

冶金反应工程学丛书

传递过程原理 及应用

查金荣 陈家镛 著

YEJIN FANYING
GONGCHENGXUE
CONGSHU

冶金工业出版社

冶金反应工程学丛书

传递过程原理 及应用

查金荣 陈家镛 著

赠
化冶所
图书馆

查金荣

97.8.7.

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书阐述了动量传递、能量传递和质量传递的基本规律,介绍了进行定量研究的基本方法。它以场论为主线叙述传递原理,从物理概念出发引进张量和场论,建立通用的微分方程组,并详举实例剖析针对实际问题进行简化和求解的方法。对壳体平衡法、微元平衡法和整体平衡法本书均做了介绍,并简述了量纲分析法,简要介绍了帕坦卡—斯波拉丁学派的数值解法。本书可作为工科研究生的教科书,也可作为大学本科高年级学生及有关工程技术人员的学习参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

传递过程原理及应用/查金荣,陈家镛著. —北京:

冶金工业出版社, 1997. 6

(冶金反应工程学丛书)

ISBN 7-5024-2083-5

I. 传… II. ①查… ②陈… III. 传递—概论 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 10428 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

冶金印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1997 年 6 月第 1 版, 1997 年 6 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 13.875 印张; 368 千字; 423 页; 1-1500 册

38 元

前言

本书是作者在自编讲义的基础上经过修订改写而成的。该讲义曾多次作为中国科技大学研究生院的教材。作者曾在该研究生院讲学10余年,已将对教材内容和教学对象的理解及教学心得全部融于本书之中。

本书在编写过程中注意了如下几点。

第一,贯彻“少而精”和“深入浅出”的原则。内容安排便于读者的理解和掌握,既便于教学,也便于自学。内容上突出了三传的相似性。每章最后一节的“本章要点”,是作者多年从事教学工作的结晶。

第二,原理体系与应用实例两者兼顾。传递原理的体系是伯德(Bird)等人^[1]于50年代末期建立的,它吸收了连续介质力学和热力学的研究成果。本书以场论为主线讲解传递原理体系(通用微分方程组),体系是完整的、严密的,叙述上只省略了某些数学环节上的处理,目的在于照顾工科专业读者的数学水平,但不影响物理上的理解和应用。对原理体系的应用,详举例题加以说明。学习和掌握体系的目的在于应用,在于指导实践。从叙述方法上讲,本书是原理体系与应用实例两者兼顾,即揉合了前苏联学者和英美学者各自的长处。

第三,以物理的本来面貌讲述传递原理。传递原理有着鲜明

的物理特征。传递原理的研究对象重点是流体，故对下列两个要点作了明确阐述：

(1) 动量传递的三维牛顿定律是一个张量关系式，即剪应力张量和变形速度张量之间的关系式。讨论张量，是为了将传递原理阐述透彻，因此以矢量和面力为切入点，进而引入张量的概念是合理的、自然的。

(2) 用欧拉方法来描述流体的运动，自然以场论的表述最为合适。用场论来讲述传递原理中的通用微分方程组，物理概念鲜明，数学表述简洁。

本书第3章(场论和张量运算简介)是为第4章作准备的，是专门针对工科专业读者的物理和数学水平而编写的。根据多年的教学经验，作者认为单位交错张量 ϵ_{ijk} 、克罗内克符号 δ_{ij} 和哈密顿算符 ∇ 在讲述场论时是一套很好的符号系统，采用这套系统读者易于理解。梯度、散度、旋度和拉普拉斯算符在正交曲线坐标系中的表达式不采用伯德所著的《传递现象》一书的表述方法，而是直接引用流体力学中的拉梅系数表达法，这样做简洁明了。

