

普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材

材料加工冶金 传输原理

吴树森 主编



机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材

材料加工冶金传输原理

主编 吴树森
参编 朱六妹
主审 孙国雄



机械工业出版社

本书涵盖了专业改革前的“流体力学”、“传热学”及“传质学”课程的内容。系统而全面地从动量、热量及质量传输观点，阐述了流体流动过程、传热过程以及传质过程的基本理论，并结合学科发展前沿及最新技术介绍了它们在材料加工及冶金工程实践中的主要应用。

材料加工冶金过程中的三种传输是相互关联、相互制约及相互影响的。本书从物理和数学上阐明动量、热量和质量传递之间的相似性，用统一的和对照的方法研究三种传输过程，以加深对三种传输过程的理解。全书各章中均附有一定数量的例题和习题，以帮助读者对内容的理解和运用，书末附有必要数据资料的附录。

本书可作为材料加工工程、材料成形及控制工程、材料学、热能工程及冶金等专业的本科生教材，也可供从事此类专业的研究生及其它科学技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料加工冶金传输原理/吴树森主编. —北京: 机械工业出版社, 2001.5

普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材

ISBN 7-111-08480-2

I. 材… II. 吴… III. 金属材料-热处理-理论—高等学校-教材
IV. TG151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 03721 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 董连仁 王霄飞 版式设计: 霍永明 责任校对: 张 佳

封面设计: 姚 毅 责任印制: 郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·8 印张·307 千字

0 001—2 500 册

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

普通高等教育材料成形及控制工程专业 改革教材编审委员会

主编单位：华中科技大学

策划单位：华中科技大学 机械工业出版社

顾问：杨叔子 院士

周 济 院士

崔 昆 院士

参编单位：西北工业大学 武汉理工大学

武汉大学 吉林工业大学

重庆工业大学 太原理工大学

湖北工学院 华南理工大学

太原重型机械学院 武汉科技大学

大连理工大学 上海交通大学

湖北汽车工业学院 武汉凯奇公司

机械科学研究院武汉材料保护研究所

审稿单位：武汉大学 东南大学

武汉理工大学 山东工业大学

合肥工业大学 中国科学院计算所

西安交通大学 浙江大学

福州大学

(排名不分先后)

序 言

我国社会主义现代化建设浪潮不断高涨，高等教育与教学改革不断深入发展，长江后浪推前浪。

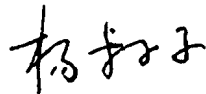
培养基础宽、素质高、能力强、适应面广，具有创新能力的人才，教材建设是一大关键。新的专业目录颁布以来，经过摸索和探讨，对一些改革力度大的专业组建和教材建设，各高校的观点和看法逐渐趋于大同。在这个基础上，编写一套适合于普通高等教育“材料成形与控制工程”专业系列改革教材是适时的，也是非常必要的。

该系列教材与内容合理而先进，充分体现了专业重心下移，着重于专业的基础性、共性课程的设置。而反映铸、锻、焊专业方向性的课程，绝大部分作为选修课程设置。其主要特点，一是系列教材覆盖面宽，不仅覆盖了3个老专业近40门专业教材的内容，而且还延伸到材料热加工的最新技术及发展的前沿；二是内容精练，选材新颖，结构合理，12门教材平均每门不足30万字，仅为4个老专业教材篇幅的 $1/4 \sim 1/5$ ，且近一半的内容选自近10余年来的科研成果、国内外文献和国外原版教材；三是12门专业主干教材中，有4门是与计算机和信息技术相结合的教材，突出了计算机和信息技术的学习与应用。

我相信，通过这套专业系列教材的学习，可使材料成形与控制工程专业的学生较为充分掌握系统的专业基础与共性知识，在先进的材料加工新技术和发展趋势方面较好了解乃至有所掌握，在计算机应用和外语水平方面能形成优势，这有利于培养较高的综合素质和较强的创新能力。

