\text{kg/m}^3$ . 据比重定义式(1.13), 得这种液体的  $\rho = 2950\text{kg/m}^3$ .

- 1.12 确定氦气在 260℃ 和  $8.274 \times 10^5$  帕(约为 8.17atm)下的热扩散系数. 可假定压力对导热系数无影响.

解 由表 B-4(SI), 通过插值,

$$k = 0.2109\text{W/mK}, \quad \rho_1 = 0.0924\text{kg/m}^3, \quad c_p = 5.2 \times 10^3 \frac{1}{\text{kgK}}$$

由式(1.11)

$$\rho = \rho_1 \left( \frac{p}{p_1} \right) = 0.0924 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left( \frac{8.274 \times 10^5 \text{Pa}}{1.01325 \times 10^5 \text{Pa}} \right) = 0.754\text{kg/m}^3$$

因此, 由式(1.16)

$$a = \frac{k}{\rho c_p} = \left( 0.2109 \frac{\text{J/s}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right) \left( \frac{\text{m}^3}{0.754\text{kg}} \right) \left( \frac{\text{kgK}}{5.2 \times 10^3 \text{J}} \right) = 5.383 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$$

- 1.13 宇航员在探测月球表面时用的照相机在地球上的重量(wt)为 8.8964N. 月球的平均重力加速度为 1/6 地球的重力加速度. 求在月球上照相机的重量.

解 由式(1.19)

$$m = \frac{\text{wt} \cdot g_c}{a},$$

$a$  为地球的重力加速度, 为  $9.807\text{m/s}^2$ , 由表 1-1,  $g_c = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}$ , 而  $\text{wt} = 8.964\text{N}$ , 因此, 有

$$m = \frac{8.964\text{N} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}}{9.807\text{m/s}^2} = 0.907\text{kg}$$

在月球上时,  $a = \frac{1}{6}(9.807)\text{m/s}^2 = 1.6345\text{m/s}^2$ , 所以, 在月球上照相机的重量为

$$\text{wt} = \frac{1}{g_c} \cdot ma = \frac{0.907\text{kg} \cdot 1.6345\text{m/s}^2}{1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{Ns}^2} = 1.48\text{N}$$

- 1.14 求空气在 450K 和  $1.00 \times 10^6$ Pa 时的运动黏度.

解 由表 B-4(SI), 在 450K 和 1atm 时,

$$\mu_{m_1} = 2.484 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}, \quad \rho_1 = 0.783\text{kg/m}^3$$

利用式(1.13)

$$\rho = \rho_1 \left( \frac{p}{p_1} \right) = 0.783 \left( \frac{1.00 \times 10^6}{1.013 \times 10^5} \right) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 7.729\text{kg/m}^3$$

由式(1.18)

$$\nu = \frac{2.484 \times 10^{-5} \text{kg/m} \cdot \text{s}}{7.729\text{kg/m}^3} = 3.212 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$$

核查:  $p/p_c = 9.87$ ,  $T/T_c = 3.40$ , 因此, 由图 B-4

$$\mu/\mu_1 \approx 1.0$$

- 1.15 确定氢气在 50K 和  $11.67 \times 10^6$ Pa 下的动力黏度.

解 由表 B-4(SI), 在 50K = -223℃ 时

$$\mu_{m_1} = 2.516 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}, \quad \rho_1 = 0.5095 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

表 B-5, 查得氢气的临界参数

$$p_c = 12.8\text{atm}, \quad T_c = 33.3\text{K}$$

由于  $1\text{atm} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ , 所以

$$p = \frac{11.67 \times 10^6 \text{ Pa}}{1.013 \times 10^5 \text{ Pa/atm}} = 115.2 \text{ atm}$$

$$P_r = \frac{p}{p_c} = \frac{115.2}{12.8} = 9.0, \quad T_r = \frac{50}{33.3} = 1.50$$

由图 B-4,  $\mu_m/\mu_{m_1} \approx 3.0$ , 所以  $\mu_m \approx 3.0 \left( 2.516 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right) = 7.55 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$

- 1.16 一套拟用的设备在地球上的重量为 132N, 在一个模拟的重力为地球重力 1/5 的空间平台上, 这套设备的重量是多少?

