



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

北京市高等教育精品教材

冶金传输原理

YEJIN CHUANSHU YUANLI

(第2版)

吴铨 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
北京市高等教育精品教材

冶金传输原理

(第2版)

吴铨 编著

北京

冶金工业出版社

2017

内 容 提 要

本书共分四篇,分别为动量传输、热量传输、质量传输、传输现象的类比和耦合。从传输现象出发,系统介绍了动量传输、热量传输和质量传输的基本概念、基本规律和基本方法。介绍了传输现象在冶金工程中的应用,以及化学反应的传质理论与化学动力学之间的关系。基于三种传输现象的类似性,探讨了冶金传输原理的课程体系。针对传输过程的非平衡态线性不可逆特点,讨论了传输过程中的耦合概念。各章提要精练地概括了学习重点,章后总结了应掌握的内容,思考题和习题具有代表性;书末附有常用数据表、索引和习题参考答案。

本书可作为冶金工程和材料加工工程等专业的本科生教材,也可作为有关人员学习传输原理的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

冶金传输原理/吴铿编著. —2版. —北京:冶金工业出版社, 2016.8 (2017.7重印)

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-5024-7134-7

I. ①冶… II. ①吴… III. ①冶金过程—传输—高等学校—教材 IV. ①TF01

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第010663号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 孙跃红 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7134-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2011年12月第1版,2016年8月第2版,2017年7月第2次印刷

787mm×1092mm 1/16; 25.25印张; 615千字; 386页

49.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

第2版前言

本书自2011年出版以来,得到了国内有关专家们和冶金院校的支持和肯定,2014年获批北京市高等教育精品教材,2015年入选“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

当前正值我国全面深化改革之际,这对高等院校加强基础教育、培养高素质人才提出了更高的要求。因此,《冶金传输原理(第2版)》是根据当前教育发展对课程教学新的要求进行修改的。

为了进一步完善第1版中冶金传输原理体系的特色,本次修订中增加了由微元体导出静压力微分方程一章和由微元体导出分子扩散微分方程一节。形成了在动量、热量和质量传输过程中不考虑流动的静压力微分方程、导热微分方程和分子扩散微分方程,在第2版增加了类比性和结构的完整性。

国内外新的相关教科书中,将热量传输的另外一种基本方式定义为热对流,实际中流体流过与其温度不同的物体表面时的热量传输过程定义为对流换热。依据上述观点,本书在第2版中将质量传输中的另一种方式定义为质对流,而在实际中流体流过与其质量不同的物体的质量传输过程定义为对流传质。分别给出了由微元体导出的对流换热和对流传质的微分方程,并讨论了与导热微分和分子扩散微分方程的关系。

对流换热和对流传质与动量传输的湍流边界层包含层流底层是相类似的,从实质上展示了传热边界层和传质边界层的物理意义,强调了冶金传输原理的结构和体系中边界层相关理论作为冶金传输原理中一条重要主线的意义,凸显了冶金传输原理在流体力学、传热学和传质学的基础上已经发展为一门较为完善的独立学科。

为了进一步增加质量传输的内容和为下一步学习奠定必要的基础,在质量传输中增加了非稳态半无限大物体,分别在表面浓度和表面质量为常数的边界条件下,确定扩散偶法和几何面源法的分子扩散质量传输方程。

考虑到在冶金及环保过程中烟囱应用的普遍性,第2版补充了有关烟囱参

数计算的内容。此外,在第1版的2.2节中选择控制体的例题中,参照国内外大部分教科书的做法,考虑管壁与流体之间的作用力来选择控制体,虽然结果与控制体的选择无关,但采用该方法因涉及较多的力学知识,学生理解有相当的难度,而通常情况下也不会采用这种方法选择控制体的。从实用出发,本次修订删减了这部分不尽合理的选择控制体例题的内容。

另外,为了增强学生应用基本的原理分析和计算的能力,第2版在附录中增加了习题的参考答案。其宗旨是使学生能够系统地学习基础理论,力求强化和提高学生的理论基础和运用基础理论分析和解决问题的能力,为进一步的学习奠定良好的基础。

在完成第2版修订工作期间,作者所在课题组的研究生在教材修改、例题计算和习题答案的核定等工作中付出了大量辛勤劳动;并协助在北京科技大学工程师学院冶E13和E14两届的“冶金传输原理”课程中进行了“概念-问题-探究”教学模式的构建与应用的实践,对完成第2版的修订提供了有力的支持,作者在此表示深切谢意。

