



普通高等教育材料成型及控制工程
系列规划教材

材料科学与工程中的 传输原理

李 日 等编著
黄卫东 主 审



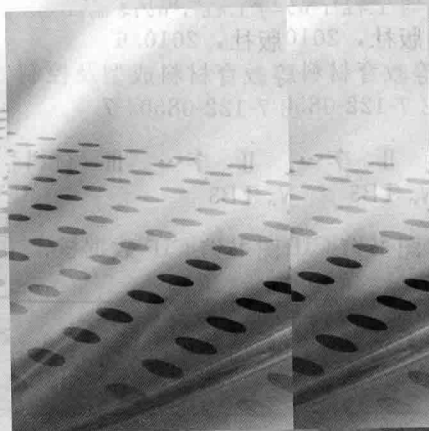
化学工业出版社



普通高等教育材料成型及控制工程
系列规划教材

材料科学与工程中的 传输原理

李 日 等编著
黄卫东 主 审



化学工业出版社

· 北京 ·

在材料科学研究与材料热加工工程中,许多过程是在高温下进行的。流体流动、热量传递和物质传递是普遍存在的三种最基本的物理现象。本书以微积分为主要的分析工具,系统而全面地剖析了动量、热量以及质量传输现象的物理特征,阐述了流体流动过程、传热过程和传质过程的基本理论。

本书分3篇共13章阐述了流体力学、传热学及传质学的基本理论,及在工程中的主要应用。每章后均安排有复习思考题及习题。书末附录给出了必要的资料。

本书可作为材料科学与工程、材料成形与控制工程、冶金工程专业的本科生教材,也可供从事此类专业的研究生及其他相关的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料科学与工程中的传输原理/李日等编著. —北京:
化学工业出版社, 2010.6
(普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材)
ISBN 978-7-122-08504-7

I. 材… II. 李… III. 材料科学:热工学-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第082035号

责任编辑:彭喜英

装帧设计:周 遥

责任校对:郑 捷

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张15¼ 字数390千字 2010年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.80元

版权所有 违者必究

序

材料成型及控制工程专业是1998年教育部进行专业调整时,在原铸造专业、焊接专业、锻压专业及热处理专业基础上新设立的一个专业,其目的是为了改变原来老专业口径过窄、适应性不强的状况。新专业强调“厚基础、宽专业”,以拓宽专业面,加强学科基础,培养出适合经济快速发展需要的人才。

但是由于各院校原有的专业基础、专业定位、培养目标不同,也导致在人才培养模式上存在较大差异。例如,一些研究型大学担负着精英教育的责任,以培养科学研究型和科学研究与工程技术复合型人才为主,学生毕业以后大部分攻读研究生,继续深造,因此大多是以通识教育为主。而大多数教学研究型和教学型大学担负着大众化教育的责任,以培养工程技术型、应用复合型人才为主,学生毕业以后大部分走向工作岗位,因此大多数是进行通识与专业并重的教育。而且目前我国社会和工厂企业的专业人才培养体系没有完全建立起来;从人才市场来看,许多工厂企业仍按照行业特征来招聘人才。如果学生在校期间的专业课学得少,而毕业后又不能接受继续教育,就很难承担用人单位的工作。因此许多学校在拓宽了专业面的同时也设置了专业方向。

针对上述情况,教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会于2008年制定了《材料成型及控制工程专业分类指导性培养计划》,共分四个大类。其中第三类为按照材料成型及控制工程专业分专业方向的培养计划,按这种人才培养模式培养学生的学校占被调查学校的大多数。其目标是培养掌握材料成型及控制工程领域的基础理论和专业基础知识,具备解决材料成型及控制工程问题的实践能力和一定的科学研究能力,具有创新精神,能在铸造、焊接、模具或塑性成形领域从事设计、制造、技术开发、科学研究和管理等工作,综合素质高的应用型高级工程技术人才。其突出特色是设置专业方向,强化专业基础,具有较鲜明的行业特色。

由化学工业出版社组织编写和出版的这套“材料成型及控制工程系列规划教材”,针对第三类培养方案,按照焊接、铸造、塑性成形、模具四个方向来组织教材内容和编写方向。教材内容与时俱进,在传统知识的基础上,注重新知识、新理论、新技术、新工艺、新成果的补充。根据教学内容、学时、教学大纲的要求,突出重点、难点,力争在教材中体现工程实践思想。体现建设“立体化”精品教材的宗旨,提倡为主干课程配套电子教案、学习指导、习题解答的指导。

希望本套教材的出版能够为培养理论基础和专业知识扎实、工程实践能力和创新能力强、综合素质高的材料成型及加工的专业性人才提供重要的教学支持。

教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会主任

李春峰

2010年4月

前言

根据“教育部材料成型及控制工程专业教学指导委员会”制定的指导性培养方案，在教学指导委员会的指导和支持下，依据教指委“材料成型及控制工程（分专业方向）本科培养方案”，配合高等院校的教学改革和教材建设，编写了本教材。

“动量、热量和质量传递原理”描述了流体流动、传热、单元操作和化学反应等过程工程中的共性科学问题。在美国，该课程一直作为大多数工程专业教学体系中的“工程科学核心课程”，由此也可看出传递现象在工程教育中的基础理论地位。

在材料科学与工程研究中，流体在各个形态阶段的动量传递、热传递、质量传递及应力传递四种基本物理量的变化过程对材料制备和成型有决定作用，这些过程也是材料制备和成型过程中普遍存在的物理现象。因此，培养材料科学与工程各专业的学生综合应用动量、热量和质量传输的观点去定量定性分析材料成型及控制工程中的各种理论问题和工程问题就成为本书的目的。应力场的分析暂时不在本书的讨论范围之内。

