

高等教育“十二五”规划教材

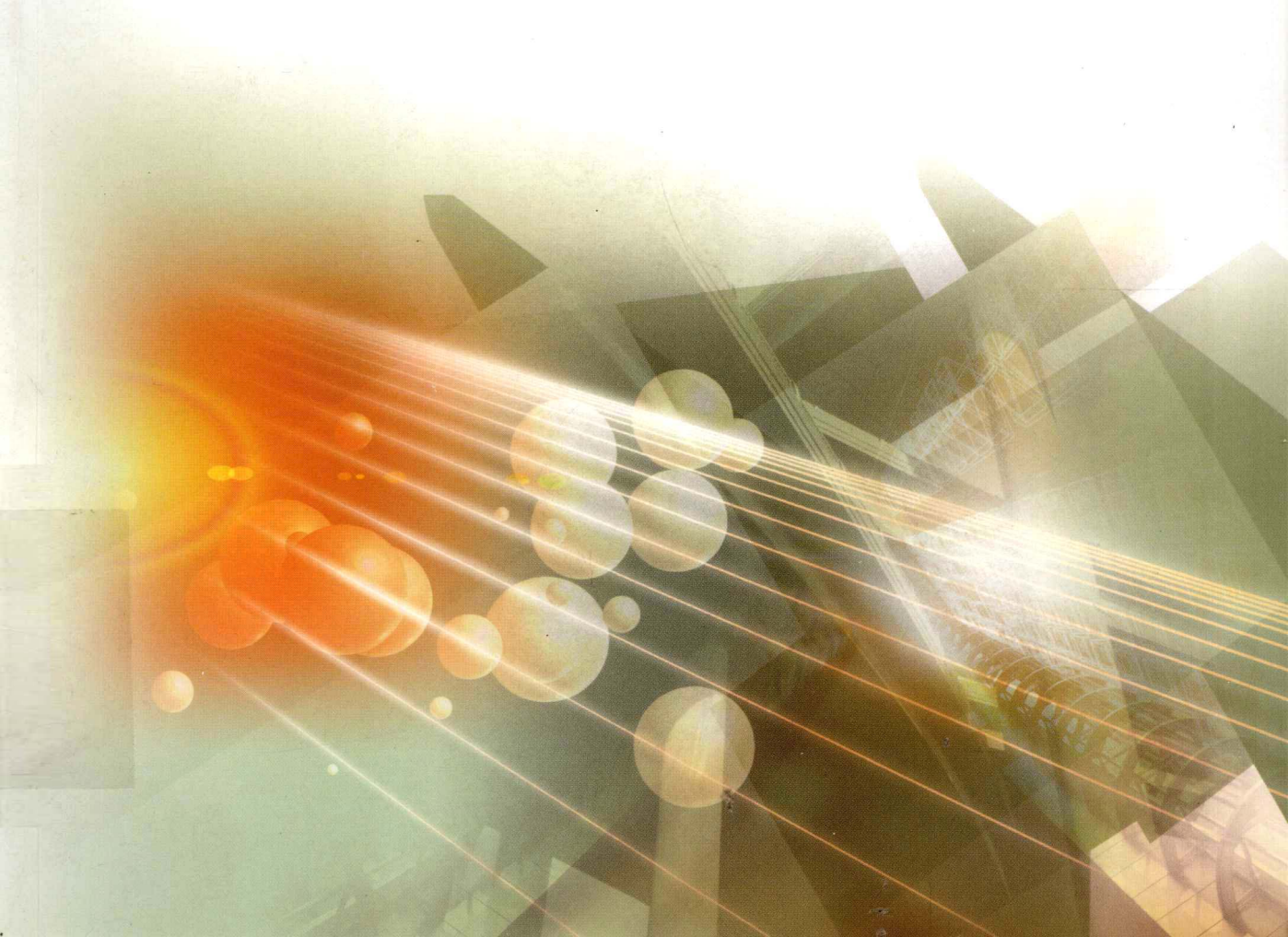
材料工程传输原理

Cailiao Gongcheng Chuanshu Yuanli

主 编 时海芳 高志玉

副主编 韩富银 薛维华 付大军 任 鑫 孟媛媛

中国矿业大学出版社



高等教育“十二五”规划教材

材料工程传输原理

主 编	时海芳	高志玉	
副主编	韩富银	薛维华	付大军
	任 鑫	孟媛媛	

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书包括动量传输、热量传输、质量传输三编内容,共16章。动量传输部分包括动量传输的基本概念和基本定律、管内流动、边界层流动、可压缩气体流动及相似原理与量纲分析等内容;热量传输部分包括热量传输基本概念及基本定律、导热、对流换热、辐射换热等内容;质量传输部分包括质量传输基本概念及基本定律、扩散传质、对流传质及动量、热量、质量传输的类比等。各章均设有小结和复习思考题,书末附有常用数据表。本书注重从三种传输具有类似性的角度阐述了流体流动过程、传热过程以及传质过程的传输基础理论,并力求将这些基础理论应用于材料制备及加工与冶金工程实践中。

本书可作为高等院校材料类、冶金类专业及相关专业的本科生教材,也可作为研究生、教师及有关工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

材料工程传输原理/时海芳,高志玉主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2012.5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1386 - 0

I. ①材… II. ①时… ②高… III. ①材料科学:热工学—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 280964 号

书 名 材料工程传输原理

主 编 时海芳 高志玉

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 18 字数 445 千字

版次印次 2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷

定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

