



冶金传输现象 的基本原理与方法

楼志诚 著

上海科学技术出版社

76.103
65

冶金传输现象的 基本原理与方法

楼 志 诚

30167

1997.9 2
上海科学技术出版社

冶金传输现象的基本原理与方法

楼 志 诚

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所经销 常熟第七印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 8.5 字数 178,000

1997 年 3 月第 1 版 1997 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—3,000

ISBN 7-5323-4218-2/TF·4

定价: 9.80 元

前 言

传输现象(Transport phenomena)是自然界、工程技术乃至日常生活中普遍存在的物理量——动量、热量(能量)、质量的传递和输运现象。它包括物质分子尺度上由于分子热运动而产生的物理量沿速度、温度、浓度负梯度方向上的分子传递(传导、扩散);流体微团尺度上由于紊流旋涡而产生的物理量沿脉动速度方向上的旋涡传递(扩散、混合)以及设备尺度上由于流体整体运动而产生的物理量沿流速方向上的宏观输运(迁移、对流)过程。

传输现象理论是近代科技发展过程中,在流体力学、传热学、传质学传统学科基础上产生的一门独立的新兴学科,在国外已列入与热力学、电磁学等同等重要的一门基础技术科学或关键工程科学(Key Engineering Science),成为冶金、材料、化工、热工、能源、机械、环境等工程学科的基础之一,促进了这些学科的发展。

冶金过程一般可分为化学过程与物理过程两大过程。冶金传输现象,即冶金过程及系统内的流体流动、传热传质现象对于决定冶金反应的效果和速度起着十分重要的作用。传输现象理论在国外于 70 年代引入冶金学科,80 年代初介绍到我国冶金界后,与冶金反应热力学与动力学、冶金反应工程学、冶金系统工程学等一起,奠定了冶金学科的理论基础,使冶金学加快了从技艺走向科学的质的飞跃。

与流体力学、传热学等学科一样,传输现象学科按研究方

43781

、 1 、

法亦可分为理论、数值、实验三大分支。本书以传输现象的基本理论及其解析方法作为阐述对象，而不涉及数值方法及实验方法。

全书内容包括传输现象的基本定律与微分方程、无粘流动、粘性流动、传导传热、对流给热、传导传质、对流传质等七章及五个附录。第一章介绍描述传输现象的三个基本定律及四个基本微分方程，“作为以下各章的基础。第二、三章介绍动量传输原理：“无粘流动”一章从运动学、静力学、动力学三角度分析理想流体的流动规律；“粘性流动”一章从层流、紊流、边界层流动分析实际流体的流动规律。第四、五章介绍能量传输原理：“传导传热”一章介绍一维及多维、稳态态和不稳态态导热微分方程的典型解析方法；“对流给热”一章介绍对流给热微分方程的精确解、对流给热积分方程的近似解以及对流给热问题类似解及相似解方法。第六、七章介绍质量传输原理：“传导传质”一章介绍浓度、化学位梯度为驱动力的稳态态扩散、固相中的非稳态态扩散以及伴随相变或化学反应的扩散；“对流传质”一章介绍对流传质的边界层理论、对流传质准数方程、传输现象类似律以及传质系数模型。

本书的附录部分提供了场论、复变函数、数理方程、特殊函数、积分变换等工程数学方法在传输现象中的应用，可以看作正文各章内容的延伸及补充。附录一给出场论的基本运算，附录二给出柱坐标及球坐标中传输现象的基本方程，附录三介绍复变函数在势流理论中的应用，附录四给出一维非稳态态导热的基本精确解，附录五给出导热及扩散计算用特殊函数、特征方程及积分变换表。