推行专业改革，为社会培养综合素质高、知识结构全面的人才，教材建设是极为重要的一个部分。

中国现代理工科教育使用的教材基本是承袭了西方国家的教育传统，所建立的教学体系也基本是仿照西方教育体系而来。我们最初使用的教材是翻译过来的，几经延续，形成了我国目前的教材体系。但教材的基本结构没有实质性的变化，其基本结构是：概念和名词解释—原理论证。这种教材的特点为：是专门知识的说明书，或者说是专门知识的“字典”，体例翔实、系统性强；但同时又是它的致命弱点，就是抽去了知识探索 and 思想探索的过程，只保留了结果，极少叙述知识的来源和思想脉络。没有了人的活动，不叙述思想探索的过程，使思想历程变成了知识的堆积，因而把活生生的人类探索的历程变成了僵化的教条，使知识的学习索然无味，激发不出学生的求知欲，更谈不上继续创造。

而我们许多教师的教学特点也是“背书式”教学法，即沿着教科书的编写顺序去复述和解释文本，极少去叙述知识的思想根源、探索历程，教师基本是扮演了“教材的扬声器”和“教材的解释器”的作用，这是学生不爱学习的根本原因。再加上大学里课程很多，教学进度比中学明显加快，而做练习的时间又大大缩短，因此学生没有时间去品味知识，更谈不上追寻知识的根源和理出知识的思想脉络了。

我们考察许多著名的科学家会发现，他们在年轻的时候就作出了惊人的科学贡献，原因是非常了解其所在领域的思想发展历程，因此可以顺着那个方向去作出有全局性和根本性贡献的科学创造。比如爱因斯坦，他对当时的学校教育很不感兴趣，却有机会读到当时最杰出的物理学家和思想家的原著，如马赫、牛顿、法拉第、麦克斯韦、亥姆霍兹等的著作。而著作与教材的根本不同就在于它包含着思想探索的脉络。再如麦克斯韦，他就是在读法拉第的原著时，激发了把法拉第的思想翻译成“数学语言”欲望，因此才有了今天的电动力学。所以只有获得了思想和灵魂的知识才是真正的知识，而“思想和灵魂”和历史是密不可分的。

但是原著是大量的，而时间是有限的，因此为了达到在较短时间内传授真知识的目标，就要求教师经过艰苦的劳动把专门知识的思想脉络和历程提炼出来，和现有的教材相结合，形成

既有思想性，又有知识性；既有趣味，而又不失严谨性的教材体系，使学生学得有趣、学得轻松、学得扎实、学到真知识。

本书力图从知识的创造根源、思想方法和发展方向去还原知识的本来面目，将知识、思想、方法和智慧融为一体，从而激发学生研究问题、探索思想的兴趣。

“材料科学与工程中的传输原理”的先修课程为“高等数学”、“大学物理”、“大学化学”和“工程力学”。同时它又是“材料科学基础”和“材料成形原理”的基础先修课。

在内容安排上，首先是绪论，对三种传递现象进行了综述。全书分三篇：第一篇为动量传递，包括第1章~第6章的内容。第二篇为热量传递，包括第8章~第10章的内容。第三篇为质量传递，包括第11章~第13章的内容。适合50~60学时讲授。

全书力求突出如下特点。

1. 在编排顺序上围绕着一个宗旨：还知识以本来面目，即知识是科学探索和科学研究的产物。从研究主题出发，围绕研究目标展开论述。具体做法是：为了实现研究目标，需要开展哪些方面的研究（研究内容），在研究内容下，需要解决什么样的关键问题，这样，需要确立的概念和名词就会自然地呈现出来。

2. 突出用微分方程定量分析和描述连续体的连续传递过程的方法；突出首先根据问题抽象出物理模型，然后建立相应的数学模型的方法。

3. 突出工程的思想，即如何把基础理论在工程中表现出来的方法。例如，在工程流体力学一章中，全面体现了如何根据具体的工程问题将理论流体力学的基本微分方程组转化为工程上可以应用的方程形式。

4. 留出继续思考和创造的余地。如相似原理一章中关于相似三定律的哲学观念的讨论，传热学研究概论一章中关于科学研究范围的讨论，及从物质内部直接冷却和加热的提法等；这些都是会引起争论的问题，但其中却蕴涵着可能的创造根源，所以在书中也加以叙述，目的是激发读者深入思考。

全书由河北工业大学李日教授等编著，由谭雁清编写第3章5.5节，王成武编写第10章10.9节、李红丽编写第13章13.5节。并由谭雁清、王成武、李红丽负责全书文字和图表的输入工作。由西北工业大学凝固技术国家重点实验室的宋梦华博士、比亚迪公司的张晓丽女士进行全书文字和图表的校核和整理工作，特此致谢！

全书由西北工业大学凝固技术国家重点实验室黄卫东教授主审。在编写过程中，黄先生对全书的框架结构、思想阐述提出了建设性的指导意见，在此特别表示诚挚的感谢！本书由凝固技术国家重点实验室开放课题资助，课题批准号：SKLSP201006。