传输与输送、转移、传递同义,都是指不同条件下的物质或能量随空间及时间的变化。传输现象普遍存在于各工程技术领域。传输过程是流体的动力过程、传热过程及物质传递过程的统称,也称为传递过程或速率过程。传输过程中进行着动量、热量、质量的传递与输送,分别称为动量传输、热量传输和质量传输。传输原理主要研究流体的动量、热量、质量在传输过程中的速率,三者具有统一性。从20世纪中期以来,传输原理已成为一门独立学科,并广泛应用于材料、冶金、机械、化工、能源、环境等工程领域。随着科学技术的发展,传输原理在认识材料制备及加工与冶金过程的本质,发展材料制备及加工与冶金新理论、新技术、新工艺、新方法、新流程等方面起到中流砥柱的作用,已经成为现代材料制备及加工与冶金工程的理论基础。

作者根据多年的“传输原理”课程教学经验和体会,在参考国内外相关教材、著作的基础上,结合培养应用创新型人才的需要编写了本书。书中内容涵盖材料、冶金类学生学习传输原理所需的相关基本知识,并结合材料、冶金学科发展及新技术,介绍“三传”在材料制备及加工与冶金工程实践中的应用。内容力求体现“加强基础、便于自学、联系实际”的原则。本书可作为材料科学与工程、材料成型及控制工程、焊接技术与工程、冶金工程等专业的本科生的教学用书。各专业可根据自身特点及需要,讲授课程时酌情删减。书中按章附有复习思考题,以利于培养学生运用基本概念和理论解决实际问题的能力。本书附录给出了传输现象和传输理论方面的一些物性数据表,以供查阅。本书也可供研究生、教师和有关工程技术人员参考使用。

本书分为3编,共16章内容。第1编为动量传输,包括第2章至第8章,介绍了动量传输的基本概念和定律,为了易于理解理论知识,加强了基本概念的描述。与此同时,注重内容的系统性,保留了流体力学中流体静力学的一些内容。第2编为热量传输,包括第9章至第12章,详细介绍了热量传输三种基本方式的基本原理、计算方法和工程计算实例。以导热为例,介绍了关于热量传输的数值计算方法。第3编为质量传输,包括第13章至第16章,介绍了质量传输基本概念,扩散传质、对流传质的基本计算方法及工程应用。关于“三传”的

类比在第16章进行了概述。

本书虽然是按动量传输、热量传输、质量传输的顺序编写,但又从传输理论系统的整体性出发,各章内容前后联系、循序渐进,力图从物理和数学上阐明动量传输、热量传输和质量传输之间的相似性,用对照的方法研究三种传递过程,加强读者对三种传递过程的理解。冶金传输原理是一门数理解析较强的课程,在本书内容的阐述和解析方法上,着眼于物理概念和数学表达的统一,并突出物理性课程的特点,而且力图提炼出简化的物理模型和数学模型。