全书中出现的物理量均严格采用统一的国际单位制。

本书在写作题材的选择、取舍上，力求典型，考虑了以治

金、材料、热工领域为应用背景,但本书旨在阐明传输现象的基本物理概念、基本微分方程及三传类似性的基本原理,阐明以精确法、近似法、相似法、类似法为核心方法的传输现象数学解析方法及模型实验方法的基本原理;在写作风格上力求突出基础理论,强调物理概念与数学方法的有机结合,做到思路清晰、逻辑严密,而又简洁流畅,以不大的篇幅追求深度与广度。与现行教科书相比较,由于本书适当采用了场论、矢量与张量、复变函数、微分方程、特殊函数、积分变换等工程数学方法,因此本书内容已超出冶金及材料类传输原理课程本科的要求,可供冶金、材料、热工、化工等专业师生作为教学参考书,对有关专业的科技人员亦是一本有益的读物。

本书在写作过程中参考了传输现象、流体力学、传热学、传质学、冶金动力学、工程数学等方面中外作者的大量文献,作者在长期的教学、研究中从中积累了丰富的知识,接受了思维方法的熏陶;在1994年10月全国“冶金传输原理”和“冶金反应工程学”课程教学和教材建设研讨会上,作者从与会专家、学者及同行研讨中得到了有益的思想启迪;徐匡迪教授、蒋国昌教授、徐烈鹏教授对本书的写作给予了热情的鼓励与支持。作者谨向他们以及为本书问世提供帮助的其他许多同志致以诚挚的谢意,同时还要感谢上海市钢铁冶金重点学科建设项目经费资助。

传输现象理论、数值计算、实验方法正在蓬勃发展之中,限于作者的学识水平,本书谬误不妥之处在所难免,作者期待专家学者和广大读者不吝指正。

楼志威 1995.10.

于上海大学材料科学与工程学院

主要符号表

A	—面积	$[\text{m}^2]$
ω	—加速度	$[\text{m}/\text{s}^2]$
	—热扩散率	$[\text{m}^2/\text{s}]$
l	—宽度	$[\text{m}]$
C_d	—浓度	$[\text{mol}/\text{m}^3]$
C_D	—阻力系数	
C_f	—摩擦系数	
c_p	—定压比热	$[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
c_v	—定容比热	$[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
C_ϕ	—相似常数	
D	—扩散系数	$[\text{m}^2/\text{s}]$
d	—直径	$[\text{m}]$
F	—力	$[\text{N}]$
f	—单位质量力	$[\text{m}/\text{s}^2]$
	—摩擦系数	
	—量纲一流函数	
g	—重力加速度	$[\text{m}/\text{s}^2]$
h	—高度	$[\text{m}]$
J	—汽蚀强度	$[\text{m}^2/\text{s}]$
J_A	—分子扩散速率	$[\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$
J_D	—传质 J 因子	
J_H	—传热 J 因子	
K	—紊流脉动动能	$[\text{J}/\text{kg}]$
	—传热系数	$[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$

