



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

冶金传输原理

刘坤 冯亮花 刘颖杰 王志英 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

冶金传输原理

刘坤 冯亮花 刘颖杰 王志英 编著

北京

冶金工业出版社

2015

内 容 提 要

本书内容涵盖冶金、材料类专业本科学生学习传输原理所需的相关基本知识。全书共分三篇,系统介绍了由三种传输现象单独或综合构成的动量、热量和质量传递过程的基本概念、基本规律和基本方法,以及冶金反应工程基本原理在冶金中的应用。书中各章均有学习要点、典型例题、本章小结、思考题与习题。

本书为冶金、材料类专业的本科生教材,也可供相关学科的研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冶金传输原理/刘坤等编著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 3
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5024-6863-7

I. ①冶… II. ①刘… 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(2015)第 045754 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 宋 良 杨 敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6863-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京印刷一厂印刷

2015 年 3 月第 1 版, 2015 年 3 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 20.25 印张; 488 千字; 306 页

46.00 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 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

本书阐述了冶金过程中传输的基本原理，内容包括“动量传输”、“热量传输”、“质量传输”及“冶金反应工程”，即“三传一反”。本书编者是在长期从事“冶金传输原理”课程教学及参考了国内外相关教材的基础上编写而成的，内容涵盖冶金、材料类本科学生学习传输原理所需的相关基本知识。通过学习该教材，读者能够深入了解复杂反应过程中各因素影响机理，从而为改进操作和设备，提高控制 and 设计水平奠定一定的理论基础；借助教材中提供的物理模型和数学模型，可应用电子计算机模拟求解许多工程问题，预测运行结果以便及时控制获得最佳的经济效益。本教材所包含的“三传”问题，与多种生产技术和科技领域都有密切联系，可作为有关院校材料、冶金及化工等专业本科生和研究生的学习教材，也可作为工程技术人员或科研工作者的参考资料。

全书分为三篇，共 11 章。第一篇为动量传输，共 5 章；第二篇为热量传输，共 4 章；第三篇为质量传输和冶金反应工程，共 2 章。主要包括动量传输中的流体特征即流动性、压缩性及黏性引出连续介质、不可压缩及理想流体三大假设模型；三大基本定律引出连续性方程、运动方程及能量三大方程；不可压缩流体的一维管路计算；可压缩性流体一维收缩 - 渐扩喷管内的流动工况并与实际炼钢氧枪的应用相结合；从研究方法上利用相似定理及模型研究方法处理试验数据和进行模型试验；热量传输中的导热的基本定律及应用，稳态及不稳态导热的特点及应用；将边界层理论内容合并到热量传输中与对流给热部分内容融合到一起，具体揭示边界层理论、类比法及实验法求解阻力及对流给热问题；黑体辐射基本概念、基本定律及灰体辐射换热的网络计算方法；质量传输中的分子扩散传质和对流流动传质的基本概念及规律；动量、热量和质量传输三者的类似原理，作为传输原理的概括和综合；以实际冶金反应过程为研究

对象，研究伴随各类传递（动量、热量、质量）过程的冶金化学反应的规律，以解决工程问题为目的，研究实现不同冶金反应的各类冶金反应器的特征，并把二者有机结合起来，使传输原理的基本规律在冶金反应中得以具体的应用。

非常感谢辽宁科技大学教务处对本教材的大力支持。

由于编者水平有限，书中的疏漏与不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者
2014 年 9 月