借助于计算机模拟及计算,有限差分法及有限元法等数值计算方法,已成为解析传输过程偏微分方程的主要手段。限于篇幅,本书仅对计算机模拟及计算作了简单介绍。

本书由辽宁工程技术大学时海芳(第1、3、13章)、高志玉(第4、5、14章)、薛维华(第9、10、12章)、付大军(第6、7章)、任鑫(第8章、复习思考题)、孟媛媛(第2章、附录)和太原理工大学韩富银(第11、15、16章)编写,全书由高志玉统稿。沈阳工业大学袁晓光教授审阅了全书,对本书的编写提出了许多宝贵意见,在此深表谢意。

在本书编写过程中,得到了中国矿业大学出版社、辽宁工程技术大学教务处的帮助和支持,在此表示衷心的感谢。并向本书引用参考文献的原著者和编撰者及为本书提供资料及建议的同行表示诚挚的感谢。

由于编者水平及所掌握的资料所限,不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2011年10月

主要符号表

a	加速度, m/s^2	n	对流质量通量密度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
	热扩散率, m^2/s	N	对流摩尔通量密度, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
A	面积, m^2	p	压强, Pa
b	蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2})$	P	压力, N
	宽度, m	q	热流密度, W/m^2
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	q_m	质量流量, kg/s
	音速, m/s	q_v	体积流量, m^3/s
C	物质的量浓度, mol/m^3	q_G	重量流量, N/s
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Q	热量, J
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Q_w	累计热量, J/m^2
d	直径, m	r	半径, m
	相对密度, 无量纲量	R	水力半径, m
d_e	当量直径, m		冲击力, N
D	扩散系数, m^2/s	t	时间, s
E	辐射力, W/m^2		摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
F	力, N	T	热力学温度, K
g	重力加速度, m/s^2	v	比体积, m^3/kg
G	重力, N		速度, m/s
	投入辐射, W/m^2	V	体积, m^3
h	高度, m	w	质量分数
	比焓, J/kg	W	单位质量力, m/s^2
h_f	总水头损失, m	W_P	势函数
h_l	沿程水头损失, m	W_R	单位质量流体的阻力功, m^2/s^2
h_r	局部水头损失, m	x	摩尔分数
j	扩散质量通量密度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	X	单位质量力 x 轴分量, m/s^2
J	扩散摩尔通量密度, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Y	单位质量力 y 轴分量, m/s^2
	有效辐射, W/m^2	z	高度(水头), m
k_c	对流传质系数, m/s	Z	单位质量力 z 轴分量, m/s^2
l	长度或特征长度, m	α	对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	分子平均自由程, m		热辐射吸收率
L	无量纲长度		角度
m	质量, kg	α_v	体胀系数, K^{-1}
M	摩尔质量, kg/mol	γ	重度, N/m^3
	动量, $\text{N} \cdot \text{s}$		质量热容比, $\gamma = c_p/c_v$
M_r	相对分子量, kg/mol		

续表

δ 厚度, m	λ 沿程阻力系数
速度边界层厚度, m	热导率, W/(m · K)
δ_b 层流底层的厚度, m	波长, m
δ_T 温度边界层厚度, m	Δ 无量纲速度
δ_c 浓度边界层厚度, m	ν 运动黏度(动量扩散系数), m ² /s
Δ 绝对粗糙度, m	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	质量浓度, kg/m ³
ζ_l 摩擦阻力系数	σ 正应力, Pa
η 动力黏度, Pa · s	表面张力, N/m
θ 角度	τ 切应力, Pa
过剩温度, 无量纲量	热辐射透射率
Θ 无量纲温度	φ 角度
κ_T 等温压缩率, Pa ⁻¹	Φ 热流量, W