当然，任何事情不能一蹴而就。这套专业系列教材也有待于在教学实践中不断修改与完善。好的开始等于成功的一半。我祝愿在著者与读者的共同努力下，这套教材有一个更为美好的明天，谨此为序。

中科院院士



2000年8月

前 言

为了适应国家教育改革形势的发展,根据教育部最新颁布的新的专业目录,全国大部分工科院校已将原热加工专业的铸造、焊接、锻压、热处理四个专业合并为材料成形及控制工程大专业。1998年12月,教育部热加工专业教学指导委员会在哈尔滨召开年会,探讨了专业改造和教材建设的问题。

推行专业改革,为社会培养综合素质高,知识结构全面的栋梁之材,在很大程度上取决于教材建设。教育部颁布新的专业目录已两年多,经过这一阶段的摸索和探讨,对材料成形及控制工程专业的改造和教材建设,各高校观点和方法逐渐趋于大同,在这个基础上,编写一套普通高等教育材料成形及控制工程专业系列教改教材是适时的。为此,机械工业出版社教材编辑室成立了以华中科技大学为牵头单位的系列教改教材编审委员会,共同组织编写材料成形及控制工程专业系列教材。

本书是根据1998年教育部颁布的最新高等学校本科专业目录而编写的,作为以材料加工工程、材料成形及控制工程、材料及冶金专业的本科生为主的教学用书。

《材料加工冶金传输原理》是继《高等数学》、《大学物理》、《大学化学》及《工程力学》教学之后的技术基础课程,它为学生学习有关专业课程打好理论基础。

在内容的安排上:本书第一章为绪论;第二至七章为动量传输;第八至十二章为热量传输;第十三至十六章为质量传输。本书在编写过程中注意了如下几点:

1. 许多材料加工及冶金过程都是在高温下进行的,在进行冶金化学反应的同时,必然伴随着热量传递过程和物质传递过程。在大多数情况下,这些物理过程是在物质流动的情况下发生的,也就是说是以动量传输为基础的热量传输和质量传输,它们构成了材料加工过程中三个不可分割的物理过程。本书力图从物理上和数学上阐明动量、热量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,以便学生加强对三种传递过程的理解。

2. 遵循由浅入深的认识规律,加强了对一些基本概念的叙述,注重阐述的系统性,以便于理解和自学。

3. 本课程的教学基本目的之一,是为学习后续课程或研究材料加工过程提供基础物理模型和数学模型,因此,本书力图阐明提炼出简化的物理模型和数

学模型的方法。同时，边界层理论已越来越多地用于研究材料加工过程中的实际传输问题，本书加强了这方面的叙述。

4. 在论述动量传输、热量传输和质量传输各个部分主要内容的同时，还介绍了与现代材料加工联系密切的传输理论问题（如第六、十二、十六章）。

5. 借助于计算机的模拟及计算已成为传输理论的重要研究方法。利用有限差分法及有限元法等数值计算方法，可以对复杂的导热及流体流动的偏微分方程进行求解。但是，目前材料加工工程及冶金等专业都开设“（材料加工）计算机模拟”或“（材料加工）CAD/CAM”课程，这些课程对数值解法有详细的叙述，并大多以导热或流体流动问题为分析对象。因此，为避免重复及节省篇幅，本教材略去了数值解法的内容，读者可参考本系列教材的其它教材或参考书。

本书由华中科技大学吴树森教授主编（编写第一至七章、第十三至十六章），朱六妹副教授参编（编写第八至十二章），由东南大学孙国雄教授主审。

本书在编写过程中，得到了华中科技大学魏华胜副院长、林汉同教授、李远才教授、李志远教授、黄乃瑜教授及刘清华同志，以及武汉大学张富巨教授、武汉理工大学齐世长教授等的帮助和支持，在此一并表示衷心的感谢。对所有为本书提供资料及建议的同志也表示诚挚的谢意！