本书符号表

动量传输部分

A	面积, m^2	Δp	压强差, Pa
c	声速, m/s	q_m	质量流量, kg/s
a	加速度, m/s^2	q_v	体积流量, m^3/s
c_p	定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	R	气体常数, $\text{m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$
c_v	定容比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Re_{cr}	临界雷诺数, 无量纲
c_f	平板阻力损失系数	r	半径, m
c_{fx}	平板局部阻力损失系数	t	时间, s
d	直径, m	τ	切应力, Pa
d	比重, 无量纲	V	体积, m^3
d	相对密度, 无量纲	v	比体积 (质量体积), m^3/kg
d_f	非球形颗粒直径, m	v	瞬时速度, m/s
d_p	固体球形颗粒直径, m	\bar{v}	平均速度或时均速度, m/s
E_v	体积弹性模数, Pa	v_c	下临界速度, m/s
F	力, N	v'_c	上临界速度, m/s
F_D	摩擦阻力, N	v_f	流体在孔隙中的实际流速, m/s
f	单位质量力, kg	v_θ	切向速度, m/s
G	重力, N	v'	脉动速度, m/s
g	重力加速度, m/s^2	We	韦伯数, 无量纲
H	距离, m	x	x 轴向距离, m
h	焓, kJ	x_{cr}	层流到过渡区的转折点, m
h_f	沿程阻力损失, N/m^2	α	动能修正系数, 无量纲
h_j	局部阻力损失, Pa	α_f	体膨胀系数, K^{-1}
h_w	全流程的总损失, N/m^2	γ	重度, N/m^3
γ	绝热指数, 无量纲	δ	流动边界层厚度, m
L	长度, m	δ_b	层流底层厚度, m
M	动量, $\text{kg} \cdot \text{m/s}$	Δ	绝对粗糙度, m
m	质量, kg	$\bar{\Delta}$	相对粗糙度, m
p	压强 (压力), N/m^2 或 Pa	ε	孔隙度, 无量纲
p_{abs}	绝对压强, Pa	ξ	局部阻力损失系数, 无量纲
p_{re}	相对压强, Pa	ν	运动粘性系数, m^2/s
p_a	大气压强, Pa	θ	夹角, ($^\circ$)

λ	分子平均自由程, m	$\tau_{\text{粘}} (\tau_{\mu})$	粘性切应力, Pa
λ	沿程阻力损失系数, 无量纲	$\tau_{\text{附}} (\tau_i)$	附加切应力, Pa
μ	动力黏性系数, Pa·s	∇	哈密顿算子
μ_{eff}	有效黏性系数, Pa·s	β	等温压缩率, Pa ⁻¹
ρ	密度, kg/m ³	$^{\circ}E$	恩氏黏度系数, 无量纲
σ	表面张力, N/m		

热量传输部分

λ	导热系数, W/(m·°C)	I	辐射强度, W/(m ² ·Sr)
t	温度, °C	J	有效辐射, W/m ²
τ	时间, s	K	传热系数, W/(m ² ·°C)
A	吸收率, 无量纲	K_{λ}	单色减弱系数, 1/m
a	热量传输系数(或导温系数), m ² /s	k	热导率, W/(m·°C)
c_0	黑体的辐射系数, 5.67W/(m ² ·K ⁴)	Q	热流量, W
c_1	普朗克第一常数, $c_1 = 3.742 \times 10^{-16}$ W·m ²	q	热流密度, W/m ²
c_2	普朗克第二常数, $c_2 = 1.439 \times 10^{-2}$ m·K	R	反射率, 无量纲
D	透射率, 无量纲	R	热阻, m ² ·K/W
E	实际物体辐射力, W/m ²	S	平均射线程长, m
E	扩散活化能, kJ/mol	T	绝对温度, K
E_b	黑体的辐射力, W/m ²	α	吸收率, 无量纲
E_{λ}	单色辐射力, W/m ²	δ_i	温度边界层厚度, m
E_{θ}	定向辐射力, W/(m ² ·Sr)	ε	发射率(黑度), 无量纲
G	投射辐射能, W/m ²	ε_g	气体发射率, 无量纲
α	对流换热系数或表面传热系数, W/(m ² ·°C)	θ	过余温度, K
		σ_b	斯忒藩-玻耳兹曼常数, 5.67×10^{-8} W/(m ² ·K ⁴)
		ω	立体角, sr
		φ_{ij}	表面 <i>i</i> 对表面 <i>j</i> 的角系数, 无量纲

质量传输部分

C	组分的浓度, mol/m ³	J_{λ}	传质通量, kmol/(m ² ·s)
D_{AB}	组分A在组分B的扩散系数, m ² /s	δ_c	浓度边界层厚度, m
K	传质系数, m/s		

特征数

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

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

$$Fo = \frac{at}{l^2}, \text{ 傅里叶数}$$

$$Fr = \frac{v^2}{gL}, \text{ 弗劳德数}$$

$$Gr = \frac{\alpha g l^3 \Delta t}{\nu^2}, \text{ 格拉晓夫数}$$

$$Ho = \frac{vt}{L}, \text{ 均时性特征数}$$

$$Le = \frac{\alpha}{D}, \text{ 路易斯数}$$

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

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{vL}{a}, \text{ 贝克来数}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \text{ 普朗特数}$$

$$Re = \frac{vL}{\nu}, \text{ 雷诺数}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D}, \text{ 施密特数}$$

