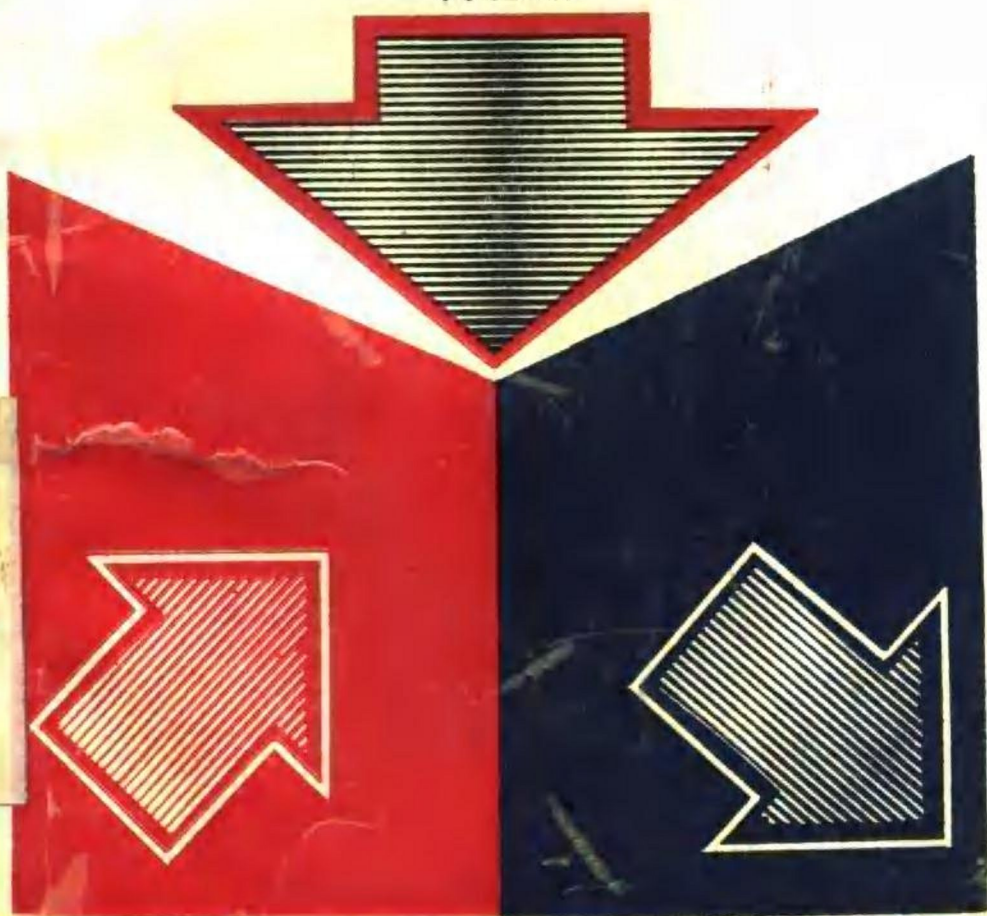


高等学校教材

传热学基础

(机制热加工类专业适用)

杨世铭



FUNDAMENTALS OF HEAT TRANSFER 高等教育出版社

高等学校教材

传热学基础

(机制热加工类专业适用)

杨世铭

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是按照国家教育委员会批准印发的机制热加工类《传热学课程教学基本要求》编写的。适用于机制热加工类各专业。于1989年经国家教育委员会热工课程教学指导委员会审定通过。

本书在结构体系上，结合热加工工艺的特点，重点讲解了热传递过程的理论基础，并培养一定的分析和计算能力，为学习有关专业主干课程及吸收新理论、新工艺创造条件。与已有的教材相比，本书独具特色。

本书以导热理论为重点，恰当地组织了对流换热和辐射换热的有关内容。全书共八章，各章配有思考题和习题，习题有答案。书末附有材料丰富的附录和参考文献目录。

全书使用国家法定计量单位。

本书也可供机械制造、材料科学以及金属冶炼等专业技术人员参考。

高等学校教材

传热学基础

(机制热加工类专业适用)