由于编写水平所限，难免会有不少错误，敬请广大读者指正。

编 者
2000年9月

主要符号

<p>a 加速度, m/s^2 热扩散率, m^2/s</p> <p>A 面积, m^2</p> <p>b 蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{s}^{1/2})$</p> <p>$B$ 宽度, m</p> <p>c 比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$</p> <p>$c$ 物质的量浓度, mol/m^3</p> <p>c_f 摩擦阻力系数</p> <p>c_p 比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$</p> <p>$c_v$ 比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$</p> <p>$d$ 直径, m</p> <p>D 直径, m 扩散系数, m^2/s</p> <p>D_{AA} 自扩散系数, m^2/s</p> <p>D_{AB} 互扩散系数, m^2/s</p> <p>e 自然对数的底</p> <p>E 比能, J 辐射能量, W/m^2</p> <p>F 力, N</p> <p>g 重力加速度, m/s^2</p> <p>G 重力, N 总辐照强度, W/m^2</p> <p>h 高度, m</p> <p>h_w 摩擦阻力损失, J/m^3 或 J/kg, 沿程损失水头, m 液体柱</p> <p>h_f 局部阻力损失, J/m^3</p> <p>j 质量通量密度 (相对于质量平均速度), $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$</p> <p>$J$ 摩尔通量密度 (相对于摩尔平均速度), $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 辐射强度, W/m^2</p> <p>k 传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$</p>	<p>k_c 对流传质系数, m/s</p> <p>l 长度, m</p> <p>\bar{l} 分子平均自由程, m</p> <p>L 厚度或特征长度, m 凝固潜热量, J/kg</p> <p>m 质量, kg</p> <p>M 摩尔质量, kg/mol 动量, $\text{N} \cdot \text{s}$</p> <p>n 质量通量密度 (相对于静止坐标), $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$</p> <p>$N$ 摩尔通量密度 (相对于静止坐标), $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$</p> <p>$p$ 压力, Pa 或 N/m^2</p> <p>q 热流密度, W/m^2</p> <p>Q 热量, J 流量, m^3/s 或 kg/s</p> <p>r 半径, m</p> <p>R 气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 水力半径, m 冲击力, N</p> <p>R_t 热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$</p> <p>$t$ 时间, s 摄氏温度, C</p> <p>T 热力学温度, K</p> <p>v 速度, m/s 比体积, m^3/kg</p> <p>V 体积, m^3</p> <p>w 质量分数</p> <p>W 质量力, N</p> <p>X 单位质量力 x 轴分量, N</p> <p>Y 单位质量力 y 轴分量, N</p> <p>Z 单位质量力 z 轴分量, N</p> <p>Z 高度 (水头), m</p>
---	--

α	表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 热辐射吸收率, % 角度	Θ	无量纲温度
α_v	体积膨胀系数, $^\circ C^{-1}$ 角度	λ	沿程阻力系数 热导率, $W/(m \cdot K)$ 辐射波长, m
γ	重度, N/m^3	ν	运动粘度 (动量扩散系数), m^2/s
κ_T	等温压缩率, Pa^{-1}	ρ	密度, kg/m^3 热辐射, 反射率, %
δ	厚度 (或边界层厚度), m	σ	正应力 (或表面张力), Pa 辐射常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$
Δ	绝对粗糙度, m	τ	切应力, Pa 热辐射, 透射率, %
ϵ	热辐射, 发射率, %	Φ	热流量, W/m^2
ζ	局部阻力系数	φ	角度
η	动力粘度, $Pa \cdot s$	ω	孔隙度
θ	角度		