$$Sh = \frac{K_c L}{D}, \text{ 谢伍德数}$$

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

$$St' = \frac{Sh}{Re \cdot Sc}, \text{ 斯坦顿数}$$

$$St'' = \frac{Sh}{Nu \cdot Le}, \text{ 斯坦顿数}$$

$$Eo = \frac{g \Delta \rho d_b^2}{\sigma}, \text{ 重力与表面张力之比}$$

目 录

I 动量传输

1 流体的基本性质及流体静力学	1
1.1 流体的概念及连续介质假设	1
1.1.1 流体的概念	1
1.1.2 连续介质假设	2
1.2 流体的密度、重度、比容	3
1.3 流体的压缩性和膨胀性	4
1.3.1 液体的压缩性和膨胀性	4
1.3.2 气体的压缩性和膨胀性	5
1.4 流体黏性	5
1.4.1 流体黏性的概念	5
1.4.2 牛顿黏性定律	6
1.4.3 动力黏度、运动黏度和恩氏黏度	6
1.4.4 温度和压强对流体黏度的影响	7
1.4.5 理想流体的概念	7
1.5 作用在流体上的力	9
1.5.1 质量力	9
1.5.2 表面力	9
1.6 流体静力学	9
1.6.1 流体静压强及其特性	9
1.6.2 流体的平衡微分方程	11
1.6.3 静力学基本方程	12
1.6.4 流体压强的测量	16
1.6.5 静力学基本方程工程应用实例	18
本章小结	19
思考题与习题	21
2 流体动力学	23
2.1 流体运动的基本概念	23
2.1.1 研究流体运动的两种方法	23

IV	
2.1.2	稳定流与非稳定流 25
2.1.3	迹线和流线 26
2.1.4	流管与流束 29
2.1.5	流量和平均速度 29
2.1.6	系统和控制体 30
2.2	连续性方程 30
2.2.1	直角坐标系下的连续性方程 30
2.2.2	一维总流的连续性方程 32
2.3	理想流体的运动微分方程——欧拉方程 34
2.4	实际流体的运动微分方程——纳维尔-斯托克斯方程 36
2.5	理想流体和实际流体的伯努利方程 38
2.5.1	理想流体沿流线的伯努利方程 38
2.5.2	实际流体沿流线的伯努利方程 40
2.5.3	实际流体总流的伯努利方程 41
2.6	伯努利方程的应用 43
2.6.1	应用条件 43
2.6.2	毕托管 44
2.6.3	文丘里管 45
2.7	稳定流的动量方程积分形式 46
	本章小结 50
	思考题与习题 53
3	黏性流体管内流动 56
3.1	流体运动的两种状态和能量损失的两种形式 56
3.1.1	雷诺实验 56
3.1.2	流动状态的判据——雷诺数 57
3.1.3	能量损失的两种形式 58
3.2	圆管中的层流运动 59
3.2.1	速度分布 59
3.2.2	流量计算 60
3.2.3	沿程损失 61
3.2.4	圆管内流动起始段 62
3.3	圆管中的湍流运动 62
3.3.1	脉动现象与时均值的概念 62
3.3.2	湍流核心和黏性底层（层流边界层） 63
3.3.3	水力光滑管和水力粗糙管 63
3.3.4	湍流中总切向应力 64
3.3.5	圆管中的湍流运动速度分布 65
3.3.6	湍流沿程损失的基本关系式 66

3.3.7 沿程阻力系数 λ 值的确定	67
3.4 局部阻力系数的确定	71
3.4.1 截面突然扩大的局部损失	71
3.4.2 其他类型的局部损失	73
3.5 管道水力计算	75
3.5.1 串联管路	75
3.5.2 并联管路	76
3.5.3 虹吸现象	78
本章小结	78
思考题与习题	82
4 气体动力学基础	85
4.1 微弱扰动的传播速度	85
4.1.1 微弱扰动的一维传播	85
4.1.2 声速	87
4.1.3 马赫数	88
4.2 微弱扰动在空间流场中的传播特征	88
4.2.1 静止流场中微弱扰动的传播特征	88
4.2.2 直线均匀亚声速流中微弱扰动的传播特征	88
4.2.3 直线均匀声速流中微弱扰动的传播特征	89
4.2.4 直线均匀超声速流中微弱扰动的传播特征	90
4.3 气体一维定常流动的基本方程	90
4.3.1 连续方程	91
4.3.2 运动方程	91
4.3.3 能量方程	91
4.3.4 状态方程	91
4.4 气体的参考状态	92
4.4.1 滞止状态	92
4.4.2 极限状态	93
4.4.3 临界状态	93
4.4.4 速度系数	95
4.5 变截面等熵管流的流动特征	97
4.5.1 气体一维定常等熵流动应用方程	98
4.5.2 气流速度与通道截面间的关系	98
4.5.3 变截面等熵管流的应用	99
4.6 正激波	101
4.6.1 正激波的形成	102
4.6.2 正激波基本关系式	103
4.7 收缩喷管中的流动	105