杨世铭

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

国防工业出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 6.75 字数 170 000

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数0001—3 195

ISBN7-04-002706-2/TH·264

定价2.70元

前 言

1987年国家教委审定的机制热加工类《传热学课程教学基本要求》是在对这门课程在专业培养中的地位和作用，如何结合专业需要，如何加强理论知识的应用能力的培养等问题进行了认真调查研究的基础上制订出来的。它明确了在热加工类专业中，这门课是研究各个热加工工艺领域中热传递理论的一门技术基础课。它为学生学习有关专业课程打好基础，培养学生对专业所涉及的传热问题具有一定的分析和计算能力，并为学生获取和拓展专业发展中有关的新理论、新工艺打下基础。对课程的地位和作用以及理论联系专业实际的新认识反映了教育改革的成果。本书就是按照机制热加工类《传热学课程教学基本要求》编写的一本改革型教材。

基于以上认识上的提高，教学内容的组织就不能套用热工类教材以换热设备设计和运行中的传热规律为主线的老框框，而应以物体（工件）在热加工工艺中的加热和冷却规律为主线。教学内容的重点为导热理论。本书内容共分八章。第一章为绪论。第二、三、四和第五章为导热。第二章讲述导热的基本定律和导热问题的数学描写。第三和第四章分别论述稳态导热和非稳态导热。在非稳态导热的内容中对在铸造等工艺中有实用意义的第一类边界条件下的理论解得到应有的重视，同时也介绍了第三类边界条件下的理论解。第四章的最后两节在基本内容基础上略有引伸，它们起着把基础理论应用到铸造和焊接工艺典型问题上去的过渡搭桥作用。不同专业对这两节可按需选用或组织自学。导热问题的数值解法独立组成第五章以适应计算机解题日益普及的新形势。它讲述了实际问题中处理复杂边界条件、复杂形状物体导热数值求解的基础理论和方法。第六章讲述对流换热。这一章本

着以工件的加热与冷却规律为主线的要求，采用小骨架的结构安排，内容以物体外部的换热问题为侧重点。第七章辐射换热则以灰体间的辐射换热和工件在加热炉等工业炉内所需考虑的气体和火焰辐射为主要内容。复合换热和传热过程的计算则在第八章中扼要的作了介绍。全书主线明确，结合专业特点精心取舍教学内容，知识结构合理、篇幅适中。参考学时范围为40~50学时。

本书借鉴了国内外教材的长处，并总结了编者教学实践的心得，力求说理清楚、深入浅出、便于自学。有些内容，诸如统一从导热微分方程出发求解导热问题、导热辐射系数的简洁导出等，均有独到之处。书中备有一定数量的例题、思考题和习题，培养必要的计算技能并加深对教学内容的理解。书末的习题答案为学生检验解题的正确性提供了方便。附录还提供了常用材料和介质的热物性和与各章内容有关的参考文献。

编者愿借此机会特别感谢本书主审人哈尔滨工业大学马义伟教授提出的宝贵意见。书稿还得到参加1989年合肥审稿会的清华大学、西安交通大学、天津大学、同济大学、华中理工大学、东南大学、北京航空航天大学 and 安徽工学院的代表的帮助。他们提出的许多建设性意见，对书稿质量的提高起了很大作用。编者在此向他们表示衷心的感谢。