解 

$$m = \frac{wt}{a} = \frac{132\text{N}}{9.80\text{m/s}^2} = 13.47\text{N/m} \cdot \text{s}^{-2}$$


在空间平台

$$F = ma = \left( \frac{13.47\text{N}}{\text{m/s}^2} \right) \left( \frac{9.80\text{m}}{5\text{s}^2} \right) = 26.4\text{N}$$

- 1.17 (略)

- 1.18 (略)

- 1.19 估算水蒸气在 65atm 和 575K 下的导热系数.

解  压力和温度参数已非常高, 在此压力下的  $k$  肯定不同于 1atm 时的值. 利用图 B-3, 由

$$T_c = 647.4\text{K}, \quad T_r = \frac{575\text{K}}{647\text{K}} = 0.89, \quad P_r = \frac{65\text{atm}}{218.3\text{atm}} \approx 0.30$$


由图 B-3 可查得  $k/k_1$

$$k/k_1 = 1.29$$

$k_1$  为 1atm 时的值. 由表 B-4(SI), 在  $P=1\text{atm}$  和  $T=575\text{K}$  下, 由线性插值得  $k_1=0.04005\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 因此

$$k = 1.29(0.0401)\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}) = 0.0517\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

- 1.20 为了解水蒸气的  $k$  对压力的敏感程度, 对  $p=87.5\text{atm}$  时, 再算一下 1.19 题.


解  由于温度仍是 575K, 所以

$$T_r = 0.89; \text{ 而 } P_r = \frac{87.5}{218.3} \approx 0.4$$

由图 B-3,  $k/k_1 \approx 1.5$ , 利用题 1.19 的  $k_1$  的值, 得

$$k \approx 1.5(0.0401) \approx 0.0601\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

- 1.21 一电子仪器机箱内的空气温度为  $50^\circ\text{C}$ . 箱内有一芯片, 它是一个功率为  $3 \times 10^{-3}\text{W}$  的内热源. 芯片两侧表面的面积为  $0.5\text{cm} \times 1.0\text{cm}$ , 空气流经表面积的对流换热系数  $h$  为  $9\text{W}/\text{m}^2\text{C}$  (见图 1-5). 在忽略辐射和边缘换热的情况下试求芯片的表面温度.

解  由式(1.5), 换热速率为  $q = hA_s(T_s - T_\infty)$

在本题中已知  $q = 3 \times 10^{-3}\text{W}$ , 而两侧表面的总面积为

$$A_s = 2 \left( \frac{0.5}{100}\text{m} \right) \left( \frac{1.0}{100}\text{m} \right) = 2(0.5\text{m}^2) \times 10^{-4} = 10^{-4}\text{m}^2$$

$$T_s = T_\infty + \frac{q}{hA_s} = 50^\circ\text{C} + \frac{3 \times 10^{-3}\text{W}}{9\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}) \times 10^{-4}\text{m}^2}$$

因此,

$$T_s = 50^\circ\text{C} + 3.33^\circ\text{C} = 53.33^\circ\text{C}$$

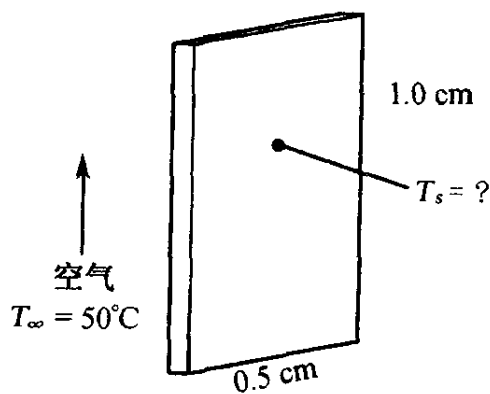


图 1-5

### 补充习题

- 1.22 一个  $0.15\text{cm}$  厚的均质薄壁, 其导热系数为  $k=0.41\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 在稳定态下薄壁两侧表面的均匀温度