相似准数

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

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

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

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

$$Fo = \frac{at}{L^2}, \text{傅里叶数}$$

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

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

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

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

$$Ho = \frac{vt}{L}, \text{均时性数}$$

$$Le = \frac{a}{D}, \text{路易斯数}$$

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}, \text{努塞尔数}$$

$$Pe = RePr = \frac{vL}{a}, \text{贝克来数}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \text{普朗特数}$$

$$Re = \frac{vL}{\nu}, \text{雷诺数}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D}, \text{施密特数}$$

$$Sh = \frac{k_c L}{D}, \text{舍伍德数}$$

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

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

目 录

序言

前言

主要符号

第一章 绪论	1
第一节 动量、热量与质量传输的类似性	1
第二节 传输过程的研究方法	3
第二章 流体的性质	6
第一节 流体的概念及连续介质模型	6
第二节 流体的主要物理性质	7
第三节 流体的粘性和内摩擦定律	10
第四节 非牛顿流体	13
习 题	15
第三章 流体动力学	16
第一节 流体运动的描述	16
第二节 连续性方程	21
第三节 理想流体动量传输方程——欧拉方程	25
第四节 实际流体动量传输方程——纳维尔—斯托克斯方程	28
第五节 理想流体和实际流体的伯努利方程	30
第六节 伯努利方程的应用	37
第七节 稳定流的动量方程及其应用	40
习 题	43
第四章 层流流动及湍流流动	45
第一节 流动状态及阻力分类	45
第二节 流体在圆管中的层流运动	49
第三节 流体在平行平板间的层流运动	52
第四节 流体在圆管中的湍流运动	55
第五节 沿程阻力系数 λ 值的确定	59
第六节 局部阻力	62
习 题	63
第五章 边界层理论	64
第一节 边界层理论的基本概念	64
第二节 平面层流边界层微分方程	65
第三节 边界层内积分方程	67

第四节	平板绕流摩擦阻力计算	70
习题	.....	72
第六章	材料加工中的特殊流体流动	74
第一节	流体与颗粒的两相流	74
第二节	固体填料层内的流动	78
第三节	气液两相流动	81
第四节	射流	82
习题	.....	84
第七章	相似原理与量纲分析	85
第一节	相似的概念	85
第二节	流体流动过程中的相似准数	87
第三节	相似三定律	89
第四节	量纲分析基础	90
第五节	相似模型研究法	93
习题	.....	96
第八章	热量传输的基本概念	97
第一节	热量传递方式与傅里叶导热定律	97
第二节	温度场、等温面和温度梯度	99
第三节	热导率与热扩散率	101
习题	.....	102
第九章	导热	103
第一节	导热微分方程	103
第二节	一维稳态导热	106
第三节	接触热阻	114
第四节	二维稳态导热	115
第五节	一维非稳态导热	118
第六节	二维及三维非稳态导热	127
习题	.....	129
第十章	对流换热	131
第一节	对流换热的机理及影响因素	131
第二节	对流换热微分方程组	133
第三节	对流换热的准数方程式	134
第四节	强制对流换热的计算	138
第五节	自然对流换热的计算	145
习题	.....	148
第十一章	辐射换热	150
第一节	热辐射的基本概念	150
第二节	热辐射的基本定律	152

第三节	固体和液体及灰体的辐射	154
第四节	黑体间的辐射换热及角系数	155
第五节	灰体间的辐射换热	161
第六节	气体辐射	164
第七节	对流与辐射共同存在时的热量传输	169
习题	.....	170
第十二章	材料加工中的热量传输	172
第一节	凝固传热	172
第二节	热处理过程温度场的计算	176
第三节	焊接热过程计算	178
第四节	粉末制备中液滴的冷却	182
习题	.....	183
第十三章	质量传输基本概念和传质微分方程	184
第一节	浓度、速度、扩散通量密度	185
第二节	扩散系数	189
第三节	质量传输微分方程	191
第四节	定解条件	195
习题	.....	195
第十四章	分子传质	197
第一节	一维稳态分子扩散	197
第二节	非稳态分子扩散	203
习题	.....	205
第十五章	对流传质	207
第一节	对流传质概说	207
第二节	圆管内的层流对流传质	208
第三节	动量、热量和质量传输的类比	209
第四节	对流传质系数的关联式	213
第五节	传质系数模型	216
习题	.....	218
第十六章	材料加工中的质量传输	219
第一节	相间稳态传质和双膜理论	219
第二节	气相-液相反应中的扩散	222
第三节	气相-固相反应中的扩散	225
第四节	多孔材料中的稳态扩散	226
习题	.....	229
附 录	.....	231
附录 A	高斯误差函数表	231
附录 B	金属材料的密度、比定压热容和热导率	232

