

冶|反|工|
金|应|程|丛|
学|书|

冶金传输原理

基础

冶金工业出版社

国家自然科学基金资助

冶金反应工程丛书

冶金传输原理

基础

沈颐身 李保卫 吴懋林 著

北京
冶金工业出版社
2000

内 容 提 要

本书分动量传输、热量传输和质量传输 3 篇共 16 章,系统地阐述了以物理学 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)为基础的传输理论;结合冶金过程实际,举了大量例题说明数学公式的应用;并介绍了实际工程中的模拟分析方法等内容。

本书可作为有关院校冶金专业本科生的学习教材,也可作为有关人员学习传输知识的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

冶金传输原理基础/沈颐身等编. - 北京:冶金工业出版社,2000.3

(冶金反应工程学丛书)

ISBN 7-5024-2380-X

I. 冶… II. 沈… III. ① 冶金-能量传递-理论 ② 冶金-传热学 ③ 冶金-传质学 IV. TF01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 21085 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 刘小峰 杨传福 美术编辑 王耀忠 责任校对 侯琨 责任印制 牛晓波
北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2000 年 3 月第 1 版,2000 年 3 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;15.625 印张;417 千字;483 页;1-2000 册

38.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

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

EAA40/67

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,并获得重要进展。日本学者鞭岩、瀨川清等根据上述冶金学内容和研究方法的新进展,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。

我国在冶金学上述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》的编委会,由下列学者组成(按姓氏笔画排列,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)

仲增墉(中国金属学会)

杨天钧(北京科技大学)

张丙怀(重庆大学)

李尚诣(冶金工业部科技司)

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 焱(中南工业大学)

- * 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

前 言

本书是作者根据 1994 年全国冶金院校冶金反应过程学和冶金传输原理教学研讨会的精神,在总结各个冶金院校十余年教学改革经验的基础上编写而成的。本书是以冶金专业本科生为主要对象编写的。学生在学好高等数学、物理、化学以及工程力学的前提下,同时如能了解一些热力学的知识,对于学好本书是很有益处的。

1960 年,美国威斯康辛大学的 R. B. 伯德、W. E. 斯特瓦特和 E. N. 莱福特合著的《传递现象》一书问世,这是最早将动量、热量和质量传输现象归于一体的教材,用统一方法进行讲授。70 年代后期,我国开始在大学课堂上引入这一课程,并把它作为理工科大学的一门重要专业基础课讲授。近二十年的教学实践证明,作为冶金领域一个合格的工程师,必须对传输原理过程有一个深刻的理解,并能熟练地求解这类问题。我们高兴地看到,现在越来越多的本科生无论在毕业论文或设计中,还是在走上工作岗位的工作实践中,应用传输理论知识解决实际问题的能力获得了很大的提高,可以这样说,传输理论知识已经成为越来越多的工程技术人员和科学研究人员解决实际问题的有力工具。

大多数冶金过程都是在高温、多相条件下进行的复杂物理化学过程,同时伴有动量传输、热量传输和质量传输现象。在实际冶

金生产中,为使某一冶金反应进行,必须将参与反应的物质尽快地传输到反应进行的区域(或界面)去,在那里发生反应,并使反应产物尽快地排除。其中最慢的步骤称为过程控制步骤或限制性环节。高温、多相条件下的冶金反应大多受传质环节控制,即传质速率往往决定了反应速度,而传质速率往往又与动量和热量传输有密切关系,因此,研究传输现象对冶金过程动力学的影响是非常重要的。

传输理论是以物理学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。本书一大特点是应用这3个定律从宏观上研究传输问题,3种平衡法的核心是微元平衡法,壳体平衡法是微元平衡法的一维形式,而整体平衡法是微元平衡法的积分形式,前两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。本书另一特点是用矢量式配以哈密顿算符来表示各种形式的通用微分方程,数学上简单明了,物理意义鲜明。考虑到学生认识过程的特点是先易后难,本着循序渐进的原则,先推导理想流体运动方程,再过渡到实际流体运动方程;先推导导热微分方程,再过渡到能量微分方程。本书结合冶金过程实际,举了大量的例题,说明这些公式的应用,其用意一方面强调学以致用,另一方面加深对传输理论的理解和消化。

动量、热量和质量传输是一门探讨速率过程的科学。将这3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,3种传输现象之间存在着许多相似性。对于未来的冶金工程师来说,学习“冶金传输理论基础”有两个最基本的目的,第一,深入地了解各类传输现象的机理,这对于改进各种冶金过程和设备的设计、操作及控制提供理论依据。第二,为将来所研究的冶金过程提供基础数学模型,有了这些数学模型,借助计算机的帮助,就可以对冶金过程进行模拟研究,从而