第四，以微元平衡法为核心讲述三种平衡法。传递原理体系是应用三个实验定律(牛顿定律、傅里叶定律和菲克定律)和三个守恒准则(动量守恒、能量守恒和物质不灭定律)，再加上微积分数学处理而建立的。数学处理方法可称为微元平衡法，其一维形式为壳体平衡法，其积分形式为整体平衡法。三种平衡法各有其特色，分别在第2章、第4章和第7章中加以叙述。

第9章讲述数值解法，帕坦卡—斯波尔丁学派采用控制容积法，在物理上可以将控制容积法看作是微元平衡法在数值解法中的一种特殊形式。

第五，引进了70年代以后的研究新成果，主要在以下两个方面：

(1) 介绍了湍流的实用计算模型。以 $k-\epsilon$ 双方程模型为代表，已开发出了一系列的湍流计算模型。虽然在理论上湍流的研究还不成熟，但在实用计算上已有长足的进步。

(2) 介绍了三传的通用数值解法。以帕坦卡—斯波尔丁学派的方法为代表。

本书在第6章、第9章和第10章中收进了一些新的内容。

原讲义第一稿由陈家镛执笔，后经几次增补，本书由查金荣执笔。

本书的顺利出版得到了各方面的支持和帮助。首先要提到的是《冶金反应工程学丛书》编委会肖泽强教授、曲英教授和蔡志鹏教授；还有中国科学院计算机化学开放实验室副主任温浩研究员，化工冶金研究所研究生部主任孙茂芬老师，中国科技大学研究生院化学部（系）主任胡照林教授、化工冶金研究所所长谢裕生研究员和《化工冶金》编辑部主任夏光副编审等。在此，特向支持本书出版的各界朋友表示衷心的感谢。

本书由蔡志鹏教授、梅炽教授审阅。

查金荣 陈家镛

1997-01-30

序 言

冶金学是研究人类从自然资源中提取有用金属和制造材料的科学。从人类最早使用金属到今天，已有数千年历史。在近一百多年的现代工业生产发展中，冶金工业作为一门基础材料工业，发挥了重大作用。本世纪上半叶以来，许多冶金学家应用化学热力学知识，对冶金过程中气体-熔渣-金属间的反应平衡和熔体的物理化学性质进行了大量的测定和研究，这些研究成果促进了现代冶金工艺的发展。冶金学也逐步完善为一门主要以热力学为理论基础的、独立的专业学科。

近几十年来，冶金学知识体系和结构，随着冶金技术的发展和相关学科的进步，也在发生变化。计算机技术的发展和广泛应用，使冶金学理论和工艺的研究方法、冶金生产及其控制技术发生了重大变革。由传统冶金学和传统冶金工艺学所构成的知识体系和结构，已不能完全满足现代冶金工艺发展和理论研究的需要。因此，诸如对微观和宏观过程的认识、单元过程或现象的定量解析、反应过程的数学物理模拟、反应和生产速率的预测、反应器的仿真研究和设计、人工智能技术的应用以及反应器运行和整体生产过程的控制等等，均逐渐成为现代冶金学必须包括的内容。近二三十年中，许多冶金学学者努力学习相关学科，如现代化学工程学、计算流体力学（CFD）、传输理论等方面的知识，积极利用

数学解析方法和计算技术,来定量分析和解决冶金学理论和工艺方面的问题,并获得了重要进展。日本学者鞭岩、瀬川清等根据上述冶金学内容和研究方法的新发展,于70年代提出冶金反应工程学概念,并分别出版了《冶金反应工程学》和《铁冶金反应工程学》等专著。

我国在上述冶金学新兴内容的研究方面,起步于70年代末。近二十多年,国内许多冶金学者根据现代冶金学发展的趋势,吸收国外先进经验,注意促进多学科知识的交叉,逐步将传输理论、反应工程学的方法以及计算技术引入冶金学的理论研究和工艺开发中,并取得较大的进展。为及时总结冶金学近几十年的发展成果,增进国内外学术交流,改善专业教学、基础研究和工艺发展的条件,中国金属学会冶金反应工程学学术委员会决定组织我国冶金领域内的专家、学者,并争取国外学者的参与或合作,编辑出版一套《冶金反应工程学丛书》。