附录 C 几种保温、耐火材料的热导率与温度的关系	233
附录 D 饱和水的热物理性质	234
附录 E 液态金属的热物理性质	235
附录 F 干空气的热物理性质	236
附录 G 在大气压力下烟气的热物理性质	237
附录 H 二元体系的质量扩散系数	238
附录 I 固体材料沿表面法线方向上辐射发射率 $\epsilon(\epsilon_n)$	239
附录 J 主要物理量的单位换算表	240
参考文献	241

第一章 绪 论

传输现象 (Transport phenomena) 不仅存在于材料加工及冶金过程中, 在其它工程技术领域中也是普遍存在的, 如制冷工程、机械工程、生化工程及环境工程等领域。传输过程是物理量从非平衡状态朝平衡状态转移的过程。所谓平衡状态 (Equilibrium state), 通常是指在物理系统内具有强度性质的物理量 (如温度、组分浓度等) 不存在梯度而言的, 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, 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。

在本课程的范围内, 在传输过程中所传输的物理量为动量、热量和质量 (Momentum, heat and mass)。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。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、温度和浓度梯度的缘故。

动量、热量与质量传输是一种探讨速率的科学, 三者之间具有许多类似之处, 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着某些定量关系。这些类似关系和定量关系会使研究三类传输过程规律的问题得以简化。

第一节 动量、热量与质量传输的类似性

当系统中存在着速度、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。动量、热量和质量的传递, 既可由分子的微观运动引起的分子扩散传递, 也可以是由旋涡混合造成的流体微团的宏观运动引起的湍流传递。下面以分子传递为例, 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递的类似性, 将在第十五章进行总结说明。

冶金熔液或气体等流体的粘性、热传导性和质量扩散性, 统称为流体的分子传递 (传输) 性质。因为从微观上来考察, 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, 分子传递的结果产生切应力; 而温度分布不均匀时, 分子传递的结果

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，分子传递的结果便引起该组分的质量扩散。表示上述三种分子传输性质的数学关系分别为牛顿粘性定律、傅里叶定律和菲克定律。

一、牛顿粘性定律(Newton's law of viscosity)

两个作直线运动的流体层之间的切应力正比于垂直于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，上式可改写为

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

式中 y ——垂直于运动方向的坐标 (m)；
 τ ——切应力，又称动量通量 (Pa)；
 η ——流体的动力粘度或动力粘性系数 (Pa·s)；
 ν ——流体的运动粘度 (m²/s)， $\nu = \eta/\rho$ ；
 ρ ——密度 (kg/m³)；

$d(\rho v)/dy$ ——动量浓度变化率，表示单位体积内流体的动量在 y 方向的变化率 (N·s/m⁴ 或 kg·m⁻³·s⁻¹)。

式中的负号表示动量通量的方向与速度梯度的方向相反，即动量朝着速度降低的方向传递。

二、傅里叶定律(Fourier's law)

在均匀的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

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

对于恒定 ρc_p 的流体，上式可改写为

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

式中 y ——温度发生变化方向的坐标 (m)；
 q ——热流密度，又称热量通量，表示单位时间内通过单位面积传递的热量 (W/m²)；
 λ ——热导率 [W/(m·K)]；
 a ——热扩散率 (m²/s)；