编者热忱欢迎读者对本书的不足提出批评指正意见，以便再版改进。

杨世铭

1990年11月于上海交通大学

主要符号表

<p>a 热扩散率(导温系数)</p> <p>b 蓄热系数</p> <p>c 比热容</p> <p>d, D 直径</p> <p>E 辐射力</p> <p>f 截面积</p> <p>F 表面积</p> <p>g 重力加速度</p> <p>h, H 高度</p> <p>k 传热系数, 辐射减弱系数</p> <p>l 长度</p> <p>L 凝固潜热, 长度</p> <p>p 压强 (压力)</p> <p>q 热流密度 (热通量)</p> <p>Q 热量, 热流量</p> <p>r 半径</p> <p>R 半径, 热阻</p>	<p>t, T 温度</p> <p>u, v, w 速度</p> <p>x 长度</p> <p>X 长度, 角系数</p> <p>α 换热系数, 吸收率</p> <p>β 体积膨胀系数</p> <p>δ 厚度</p> <p>ε 发射率 (黑度)</p> <p>θ 过剩温度</p> <p>Θ 无量纲过剩温度</p> <p>λ 导热系数, 波长</p> <p>μ 动力粘度</p> <p>ν 运动粘度</p> <p>ρ 密度, 反射率</p> <p>σ 表面张力</p> <p>σ_b 黑体辐射常数</p> <p>τ 时间, 穿透率</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

相似准则

$$Re = \frac{ul}{\nu} \text{——雷诺准则}$$

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{——努谢尔特准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{——普朗特准则}$$

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{——毕渥准则}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} \text{——傅里叶准则}$$

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t \text{——葛拉晓夫准则}$$

目 录

主要符号表

第一章 绪论	1
1-1 传热学的研究对象及其在热加工工艺中的应用	1
1-2 热量传递的三种基本方式	3
1-3 单位制	8
第二章 导热基本原理	11
2-1 傅里叶定律	11
2-2 导热微分方程式	21
2-3 初始条件及边界条件	26
第三章 稳态导热	29
3-1 通过平壁的导热	29
3-2 通过圆筒壁和球壁的导热	35
3-3 表面有散热的长杆的导热	40
3-4 接触热阻	44
3-5 形状因子	46
第四章 非稳态导热	51
4-1 非稳态导热的基本概念	51
4-2 第一类边界条件下的一维非稳态导热	52
4-3 伴有相变边界的一维非稳态导热	57
4-4 第三类边界条件下的一维非稳态导热	60
4-5 二维及三维非稳态导热	70
4-6 集总参数法	74
4-7 不同形状物体加热或冷却速度的比较	78
4-8 集中热源作用下的非稳态导热	79
第五章 导热问题的数值解法	86
5-1 稳态导热有限差分方程	86

5-2	非稳态导热有限差分方程	88
5-3	边界条件	94
5-4	差分方程组的求解	96
第六章	对流换热	108
6-1	牛顿冷却公式和换热系数	108
6-2	影响对流换热的主要因素	108
6-3	对流换热微分方程组	112
6-4	对流换热的无量纲准则	115
6-5	自然对流换热的计算	119
6-6	强制对流换热的计算	123
第七章	辐射换热	135
7-1	热辐射的基本概念	135
7-2	热辐射的基本定律	139
7-3	两个黑体间的辐射换热	146
7-4	角系数	148
7-5	灰体间的辐射换热	155
7-6	气体辐射	164
7-7	火焰辐射	173
第八章	复合换热与传热	180
8-1	复合换热	180
8-2	传热过程及其计算	183
8-3	换热器传热的平均温差	187
附录		192
附录 1	常用单位换算表	192
附录 2	金属材料的密度、比热容和导热系数	193
附录 3	保温、建筑及其它材料的密度和导热系数	196
附录 4	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	197
附录 5	干空气的热物理性质 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	197
附录 6	在大气压力 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$) 下烟气的热物理性质	198
附录 7	饱和水的热物理性质	199
附录 8	几种饱和液体的热物理性质	200
附录 9	双曲线函数值	201
附录 10	高斯误差函数值	202
习题答案		203
参考文献		206

第一章 绪 论

1-1 传热学的研究对象及其在热加工工艺中的应用

传热学是研究热量传递规律的一门学科。

生产部门存在着多种多样的热量传递问题，需要应用传热学去解决。这些部门主要有：能源、化工、冶金、建筑、机械制造、电子、制冷、航空航天、农业、环境保护等。这些技术部门的巨大进步也推动了传热学学科的迅速发展。现在，传热学的理论体系日趋完善，内容不断充实，已经发展成为现代科学技术中充满活力的一门重要的技术基础学科。

