

高等学校教材

传热学基础

第二版

(机制热加工类专业适用)

杨世铭



高等教育出版社

高等学校教材

传热学基础

第二版

(机制热加工类专业适用)

杨世铭

高等教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

传热学基础/杨世铭编. —2版. —北京: 高等教育出版社, 2004.1

ISBN 7-04-013066-1

I. 传… II. 杨… III. 传热学-高等学校-教材
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 080671 号

| | | | | | |
|------|-----|------|-----|------|-----|
| 策划编辑 | 龙琳琳 | 责任编辑 | 李心桂 | 封面设计 | 刘晓翔 |
| 责任绘图 | 宗小梅 | 版式设计 | 马静如 | 责任校对 | 尤 静 |
| 责任印制 | 孔 源 | | | | |

| | | | |
|------|--------------|------|---|
| 出版发行 | 高等教育出版社 | 购书热线 | 010-64054588 |
| 社 址 | 北京市西城区德外大街4号 | 免费咨询 | 800-810-0598 |
| 邮政编码 | 100011 | 网 址 | http://www.hep.edu.cn |
| 总 机 | 010-82028899 | | http://www.hep.com.cn |

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京市南方印刷厂

| | | | |
|-----|-----------------|-----|---------------------------|
| 开 本 | 850 × 1168 1/32 | 版 次 | 1991年5月第1版 2003年12月第2版 |
| 印 张 | 7.125 | 印 次 | 2003年12月第1次印刷 |
| 字 数 | 170 000 | 定 价 | 8.70 元 |

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

本书是按照教育部门批准印发的《传热学课程教学基本要求》、在第一版的基础上修订而成的。在结构体系上，本书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，并注意培养学生的分析和计算能力，为学习有关专业课程及吸收新理论、新工艺创造条件。与已有教材相比，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。全书采用国家法定计量单位和名词术语。

本书可作为机制热加工一类专业的教材，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。

第二版前言

此次改版，除了两点更新之外，主体内容未作改动。更新之一一是名词及符号按 GB 3101—93 作了少量修改。其二是自然对流换热一节吸收新成果作了局部更新。借此再版机会，编者继续热忱欢迎读者的批评指正。

杨世铭

2002 年 11 月于上海交通大学

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 and 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), m^2/s</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>A 表面积</p> <p>g 重力加速度</p> <p>h 表面传热系数, Pa</p> <p>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 压力, 压强</p> <p>q 热流密度(面积热流量)</p> <p>Q 热量</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_1 体胀系数, 吸收率</p> <p>σ 表面张力</p> <p>δ 厚度</p> <p>ϵ 发射率(黑度)</p> <p>θ 过剩温度</p> <p>\textcircled{H} 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, 反射比</p> <p>σ_b 黑体辐射常数</p> <p>Φ 热流量</p> <p>τ 时间, 透射比</p> |
|--|---|

相似准则

$$Re = \frac{ul}{\nu} \text{—— 雷诺准则}$$

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \text{—— 努塞尔准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{—— 普朗特准则}$$

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

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

$$Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \alpha \nu \Delta t \text{—— 格拉晓夫准则}$$

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581698/58581879/
58581877

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn 或 chenrong@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

目 录

| | |
|--------------------------------|----|
| 主要符号表 | 1 |
| 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 |
| 思考题 | 9 |
| 习题 | 10 |
| 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 |
| 思考题 | 27 |
| 习题 | 28 |
| 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 | 45 |
| 3-5 形状因子 | 47 |
| 思考题 | 49 |
| 习题 | 50 |
| 第四章 非稳态导热 | 52 |
| 4-1 非稳态导热的基本概念 | 52 |
| 4-2 第一类边界条件下的一维非稳态导热 | 54 |
| 4-3 伴有相变边界的一维非稳态导热 | 58 |
| 4-4 第三类边界条件下的一维非稳态导热 | 61 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 4-5 二维及三维非稳态导热 | 72 |
| 4-6 集总参数法 | 75 |
| 4-7 不同形状物体加热或冷却速度的比较 | 80 |
| 4-8 集中热源作用下的非稳态导热 | 81 |
| 思考题 | 85 |
| 习题 | 86 |
| 第五章 导热问题的数值解法 | 89 |
| 5-1 稳态导热有限差分方程 | 89 |
| 5-2 非稳态导热有限差分方程 | 91 |
| 5-3 边界条件 | 97 |
| 5-4 差分方程组的求解 | 99 |
| 思考题 | 110 |
| 习题 | 110 |
| 第六章 对流换热 | 112 |
| 6-1 牛顿冷却公式和表面传热系数 | 112 |
| 6-2 影响对流换热的主要因素 | 113 |
| 6-3 对流换热微分方程组 | 116 |
| 6-4 对流换热的无量纲准则 | 119 |
| 6-5 自然对流换热的计算 | 123 |
| 6-6 强制对流换热的计算 | 127 |
| 思考题 | 137 |
| 习题 | 138 |
| 第七章 辐射换热 | 140 |
| 7-1 热辐射的基本概念 | 140 |
| 7-2 热辐射的基本定律 | 144 |
| 7-3 两个黑体间的辐射换热 | 152 |
| 7-4 角系数 | 154 |
| 7-5 灰体间的辐射换热 | 161 |
| 7-6 气体辐射 | 170 |
| 7-7 火焰辐射 | 180 |
| 思考题 | 183 |

| | |
|---|------------|
| 习题 | 184 |
| 第八章 复合换热与传热 | 187 |
| 8-1 复合换热 | 187 |
| 8-2 传热过程及其计算 | 190 |
| 8-3 换热器传热的平均温差 | 194 |
| 思考题 | 197 |
| 习题 | 198 |
| 附录 | 199 |
| 附录 1 常用单位换算表 | 199 |
| 附录 2 金属材料的密度、比热容和导热系数 | 200 |
| 附录 3 保温、建筑及其他材料的密度和导热系数 | 203 |
| 附录 4 几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系 | 204 |
| 附录 5 干空气的热物理性质 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$) | 204 |
| 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 | 205 |
| 附录 7 饱和水的热物理性质 | 206 |
| 附录 8 几种饱和液体的热物理性质 | 207 |
| 附录 9 双曲线函数值 | 208 |
| 附录 10 高斯误差函数值 | 209 |
| 习题答案 | 210 |
| 参考文献 | 212 |

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，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]。就本书涉及的内容而言，连续体的假定都是成立的。

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。晶格结构振动的传递在文献中常称为格波(又称声子)^[1]。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面积 A 成正比，即

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

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。

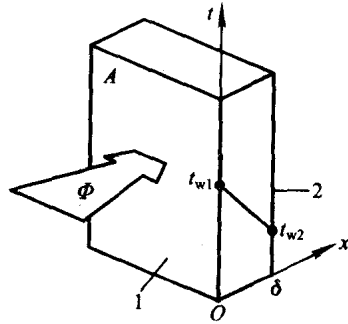


图 1-1 通过平板的一维导热

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

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

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、风机或其他压差作用所造成的，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，熔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：

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

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

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

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

$$\Phi = Ah\Delta t \quad \text{W} \quad (1-6)$$

式中，比例系数 h 称为表面传热系数，习惯上称换热系数^①，单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

表面传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表面传热系数的各种复杂因素的具体关系式，它仅仅给出了表面传热系数的定义。各种场合下表面传热系数 h 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，同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射。发出与吸收过程的综合效果造成

^① 习惯上，换热系数又常称为放热系数及给热系数。