相似准数

阿基米德数	$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}$	路易斯数	$Le = \frac{a}{D}$
毕渥数	$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}$	马赫数	$Ma = \frac{v}{c}$
传质毕渥数	$Bi^* = \frac{k_c l}{D}$	努塞尔数	$Nu = \frac{Kl}{\lambda}$
欧拉数	$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2}$	贝克莱数	$Pe = Re \cdot Pr = \frac{vl}{a}$
傅立叶数	$Fo = \frac{at}{l^2}$	传质贝克莱数	$Pe^* = Re \cdot Sc = \frac{vl}{D}$
传质傅立叶数	$Fo^* = \frac{Dt}{l^2}$	普朗特数	$Pr = \frac{\nu}{a}$
弗劳德数	$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}}$	雷诺数	$Re = \frac{vl}{\nu}$
伽利略数	$Ga = \frac{gl^3}{\nu^2}$	施密特数	$Sc = \frac{\nu}{D}$
格拉晓夫数	$Gr = \frac{\alpha gl^3}{\nu^2} \Delta T$	舍伍德数	$Sh = \frac{k_c l}{D}$
传质格拉晓夫数	$Gr^* = \frac{l^3 g \beta \Delta x}{\nu^2}$	斯坦顿数	$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{K}{\rho v c_p}$
均时性数	$Ho = \frac{vl}{l}$	传质斯坦顿数	$St^* = \frac{Nu^*}{Pe^*} = \frac{k}{\rho v}$

目 次

第 1 章 绪论	1
1.1 传输现象	1
1.2 动量、热量及质量传输的类似性	2
1.3 传输过程的研究方法	4
1.4 体系与控制体	5
1.5 衡算方程	6
本章小结	7
复习思考题	7

第 1 编 动量传输

第 2 章 动量传输的基本概念	11
2.1 动量传输的研究对象、研究目标及研究方法	11
2.2 流体的主要物理性质	13
2.3 牛顿黏性(内摩擦)定律	17
2.4 作用在流体上的力	22
2.5 流体静压强及其特性	23
本章小结	30
复习思考题	30
第 3 章 流体运动的描述	32
3.1 描述流体运动的方法	32
3.2 描述流场的基本物理量	32
3.3 流场的描述	35
本章小结	38
复习思考题	38
第 4 章 动量传输的基本方程	40
4.1 质量守恒定律与连续性方程	40
4.2 理想流体动量平衡方程——欧拉方程	44

4.3	实际流体动量平衡方程——纳维尔—斯托克斯方程	46
4.4	伯努利方程——能量守恒方程	49
4.5	稳定流的动量方程及其应用	57
	本章小结	60
	复习思考题	60
第5章	流动形态及能量损失	62
5.1	流体流态分析及能量损失	62
5.2	流体在圆管中层流流动及沿程损失计算	65
5.3	流体在圆管中湍流流动及沿程损失计算	69
5.4	局部阻力与局部能量损失计算	76
5.5	流体在平行平板间的层流运动	78
	本章小结	81
	复习思考题	81
第6章	边界层理论	83
6.1	边界层理论的基本概念	83
6.2	平面层流边界层微分方程	85
6.3	边界层内积分方程	87
6.4	平板绕流摩擦阻力计算	90
	本章小结	91
	复习思考题	92
第7章	可压缩气体的流动	93
7.1	可压缩气体的基本概念	93
7.2	可压缩气体一元稳定等熵流动的基本方程	96
7.3	一元稳定等熵流动的基本特性	99
7.4	气流参数与流通截面的关系	105
7.5	渐缩喷管与拉瓦尔喷管	107
7.6	激波和膨胀波	111
	本章小结	114
	复习思考题	114
第8章	相似原理与量纲分析	116
8.1	相似原理的重要意义	116
8.2	相似的基本概念	117
8.3	相似三定律	120

8.4 两种求解相似准数的方法	122
8.5 相似模型研究方法	127
本章小结	130
复习思考题	130

第 2 编 热量传输

第 9 章 热量传输的基本概念	135
9.1 热量传输的研究内容	135
9.2 热量传输的基本方式	136
9.3 热量传输的描述	136
本章小结	139
复习思考题	140
第 10 章 导热	141
10.1 导热基本定律	141
10.2 导热微分方程	142
10.3 稳态导热	145
10.4 非稳态导热	154
10.5 导热的数值计算方法	164
本章小结	168
复习思考题	168
第 11 章 对流换热	170
11.1 对流换热现象的过程分析	170
11.2 对流换热过程的数学描述	173
11.3 求解对流换热系数的准数方程	175
11.4 对流换热的工程应用举例	181
本章小结	190
复习思考题	190
第 12 章 辐射换热	192
12.1 辐射换热的基本概念	192
12.2 黑体模型及黑体辐射定律	194
12.3 实际物体的辐射与吸收规律	196
12.4 角系数及其计算	198