本书的修订,得到了北京科技大学教务处的悉心关怀和指导,兄弟院校在原书使用过程中也曾提出了不少有益的意见和修改建议,北京科技大学冶金与生态工程学院对本书的修订给予了热情的支持和帮助。北京科技大学工程师学院对冶金传输原理课堂的教学改革和为本书的修改提供了强有力的支持。在此向他们表示深切的谢意。

修订稿由北京科技大学曲英教授再次审阅,提出了许多宝贵的修改意见,作者表示衷心的感谢。

南京理工大学材料学院吴鏊教授对本书进行了全面的审校,东北大学冶金学院翟玉春教授与作者就冶金传输原理的体系和结构进行了深入的讨论,并与作者对热力学参数在冶金传输原理中的表示方法进行了系统和深入的讨论,作者非常感谢他们对本书的修订提出的宝贵意见。

限于作者水平,书中难免存在不足和谬误之处,恳请读者和专家们指正。

吴 鏊

于北京科技大学

第1版前言

上世纪70年代以来,很多发达国家都将传输原理列为理工科大学的必修课程,国内也于80年代将其作为本科生的必修课。国内的冶金院校先后出版了多部冶金传输原理教材,对该课程的发展起到了非常重要的作用。随着科学技术的发展,工程专业的基础学科不断扩大,传输原理已在原有流体力学、传热学、传质学的基础上发展成为一门独立的学科,其中由J. R. Welty等编写的《动量、热量和质量传递原理》已经出版了第4版,它标志着传输原理课程体系已经基本成熟。

对于冶金学科而言,经典的平衡热力学主要研究平衡体系,并用来研究非平衡体系的变化方向和限度问题,平衡热力学理论已经非常成熟。近平衡热力学研究近平衡体系,重点是不可逆过程中力学量之间的线性关系。传输现象涉及近平衡态的线性不可逆过程,而线性非平衡态热力学理论已经成熟,如传输原理中的动量、热量和质量传输理论,但不同力学量之间的耦合关系是目前非平衡态热力学的研究热点,也是传输原理发展的方向。

为了适应学科发展和教学过程的新要求,笔者在北京科技大学张先棹主编的《冶金传输原理》的基础上,重点参考了《动量、热量和质量传递原理》的结构、体系和内容,同时吸收国内著名的流体力学、传热学和传质学教材的相关内容,编写了这部面向冶金工程专业本科生的冶金传输原理新教材。

本教材第一篇为动量传输,共8章。首先介绍了动量传输的基本原理和基本方程,并将其应用于解决一系列具体问题,然后较为详细地讨论了边界层理论,最后对相似原理作了简要介绍。第二篇为热量传输,共7章。在介绍传热基本概念的基础上,讨论了导热方程,以及稳态和非稳态传热,然后推导了对流换热微分方程,并较为详细地讨论了热边界层的相关理论和对流换热的经验关联式,最后从热辐射的基本定律和辐射换热计算两方面介绍辐射传热。第三篇为质量传输,共6章。在保持传输原理经典体系的前提下,对分子扩散传质和对流流动传质进行了较为详细的介绍,讨论了质量边界层的相关理论和对流

传质的经验关联式,对相际传质也进行了介绍。第四篇为传输现象的类比和耦合,共2章。将传输原理分成4篇是本书在结构上的一种新的探索。通过三种传输现象的类比,有助于学生深入认识动量、热量和质量传输现象。该篇首先探讨了传输原理的体系和结构,力图使学生更好地掌握传输原理的整体框架。然后对传输现象的线性耦合作用进行简单介绍,以开拓学生的视野,培养学生对艰深理论问题的兴趣,以利于创新能力的培养。

本教材参考了一些著作和文献,在此对相关著作和文献的作者表示感谢。

曲英教授和吴懋林教授对本书的初稿提出了宝贵的意见。曲英教授特别提供了多年收集的质量传输数据,并对教材中传输现象耦合等内容给予了充分的肯定,编者对他们表示衷心的感谢。

编者与李士琦教授、刘应书教授、宋波教授和成国光教授就冶金传输原理的相关问题进行了有益的讨论。特别是李士琦教授,提出了一些颇具哲理的关于课程结构的看法。这些讨论和看法对提升教材水平大有裨益,编者表示深深的谢意。