由于水平所限和编写时间仓促，难免会有不少不当之处，诚请广大读者指正，以待今后改正。

编 者

2010年1月

主要符号

a	加速度, m/s^2 热扩散率, m/s^2	Y	单位质量力 y 轴分量, N
A	面积, m^2	Z	单位质量力 z 轴分量, N 高度 (水头), m
b	蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{1/2})$	α	表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 热辐射吸收率, % 角度
B	宽度, m	α_v	体积膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-2}$ 角度
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	γ	重度, N/m^3
c_f	摩擦阻力系数	κ_T	等温压缩率, Pa^{-1}
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	J	摩尔通量密度 (相对于摩尔平均速度), $\text{mol}/(\text{m}^2/\text{s})$
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	k	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
d	直径, m	k_c	对流传质系数, m/s
D	直径, m 扩散系数, m^2/s	l	长度, m
D_{AA}	自扩散系数, m^2/s	$\bar{l}$	分子平均自由程, m
D_{AB}	互扩散系数, m^2/s	L	厚度或特征长度, m 凝固潜热量, J/kg
e	自然对数的底	m	质量, kg
E	比能, J 辐射能量, W/m^2	M	摩尔质量, kg/mol 动量, $\text{N} \cdot \text{s}$
F	力, N	n	质量通量密度 (相对于静止坐标), $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
g	重力加速度, m^2/s	N	摩尔通量密度 (相对于静止坐标), $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
G	重力, N	p	压力, Pa 或 N/m^2
h	高度, m	q	热流密度, W/m^2
h_w	摩擦阻力损失, J/m^3 或 J/kg 沿程损失水头, m 液体柱	Q	热量, J 流量, m^3/s 或 kg/s
h_f	局部阻力损失, J/m^3	r	半径, m
δ	厚度 (或边界层厚度), m	R	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 水力半径, m 冲击力, N
Δ	绝对粗糙度, m	R_t	热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
j	质量通量密度 (相对于质量平均速度), $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	t	时间, s
v	速度, m/s 比体积, m^3/kg		
V	体积, m^3		
w	质量分数		
W	质量力, N		
X	单位质量力 x 轴分量, N		

	摄氏温度, °C	ν	运动黏度 (动量扩散系数), m^2/s
T	热力学温度, K	ρ	密度, kg/m^3
ε	热辐射, 发射率, %		热辐射, 反射率, %
ζ	局部阻力系数	σ	正应力 (或表面张力), Pa
η	动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$		辐射常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
θ	角度	τ	切应力, Pa
Θ	无量纲温度		热辐射, 透射率, %
λ	沿程阻力系数	Φ	热流量, W/m^2
	热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	φ	角度
	辐射波长, m	ω	孔隙度

相似特征数

$$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}, \text{ 阿基米德数}$$

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}, \text{ 毕渥数}$$

$$Bi^* = \frac{k_c L}{D}, \text{ 传质毕渥数}$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2}, \text{ 欧拉数}$$

$$Fo = \frac{at}{L^2}, \text{ 傅里叶数}$$

$$Fo^* = \frac{Dt}{L^2}, \text{ 传质傅里叶数}$$

$$Fr = \frac{v^2}{\sqrt{gL}}, \text{ 弗劳德数}$$

$$Ga = \frac{gL^3}{\nu^2}, \text{ 伽利略数}$$

$$Gr = \frac{\alpha_v g L^3}{\nu^2} \Delta T, \text{ 格拉晓夫数}$$

$$Ho = \frac{vt}{L}, \text{ 均时性数}$$

$$Le = \frac{a}{D}, \text{ 路易斯数}$$

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}, \text{ 努赛尔数}$$

$$Pe = RePr = \frac{vL}{a}, \text{ 贝克莱数}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \text{ 普朗特数}$$

$$Re = \frac{vL}{\nu}, \text{ 雷诺数}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D}, \text{ 施密特数}$$

$$Sh = \frac{k_c L}{D}, \text{ 舍伍德数}$$

$$St = \frac{Nu}{RePr} = \frac{\alpha}{\rho v c_p}, \text{ 斯坦顿数}$$

$$St^* = \frac{Nu}{ReSc} = \frac{k_c}{v}, \text{ 传质斯坦顿数}$$

目 录

绪论	1	地位和意义	3
0.1 传输现象在材料科学与工程研究中的地位 和意义	1	0.1.4 “传输原理”和“物理化学”是材料 科学与工程研究的两大理论支柱	3
0.1.1 对一个铸件的充型凝固过程的 分析	1	0.2 微分方程是进行传输现象分析的核心 工具	3
0.1.2 对微观组织形成过程的分析	3	0.3 本书叙述特点	5
0.1.3 传输现象在材料科学与工程研究中的 地位	3	复习思考题	6
第一篇 动量传输	7		
第1章 理论流体力学的科学布局	7	方程)	30
1.1 流体力学的研究目标、研究方法和核心 问题	7	3.1.3 对流体力学微分方程组的讨论	33
1.1.1 流体力学的研究目标	7	3.2 理想流体的微分方程组	35
1.1.2 研究流体的方法	7	复习思考题	37
1.1.3 理论流体力学的核心问题：流场 方程	10	习题	37
1.2 对实际流体运动分析引出的问题	12	第4章 工程流体力学	39
1.2.1 第一个等价关系	12	4.1 工程流体力学的典型模型、主要问题和 研究布局	39
1.2.2 第二个等价关系	13	4.2 理想流体的伯努利方程	41
1.3 理论流体力学的研究布局	14	4.3 实际流体的伯努利方程	42
1.4 流场形象化的研究	15	4.3.1 实际流体的伯努利方程	42
1.4.1 迹线和流线	15	4.3.2 伯努利方程的几何意义和物理 意义	43
1.4.2 流管、流束、流量	17	4.3.3 实际流体总流的伯努利方程	45
复习思考题	17	4.4 稳定流的动量方程	45
第2章 流体的两个主要性质	19	4.5 应用举例	48
2.1 流体的膨胀性和收缩性	19	4.5.1 伯努利方程应用举例	48
2.1.1 液体的压缩性和膨胀性	19	4.5.2 动量方程应用举例	50
2.1.2 气体的压缩性和膨胀性	20	4.6 流体流态分析及阻力分类	52
2.2 流体黏性及内摩擦定律	21	4.6.1 流态及 Re 数	52
2.2.1 牛顿黏度定律	21	4.6.2 流动阻力分类	55
2.2.2 黏度	22	4.7 圆管中层流流动的沿程阻力计算	55
2.3 对流体黏性的再讨论——非牛顿流体	24	4.7.1 有效截面上的速度分布	56
复习思考题	25	4.7.2 平均流速和流量	57
习题	25	4.7.3 管中层流沿程损失的达西公式	57
第3章 理论流体力学的微分方程组	27	4.8 圆管中湍流流动的沿程阻力计算	59
3.1 实际流体微分方程组	27	4.8.1 湍流沿程损失的基本关系式	59
3.1.1 连续性方程	27	4.8.2 对湍流沿程损失中有关参数的处理 方式	60
3.1.2 实际流体动力学方程 (N-S			