12.5 黑体表面间的辐射换热·····	202
12.6 灰体表面间的辐射换热·····	203
12.7 气体辐射·····	208
12.8 综合换热·····	212
本章小结·····	212
复习思考题·····	213

第3编 质量传输

第13章 质量传输的基本概念 ·····	217
13.1 质量传输的研究对象、研究目标及研究方法·····	217
13.2 浓度、速度与传质的基本方式·····	218
13.3 菲克第一定律再论及扩散系数·····	223
13.4 通量密度·····	226
13.5 质量传输微分方程及其定解条件·····	228
本章小结·····	232
复习思考题·····	232
第14章 扩散传质 ·····	234
14.1 一维稳态扩散传质·····	234
14.2 非稳态扩散传质·····	238
本章小结·····	241
复习思考题·····	241
第15章 对流传质 ·····	243
15.1 对流传质概述·····	243
15.2 对流传质微分方程和对流传质过程的相似准数·····	245
15.3 对流传质的量纲分析·····	246
15.4 对流传质系数求解的工程应用举例·····	248
15.5 传质系数模型·····	251
本章小结·····	253
复习思考题·····	253
第16章 动量、热量和质量传输的类比 ·····	254
16.1 分子传输的类似性·····	254
16.2 湍流传输的类似性·····	254

16.3 “三传”微分方程的类似性·····	255
16.4 三种传输的类比·····	256
本章小结·····	259
复习思考题·····	259
参考文献 ·····	260
附录 ·····	261
附表 1 高斯误差·····	261
附表 2 金属材料的密度、比定压热容和热导率·····	262
附表 3 几种保温、耐火材料的热导率与温度的关系·····	263
附表 4 饱和水的热物理性质·····	264
附表 5 液态金属的热物理性质·····	266
附表 6 干空气的热物理性质·····	267
附表 7 在大气压力下烟气的热物理性质·····	268
附表 8-1 气体中的质量扩散系数(二元体系)·····	269
附表 8-2 液体中的质量扩散系数(二元体系)·····	270
附表 8-3 固体中的质量扩散系数(二元体系)·····	270
附表 9 固体材料沿表面法线方向上的辐射发射率 $\epsilon(\epsilon_n)$ ·····	271
附表 10 主要物理量的单位换算表·····	273

第1章 绪 论

传输与传递、转移同义,均指自然界不同条件下的物质或能量随空间及时间的变化。材料工程传输原理是对材料工程中传输现象的原理及机理的解释和定量求解。它以动量传输、热量传输和质量传输(简称“三传”)作为主要研究对象,而这三种传输过程(动量、热量和质量)又分别属于流体力学、传热学和传质学领域。传输原理以物理学三个基本定律,即质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律为依据,是一门探讨速率的科学。

1.1 传输现象

所谓传输现象,是指流体的动力过程、传热过程和物质输送过程的统称。某种传输过程,通常是指系统内的物理量从非平衡状态向平衡状态转移的过程。此处平衡状态是指在物理系统内具有强度性质的物理量(如速度、温度、组分浓度等)不存在梯度,例如,热平衡是指物系内的温度各处均匀一致。反之,若物系处于非平衡状态,即具有强度性质的物理量在系统内不均匀时,就会发生物理量的传输,例如,冷、热两物体互相接触将发生热量传输,热量会由热物体流向冷物体,最后使两物体的温度趋于一致。

1.1.1 生活、生产中的传输现象

传输现象普遍存在于日常生活中。例如大气的流动、河流水的流动、烟囱喷出烟气的流动等,这些都属于动量传输。对于热量传输,除了上述关于冷、热两物体相接触而发生的热量转移这一现象外,一杯热水放置于空气中,它的散热过程即是一个热量传输过程。而我们可以嗅到厨房做菜飘出的美味,可以闻到花香,这些都属于质量传输现象。

工业生产中也普遍存在传输现象,如冶金工程、机械工程、生化工程、制冷工程及环境工程等领域。以冶金工程为例,熔炼炉中冶金熔体的流动、除气精炼过程中气泡上升过程造成的两相流动都属于动量传输;熔炼炉的升温、降温过程,固态矿物原料的液化、气化都属于热量传输;而金属还原过程中的火法冶金与湿法冶金、金属合金的熔炼与净化工艺均涉及质量传输问题。

那么,如何对动量传输、热量传输和质量传输进行定义呢?