使过程从开始到使用的周期大大缩短。事实上,本书所涉及的许多内容,已经成功地应用于工程实际中了。

本书在编写过程中,得到萧泽强,曲英两位教授的关心和支持,程素森副教授为本书的整理、修改做了大量工作,在此一并表示衷心的感谢,对所有为本书做过有益工作的同志也表示诚挚的谢意。

沈颐身 李保卫 吴懋林

1999年1月

目 录

第一篇 动量传输	1
1 动量传输的基本概念	3
1.1 动量传输研究的对象与性质	3
1.2 动量传输研究问题的模型与方法	5
1.3 描述流场的基本物理量及梯度、散度和旋度	10
1.4 流场的分类及描述	14
2 总体质量、动量与能量平衡	26
2.1 总体质量平衡	26
2.2 总体动量平衡	29
2.3 总体能量平衡	31
3 理想流体的流动	34
3.1 质量守恒定律与流体流动的连续性方程	34
3.2 理想流体的动量守恒定律与欧拉方程	37
3.3 柏努利方程	40
3.4 可压缩流体流动	44
4 实际流体的流动	53
4.1 实际流体微团运动分析	53
4.2 牛顿粘性定律	58

4.3	实际流体的动量守恒定律——N-S方程	61
5	层流流动	66
5.1	层流流动的定解问题	66
5.2	层流流动下几种特殊情况的解析解	68
5.3	二维流动情况下涡量-流函数计算	78
6	湍流流动	84
6.1	湍流的起因	84
6.2	湍流流动的雷诺方程	85
6.3	湍流流动的定解问题	88
6.4	光滑管内的湍流	93
7	边界层理论	103
7.1	边界层理论的基本概念	103
7.2	平面层流边界层微分方程	105
7.3	边界层内积分方程	123
7.4	平板绕流摩擦阻力计算	128
8	相似原理及量纲分析	133
8.1	相似的基本概念	133
8.2	流体流动过程中相似准数的导出	136
8.3	相似三定律	139
8.4	量纲分析	141
8.5	模型研究法	147
第二篇 热量传输		153
9	热量传输概论	154
9.1	热量传输的基本方式	154
9.2	热阻的概念	157
10	导热	159
10.1	导热的基本概念	159
10.2	傅里叶定律	161
10.3	导热微分方程	166

10.4	平壁一维稳态导热	173
10.5	圆筒壁一维稳态导热	183
10.6	不稳态导热的基本概念	192
10.7	薄材的不稳态导热(集总参数法)	196
10.8	无限大平板的不稳态导热	200
10.9	无限长圆柱体的不稳态导热	210
10.10	半无限大物体的不稳态导热	213
10.11	二维和三维不稳态导热	218
10.12	凝固或融化过程的导热	222
10.13	导热问题的数值解法	227
11	对流换热	250
11.1	对流换热的一般分析	250
11.2	对流换热过程的数学描述	253
11.3	平板层流换热微分方程组及其分析解	256
11.4	平板层流换热的近似积分解	260
11.5	动量传输和热量传输的类比方法	265
11.6	相似理论指导下的实验方法	272
11.7	强制对流换热的准数方程	277
11.8	自然对流换热	286
11.9	沸腾换热	294
12	辐射换热	299
12.1	热辐射的基本概念	299
12.2	黑体辐射的基本定律	304
12.3	实际物体表面的辐射——灰体	309
12.4	角系数	315
12.5	两个黑体表面间的辐射换热	324
12.6	灰体表面间的辐射换热	325
12.7	气体辐射	335
12.8	气体与围壁表面间的辐射换热	344
12.9	辐射换热系数	346

第三篇 质量传输	349
13 质量传输的基本概念	350
13.1 质量传输的基本方式	350
13.2 分子传质的速度与通量	352
13.3 菲克定律	357
14 传质的微分方程	374
14.1 传质微分方程的推导	374
14.2 传质微分方程的特殊形式	376
14.3 常见的边界条件	379
15 分子传质(扩散)	381
15.1 稳态分子传质	381
15.2 非稳态分子传质	401
16 对流传质	409
16.1 对流传质的基本概念	409
16.2 层流浓度边界层的精确解	412
16.3 浓度边界层的近似解	416
16.4 量纲分析在对流传质中的应用	420
16.5 动量、热量和质量传输的类比	424
16.6 对流传质系数的关联式	432
16.7 传质系数模型	441
16.8 相间稳态传质和双膜理论	446
附录	452
附录 1 广义牛顿粘性定律的推导	452
附录 2 金属材料的密度、质量定压热容和导热系数	455
附录 3 保温、建筑及其他材料的密度和导热系数	458
附录 4 几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	459
附录 5 在大气压力($p = 101325\text{Pa}$)下干空气的热物理性质	460