4.9 圆管中阻力系数值的确定	62
4.10 局部阻力	64
4.10.1 截面突然扩大的局部损失	64
4.10.2 其他类型的局部损失	65
4.11 平行平板间层流流动的速度分布和 沿程阻力	65
4.11.1 运动微分方程	66
4.11.2 应用举例	67
复习思考题	68
习题	69
第5章 边界层理论	71
5.1 边界层理论的基本概念	71
5.2 平面层流边界层微分方程	72
5.3 边界层内积分方程	74
5.4 平板绕流摩擦阻力计算	76
5.5 流体力学的发展与研究展望	78
复习思考题	81
习题	81

第二篇 热量传输

第7章 传热学概论	98
7.1 传热学的研究目标、研究方法和核心 问题	98
7.1.1 传热学的研究对象	98
7.1.2 研究传热的方法	99
7.2 温度的来源及相关科学问题	100
7.2.1 对冷热程度的度量——温度的 建立	100
7.2.2 自然科学量化原则——视觉的 科学	101
7.3 温度场及其形象化	103
7.3.1 温度场	103
7.3.2 温度场的形象化方法	103
7.4 热量传递的普遍性微分方程	104
7.5 热传递方式	106
7.5.1 导热	106
7.5.2 对流换热	107
7.5.3 热辐射	108
复习思考题	108
习题	109
第8章 导热	110
8.1 导热微分方程	110
8.1.1 导热微分方程式及其定解条件	110

第6章 相似原理与量纲分析	82
6.1 相似原理的重大意义	82
6.2 相似匀速曲线运动分析	83
6.2.1 相似匀速曲线运动分析	83
6.2.2 流动相似的概念	87
6.3 相似三定律及其蕴涵的哲学观念	88
6.3.1 相似三定律	88
6.3.2 相似三定律所蕴涵的哲学观念	89
6.4 求解相似特征数的两种方法	89
6.4.1 有控制方程的相似现象的相似特征 数解法	89
6.4.2 无控制方程的相似现象的相似特征 数解法	92
6.5 相似模型研究方法	94
6.5.1 模型设计方法	94
6.5.2 参数测试及实验结果处理	95
复习思考题	96
习题	97
8.1.2 对导热微分方程的评述	112
8.2 导热微分方程的简化及其在工程中的 应用	112
8.2.1 一维稳态导热	112
8.2.2 一维非稳态导热	119
8.2.3 二维稳态导热	126
8.2.4 二维及三维非稳态导热	128
8.2.5 对工程导热问题的评述	130
8.3 数值计算方法	130
8.3.1 一维导热问题的直接差分法数值 计算	130
8.3.2 二维非稳态导热差分方程的 建立	134
复习思考题	136
习题	136
第9章 对流换热	138
9.1 对流换热现象分析	138
9.1.1 对流换热热流密度的表达式	138
9.1.2 影响对流换热的主要因素	139
9.2 对流换热数学模型的建立	140
9.2.1 对流换热中的物理现象	140
9.2.2 换热微分方程	140
9.2.3 能量微分方程	141

9.2.4 对流换热微分方程组讨论	142	10.4.1 固体和液体的辐射	166
9.3 用相似原理求解对流换热系数	143	10.4.2 灰体的辐射	167
9.3.1 对流换热过程的相似特征数	143	10.5 黑体间的辐射换热及角系数	167
9.3.2 对流换热的特征数方程式	144	10.5.1 黑体间的辐射换热	168
9.3.3 对流换热量纲分析	147	10.5.2 角系数	168
9.4 工程中对流换热系数计算举例	149	10.6 灰体间的辐射换热	172
9.4.1 强制对流换热系数的计算	149	10.6.1 有效辐射	172
9.4.2 自然对流换热的计算	154	10.6.2 两个灰体间的辐射换热	172
复习思考题	157	10.6.3 具有重辐射面的封闭腔的辐射 换热	174
习题	157	10.7 气体辐射	175
第10章 辐射换热	159	10.7.1 气体辐射的特点	175
10.1 准备知识	159	10.7.2 气体的发射率	176
10.1.1 电磁波谱	159	10.7.3 辐射换热	176
10.1.2 辐射能的吸收、反射和透射	159	10.8 对流与辐射共同存在时的热量传输	179
10.1.3 人工黑体模型	160	10.9 传热学的发展概说及非傅里叶导热 效应	179
10.1.4 黑体辐射的基尔霍夫定律	161	10.9.1 传热学的发展历史概况	179
10.2 辐射问题模型及其实验研究	161	10.9.2 非傅里叶导热效应的研究	180
10.2.1 辐射换热强度的实验研究	161	复习思考题	181
10.2.2 黑体单色辐射换热强度规律	163	习题	182
10.3 黑体单色辐射的研究历史及量子力学 的诞生	164		
10.4 实际物体的辐射特性及灰体辐射	166		