在本课程范围内,传输过程中所传输的物理量为动量、热量和质量。动量传输是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;热量传输是指热量由高温区向低温区的转移;质量传输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。由此可见,动量、热量与质量传输之所以发生,是由于系统内部存在速度、温度和浓度梯度的结果,换句话说,速度差、温度差和浓度差分别是动量、热量和质量传递的驱动力。

1.1.2 材料工程中的传输现象

动量传输、热量传输、质量传输的现象广泛存在于材料工程各个领域,包括热处理过程、

铸造过程、焊接过程、锻压冷变形过程等。例如,热处理过程中工件温度的变化、材料成分的变化,铸造过程中金属熔体的流动充型、铸件的成分偏析,焊接过程中熔池金属液的流动、铸件温度的变化等均有传输现象。

1.1.3 研究传输现象在材料工程中的重要意义

传输现象是材料工程领域中普遍存在的物理现象。在金属材料的热处理过程中,温度的分布、浓度的分布和应力的分布,即温度场、浓度场和应力场,甚至包括流场(速度的分布),均发生变化,从而影响最终的热处理质量。在铸造过程中,流场、温度场、浓度场和应力场的综合作用决定了铸件的最终形态和质量。在焊接过程中,上述四场亦同样影响着工艺(产品)的最终质量。在锻压过程中,表现为温度场、浓度场及固态形变的应力应变场的变化对工艺(产品)的影响。

近些年发展起来的先进金属材料制备技术中,如快速凝固、定向凝固、非晶制备、半固态成形、激光加工、纳米制备等,上述四场中的一场或多场的变化都对材料制备过程起着非常重要的作用。

综上所述,在材料工程研究中,流体动量、材料温度、浓度及应力四种基本物理量是对过程具有决定性作用的物理量,客观描述材料加工过程中的四场变化并加以有效控制,是获得产品技术突破、提高生产效率、生产高质量产品、赢得市场的必要条件。本书主要研究材料工程中动量、热量和质量的传输现象的规律,应力场的分析不在本书的讨论范围之内,有兴趣的读者可参考相关著作。

1.2 动量、热量及质量传输的类似性

如前所述,当系统中存在速度、温度和浓度梯度时,则分别发生动量、热量和质量的传输过程。因所发生的过程不同,三种传输过程可能分别单独存在,也可能是其中任意两种或三种过程同时存在。

三种传输过程之间具有许多相似之处,它们不但具有相同的传输机理,可以用类似的数学模型描述,而且描述三者的一些物理量之间还存在某些定量关系。这些定量关系会使三种传输过程问题得以简化,在实际生产和材料工程研究中具有非常重要的意义。

动量、热量和质量传输,既可以由分子的微观运动(分子扩散)引起,也可以由旋涡混合造成流体微团的宏观运动(湍流)引起。前者称为分子传递,后者称为湍流传递。分子传递只有在固体、静止或层流流动的流体内才会单独发生。在湍流流动的流体中,除分子扩散传递外,由于存在大大小小的旋涡运动,主要以湍流传递为主。关于层流与湍流流动的具体概念及特征将在后续章节叙述。

下面仅以分子扩散传递为例,说明动量、热量和质量传输的类似性。至于动量、热量和质量的湍流传输的类似性,将在第 16 章中进行总结说明。

金属熔体或气体等流体的黏性、热传导性和质量扩散性,统称为流体的分子传递性质。因为从微观上来考察时,这些性质分别是非均匀流场中分子不规则运动在同一过程中所引起的动量、热量和质量传输的结果。当流场中速度分布不均匀时,分子传递的结果是产生切应力;而温度分布不均匀时,分子传递的结果是产生热传导;在多组分的混合流体中,如果某种组分的浓度分布不均匀,分子传递的结果是引起该组分的质量扩散。表示上述三种分子