附录 6	在大气压力($p = 101325\text{Pa}$)下烟气的 热物理性质	462
附录 7	饱和水的热物理性质	463
附录 8	干饱和水蒸气的热物理性质	465
附录 9	常压下气体的性质	467
附录 10	高斯误差函数表	471
参考文献	473
人名索引	475
术语汉英索引	476
主要符号表	482

第一篇

动量传输

动量传输是自然界与工程技术中普遍存在的一种现象,如大气的流动、河流中水的流动、烟囱排出的烟气流动等。在冶金工业中,中间罐内的钢液流动、气泡上浮导致盛钢桶中的两相流动、超音速射流等也都与动量传输有关。认真地研究动量传输,掌握其内在的规律,不仅对于认识自然现象,改进工程设备,优化工艺过程非常重要.而且因为热量和质量多在流动介质中传输,所以学习动量传输原理也为理解整体的传输理论打下基础。

在三种传输现象中动量传输是较难掌握的一部分内容,数理要求相对较多.这首先是因为热量与质量场是标量场,而动量场是一种矢量场,对矢量场的研究比对标量场的研究要困难得多。粘性动量传输还不可避免地要引进“粘性动量通量”的概念,它是一个张量,这又增加了研究动量传输的难度。另一方面,在一定的条件下,流体的不稳定性流动、湍流、涡旋的产生、耗散与传输是至今流体理论还未彻底解决的问题,这也使得动量传输学习起来难度较大。当然,本书不会深入探讨这

方面的问题,但就理解所必须引进的一些概念也需要一定的数理基础。

第一篇的内容分为8章具体讲解,第1章介绍研究动量传输所必需的一些基本概念,是后面各章的基础;第2章给出有一定工程应用价值的总体衡算概念,为一些不要求了解内部细节的实际问题的处理建立一套方案;第3章具体讲解理想流体的运动方程和一些工程应用实例;第4章讲述本篇的主要内容——实际流体的流动,介绍动量方程的建立,给出工程上遇到的实际流体满足的定解问题,为具体的研究粘性动量传输打下基础;第5章与第6章作为第4章的应用,分两种不同的流态——层流与湍流,讨论实际流体的数学模型与应用,第6章在处理湍流流动时引进了一些简单的数学模型使第4章中介绍的定解问题在湍流状态下封闭,为湍流问题的深入讨论创造条件;第7章讲述具有理论与应用意义的边界层理论,这一理论曾在流体力学的发展中起过重大的作用,且本身还包含着深刻的物理思想,至今还有着广阔的应用价值;第8章介绍相似理论,它是实验工作者与理论工作者都应掌握或了解的内容,它将告诉我们怎样进行合理的实验设计,怎样把实验的结果推广到工程同类相似现象中去。

随着定量认识越来越被看重,而数值计算方法又是动量传输定量认识方面被大多数人看好的一条道路,本篇也引入一些数值处理的方法使动量传输这个理论性较强的基础内容尽可能地与实际工业过程接近,为处理实际工程中的问题做一些准备。

1

动量传输的基本概念

在自然界中常见到的物质状态往往分为3种,即气态、液态与固态,而人们把处于前两种状态的物质称为流体,研究流体流动的学科被称为流体力学。动量传输也就是流体力学。之所以在传输理论中称为动量传输,这主要是因为从传输的观点去看,它与热量传输、质量传输有相当的类似性与统一性,用动量传输的观点讨论流体流动,不仅有利于传输理论体系的和谐,同时还能揭示三种传输现象类似的深刻的内涵。

1.1 动量传输研究的对象与性质

动量传输就是研究流体—气体与液体—在外界的作用下运动规律的一门科学,它的研究对象自然就是流体。流体不像固体,固体有自己固定的形状,流体则常常呈现出盛放它的容器的形状,而气体往往还要充满盛放它的容器的体积。流体日常表现出来的这种性质实质上是它的可流动性与可压缩性的体现。所谓可流动性就是指流体在任意小的切应力的作用下都会发生明显的变形,而一般的固体则不会。可压缩性是指在压力的作用下,流体的体积会发生明显的变化。因为物质是由分子组成的,分子与分子之间有着一定的间隙,流体在外界的压力作用下,分子之间的间隙会发生变化,从而导致体积随着外界压力的不同而不同。气体在这一方面表现得最为突出。液体虽然随压力的变化分子间的距离也会有变化,但总的体积的变化并不明显。流体的压缩性通常用压缩系数 β 来描述, β 的定义为:

$$\beta = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_T \quad (1-1)$$

即当流体的温度保持不变时,每增加单位压强流体体积的相对变