第三篇 质量传输

第11章 传质学概论	184	12.1 一维稳定态分子扩散	198
11.1 传质学的研究目标、研究方法和核心 问题	184	12.1.1 等摩尔逆向扩散	198
11.1.1 为什么要研究传质学? 传质学的 研究目标	184	12.1.2 通过静止气膜的单向扩散	200
11.1.2 传质学的研究方法和核心问题	184	12.1.3 气体通过金属膜的扩散	201
11.1.3 建立质量传输微分方程时出现的 问题	188	12.2 非稳定态分子扩散	203
11.1.4 传质学研究布局	189	12.2.1 忽略表面阻力的半无限大介质中 的非稳定态分子扩散	203
11.2 菲克第一定律及扩散系数	189	12.2.2 几种简单几何形状物体中的非 稳定态分子扩散	205
11.2.1 菲克第一定律 (Fick's law)	189	12.2.3 二维和三维非稳态分子扩散	205
11.2.2 对扩散系数的讨论	190	复习思考题	205
11.3 扩散通量密度	191	习题	205
11.4 质量传输微分方程及定解条件	194	第13章 对流传质	207
11.4.1 质量传输微分方程	194	13.1 对流传质微分方程	207
11.4.2 定解条件	196	13.1.1 对对流传质的分析	207
复习思考题	196	13.1.2 对流传质微分方程和 Sh 数	207
习题	197	13.2 对流传质的量纲分析	208
第12章 分子传质	198	13.2.1 强制对流传质	208
		13.2.2 自然对流传质	209

13.3 求解对流传质系数的工程举例	210
13.3.1 平板和球的传质	210
13.3.2 管内湍流传质	211
13.3.3 液滴和气泡内的传质	211
13.4 传质系数模型	212
13.4.1 薄膜理论	212
13.4.2 渗透理论	213

13.4.3 表面更新理论	213
13.5 动量、热量和质量传输的类比	214
13.5.1 层流传输(分子传递)的类似性 ..	214
13.5.2 湍流传输的类似性	216
13.5.3 三种传输的类比	217
复习思考题	219
习题	219

附录 221

附录 A 高斯误差函数表	221
附录 B 金属材料的密度、比定压热容和 热导率	221
附录 C 几种保温、耐火材料的热导率与 温度的关系	222
附录 D 饱和水的热物理性质	223
附录 E 液态金属的热物理性质	224

附录 F 干空气的热物理性质	224
附录 G 在大气压力下烟气的热物理性质 ...	225
附录 H 二元体系的质量扩散系数	226
附录 I 固体材料沿表面法线方向上辐射 发射率 ϵ (ϵ_n)	227
附录 J 主要物理量的单位换算表	227

参考文献 229

绪 论

本章导读：阐述动量传输、热量传输、质量传输是冶金过程、热处理过程、铸造过程、焊接过程及锻压冷变形过程等主要的材料热加工中的主要现象，研究材料加工过程的规律的一个主要方面就是要研究这些过程的各种传输现象及其耦合，而另一个主要的方面就是从热力学的角度去分析这些过程的组织变化的可能性与动力学过程。而研究传输规律的主要数学方法就是连续介质的微积分方法特别是偏微分方程的建立。最后说明了本书的写作特点，即把三大传输现象划分为若干科学研究主题，然后围绕这些科学主题进行科学布局，即确立主问题与子问题之间的关系，然后按照一定的技术路线去展开论述，直至完成整个主题的论述。在论述过程中，充分体现科学研究的思想方法和知识脉络。

0.1 传输现象在材料科学与工程研究中的地位 and 意义

0.1.1 对一个铸件的充型凝固过程的分析

首先让我们来观察和分析制动鼓铸件从浇注到凝固结束的全过程，如图 0-1。

铸件的形成经历了充型和凝固两个阶段，宏观上主要表现为流动、冷却和收缩三种物理现象。在充型过程中，伴随着流动过程，液体温度在发生变化，同时全部金属液内部成分的浓度分布也在变化。如果把整体铸件空间看作一个场，则在这个场中的某个物理量分布成为某物理量的场。在上述铸件充型过程中，金属液在铸件空间中的流动状态在不断变化，即流场在发生着变化，同时温度场和浓度场也在变化，如果冷却强度足够大，应存在着微弱的液体和固体的收缩，则应力场也在变化。而且这四场的变化是交织在一起，即耦合发生的。

充型结束后，液体静止下来，铸件开始冷却凝固。在此过程中，在温度场变化的同时，存在着金属液的自然对流和已凝固金属的收缩和液体的收缩，收缩导致应力场的变化，在液-固转变的过程中存在着溶质分配过程，即浓度场在发生着变化。因此，在铸件的凝固过程中，温度场、浓度场、应力场、自然对流现象在耦合变化。