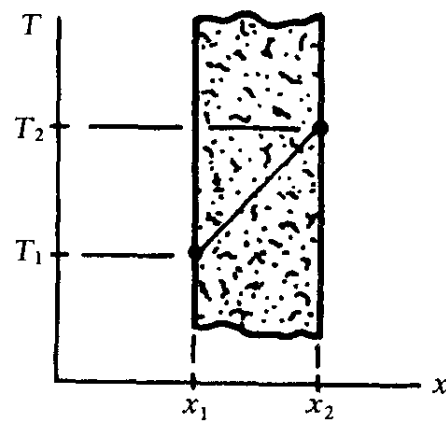


图 1-6

为  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  和  $T_2 = 70^\circ\text{C}$  (见图 1-6), 试求在  $x$  正方向单位面积的传热速率. 答案:  $-133\text{W}/\text{m}^2$

- 1.23 受迫流动的空气流过室内加热设备的一个对流换热器, 产生的对流换热系数  $h = 1135.59\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . 换热器表面温度可认为是常数, 为  $65.6^\circ\text{C}$ , 空气温度为  $18.3^\circ\text{C}$ . 若要求的加热功率为  $8790\text{W}$ , 试求所需换热器的换热面积. 答案:  $0.164\text{m}^2$
- 1.24 在夏天, 沥青路面的表面温度大约为  $50^\circ\text{C}$ . 设这种表面的发射能力和黑体相同, 试确定单位面积发射的辐射功率. 答案:  $617\text{W}/\text{m}^2$
- 1.25 在附录 B-1(SI)给出的温度范围内画出铜和铸铁的导热系数与温度之间的关系. 两种材料中哪种导热能力好?
- 1.26 在 B-3(SI)中给出的温度范围内画出饱和液体氨和饱和液体二氧化碳的导热系数与温度的关系. 这两种液体是否都偏离常规, 即液体的  $k$  随温度增高而减小?
- 1.27 确定水蒸气在  $276.7^\circ\text{C}$  和  $68.95\text{N}/\text{m}^2 \cdot 10^4$  下的导热系数. 答案:  $0.0379\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})(k/k_1 = 1.0)$
- 1.28 确定水蒸气在  $550\text{K}$  和  $827\text{kPa}$  下的导热系数. 答案:  $0.0505\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})(k/k_1 = 1.0)$
- 1.29 确定一氧化碳气体在  $1\text{atm}$  和  $93.7^\circ\text{C}$  下的导热系数. 答案:  $0.0299\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- 1.30 近似计算一氧化碳气体在  $550\text{K}$  和  $827\text{kPa}$  下的密度. 答案:  $5.06\text{kg}/\text{m}^3$
- 1.31 利用水银在  $50^\circ\text{C}$  时的密度值确定其比重. 答案:  $13.51$  (基于  $20^\circ\text{C}$  的水的密度算得)
- 1.32 直径  $3.81\text{cm}$  的轴在长为  $6.35\text{cm}$  的套筒轴承内转动. 转轴与套筒之间的径向间隙为  $3.81 \times 10^{-3}\text{cm}$ , 间隙充满了  $\mu_m = 2.277\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$  的润滑油. 设转速为  $62\text{r}/\text{min}$  和润滑油内的速度梯度是线性的, 试确定由转轴-润滑油界面的黏性切力造成的阻力扭矩. 答案:  $0.0107\text{Nm}$
- 1.33 (略)
- 1.34 在发射过程中, 美宇航局的一个航天器的最大加速度为  $3.0 \times g$ ,  $g$  为标准重力加速度. 试计算用  $\text{N}$  表示的一个体重为  $81.6\text{kg}$  的乘务员在最大加速度下的总重. 答案:  $2402\text{N}$
- 1.35 一个用于未来载人探测月球表面的着陆飞行器在地球上的重量为  $2196.5\text{N}$ , 这是不计宇航员在内的装载重量. 假定月球的平均重力为标准地球重力的  $1/6$ , (a) 求飞行器的质量是多少  $\text{kg}$ . (b) 求飞行器在月球上的重量. 答案: (a)  $223.9\text{kg}$ , (b)  $336\text{N}$
- 1.36 (略)
- 1.37 验证压力转换因子:  $1\text{mmHg} = 1.3332 \times 10^2\text{N}/\text{m}^2$
- 1.38 面向地球的月球一侧的温度在  $33.15\text{K}$  到  $366.48\text{K}$  范围内, 它们对应于月球的夜间和白天. 试换算为摄氏温度. 答案:  $-240^\circ\text{C}$  到  $93.33^\circ\text{C}$ .