平衡常数

凝固常数 $[\text{m} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}]$

K_D ——贯通传质系数 $[\text{m} \cdot \text{s}]$

k ——玻尔兹曼常数 $[\text{J}/\text{K}]$

绝热指数

形状系数

L ——阿伏加德罗常数 $[\text{mol}^{-1}]$

l ——长度 $[\text{m}]$

M ——偶极矩 $[\text{m}^2/\text{s}]$

质量流量 $[\text{kg}/\text{s}]$

m ——质量 $[\text{kg}]$

N_A ——传质速率 $[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$

n_A ——物质流 $[\text{mol}/\text{s}]$

物质的量 $[\text{mol}]$

$\mathcal{P}$ ——压力函数 $[\text{J}/\text{kg}]$

p ——压力 $[\text{N}/\text{m}^2]$, $[\text{Pa}]$

p_A ——分压 $[\text{N}/\text{m}^2]$, $[\text{Pa}]$

Q ——体积流量 $[\text{m}^3/\text{s}]$

平面流动流量 $[\text{m}^2/\text{s}]$

热流 $[\text{J}/\text{s}]$, $[\text{W}]$

热量 $[\text{J}]$

q ——传热速率 $[\text{W}/\text{m}^2]$

q_v ——内热源 $[\text{W}/\text{m}^3]$

R ——气体常数 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$

R_A ——化学反应速率 $[\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})]$

R_s ——界面反应速率 $[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$

R_0 —— 摩尔气体常数 $[\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$

r —— 半径 $[\text{m}]$

s —— 厚度 $[\text{m}]$

表面更新率 $[\text{s}^{-1}]$

T —— 温度 $[\text{K}]$

t —— 时间 $[\text{s}]$

U —— 质量力势函数 $[\text{J}/\text{kg}]$

V —— 体积 $[\text{m}^3]$

v —— 比容 $[\text{m}^3/\text{kg}]$

w —— 速度 $[\text{m}/\text{s}]$

x_A —— 摩尔分数

α —— 对流给热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$

α_D —— 对流传质系数 $[\text{m}/\text{s}]$

α_{Σ} —— 综合给热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$

β —— 体膨胀温度系数 $[\text{K}^{-1}]$

β_D —— 体膨胀浓度系数

Γ —— 环量 $[\text{m}^2/\text{s}]$

δ —— 厚度 $[\text{m}]$

γ —— 体膨胀速率 $[\text{s}^{-1}]$

紊流耗散函数 $[\text{W}/\text{kg}]$

ϵ_L —— 线变形速率 $[\text{s}^{-1}]$

l —— 量纲一距离

θ —— 量纲一温度

θ —— 角度 $[\text{rad}]$

角变形速率 $[\text{s}^{-1}]$

剩余温度 $[\text{K}]$

λ —— 导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$

μ ——粘度 $[\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2]$

μ_A ——化学位 $[\text{J}/\text{mol}]$

ν ——动粘度系数 $[\text{m}^2/\text{s}]$

ρ ——密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$

ρ_A ——质量浓度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$

τ ——动量传递速率, 粘性应力 $[\text{N}/\text{m}^2]$

Φ ——量纲一浓度

复势 $[\text{m}^2/\text{s}]$

ϕ ——剩余浓度 $[\text{mol}/\text{m}^3]$

φ ——角度 $[\text{rad}]$

速度势 $[\text{m}^2/\text{s}]$

ψ ——流函数 $[\text{m}^2/\text{s}]$

Ω ——涡量 $[\text{s}^{-1}]$

ω ——旋转角速度 $[\text{s}^{-1}]$

Ar ——阿基米德准数 $\left(\frac{g l^3}{\nu^2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)$