VI	
4.7.1	喷管出口截面的流速和流量 105
4.7.2	变工况流动分析 106
4.8	缩放管中的流动 109
4.8.1	流量和面积比公式 109
4.8.2	变工况流动分析 111
	本章小结 116
	思考题与习题 119
5	相似理论及量纲分析 121
5.1	相似基本概念 121
5.1.1	几何相似 121
5.1.2	运动相似 121
5.1.3	动力相似 122
5.2	流动过程的相似特征数 123
5.2.1	相似特征数的导出 123
5.2.2	相似特征数的意义与性质 124
5.3	相似三定理 125
5.3.1	相似第一定理 125
5.3.2	相似第二定理 129
5.3.3	相似第三定理 130
5.4	量纲分析法 132
5.4.1	量纲 133
5.4.2	量纲表达式 133
5.4.3	量纲和谐原理 134
5.4.4	量纲(因次)分析法 134
5.5	模型实验与自模化性 138
5.5.1	近似模型法 138
5.5.2	流体的自模化 138
	本章小结 139
	思考题与习题 141
 II 热量传输 	
6	热量传输总论 143
6.1	热量传输基本方式概论 143
6.2	热量传输的基本概念 144
6.2.1	温度场 144
6.2.2	等温面和等温线 145

6.2.3 温度梯度	145
6.2.4 热流量与热流密度	145
6.3 导热	146
6.3.1 导热基本定律——傅里叶定律	146
6.3.2 导热系数	146
6.4 对流	150
6.5 热辐射	150
6.6 传热热阻	151
6.7 热量传输微分方程	152
6.7.1 热量传输微分方程的推导	152
6.7.2 热量传输微分方程的形式	154
6.7.3 导温系数（热扩散率）的物理意义	155
6.7.4 圆柱坐标系下的导热微分方程形式	155
6.7.5 单值性条件	156
6.7.6 傅里叶导热定律和导热微分方程式的比较	158
本章小结	158
思考题与习题	159
7 导热	161
7.1 通过平壁的一维稳态导热	161
7.1.1 第Ⅰ类边界条件：表面温度为常数	161
7.1.2 第Ⅲ类边界条件：周围介质温度为常数	164
7.2 通过圆筒壁的一维稳态导热	167
7.2.1 第Ⅰ类边界条件：表面温度为常数	167
7.2.2 第Ⅲ类边界条件：周围介质温度为常数	170
7.2.3 临界绝热层直径	172
7.3 非稳态导热过程的基本概念	174
7.3.1 非稳态导热过程的类型及特点	174
7.3.2 第Ⅲ类边界条件下 Bi 数对平板中温度分布的影响	175
7.4 薄材的非稳态导热	175
7.4.1 薄材基本概念	175
7.4.2 集总热容系统的非稳态导热（薄材分析法）	176
7.5 半无限大物体的一维非稳态导热	180
本章小结	183
思考题与习题	185
8 对流换热	188
8.1 对流换热一般分析	188
8.2 边界层理论及平板层流边界层换热特征数关联式	189

VIII	
8.2.1	边界层的基本概念 190
8.2.2	层流边界层换热微分方程组 191
8.2.3	平板层流边界层微分方程组布拉修斯解 194
8.2.4	边界层动量积分方程组 196
8.2.5	边界层动量积分方程组: 冯·卡门近似解 198
8.2.6	平板混合边界层的计算 202
8.2.7	平板层流换热的特征数关联式 203
8.3	纵掠平板及管内湍流换热特征数关联式: 动量与热量比拟法 205
8.3.1	湍流动量传输和热量传输 205
8.3.2	雷诺类比和柯尔伯恩类比 206
8.4	相似原理指导下的实验方法 210
8.4.1	相似概念及基本内容 210
8.4.2	导出相似特征数的两种方法 211
8.4.3	管内强制对流换热特征数方程的应用 213
8.5	自然对流换热及其关联式 218
8.5.1	概述 218
8.5.2	大空间自然对流换热关联式 219
	本章小结 221
	思考题与习题 222
9	辐射换热 224
9.1	热辐射的基本概念 224
9.1.1	热辐射的本质和特点 224
9.1.2	辐射能的吸收、反射和透射 225
9.2	黑体辐射的基本定律 226
9.2.1	黑体模型 226
9.2.2	四个基本概念 226
9.2.3	黑体辐射的四个基本规律 228
9.3	实际物体的辐射 230
9.3.1	实际物体的辐射特性 230
9.3.2	实际物体的吸收特性 232
9.3.3	灰体 234
9.4	角系数 235
9.4.1	角系数的定义 235
9.4.2	辐射角系数的性质 236
9.4.3	角系数的确定方法 237
9.5	物体间辐射换热的计算 240
9.5.1	两黑体表面间的辐射换热 240
9.5.2	灰体表面的辐射热流 241