非常感谢北京科技大学教务处和冶金与生态工程学院对本教材的大力支持。

编者所在课题组的研究生和本科生为教材编写付出了大量辛勤的劳动,在此一并表示感谢。

限于编者的水平,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

吴 铨

于北京科技大学

目 录

第一篇 动量传输

1 传输原理中流体的基本概念	3
1.1 流体及连续介质模型	3
1.2 流体的密度和重度	5
1.3 流体的压缩性	6
1.4 流体的黏性	7
1.5 牛顿流体和理想流体	8
1.6 黏性动量流密度 (通量)	10
1.7 作用在流体上的质量力和表面力	10
1.7.1 质量力	11
1.7.2 表面力	11
1.8 系统及控制体	12
1.9 单位与量纲	12
1.10 小结	13
思考题	13
习 题	14
2 控制体法 (积分方程)	15
2.1 质量守恒积分式	15
2.2 质量守恒积分式的应用	16
2.3 动量守恒积分式	17
2.4 动量守恒积分式的应用	17
2.5 能量守恒积分式	18
2.6 能量积分式的应用	19
2.7 小结	21
思考题	21
习 题	21
3 流体静力学	22
3.1 流体静力学平衡微分方程	23

3.2	流体静力学基本方程	24
3.3	流体压强的度量基准	25
3.4	流体静力学基本方程的应用	26
3.5	小结	27
	思考题	28
	习 题	28
4	描述流体运动的方法	30
4.1	雷诺试验和卡门涡街	30
4.1.1	雷诺试验	30
4.1.2	卡门涡街	32
4.2	描述流体运动的两种方法	32
4.2.1	拉格朗日法	32
4.2.2	欧拉法	33
4.2.3	两种方法的应用	33
4.3	质点导数	34
4.4	拉格朗日法和欧拉法的转换	36
4.4.1	拉格朗日法转换到欧拉法	36
4.4.2	欧拉法转换到拉格朗日法	37
4.5	流体运动的基本概念	38
4.5.1	定常流动和非定常流动	38
4.5.2	均匀流动和非均匀流动	38
4.5.3	平面流和轴对称流	38
4.5.4	迹线	38
4.5.5	流线	39
4.5.6	流管	40
4.5.7	流束	40
4.5.8	流量 (体积流率)	41
4.6	小结	41
	思考题	42
	习 题	42
5	动量传输的微分方程	43
5.1	连续性微分方程	43
5.2	理想流体运动方程 (欧拉方程)	45
5.3	伯努利方程 (理想流体定常流动沿流线的积分)	47

5.4 伯努利方程的应用	49
5.4.1 文丘里管	50
5.4.2 皮托管	50
5.4.3 烟囱	52
5.5 实际流体运动方程——纳维 - 斯托克斯方程	54
5.6 小结	58
思考题	58
习 题	59
6 管道中的流动	61
6.1 圆管中的层流流动	61
6.1.1 速度分布	61
6.1.2 流量 (体积流率) 与平均流速	62
6.1.3 阻力及阻力系数	63
6.2 湍流流动	64
6.2.1 临界雷诺数	64
6.2.2 充分发展流	64
6.2.3 湍流的描述	65
6.2.4 几种典型的湍流	66
6.2.5 湍流的切应力 (雷诺应力)	66
6.3 普朗特混合长度理论	67
6.4 圆管内湍流速度分布	69
6.5 圆管中的摩擦阻力系数	71
6.5.1 水力光滑和水力粗糙	71
6.5.2 摩擦阻力系数	72
6.5.3 非圆形截面的管道摩擦损失的计算	75
6.6 气体通过固体散料层的公式	75
6.6.1 卡门公式	75
6.6.2 欧根公式	77
6.7 管路计算	78
6.7.1 能量方程	78
6.7.2 流动能量损失	78
6.7.3 管路损失计算	79
6.8 小结	81
思考题	81
习 题	82

7 边界层理论	84
7.1 边界层的基本概念	85
7.1.1 边界层理论	85
7.1.2 边界层的厚度	85
7.1.3 边界层的状态和特点	86
7.2 边界层微分方程	87
7.2.1 微分方程的简化	87
7.2.2 平板层流边界层的布拉修斯解	89
7.2.3 布拉修斯解的作用	90
7.3 冯·卡门动量积分方程	91
7.3.1 冯·卡门积分方程的导出	92
7.3.2 冯·卡门积分方程的应用	94
7.4 平板湍流的边界层	95
7.5 影响层流向湍流过渡的因素	97
7.6 小结	97
思考题	98
习 题	98
8 可压缩气体的流动和射流简介	99
8.1 可压缩气体的相关概念	99
8.1.1 压缩性与声速	99
8.1.2 马赫数	101
8.1.3 可压缩气体与不可压缩气体的差别	102
8.2 可压缩气体一元稳定等熵流动的基本方程	102
8.3 一元稳定等熵气流的基本特性	105
8.3.1 滞止状态	105
8.3.2 临界状态	106
8.3.3 极限状态	106
8.4 气流参数与流通截面的关系	107
8.5 喷管的计算和分析	108
8.5.1 收缩喷管	108
8.5.2 拉瓦尔喷管	110
8.6 射流和气液两相流动	112
8.6.1 自由射流	112
8.6.2 气体流过液体表面的流动	113
8.6.3 气体喷入液体中的流动	113