在机械制造热加工类专业中，由于工件在制造工艺中的加热、冷却、熔化和凝固都与热量传递息息相关，传热学有它特殊的重要性。工件温度场的测算和控制，不同工作条件、不同材料性质及几何形状对工件温度场变化的影响，工艺中缺陷的分析和防止，无不受到热量传递规律的制约，传热学在保证工艺实施、提高产品质量和产量等方面起着关键作用。它是一门为主干学科和主要课程打基础的重要技术基础课。为了说明传热学与各专业主要课程间的关系，以铸造专业的铸件形成理论这门专业主要课程为例，作一番考察。这门课程的任务是要运用基础课、技术基础课的理论知识来分析铸件形成过程的基本规律及有关因素的内在联系。其中相当多的内容是：分析金属与铸型在不同条件下热量传递的特点，铸件温度场的确定及其影响因素，讨论金属包括液态金属及砂型的热物理性质，研究温度分布在金属收缩规律中的作用以及热裂、热应力变形、冷裂等缺陷的成因及防止途径等等，这些内容都建筑在传热学的基础之上。因此，《传热学》与《物理化学》和《流体力学》三门课程一起组成《铸件成型理论》这门专业主要

课程的理论基础。在焊接专业,《传热学》也是专业主要课程《金属熔焊原理及工艺》的重要理论基础。

本课程的任务是结合热加工工艺领域中热传递过程的特点,系统地阐述传热学的基本理论、基本知识,培养一定的分析和计算技能,为学习有关专业课程打好理论基础,同时也为认识专业发展中的新理论、新工艺创造条件。换句话说,扎实的传热学基础,既是学好专业主干学科的前提,也为消化、吸收和创造新技术准备了必要的条件,它是一个合格的热加工工程师必须具备的理论素养的重要组成部分。

本课程以阐述不同条件下物体中的温度分布为主线,重点在导热理论。按照这样的指导思想系统地组织传热学的内容,有利于掌握应用于热加工工艺的热量传递理论的特点,有利于理解专业课引用的重要基本方程及公式的来龙去脉及其求解方法,为专业应用基础理论起到桥梁的作用。

按物体温度是否随时间变化的不同,热量传递过程可区分为稳态过程(又称定常过程)与非稳态过程(又称非定常过程)两大类。凡是物体中各点温度不随时间改变的热传递过程均称为稳态热传递过程,反之则称为非稳态热传递过程。各种物体在持续不变的运行工况下经历的热传递过程属于稳态过程,而物体在加热、冷却、熔化和凝固情况下经历的热传递过程则为非稳态过程。

采用高等数学方法分析热传递过程,总要假定所研究的对象是一个连续体,即认为所研究对象内各点上的温度、密度、速度等都是空间坐标的连续函数。实际上,只要被研究对象的几何尺度远大于分子的平均自由行程,连续体的假定即可成立⁽¹⁾①。就本书涉及的内容而言,连续体的假定都是成立的。

① 方括号中的数字表示与所述问题有关的附录所列参考文献的编号。

1-2 热量传递的三种基本方式

热量传递有三种基本方式：导热、对流和热辐射。

1. 导热

物体各部分之间不发生相对位移时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动进行的热量传递称为导热。例如，窑炉炉衬温度高于炉墙外壳，炉衬内侧向炉墙外壳的热量传递是导热，铸件凝固冷却时，铸件内部的温度高于外界，铸件内部向其外侧以及砂型中的热量传递也是导热。

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时相互碰撞的结果。众所周知，气体的温度越高，其分子的平均动能越大。不同能量水平的分子相互碰撞的结果，使热量从高温向低温处传递。导电固体中有相当多的自由电子，它们在晶格之间象气体分子那样运动。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。晶格结构振动的传递在文献中常称为格波（又称声子）^[4]。至于液体中的导热机理，还存在着不同的观点。有一种观点认为液体定性上类似于气体，只是情况更复杂，因为液体分子间的距离比较近，分子间的作用力对碰撞过程的影响远比气体大^[2]。另一种观点则认为液体的导热机理类似于非导电固体，主要靠格波的作用^[3]。导热微观机理的进一步论述已超出本书的范围，有兴趣的读者可参阅热物性学专著^[4]。本书以后的论述仅限于导热现象的宏观规律。