本套丛书可大致划分为介绍冶金反应工程学理论的著作(一部分为高校教材或教学参考书)和介绍冶金反应工程学知识应用成果和经验的专著两类。第一批著作于1996年开始出版发行。欢迎国内外冶金学者参加《冶金反应工程学丛书》书目的著述。

《冶金反应工程学丛书》编委会,由下列学者组成(按姓氏笔画顺序排列,带*号者为执行小组成员):

- 干 勇 (冶金部钢铁研究总院)
- * 曲 英 (北京科技大学)
- 任崇信 (冶金工业出版社)
- 仲增嘯 (中国金属学会)
- 杨天钧 (北京科技大学)
- 张丙怀 (重庆大学)
- 贺友多 (包头钢铁学院)
- 柯家骏 (中国科学院化工冶金研究所)
- 徐德龙 (西安建筑科技大学)
- 梅 炽 (中南工业大学)

21136/02

- * 萧泽强 (东北大学)
- 赫冀成 (东北大学)
- * 蔡志鹏 (中国科学院化工冶金研究所)
- 戴永年 (昆明理工大学)
- 魏季和 (上海大学)

由于《冶金反应工程学丛书》内容涉及面较宽，编写工作量大，且系初次组织，经验不足，错误和不足之处在所难免，请读者批评指正。

《冶金反应工程学丛书》编委会

1996年5月

目 录

1 动量、能量和质量传递的基本规律	1
1.1 一维传递机理	1
1.1.1 动量传递机理——牛顿粘度定律	1
1.1.2 能量传递机理——傅里叶导热定律	3
1.1.3 质量传递机理——菲克扩散定律	4
1.2 物性系数	7
1.2.1 粘性系数、导热系数和扩散系数	7
1.2.2 低密度气体物性系数的推算	11
1.3 三传的相似性	15
1.3.1 传递机理的相似性	15
1.3.2 物性系数的可比性	15
1.4 三维传递机理	16
1.4.1 三维傅里叶定律	16
1.4.2 三维菲克定律	17
1.5 本章要点	18
2 壳体平衡法与一维定态传递实例	19
2.1 壳体动量衡算	19
2.1.1 动量衡算式及边界条件	19
2.1.2 柱面壳体平衡法	20
2.2 壳体能量衡算	27

2.2.1	能量衡算式及边界条件	27
2.2.2	柱面壳体平衡法	28
2.2.3	圆面壳体平衡法	31
2.3	壳体质量衡算	35
2.3.1	质量衡算式及边界条件	35
2.3.2	球面壳体平衡法	36
2.4	自然对流	43
2.4.1	自然对流的特点	43
2.4.2	平面壳体平衡法	43
2.5	本章要点	47
3	场论与张量运算简介	49
3.1	流体力学的基本概念	49
3.1.1	连续介质假设与微团	50
3.1.2	描述流体运动的两种方法——拉格朗日方法 和欧拉方法	52
3.1.3	流体速度分解定理	54
3.1.4	涡旋的概念	56
3.1.5	面力和体力	57
3.2	一点的应力状态——应力张量	58
3.2.1	张量的物理概念	58
3.2.2	压力张量	59
3.2.3	剪应力张量	59
3.3	场论	60
3.3.1	场的定义	60
3.3.2	矢量加法与乘法运算	60
3.3.3	矢量微分运算与哈密顿算符	64
3.3.4	梯度、散度、旋度、拉普拉斯运算在正交曲线坐 标系中的表达式	67
3.4	二阶张量运算	70
3.4.1	定义和符号	70
3.4.2	张量的加法与乘法	72
3.4.3	张量运算恒等式	73