8.6.4 气体垂直喷入液体中的流动	114
8.6.5 气体垂直喷向液体表面的流动	115
8.7 小结	116
思考题	116
习 题	117
9 相似原理与模型研究方法	118
9.1 相似的概念	118
9.1.1 相似性质和相似条件	118
9.1.2 流动的力学相似	119
9.2 相似原理	119
9.2.1 特征数的导出	120
9.2.2 特征数的物理意义	122
9.2.3 特征数的转换	122
9.3 量纲分析	123
9.3.1 量纲的基本概念	123
9.3.2 量纲和谐原理	124
9.3.3 π 定理或白金汉定理	124
9.3.4 π 定理的应用	124
9.4 模型研究方法	128
9.4.1 近似模化法	128
9.4.2 黏性流体的稳定性和自模化性	128
9.4.3 模型实验的数据处理	129
9.5 小结	129
思考题	129
习 题	130

第二篇 热量传输

10 热量传输的基本方式	133
10.1 导热	134
10.2 热对流和对流换热	137
10.3 热辐射	138
10.4 组合传热	139
10.5 小结	140
思考题	140
习 题	141

11 导热微分方程	142
11.1 导热微分方程	142
11.2 导温系数 (热扩散系数)	144
11.3 柱坐标系和球坐标系的导热微分方程	144
11.4 定解条件	145
11.5 小结	147
思考题	147
习 题	148
12 一维稳态和非稳态导热	149
12.1 通过平壁的一维稳态导热	149
12.1.1 第一类边界条件: 表面温度为常数	150
12.1.2 第三类边界条件: 周围介质温度为常数	153
12.2 通过圆筒壁的一维稳态导热	154
12.2.1 第一类边界条件: 表面温度为常数	154
12.2.2 第三类边界条件: 周围介质温度为常数	157
12.2.3 临界绝热层直径	159
12.3 非稳态导热的基本概念	160
12.3.1 非稳态导热的基本概念	160
12.3.2 平壁内非稳态温度场的主要特点	161
12.3.3 周期性的非稳态导热	161
12.3.4 非稳态导热的特点	161
12.4 薄材的非稳态导热	162
12.4.1 薄材的概念	162
12.4.2 薄材的非稳态导热——集总参数法	164
12.5 半无限大物体的一维非稳态导热	165
12.6 有限厚物体的一维非稳态导热	168
12.6.1 第一类边界条件: 表面温度为常数	168
12.6.2 第三类边界条件: 周围介质温度为常数	169
12.7 其他形状物体的非稳态导热	173
12.7.1 无限长圆柱体和球体	173
12.7.2 无限长直角柱体、有限长圆柱体和六面体	173
12.8 导热问题的数值解法简介	175
12.8.1 有限元法	176
12.8.2 有限差分法	176
12.8.3 需要注意的一些问题	178

12.9 小结	178
思考题	178
习 题	179
13 对流换热的基本方程和分析解	181
13.1 对流换热概述	181
13.2 对流换热微分方程组	182
13.2.1 换热微分方程	182
13.2.2 对流换热微分方程	182
13.2.3 连续性方程	185
13.2.4 运动(动量传输)方程	185
13.3 对流换热边界层微分方程组	185
13.3.1 温度(热)边界层	185
13.3.2 边界层对流换热微分方程组	186
13.4 对流换热边界层微分方程组的分析解	187
13.4.1 平板层流换热的分析解	187
13.4.2 液体金属流过平板时的对流换热	189
13.5 对流换热边界层积分方程近似解	189
13.6 小结	192
思考题	192
习 题	193
14 对流换热的特征数及其关联式	194
14.1 对流换热的特征数和量纲分析	194
14.1.1 对流传热中的重要特征数	194
14.1.2 对流换热量纲分析	195
14.2 强制对流换热及其关联式	197
14.2.1 管内强制对流换热	197
14.2.2 外部流动的强制对流换热	200
14.3 自然对流换热及其关联式	202
14.3.1 大空间自然对流换热关联式	203
14.3.2 有限空间自然对流换热	205
14.4 小结	207
思考题	207
习 题	208
15 热辐射的基本定律	209
15.1 热辐射的基本概念	209