Arr ——阿仑尼乌斯准数 $\left(\frac{R_A \delta^2}{D_A C_A} \right)$

Bi ——毕欧准数 $\left(\frac{\alpha s}{\lambda} \right)$

Bi_D ——传质毕欧准数 $\left(\frac{\alpha_D s}{D} \right)$

Eu ——欧拉准数 $\left(\frac{\Delta p}{\rho w^2} \right)$

Fi ——菲克准数 $\left(\frac{D l}{l^2} \right)$

FO ——傅里叶准数 $\left(\frac{\alpha t}{l^2} \right)$

Fr ——弗劳德准数 $\left(\frac{g l^2}{w^2} \right)$

- Gr ——伽里略准数 $\left(\frac{gl^3}{\nu^2}\right)$
 Gr ——格拉晓夫准数 $\left(\frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta T\right)$
 Gr_D ——传质格拉晓夫准数 $\left(\frac{gl^3}{\nu^2} \beta_D x_A\right)$
 Ho ——均时性准数 $\left(\frac{wl}{l}\right)$
 Nu ——努塞尔准数 $\left(\frac{\alpha l}{\lambda}\right)$
 Pe ——贝克来准数 $\left(\frac{wl}{\alpha}\right)$
 Pe_D ——传质贝克来准数 $\left(\frac{wl}{D}\right)$
 Pr ——普朗特准数 $\left(\frac{\nu}{\alpha}\right)$
 Ra ——瑞利准数 $\left(\frac{gl^3}{\nu \alpha} \beta \Delta T\right)$
 Re ——雷诺准数 $\left(\frac{wl}{\nu}\right)$
 Sc ——施密特准数 $\left(\frac{\nu}{D}\right)$
 Sh ——修伍德准数 $\left(\frac{\alpha_H l}{D}\right)$
 St ——斯坦顿准数 $\left(\frac{\alpha}{\rho c_p w_\infty}\right)$
 St_D ——传质斯坦顿准数 $\left(\frac{\alpha_D}{w_\infty}\right)$

内 容 提 要

本书阐明冶金传输现象的基本原理与方法。内容包括传输现象的基本定律与微分方程、无粘流动、粘性流动、传导传热、对流给热、传导传质、对流传质等七章及五个附录。重点阐明传输现象中的基本物理概念、基本微分方程及三传类似性的原理。阐明以精确法、近似法、相似法、类似法为核心方法的传输现象数学解析方法及模型实验方法的原理。附录中提供了场论、复变函数、特殊函数、积分变换等工程数学方法在传输现象中的应用。内容深度上已经出冶金及材料类传输原理课程本科的要求。

本书可供冶金、材料、热工、化工等专业师生作为教学参考书，对相关专业的科技人员亦是一本有益的读物。

目 录

前言	1
主要符号表	1
1 传输现象的基本定律和微分方程	1
1.1 传输现象基本定律	1
1.1.1 牛顿粘性定律	1
1.1.2 傅里叶导热定律	3
1.1.3 菲克扩散定律	5
1.2 连续性方程	7
1.3 动量方程(纳维-斯托克斯方程)	9
1.3.1 应力形式的 N-S 方程	9
1.3.2 流体质点加速度	11
1.3.3 广义牛顿粘性定律	12
1.3.4 速度形式的 N-S 方程	13
1.4 能量方程(傅里叶-克希荷夫导热微分方程)	13
1.5 传质方程	16
2 无粘流动(动量传输之一)	19
2.1 流体微团运动的几何分析	19
2.1.1 线变形速率	20
2.1.2 角变形速率	21
2.1.3 旋转角速度	22
2.2 速度势与流函数、不可压平面势流的速度场	23
2.2.1 无旋流动的势函数	24

2.2.2	不可压平面流动的流函数	35
2.2.3	势元流动的势函数与流函数	37
2.3	静止流场(流体静力学)	38
2.3.1	静止流场的基本方程	34
2.3.2	有势质量力	35
2.3.3	正压流体及其压力函数	36
2.3.4	静止流场的基本特征	37
2.4	理想流体的运动方程及其积分	39
2.4.1	理想流体的运动方程	39
2.4.2	无旋流动的拉格朗日积分	39
2.4.3	沿流线的柏努利积分	40
3	粘性流动(动量传输之二)	42
3.1	平板间稳定态层流的精确解	42
3.2	圆球低雷诺数绕流的近似解	45
3.3	紊流流动的基本方程及混合长度模型	49
3.3.1	不可压粘性流体紊流的基本方程	50
3.3.2	普朗特混合长度理论	54
3.3.3	光滑平壁或圆管内紊流的速度分布	56
3.4	紊流模式理论基础	58
3.4.1	雷诺应力输运方程	58
3.4.2	紊流脉动动能方程	60
3.4.3	紊流 $K-\epsilon$ 模型	62
3.5	边界层基本微分方程及布莱修斯精确解	64
3.5.1	边界层基本微分方程(普朗特方程)	65
3.5.2	平板层流边界层的布莱修斯精确解	67
3.6	边界层动量积分方程及近似解	71
3.6.1	卡门边界层动量积分方程	71
3.6.2	平板层流边界层的近似解	74