9.5.3 两灰体表面间的辐射换热	242
9.6 辐射换热的网络解法	245
9.6.1 三个灰体表面(等温)组成的封闭系统	245
9.6.2 具有重辐射面的封闭腔的辐射换热	246
9.6.3 两表面间有隔热屏时的辐射换热网络	247
9.7 气体辐射	252
9.7.1 气体辐射的特点	252
9.7.2 气体的吸收定律	252
9.7.3 气体的黑度和吸收率	253
9.8 气体与围壁表面间的辐射换热	257
9.9 辐射给热系数	258
本章小结	258
思考题与习题	260

III 质量传输与反应工程学

10 质量传输	263
10.1 两种质量传输方式	263
10.1.1 分子扩散传质	263
10.1.2 对流流动传质	264
10.1.3 质量传输中的常用浓度单位	264
10.2 质量传输平衡方程式	264
10.3 分子扩散传质	265
10.3.1 分子扩散传质方程	266
10.3.2 气体通过间壁的扩散	266
10.3.3 分子扩散传质系数	267
10.3.4 静止介质中不稳态扩散传质	268
10.4 对流流动传质	269
10.4.1 对流流动传质模型	270
10.4.2 平板层流流动质量传输特征数关联式	271
10.4.3 平板湍流流动质量传输特征数关联式	272
10.4.4 相似原理指导下对流流动传质特征数方程	273
10.5 动量、热量和质量传输的类比	275
10.5.1 动量传输与热量传输的类似定律	275
10.5.2 动量传输与质量传输的类似定律	277
10.5.3 动量传输、热量传输和质量传输三者的类似	278
本章小结	280
思考题与习题	281

11 冶金反应工程学	283
11.1 冶金宏观动力学	283
11.1.1 气体-固体间反应	283
11.1.2 气体-液体间反应	284
11.1.3 液体-液体间反应	287
11.1.4 液体-固体间反应	287
11.1.5 固体-固体间反应	287
11.2 冶金反应器	288
11.2.1 理想反应器	288
11.2.2 非理想反应器	289
11.2.3 搅拌和反应器内液体的混合	293
11.3 典型冶金反应器	293
11.3.1 冶金气-液反应器	293
11.3.2 冶金液-液反应器	294
本章小结	294
工程实例导读	296
附 录	297
参考文献	306

I 动量传输

1 流体的基本性质及流体静力学

本章学习要点：主要介绍流体的基本概念。分析流体与固体的区别，流体的基本性质，介绍牛顿内摩擦定律，作用在流体上的两种力，推流体静力学方程及应用，了解测量流体压强的常用测压计原理与结构。

1.1 流体的概念及连续介质假设

1.1.1 流体的概念

所谓流体是指没有固定的形状、易于流动，受任何微小剪切应力作用都能连续变形的一种物质。流体包括液体和气体。

流体和固体的差别在于宏观上表现为流体具有流动性。设如图 1.1 所示固体平板受到剪切力的作用，变形扭曲，发生 θ 角变形，弹性极限范围内， F 大小不变，则变形不变。对于图 1.2 所示流体， F 大小不变地连续作用时， $t_2 > t_1 > t_0$ ，流体会连续变形下去，只要此剪切力 F 作用存在，则变形不会终止。因此说，流体是容易变形和流动的物体。

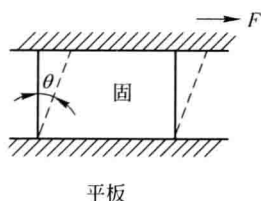


图 1.1 固体受力变形

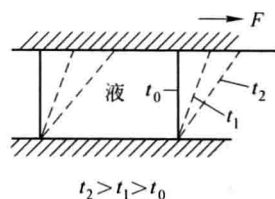


图 1.2 流体受力变形

在微观上，固体的分子排列紧密，分子间的引力和斥力都较大，分子被束缚在平衡位