3.4.4	张量不变量与张量的几何表示	74
3.4.5	矢量与张量的积分运算	77
3.5	流体力学本构方程	78
3.5.1	三维牛顿粘度定理	78
3.5.2	变形速度张量	79
3.5.3	本构方程	79
3.6	本章要点	88
4	微元平衡法与通用微分方程组	91
4.1	连续方程——质量平衡方程	91
4.1.1	物理模型与数学模型	91
4.1.2	微元平衡法	92
4.1.3	连续方程的推导	92
4.1.4	源点与汇点——空间的不连续点	94
4.2	运动方程——动量平衡方程	95
4.2.1	直角坐标系中的运动方程	95
4.2.2	向量式的运动方程	96
4.2.3	机械能方程	100
4.2.4	自然对流的非等温运动方程	100
4.3	能量方程——能量平衡方程	101
4.3.1	热力学第一定律与内能加动能方程	101
4.3.2	总能方程与内能方程	103
4.3.3	用温度 T 表示的能量方程	104
4.4	状态方程	108
4.4.1	通用微分方程组的封闭性	108
4.4.2	几种常见的状态方程	108
4.5	多组分系统的通用微分方程组	110
4.5.1	二元系连续方程	110
4.5.2	通量形式的多组分通用微分方程组	113
4.5.3	用传递性质表示的多组分通量	115
4.6	本章要点	118
5	层流中的传递过程	119
5.1	等温系统	119

5.1.1	定态流动	119
5.1.2	非定态流	122
5.2	流函数法	128
5.2.1	势函数与流函数	129
5.2.2	低速运动时关于球体阻力的斯托克斯定律	133
5.3	非等温系统	137
5.3.1	几个简例	137
5.3.2	一维超声速流	148
5.3.3	圆管定态层流流动的强制对流传热	159
5.4	边界层理论	166
5.4.1	普朗特边界层概念与边界层理论模型	166
5.4.2	平板边界层与布拉休斯解	169
5.4.3	速度边界层与温度边界层	174
5.5	多组分系统	177
5.5.1	定态扩散	178
5.5.2	非定态扩散	185
5.5.3	边界层理论——热量、质量、动量同时传递时的精确解	196
5.6	本章要点	206
6	湍流中的传递过程	208
6.1	纳维—斯托克斯方程组的时均化	209
6.1.1	脉动与旋涡	209
6.1.2	不可压缩流体通用微分方程组的时均化	214
6.1.3	湍流通量的半经验模型	217
6.2	湍流流动的计算	220
6.2.1	光滑管中定态湍流流动计算	220
6.2.2	光滑管中的定态湍流传热计算	224
6.2.3	光滑管中的定常湍流传质计算	227
6.3	湍流计算的双微分方程模型	228
6.3.1	单方程模型	229
6.3.2	双方程模型	230
6.4	本章要点	233

7 整体平衡法及其应用	236
7.1 整体平衡方程	236
7.1.1 整体质量衡算	237
7.1.2 整体动量衡算	239
7.1.3 整体能量衡算	240
7.1.4 整体机械能衡算——伯努利方程	243
7.1.5 多组分系统的整体平衡方程	249
7.2 整体平衡法在定态流动中的应用	251
7.3 整体平衡法在非定态流动问题中的应用	265
7.4 本章要点	276
8 量纲分析法	277
8.1 量纲分析法基本原理	277
8.1.1 量纲、单位和单位制	277
8.1.2 特征数	279
8.1.3 π 定理	280
8.2 通用微分方程的无量纲化	287
8.3 量纲分析法在实验数据整理中的应用	290
8.3.1 摩擦系数与传热系数实验数据无量纲化关联式	290
8.3.2 低传质速率情况下单相二元传质系数关联式	297
8.4 量纲分析法在传递相似中的应用	299
8.4.1 特征数的作用	299
8.4.2 传热与传质之间的相似	300
8.5 本章要点	303
9 数值算法——帕坦卡—斯波尔丁学派方法简介	305
9.1 微分方程的离散化	306
9.1.1 用于数值计算的微分方程通用形式	306
9.1.2 双向坐标与单向坐标	307
9.1.3 积分区域的网格化	308
9.1.4 差分方程的一般格式	309
9.1.5 Φ 值的分布假设	312