通过对实践经验的提炼，导热现象的规律已经总结为傅里叶定律。考察如图 1-1 所示的通过平板的导热。平板的两个表面均维持各自的均匀温度。这是个一维导热问题。对于 x 方向上任意一个厚度为 dx 的微元层，根据傅里叶定律，单位时间内通过该层的导热热量，与当地的温度变化率及平板截面积 F 成正比。即

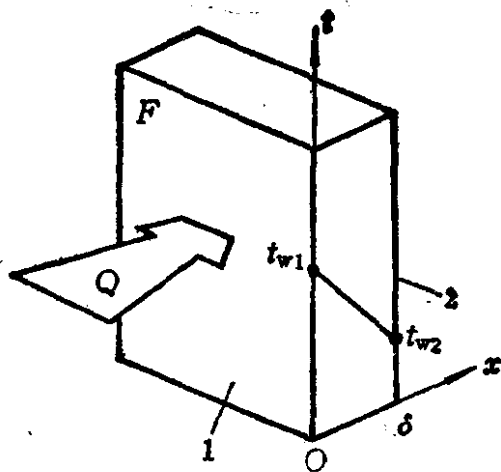


图1-1 通过平板的一维导热

$$Q = -\lambda F \frac{dt}{dx} \quad \text{W} \quad (1-1)$$

式中， λ 是个比例系数，称为导热系数（又称热导率），负号表示热量传递的方向与温度升高的方向相反。

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量称为热流密度（又称比热流），记为 q ，单位为 W/m^2 。傅里叶定律按热流密度形式表示则为

$$q = \frac{Q}{F} = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (1-2)$$

式 (1-1) 和 (1-2) 是一维稳态导热时傅里叶定律的数学表达式。傅里叶定律更完备的向量表达式将在第二章中讨论。

2. 对流

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，而且必然伴随着导热。工程上常遇到的不是单纯对流方式，而是流体流过另一物体表面时对流和导热联合起作用的方式。后者称为对流换热，以区别于单纯对流。值得指出，虽然对流作为一种基本的热量传递方式是明确的，但本书不讨论单纯对流，而只讨论有实用意义的对流换热。

对流换热按引起流体流动的不同原因可区分为自然对流与强制对流两大类。自然对流是由于流体冷、热各部分密度不同而引起的。暖气片表面附近热空气的向上流动就是一个例子。如果流体的流动是由于水泵、风机或其它压差作用所造成的，则称为强制对流。例如油冷却器、空气预热器内流体分别由水泵（油泵）、风机驱动，它们都属于强制对流。另外，沸腾及凝结也属于对流换热，融化及凝固则除导热机理外也常带有对流换热因素，它们都是伴随有相变的对流换热现象。

对流换热的基本计算式是牛顿冷却公式

$$\text{流体被加热时 } q = \alpha (t_w - t_f) \quad \text{W/m}^2 \quad (1-3)$$

$$\text{流体被冷却时 } q = \alpha (t_f - t_w) \quad \text{W/m}^2 \quad (1-4)$$

式中， t_w 及 t_f 分别为壁面温度及流体温度， $^{\circ}\text{C}$ 。如果把温差（又称温压）记为 Δt ，并约定永远取正值，则牛顿冷却公式可表示为

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

$$Q = F \alpha \Delta t \quad \text{W} \quad (1-6)$$

式中，比例系数 α 称为对流换热系数，简称换热系数①，单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

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性（ λ 、 μ 、 ρ 、 C_p 等）以及换热表面的形状与布置，而且还与流速有密切的关系。牛顿冷却公式并不是揭示影响换热系数的各种复杂因素的具体关系式，它仅仅给出了换热系数的定义。各种场合下换热系数 α 的确定将是本书第六章的任务。