$d(\rho c_p T)/dy$ ——焓浓度变化率或热量浓度变化率 (J·m⁻³·m⁻¹)；
 c_p ——比定压热容 (W·m⁻²·°C⁻¹)。

式中的负号表示热量通量的方向与温度梯度的方向相反，即热量是朝着温度降低的方向传递的。

三、菲克定律(Fick's law)

在混合物中若各组分存在浓度梯度时, 则发生分子扩散。对于两组分系统, 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 y ——组分 A 的密度发生变化的方向的坐标 (m);

j_A ——组分 A 的质量通量密度, 表示单位时间内通过单位面积传递的组分 A 的质量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$);

D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的扩散系数 (m^2/s);

$d\rho_A/dy$ ——组分 A 的质量浓度 (密度) 梯度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}^{-1}$)。

式中的负号表示质量通量的方向与浓度梯度的方向相反, 即组分 A 朝着浓度降低的方向传递。

四、三种传输现象的类比

由牛顿粘性定律、傅里叶定律和菲克定律的数学表达式 (1-1)、式 (1-3)、式 (1-5) 可以看出, 动量、热量和质量传输过程的规律存在着许多类似性, 可得到如下几点结论:

(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、热量和质量扩散系数 ν 、 a 、 D_{AB} 具有相同的因次, 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, 故通量的通式中有一“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着许多相似性。

第二节 传输过程的研究方法

传输现象包含了流体力学、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它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。

一、理论研究方法

传输理论是以物理学的 3 个基本定律（质量守恒定律、牛顿第二定律和热力学第一定律）为依据的。这 3 个定律对体系而言的数学公式早以为大家所熟知。传输理论应用这 3 个定律从宏观上研究传输问题，其分析方法的核心是微元平衡法，而整体平衡法只是微元平衡法的积分形式。前一种方法得到的是微分方程，其解是在具体条件下的速度分布、温度分布和浓度分布；后一种方法得到的是积分方程，其解是在具体条件下的体系进口与出口各物理量之间的关系。

理论研究方法一般可分为下述三个阶段：

(1) 确定简化的物理模型 这是理论研究方法最关键也是最困难的一步，它要求人们对所研究的对象必须有深刻的了解。通常可以依靠实验、观察，对被研究的对象进行具体分析，分析哪些是主要因素，哪些是次要因素，然后抓住主要因素忽略次要因素进行合理的简化和近似，从而提出一个简化的物理模型。

(2) 建立数学模型 针对上述物理模型，根据物理上已经总结出来的普遍定律（例如牛顿定律，热力学定律等）建立普遍方程。普遍方程是对一大类问题的一般描述，它没有涉及过程的具体特点。为了唯一地确定所研究的某一过程，必须列出相应的定解条件，它包括初始条件和边界条件。数学模型建立后，实际上已将一个物理问题变成了数学问题。

(3) 数学求解 利用各种数学工具准确地或近似地解出上述数学问题，并将结果和实验或观察资料进行比较，确定解的准确程度以及适用范围。

二、实验研究方法

实验研究方法在传输过程中有着广泛应用，它是研究问题不可缺少的一个方面。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；当所研究的问题极其复杂，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在于，实验能在与所研究的问题完全相同或大体相同的条件下进行观测。因此，通过实验得出的结果一般说来是可靠的。但是实验方法往往要受到模型尺寸的限制，以及边界条件不能全部满足等问题。

三、数值计算方法

传输方程是二阶非线性偏微分方程组。当研究对象是三维空间或边界条件复杂时，普通的数学解析方法往往会无能为力。数值计算方法是在 20 世纪 60 年代蓬勃发展起来的。由于数学发展水平的局限，理论研究方法往往只能局限于比较简单的物理模型。生产技术的日益提高，又要求能研究更复杂更符合实际的过程。另外，高速电子计算机的出现，以及一系列有效的近似计算方法（有限差分