9.2	建立差分方程的基本法则	312
9.2.1	建立差分方程的一般方法	312
9.2.2	控制容积法	315
9.2.3	离散化应服从的四项基本法则	319
9.3	隐式方案与代数方程的解	321
9.3.1	一维非稳态热传导	321
9.3.2	二维与三维热传导问题	324
9.3.3	代数方程的解	327
9.4	对流与扩散	330
9.4.1	预备性推导	331
9.4.2	上风方案	333
9.4.3	各种离散化方案的比较	335
9.4.4	一个通用化的公式	336
9.4.5	多维问题的离散化方程	340
9.5	流场的计算	344
9.5.1	流场计算所面临的主要困难	344
9.5.2	交错网格	346
9.5.3	压力修正方程	347
9.5.4	SIMPLE 算法及其系列	350
9.5.5	PHOENICS 软件	351
9.6	本章要点	352
10	传递过程研究的若干前沿课题	354
10.1	湍流新涡粘模式的研究	354
10.1.1	涡粘系数应为四阶张量	354
10.1.2	涡粘张量分量的计算公式	355
10.1.3	二维流动的情况	356
10.2	渗透蒸发过程非平衡溶解扩散模型	358
10.2.1	引言	358
10.2.2	非平衡溶解扩散模型	359
10.2.3	非平衡溶解扩散模型中的溶解速度	360
10.3	血液的流变性质	362
10.3.1	血液的非牛顿流体特性	362

10.3.2	血液在圆管内的层流运动	364
10.4	磁流体力学在冶金过程中的应用	367
10.4.1	钢包精炼设备 ASEA-SKF 炉	367
10.4.2	电磁搅拌作用下的流体流动方程	368
10.4.3	数值计算结果	369
10.5	两相流	369
10.5.1	两相流的基本特性	370
10.5.2	各种模型的近似	373
10.5.3	旋风分离器中气粒两相流动	374
参考文献		376
附录 A 单位换算系数		377
附录 B 传递性质推算用表		380
附录 C 斯特姆——刘维尔型边值问题特征值理论		383
附录 D 常用特殊函数和某些初等函数		386
术语汉英索引		398
人名索引		412
主要符号表		415



动量、能量和质量传递 的基本规律

针对传递过程（或称传递现象）所研究的课题有动量传递（粘性流动）、能量传递（热传导、对流和辐射）和质量传递（扩散）。研究时将发生传递过程的介质处理为连续流。

传递过程理论研究的基础是实验定律，即动量传递的牛顿定律、能量传递的傅里叶定律和质量传递的非克定律。三种传递过程和三个实验定律有其相似之处，故放在一起研究讨论，但辐射除外。

辐射能量传递的本质要用电磁理论来描述，即真空中两“黑体”之间的辐射能量传递速率正比于两者的绝对温度四次方之差。此机理从定性或定量上来说均与上述三个实验定律完全不同。本书不讨论辐射问题。

传递过程理论的奠基之作是美国威斯康星（Wisconsin）大学的伯德等人于1960年出版的《传递现象》一书^[1]。伯德等人在其书的前言中写道：“当前的工科教育愈来愈倾向于着重基本物理原理的理解，而不是盲目地套用经验结论。”这一思想亦贯穿于本书之中。

1.1 一维传递机理

在具体讨论之前，我们先强调两点：

- (1) 对传递过程是从宏观上而不是从微观上进行研究的。
- (2) 研究重点放在流体（液体和气体）上。从模型的意义上讲，对有些问题而言固体也含在其中。如传热问题，只要令流体方程中的速度为零，则代表固体状态。

1.1.1 动量传递机理——牛顿粘度定律^[1]

流体的宏观性质主要为易流动性、粘性及压缩性。此处要讨