3. 热辐射

物体通过电磁波传递能量的方式称为辐射。物体会因各种原因发出辐射能，其中因热的原因发出辐射能的现象称为热辐射。本书以后论述的辐射一律指热辐射。

自然界中各个物体都不停地向空间发出热辐射，同时又不断

① 习惯上，换热系数又常称为放热系数及给热系数。

地吸收其它物体发出的热辐射。发出与吸收过程的综合效果造成了物体间以辐射方式进行的热量传递，即辐射换热。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，发出与吸收辐射的过程仍在不停地进行。

热辐射可以在真空中传播，而导热及对流两种传递热量的方式只在有物质存在的前提下才能实现。这是热辐射区别于导热及对流，而是另一种独立的基本热量传递方式的有力说明。当两个物体被真空隔开时，例如地球与太阳之间，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及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，即发射时热能转换为辐射能，而被吸收时又将辐射能转换为热能。

实验表明，物体的辐射能力与温度有关，同一温度下不同物体的发射和吸收本领也大不一样。在探索热辐射规律的过程中，一种称为绝对黑体（简称黑体）的理想物体的概念具有重大意义。黑体的吸收本领和发射本领在同温度物体中是最大的。

黑体单位时间内发射出的辐射热流量由斯蒂芬-玻尔兹曼定律揭示：

$$Q = F\sigma_b T^4 \quad W \quad (1-7)$$

式中， T 为黑体的绝对温度，K； σ_b 为黑体辐射常数，它是个自然常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ； F 为表面积， m^2 。斯蒂芬-玻尔兹曼定律是由理论导出，并经实验证实的规律。它又称为辐射四次方定律，是热辐射计算的基础。一切实际物体的辐射能力都小于同温度下黑体的值。实际物体发射出的热流量总可以采用斯蒂芬-玻尔兹曼定律的经验修正式来计算

$$Q = \varepsilon F\sigma_b T^4 \quad W \quad (1-8)$$

式中， ε 称为该物体的发射率（俗称黑度），其值总小于1，它与物体的种类及表面状态有关，将在第七章作进一步讨论。其余符号的意义同式（1-7）。

工程计算往往要在计算物体自身发射的辐射热流量的基础

上，进一步计算物体与周围物体的辐射换热。换句话说，要算收支总帐。本书第七章将对此进行详细论述。

三种基本热量传递方式由于机理不同，各自遵循不同的规律，依次分开论述比较相宜。不过应该注意到，在工程问题中，有时也存在二种热量传递基本方式同时出现的场合。例如一块高温钢板在厂房中的冷却散热，既有辐射换热方式，也同时有对流换热（自然对流换热）方式。两种方式以并联的形式出现，两种方式散热热流量的叠加总和等于总的散热热流量。对这种场合，就不能只顾一种方式而遗漏另一种方式。

最后应当指出，傅里叶定律、牛顿冷却公式及斯蒂芬-玻尔兹曼定律对稳态或非稳态过程都是适用的。对于非稳态过程，式(1-1)、(1-6)及(1-7)中的温度当然是瞬时值，而且由于温度不仅仅是 x 的函数，式(1-1)中的 dt/dx 应改为 $\partial t/\partial x$ 。

例题1-1 一块厚50mm的平板，两侧表面分别维持在 $t_{w1} = 300^\circ\text{C}$ 、 $t_{w2} = 100^\circ\text{C}$ 。试求下列条件下导热热流密度：(1) 材料为铜， $\lambda = 389\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ；(2) 材料为灰铸铁， $\lambda = 35.8\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ；(3) 材料为铬砖， $\lambda = 5.04\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。

解 参见图1-1，据式(1-2)有

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

在稳态过程中，垂直于 x 轴的任一截面上的热流密度是相等的，即 q 是常量。将上式分离变量并积分得

$$q \int_0^\delta dx = -\lambda \int_{t_{w1}}^{t_{w2}} dt$$

$$qx \Big|_0^\delta = -\lambda t \Big|_{t_{w1}}^{t_{w2}}$$

于是
$$q = \frac{-\lambda (t_{w2} - t_{w1})}{\delta} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