15.1.1	热辐射的本质和特点	209
15.1.2	辐射力和辐射强度	210
15.2	热辐射的基本定律	212
15.2.1	黑体的概念	212
15.2.2	普朗克定律	213
15.2.3	斯忒藩-玻耳兹曼定律	214
15.2.4	兰贝特定律	216
15.3	实际物体的热辐射特性	217
15.3.1	辐射能的吸收、反射和透射	217
15.3.2	实际物体的辐射	218
15.3.3	发射率(辐射率或黑度)	218
15.3.4	基尔霍夫定律	222
15.3.5	灰体	223
15.4	小结	223
	思考题	224
	习 题	224
16	辐射换热计算	225
16.1	黑体表面间的辐射换热	225
16.1.1	角系数的定义	226
16.1.2	角系数的性质	226
16.1.3	角系数的确定方法	227
16.1.4	两个非凹黑表面的辐射换热和辐射空间热阻	231
16.1.5	封闭的辐射换热	232
16.2	灰体表面间的辐射换热	233
16.2.1	有效辐射	233
16.2.2	辐射表面热阻	233
16.2.3	两非凹灰体表面间的辐射换热	234
16.3	辐射换热的网络方法	236
16.3.1	基本网络单元	236
16.3.2	两个面之间辐射换热网络	236
16.3.3	三个表面间的辐射换热网络	237
16.3.4	两表面间有隔热屏时的辐射换热网络	238
16.4	气体辐射	240
16.4.1	气体辐射的特点	240
16.4.2	气体的吸收定律	240
16.4.3	气体的发射率和吸收率	241

16.4.4 火焰辐射的概念	246
16.5 气体与围壁表面间的辐射换热	246
16.6 小结	247
思考题	248
习 题	248

第三篇 质量传输

17 质量传输的基本概念	253
17.1 分子扩散	253
17.2 分子扩散系数	254
17.2.1 气体的分子扩散系数	255
17.2.2 液体的分子扩散系数	256
17.2.3 固体的分子(原子)扩散系数	257
17.3 质对流和对流传质	259
17.4 质量传输中的浓度	260
17.4.1 常用浓度单位	260
17.4.2 稳态传质与非稳态传质	261
17.5 传质流密度	261
17.6 小结	264
思考题	265
习 题	265
18 分子扩散的微分方程	266
18.1 分子扩散微分方程式	266
18.2 分子扩散微分方程的定解条件	268
18.3 模拟分子扩散过程的步骤	270
18.4 小结	272
思考题	273
习 题	273
19 分子扩散	274
19.1 一维稳态无化学反应的分子扩散	274
19.1.1 固体中的分子扩散	274
19.1.2 气体中的分子扩散	276
19.2 一维稳态有化学反应的分子扩散	279
19.2.1 一级化学反应的变面积分子扩散	279



19.2.2	一级化学反应的恒定面积分子扩散	283
19.3	静止介质中非稳态分子扩散	284
19.3.1	半无限大物体, 表面浓度为常数	285
19.3.2	半无限大物体, 表面扩散物质的质量为常数	288
19.3.3	有限厚度, 介质中扩散组分的浓度为常数	291
19.3.4	有限厚度, 表面浓度为常数	291
19.4	小 结	292
	思考题	293
	习 题	293
20	对流传质	294
20.1	对流传质基本概念	294
20.2	对流传质微分方程组	296
20.2.1	传质微分方程	296
20.2.2	对流传质微分方程	296
20.3	对流传质中的重要特征数	299
20.4	层流浓度边界层的精确解	301
20.5	浓度边界层的近似解	305
20.6	有效边界层	307
20.7	小 结	308
	思考题	308
	习 题	309
21	对流传质的特征数及其关联式	310
21.1	对流传质的量纲分析	310
21.1.1	强制对流传质	310
21.1.2	自然对流传质	311
21.1.3	对流传质关联式中的特征数	312
21.2	流过平板、球体和圆柱体的传质	313
21.2.1	流体平行流过平板时的传质	313
21.2.2	流体流过球体时的传质	314
21.2.3	流体垂直接流过单个圆柱时的传质	316
21.3	管道内的湍流传质	317
21.4	流体流过填充床和流化床的传质	318
21.5	湿壁塔内的传质	319
21.6	对流传质过程的模拟步骤	319
21.7	小 结	320