4 传导传热(能量传输之一)	77
4.1 导热微分方程及分析解法简述	77
4.1.1 导热微分方程	77
4.1.2 单值条件及定解条件	79
4.1.3 解的准数方程形式	81
4.2 一维稳定态导热的解析解	83
4.2.1 平壁导热	84
4.2.2 圆筒壁导热	98
4.3 二维稳定态导热的解析解	90
4.3.1 二维稳定态导热微分方程的精确解——分离变量法	90
4.3.2 二维稳定态导热微分方程的近似解——积分方程法	93
4.4 不稳定态导热的解析解	91
4.4.1 薄材的加热或冷却问题的集总参数法	95
4.4.2 半无限厚物体的加热或冷却问题的变量置换法及拉氏变换法	97
4.4.3 有限厚物体的加热或冷却问题的分离变量法	104
4.4.4 多维不稳定态导热问题的乘积解法	115
4.5 有相变或化学反应时的导热问题	121
5 对流给热(能量传输之二)	126
5.1 对流给热微分方程的精确解	127
5.1.1 强制对流给热——平板层流传热边界层的波尔豪森解	127
5.1.2 自然对流给热——竖壁层流传热边界层的奥斯特瑞奇解	132
5.1.3 有相变的对流给热——竖板膜状凝结的努塞尔解	136
5.2 对流给热积分方程的近似解	139

5.2.1	边界层能量积分方程	140
5.2.2	平板层流传热边界层的近似解	141
5.3	动量传输和热量传输的类似律	141
5.3.1	雷诺类似律与柯尔本类似律	141
5.3.2	普朗特类似律与卡门类似律	146
5.4	相似原理及对流给热的准数方程式	149
5.4.1	相似现象的基本原理简介	150
5.4.2	流动相似准数	155
5.4.3	热相似准数	158
5.4.4	对流给热的准数方程式	160
6	传导传质(质量传输之一)	163
6.1	浓度(分压)梯度为驱动力的稳定态扩散	164
6.1.1	等分子对向扩散	164
6.1.2	通过惰性介质的单向扩散	166
6.1.3	非等分子对向扩散	168
6.2	化学位梯度为驱动力的扩散	171
6.3	固相中的非稳态扩散	174
6.3.1	半无限厚物体内的非稳态扩散	174
6.3.2	有限厚及多维物体内的非稳态扩散	175
6.3.3	扩散系数随浓度而变的非稳态扩散	177
6.4	伴随相变或化学反应的扩散	180
6.4.1	发生相变的扩散过程	180
6.4.2	发生化学反应的扩散过程	183
7	对流传质(质量传输之二)	187
7.1	对流传质的边界层理论	188
7.1.1	平板层流传质边界层微分方程的精确解	188
7.1.2	平板层流传质边界层积分方程的近似解	193

7.2 对流传质的准数方程式	195
7.2.1 传质相似准数	195
7.2.2 对流传质的准数方程式	197
7.3 动量、热量和质量传输类似律	199
7.3.1 动量传输和质量传输的类似律	199
7.3.2 热量传输和质量传输的类似律	203
7.4 传质系数模型	204
7.4.1 薄膜理论	204
7.4.2 双膜理论	205
7.4.3 渗透理论	208
7.4.4 表面更新理论	209
附录 1 场论的基本运算	212
A.1.1 方向导数与梯度	212
A.1.2 通量与散度	214
A.1.3 环量与旋度	215
A.1.4 矢量微分复合运算	217
附录 2 正交曲线坐标系中的基本方程	219
A.2.1 柱坐标系中的基本方程	219
A.2.2 球坐标系中的基本方程	220
附录 3 复变函数在势流理论中的应用	223
A.3.1 复势与复速度	223
A.3.2 简单的复势	224
A.3.3 利用共形映照求复势	228
附录 4 一维非稳态导热的基本精确解	231
A.4.1 表面温度为常数时物体内的温度分布	232