传输性质的基本数学关系分别为牛顿黏性定律、傅立叶导热定律和菲克第一定律。

1.2.1 牛顿黏性定律

两个做直线运动的流体层之间的切应力正比于垂直运动方向的速度变化率,即

$$\tau = -\eta \frac{dv}{dy} \quad (1-1)$$

对于均质不可压缩流体(密度为常数),式(1-1)可改写为

$$\tau = -\frac{\eta}{\rho} \frac{d(\rho v)}{dy} = -\nu \frac{d(\rho v)}{dy} \quad (1-2)$$

式中 η ——流体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

v ——流体速度, m/s ;

y ——垂直于运动方向的坐标, m ;

τ ——切应力,或称为动量通量,表示单位时间内通过单位面积传递的动量, Pa ;

ν ——流体的运动黏度, $\nu = \eta/\rho$, m^2/s ;

ρ ——密度, kg/m^3 ;

$d(\rho v)/dy$ ——动量浓度梯度,表示单位体积内流体的动量在 y 方向的变化率, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$ 或 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

式(1-2)中负号表示动量通量方向与速度梯度方向相反,即动量向速度降低方向传递。

1.2.2 傅立叶导热定律

在均匀且各向同性材料内的一维温度场中,通过导热方式传递的热流密度为

$$q = -\lambda \frac{dT}{dy} \quad (1-3)$$

对于 ρ 和 c_p 恒定的流体,式(1-3)可改写为

$$q = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{d(\rho c_p T)}{dy} = -a \frac{d(\rho c_p T)}{dy} \quad (1-4)$$

式中 λ ——热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

T ——热力学温度, K ;

y ——温度发生变化方向的坐标, m ;

q ——热流密度,或称为热量通量,表示单位时间内通过单位面积传递的热量, W/m^2 ;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

c_p ——比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

a ——热扩散率, $a = \lambda/\rho c_p$, m^2/s ;

$d(\rho c_p T)/dy$ ——热量浓度梯度或焓浓度梯度,表示单位体积内流体的热量在 y 方向上的变化率, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$ 。

式(1-4)中负号表示热量通量方向与温度梯度方向相反,即热量向温度降低的方向传递。

1.2.3 菲克第一定律

在混合物中若各组分存在浓度梯度时,则发生分子扩散。对于双组分系统,通过分子扩散传递的组分 A 的质量通量密度为

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (1-5)$$

式中 D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的扩散系数, m^2/s ;

ρ_A ——组分 A 的质量浓度, kg/m^3 ;

y ——组分 A 的质量浓度发生变化方向的坐标, m ;

j_A ——组分 A 的质量扩散通量密度, 表示单位时间内通过单位面积传递的组分 A 的质量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

$d\rho_A/dy$ ——组分 A 的质量浓度梯度, 表示单位体积内流体的质量在 y 方向的变化率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$ 。

式(1-5)中负号表示质量通量方向与浓度梯度方向相反, 即组分 A 向浓度降低方向传递。

1.2.4 三种传输现象的类比

由牛顿黏性定律、傅立叶导热定律和菲克第一定律的数学表达式[式(1-2)、式(1-4)、式(1-5)]可以看出, 动量、热量和质量传输过程的规律存在许多类似性, 概括如下:

① 动量、热量和质量传输通量, 均等于各自量的扩散系数与各自量的浓度梯度乘积的负值, 三种分子传递过程可用一个通式来表达, 即

$$(\text{通量}) = -(\text{扩散系数}) \times (\text{浓度梯度})$$

② 动量 ν 、热量 q 和质量扩散系数 D_{AB} 具有相同的量纲, 其单位均为 m^2/s 。

③ 通量为单位时间内通过与传递方向相垂直的单位面积上的动量、热量或质量, 各量的传递方向均与该量的浓度梯度方向相反, 故通量的通式中有负号。

通常将通量等于扩散系数乘以浓度梯度的方程称为现象方程, 它是一种关联所观察现象的经验方程。

动量、热量和质量传输是一门探讨速率过程的科学。将这三种传输现象归结为速率过程问题加以综合探讨, 具有一个鲜明的特色, 这就是在速率这个概念上三种传输现象之间存在许多相似性。由于“三传”过程的类似性, 它们不但可以用类似的数学模型描述, 而且描述三者的一些物理量之间还存在某些定量关系。可以用这些类似关系和定量关系研究各种传输过程。随着学习进一步深入, 读者将有更深刻的体会。