这是当导热系数为常数时一维稳态导热热流密度计算式。将已知数值代入此式，得

$$\text{铜} \quad q = 389 \times \frac{300 - 100}{0.05} = 1.56 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

$$\text{灰铸铁} \quad q = 35.8 \times \frac{300 - 100}{0.05} = 1.43 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

$$\text{铬砖} \quad q = 5.04 \times \frac{300 - 100}{0.05} = 2.02 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

例题1-2 一块发射率 $\varepsilon = 0.8$ 的钢板，温度 127°C 。试计算钢板发射出的热流密度（即单位面积发射出的辐射热流量）。

解 按式 (1-8)，钢板发射出的热流密度为

$$q = \varepsilon \sigma_b T^4 = 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (273 + 127)^4 = 1160 \text{ W/m}^2$$

例题1-3 上例中的钢板除本身发射出辐射能散热外，(1) 还有什么其它散热方式？(2) 已知 $\alpha = 7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，钢板周围的空气温度为 27°C ，试求自然对流传热的热流密度。

解 (1) 还有自然对流传热方式。

(2) 自然对流传热按牛顿冷却公式 (1-3) 计算，

$$q = \alpha (t_w - t_f) = 7 \times (127 - 27) = 700 \text{ W/m}^2$$

1-3 单 位 制

本书采用我国法定计量单位。它是以国际单位制单位为基础，适当增加一些其它单位构成的。国际单位制简称SI。法定计量单位的基本单位与国际单位制相同，它们是长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量及光强度共七个基本物理量的单位。单位名称及符号分别为米[m]、千克[kg]、秒[s]、安培[A]、开尔文[K]、摩尔[mol]及坎德拉[cd]。我国的法定计量单位与国际单位制一样，有很多优点，如各种不同形式的能量，诸如力学中的机械能、电学中的电能、热学中的热能等，均无例外地采用同一个单位——焦耳[J]，消除了其它单位制中不同种类能量单位间的换算。

鉴于现存工程单位制的资料在相当长的一段时期内仍有参考价值，因此读者掌握工程单位制与我国法定计量单位间的换算仍

有必要。工程单位制以长度、时间、力作为基本量，针对热科学问题又补充了温度及热量作为基本量。这五个基本量的常用单位分别是m、s、kg、°C及kcal。在物理学等先修课中，读者已熟悉压力、动力粘度等物理量的换算，这里着重补充关于能量及与能量有关的一些单位换算的要点。

我国法定计量单位中，能量的单位为焦耳[J]($1\text{ J} = 1\text{ N}\cdot\text{m}$)，功率的单位为瓦特[W]($1\text{ W} = 1\text{ J/s}$)，比它们大1000倍的单位分别是千焦尔[kJ]与千瓦特[kW]。工程单位制中1kcal折合4.1868kJ。据此，传热学中经常遇到的kcal/h这一单位组合可作如下换算：

$$\begin{aligned} 1\text{ kcal/h} &= \frac{4.1868 \times 10^3\text{ J}}{3600\text{ s}} = 1.163\text{ J/s} \\ &= 1.163\text{ W} \end{aligned}$$

因此，工程单位制中包含 kcal/h 这一单位组合的物理量，如 Q 、 q 、 λ 、 α 、 k 等各乘以1.163即换算成国际单位制中相应单位的值。注意：就这些物理量而言，两种单位制单位的数值属于同一数量级，而工程单位制单位的数值略大于国际单位制单位的数值。

热工技术中常用物理量的单位换算表引列于附录1。

思 考 题

1. 在用乙炔气喷枪切割钢板过程中，钢板经历的热量传递过程是稳态的还是非稳态的？
2. 当铸件在砂型中冷却凝固时，由于铸件收缩在铸件表面与砂型间产生气隙，气隙中的空气是停滞的，试问通过气隙有哪几种基本热量传递方式？

习 题

1. 设冬天室内温度为 t_{f1} ，室外温度为 t_{f2} ，试在该两温度保持不变的条件下，画出下列三种情况下从室内空气到室外大气温度分布的示意曲线图：
(1) 室外平静无风；