在铸件的形成过程中，如果流场不合理，则容易造成铸件的卷气、夹杂、冷隔等缺陷，也可能造成流动结束时温度分布不合理；如果温度场不合理，铸件凝固过程就可能不合理，造成收缩缺陷，如缩孔、缩松等；如果浓度分配不合理，则可能造成铸件中的成分偏析现象等。

可见，在铸件形成过程中，流场、温度场、浓度场、应力场的综合作用决定了铸件的最终形态和最终质量。客观地描述铸件形成过程的四场变化，并加以有效的控制，是获得合格铸件的必要条件。

在金属材料热处理过程中，主要是温度场、浓度场和应力场在发生变化。在焊接过程中，主要表现为流场、温度场、浓度场、应力场的变化。在锻压过程中，表现为温度场、浓度场以及固态形变的应力应变场的变化。在冶金过程中，流场、温度场、浓度场相互关联。在其他一些金属材料的先进制备技术中，如快速凝固、定向凝固、非晶制备、半固态铸造、激光成形、纳米制备等技术中，上述四场中的一场或多场的变化都起着非常重要的作用。

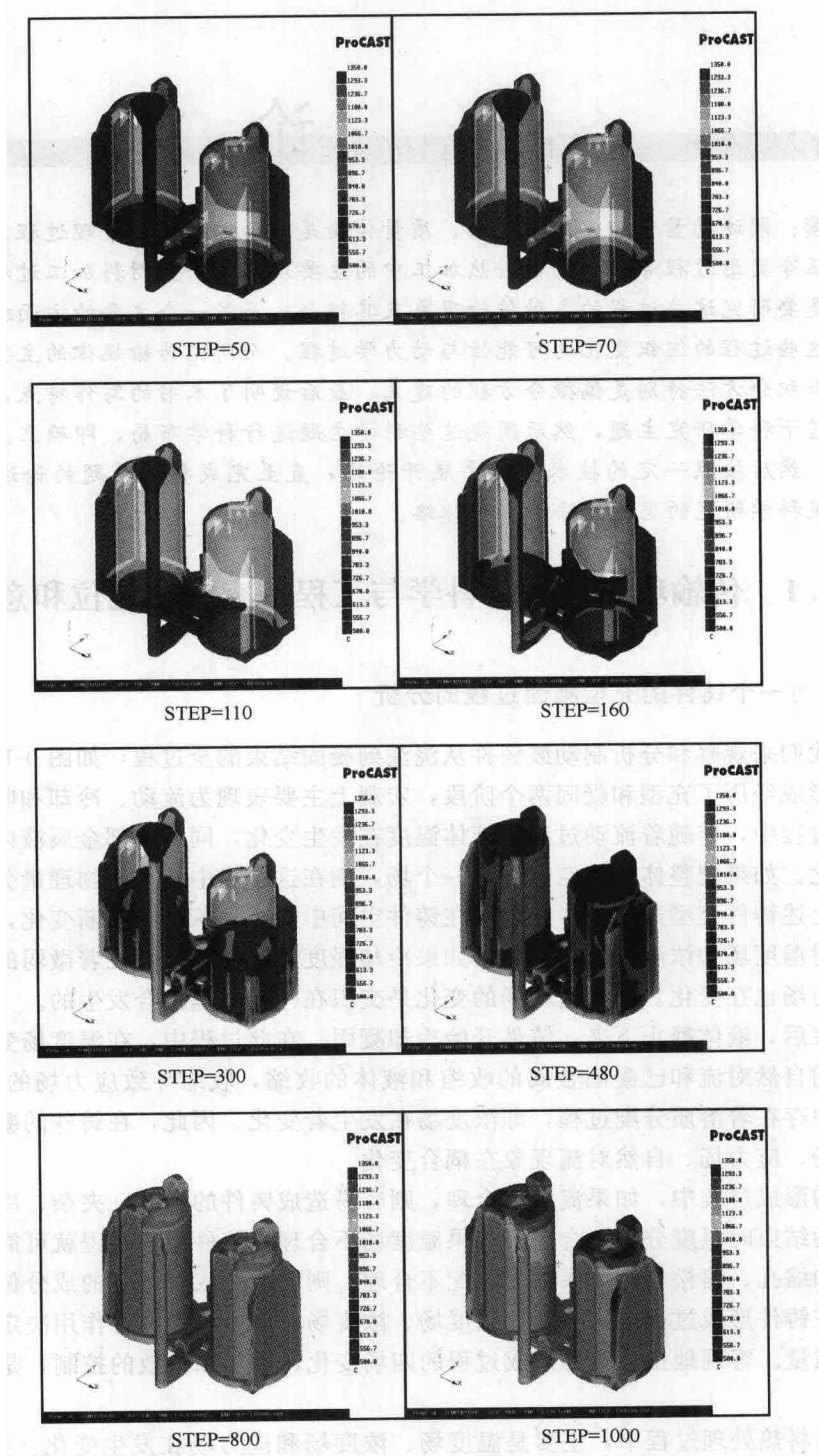


图 0-1 制动鼓铸件的充型和凝固过程

近年来，在材料研究和制备中，还出现了利用感应电场、电磁场、超声波等特殊方法，但这些特殊的外加作用主要是影响上述四个场来对材料成形过程起作用。这些特殊作用不在本书

的讨论范围，有兴趣的读者可参考相关著作。

0.1.2 对微观组织形成过程的分析

在金属材料成形过程中，温度场、浓度场的变化对金属材料微观组织形成有直接的决定作用，如果有流动的存在，则对微观组织形貌也有明显的影响。

在合金材料微观组织的形成过程中，溶质的传输和分配对相组织的形成和演化具有非常重要的作用。在凝固过程中，因溶质元素在固液相的浓度分布而导致的成分过冷对相组织的形貌有决定性作用。在相组织的形成过程中，热量传输无疑是起决定作用的直接驱动力，如果存在液体流动，则对枝晶的生长形态影响很大。如图 0-2 所示，当存在对流时，在迎流方向上，枝晶优先生长。可见，流动对微观组织的形成及形态也具有显著的影响。