1.3 传输过程的研究方法

传输现象包含流体力学、传热学及传质学的内容, 因此传输过程是物理过程。它的研究方法和物理学中其他领域的研究方法一样, 有理论研究、实验研究和数值计算三种方法。它们彼此取长补短, 相互促进, 从而使学科得到不断发展。

1.3.1 理论研究方法

传输理论以物理学中三大定律为基础, 从宏观上研究传输问题。其核心分析方法是微元平衡法及其积分形式, 即整体平衡法。微元平衡法得到描述传输体系的微分方程, 其解是在一定条件下的速度分布、温度分布和浓度分布; 整体平衡法得到的是积分方程, 其解是在一定条件下体系的进出口各物理量之间的关系。

理论研究方法的具体研究步骤如下:

① 确定简化的物理模型。通常可以依靠观察、实验和分析,弄清影响体系的主要因素,提炼出简化的物理模型。这是理论研究方法最关键也是最困难的一步,因为它要求研究者对所研究的对象必须有深刻的了解。

② 建立数学模型。针对上述物理模型,根据物理基本定律建立数学方程。数学方程是对某一大类问题的一般描述,不涉及过程的具体特点。为了唯一确定所研究的某一过程,必须由实际传输过程的具体特点列出相应的定解条件(初始条件和边界条件),将物理问题转化为数学问题。

③ 数学求解。利用相关的数学方法准确或近似地解出上述数学问题的解,并与实验或观察结果比较,确定解的准确程度及适用范围。

1.3.2 实验研究方法

实验研究方法在传输过程中有着非常广泛的应用。简化物理模型的提出需要实验提供依据;计算结果的正确性、可靠性需要实验来检验;当研究的问题复杂,数学模型不易建立,或虽有数学模型但因方程复杂或边界条件复杂难于求解时,实验研究或基于相似理论(将在第8章进行介绍)的模型实验研究就显得特别重要。实验研究方法的主要特点是能在与所研究的问题完全相同或基本相同的条件下进行观测,所以实验研究得出的结果一般是可靠的。但是,实验方法常受模型尺寸以及边界条件不能完全满足等问题所限制。

1.3.3 数值计算研究方法

传输方程通常是二阶非线性偏微分方程组,如果研究对象是三维空间或边界条件复杂时,特别是复杂的传输过程,采用数学解析方法往往不能获得其解。数值计算是借助计算机采用近似计算方法(如有限差分法、有限元法等)求解传输方程而获得数值解的有效方法。数值计算方法的优点是能够解决理论研究无法解决的复杂问题,并且与实验相比所需的费用和时间都较少,精度较高。但是,数值算法所得结果是散点,不容易看出各个物理参数对解的影响。另外,求解的前提必须有描述过程的精确的数学方程,这样才能获得满意的结果。

综上所述,在传输问题的研究中,理论、实验和数值计算三种研究方法各有利弊,相互补充。实验用于检验计算结果的正确性和可靠性以及提供建立物理模型的依据,这样的作用不论理论和数值计算发展得多么完善都是不可代替的。而理论则能指导计算和实验,使之进行得富有成效,并且可以把部分实验结果推广到没有做过实验的一类问题中去。计算则可弥补理论和实验的不足,对一系列复杂的传输过程进行既快又省的研究工作。

本书主要介绍理论研究方法及部分实验研究方法,同时结合导热问题的数值解法对数值计算方法进行简单介绍。

1.4 体系与控制体

如前所述,“三传”的理论研究以质量、能量和动量守恒定律为基础。这三个基本的物理定律都是对于某一体系而言的。所谓体系,是指一些具有特性固定不变的物质的结合。基本定律所给出的是体系和它周围环境之间的相互作用。在应用这些定律时,都必须严格按