## 第二章 一维稳定导热

### 2.1 引言

根据傅里叶定律(1.1), 物体内某点的导热速率与该点的温度梯度有关. 在许多一维问题中, 只需通过观察实际情况就能写出温度梯度. 然而, 对于较复杂的情况, 以及后面章节将要涉及的多维问题, 则需建立一个控制整个物体温度分布的能量方程. 由温度分布得出物体内任意一点的温度梯度, 进而计算出导热速率.

### 2.2 通用导热能量方程

如图 2-1 所示, 取一平行六面体微元作控制体. 该控制体可以是均质固体或均质流体的一个物质单元, 只要材料粒子间没有宏观上的相对运动. 对材料加热将使控制体内每单位面积产生一能流通量. 该通量通常是三维向量. 简单起见, 在图 2-1 中仅标出一个分量  $q_x$ .

对该控制体应用热力学第一定律, 可得如下关于温度  $T$  的通用导热方程(见习题 2.1 的推导):

$$\blacksquare \quad \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

其中  $T$  是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  和  $t$  的函数. (■为重要方程的标志.) 式中  $k$  是导热系数,  $\rho$  是密度,  $c$  是比热容, 而  $q'''$  是单位体积内的能量转换速率(产热率). 导体中的电阻加热即是一常见的  $q'''$  的来源的例子.

在大多数工程问题中,  $k$  可取为常数, 于是式(2.1)简化成

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'''}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

其中  $\alpha$  由式(1.16)给出.

导热方程的特殊情况

1. 傅里叶(Fourier)方程(无内热源)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

2. 泊松(Poisson)方程(稳态, 有内热源)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'''}{k} = 0 \quad (2.4)$$

3. 拉普拉斯(Laplace)方程(稳态, 无内热源)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2.5)$$

圆柱和球坐标系

导热系数为常数的通用导热方程可以写成

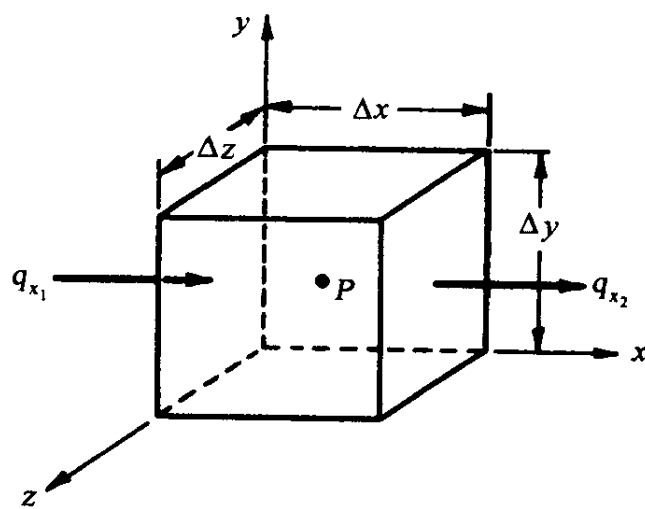


图 2-1