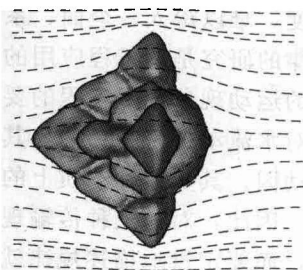


图 0-2 晶体迎流生长

0.1.3 传输现象在材料科学与工程研究中的地位和意义

由上述分析可知，在材料科学研究、材料成型及控制工程、材料熔炼过程中，流体动量、材料温度、浓度及应力四种基本物理量的变化过程是有决定作用的物理量，也是材料制备和成型过程中普遍存在的物理现象。本书研究的传输过程是物理量从非平衡状态向平衡状态转移的过程，主要研究动量、热量和质量（momentum, heat and mass）的传输现象的规律。动量传输指在垂直于实际流体流动方向上，动量由高速度区向低速度区的转移；热量传输指热量由高温区向低温区的转移；质量传输则是指物系中一个或几个组分由高浓度区向低浓度区的转移。应力场的分析暂时不在本书的讨论范围之内。

0.1.4 “传输原理”和“物理化学”是材料科学与工程研究的两大理论支柱

材料科学与工程的主要研究方法是研究体系的状态及其演化过程。要回答的问题是：①在一定的条件下，体系能否以某一状态稳定存在，是否可以向另一状态变化，变化的速率如何？这是物理化学要解决的问题。②如果在一定条件下，体系可以从一种状态变化为另一种状态，那么体系演化的过程是怎样的？在演化过程中，哪些物理量在发生作用？需要控制哪些量来使体系沿着一定的途径来变化？这是“传输原理”要解决的问题。

“物理化学”不关心体系变化的具体途径，只关心体系变化的方向和速率。而“传输原理”却是要具体跟踪体系是如何从一种状态转化到另一种状态的，具体变化的细节是什么？过程是怎样的？只有搞清楚体系变化过程，才能对体系变化实施有效控制，这对材料制备和材料成型来说至为重要。

由此可见，这两个知识体系具有互补性，是相辅相成的，它们共同构成材料科学与工程研究的两大理论基础。

0.2 微分方程是进行传输现象分析的核心工具

对流体动量传输、热量传输、质量传输现象的描述不仅仅限于科学家和工程学家，在其他领域里，也有许多对这些现象的描述和研究。以水的运动为例，在艺术领域，文学家对水流的生动描写和刻画不胜枚举，画家对水流的描绘也比比皆是。但与科学家和工程学家相比较，艺

术家对水的运动的刻画和描述偏重于表现水的艺术美，偏重于体现人的心灵的感受，而在数量上则是模糊的。与艺术家相比，科学家和工程学家对水的运动的研究有很大的不同。科学家们着眼于探究产生水的诸多运动形态的背后的动因，这就决定了科学家必须要定量地揭示和描述水的运动变化的规律，如果仅仅局限于定性地描述水的运动状态和动因，就难以上升到科学的高度，难以深入、全面、系统地揭示水的运动变化的规律。工程学家，如水利学家对水的运动规律的研究是从工程应用的角度出发，就更重视从数量上来把握水的运动形式和运动状态，使水的运动现象按照工程的要求准确可靠地运动，以完成一定的工程目标。因此科学家和工程学家对水流动的研究目标与其他领域的专家非常明显的差别在于是否量化地揭示水的运动形态和动因。其实这种本质上的差别也同样体现在热量传输和质量传输现象上。

因此，对这三种传输现象的规律的描述必须是量化的，仅仅定性地叙述规律是远远不够的，而要定量地描述规律就要诉诸数学方法。那么对于上述三种传输现象来说，应当采用什么样的数学形式才能实现量化精确描述的目的呢？

让我们首先来看看承载三种传输现象的主体的特点。

动量传输的主体是流体，流体不同于质点的突出特点是流体是由连续的质点“联结”在一起的“软体”，即不能把流体看作整块的刚性体以至于可用单质点来研究它。因为这块连续体中各个质点在同一时刻的流体运动的物理量（如速度、压力等）并不都相同，甚至是都不相同。单刚性质点的运动过程是一个“点”的连续变化过程，而连续体的运动过程却是连续体的连续变化过程。定量地描述单刚性质点的连续变化过程的有效方法是用微分方程求得的连续函数，那么如何将单质点的连续变化过渡到定量地描述连续体的变化过程就成为解决问题的关键。

热量传输可能在流动的流体这种连续体中发生，也可能在静止的流体以及固体连续体中发生。不管在哪种连续体中发生热量传输，热量传输的宏观表现形式——温度的变化都不仅是某个质点的温度变化过程，而是整体连续体中所有“联结”在一起的质点温度的连续变化过程。因此，与连续体的动量传输类似，连续体热量传输定量描述的关键也是要把对单质点的温度连续变化过程过渡到连续体温度的连续变化过程的描述。

类似地，质量传输与动量传输和热量传输均有相同的特点。

综上所述，传输现象的共同特点是连续体的连续变化过程，而我们的目标是要选择合适的数学方法来量化地精确描述上述过程。

描述连续变化过程的最有效方法是包含连续性概念的微分方法。用微分方程来描述质点连续变化过程在高等数学、理论力学中已经得到了详尽的阐述。因为连续体是由质点联结在一起的，因此必须寻找到可以将质点和连续体联结在一起的“桥梁”，才能将研究质点连续变化的方法过渡到连续体的连续变化。实现这种转变的方法就是引入微元体（如图 0-3），微元体的特点是它有尺度（ dx ， dy ， dz ），但这些尺度可以趋向于无限小，因此可以看作质点，关于质点的变化规律可以直接运用于微元体。因为微元体有尺度，因此可以积分，积分后可以扩大为

有一定体积的体，进而得到连续体的连续变化的规律。因此建立微元体的微分方程就成为研究连续体的三种传输现象规律的主要方法。

代数学的落脚点是代数方程（组），其在实际问题中的应用是根据实际问题列出代数方程（组），然后求解出未知数，所求得的结果是一个或一组数。而微积分的落脚点是微分方程（组），它在物理现象、化学现象或其他连续性现象中的应用是根据实际现象列出微分（或偏微

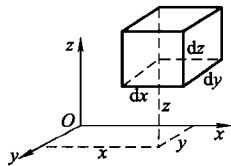


图 0-3 微元体

分) 方程(组), 所要求的结果是一个或一组函数。因此对传输现象进行定量化描述(或叫数学分析) 的本质是要根据传输现象的规律列出相应的微分方程(组), 然后求解这些方程组, 得到连续函数(组), 以达到定量描述传输现象规律的目的。

一般来说, 要得到描述三种传输现象的微分方程, 首先要把描述传输现象的物理量放到一定的坐标系中, 然后求得在该坐标系下的微分方程。描述三种传输现象的物理量一般是随时间、空间而连续变化的, 在直角坐标系中, 可以表达为时间和空间的函数 $u(x, y, z, t)$, 其中 x, y, z 表示直角坐标系的三个坐标, 而 t 则表示时间。这种物理量的变化规律往往表现为关于时间和空间坐标的各阶变化率之间的关系式, 即物理量 u 关于 t 和 (x, y, z) 的各阶偏导数之间的等式, 即包含未知函数及其偏导数等的偏微分方程。

因为描述连续变化的物理现象的方法是极限、连续性和微分, 而连续变化的物理现象又遵循一定的物理规律; 把连续过程的微分体现在这些物理规律中, 就形成微积分方程。所以为了寻求传输现象中的定量化规律, 其本质是列出体现传输现象规律的微分方程, 然后再求解这些方程, 得到显示函数式, 这就是研究传输现象的总体思路。

令人遗憾的是, 这三种传输现象得到的偏微分方程是不可求解的, 因此得不到明晰的解析解或通解。人们必须通过增加许多限制条件来得到一些特殊解以达到工程应用的目的。

为了能够全面地求解传输过程的偏微分方程(组), 只有采用数值解方法才能完成此任务。数值解不是去直接求解微分方程, 而是将微分方程以一定形式(如有限差或有限元方法) 在求解域上离散为代数方程组, 然后求解此代数方程组得到相应的解, 这种解叫做数值解, 是对解析解的在一定误差范围内的近似。关于这方面的更为深入的论述请参考文献 [7]。

数值解是在一定误差限内对真实解(或叫理论解、解析解) 的逼近, 而且如果需要, 原则上数值解可以通过加密网格和减小时间步长的办法无限趋近于真实解。因为偏微分方程的各种离散格式都是得到严格证明了的可以无限逼近真实解的格式。当得到了求解域上的全部离散格式的数据后, 可对其进行图形处理, 则可观察到全域上的流动场、温度场等的变化情况。随着计算机技术的全面发展, 数值解得到了长足的发展, 已成为与分析研究和实验研究并列的具有同等重要意义的研究方法。数值解的优点是能够解决分析研究无法解决的复杂问题; 和实验法相比, 所需费用和时间都比较少, 而且精度高。有些问题, 如加热炉过程的解析与自动控制, 可控核聚变中的高温等离子流动, 以及星云演化过程等均无法在实验室内进行实验, 采用数值方法却可对它们进行研究。数值方法要求对问题的物理特性有足够的了解, 才能得到较精确的结果。

0.3 本书叙述特点

传统教材的编写特点是在每篇每章开始时, 首先提出一般性概念及名词解释, 然后再引导到中心主题上。这种叙述方法不符合一般科学探索和科学研究的规律和顺序。一般地说, 概念和名词是在科学研究过程中产生出来的, 不是先产生名词概念, 再展开科学研究过程。但目前的教学一般是按照教材的编排顺序, 先解释名词概念, 再进入研究主题, 这不符合人的正常思维习惯, 学生学习时不得不生硬地接受, 往往会不知道名词概念的背景来源。另外, 传统教材的编排很多不是围绕研究主题去展开叙述, 而是按一定的由浅入深的顺序去编排节目, 这也很容易使学生只是理解性地学习知识, 而失去了对知识根源和思想脉络的追索。举例来说, 目前大多数流体力学方面的教材都是首先介绍流体黏性的概念, 然后在下一章才叙述 N-S 方程的