

高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

冶金传输原理

沈巧珍 杜建明 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高等学校规划教材

冶金传输原理

沈巧珍 杜建明 编著

北京

冶金工业出版社

2006

内 容 提 要

本书内容涵盖冶金、材料类本科学生学习传输原理所需的相关基本知识。全书共分为三篇,系统地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原理及其在冶金中的应用。书中有不少例题,每章之后附有必要的习题。常用基本参数列于书后附录中。

本书适于冶金、材料类专业本科生使用,也可供相关学科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/沈巧珍等编著. —北京:冶金工业出版社,
2006. 8

高等学校规划教材

ISBN 7-5024-4021-6

I. 冶… II. 沈… III. 冶金—过程—传输—高等
学校—教材 IV. TF01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 059606 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 朱华英 (联系电话:010-64027929 电子信箱:zhuhuaying 51@sina.com)

美术编辑 李 心 责任校对 卿文春 李文彦 责任印制 丁小晶

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2006 年 8 月第 1 版, 2006 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 22.25 印张; 538 千字; 340 页; 1-3500 册

46.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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)

前 言

本书是在作者长期从事《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。内容涵盖冶金、材料类学生学习传输原理所需的相关基本知识。传输原理实际上是一门探讨传递速率的课程，传输原理已在原有流体力学、传热学、传质学的基础上形成了较系统的基础理论，是冶金行业各专业必修的技术基础课程之一。

传输现象 (Transport phenomena) 为流体动力过程、传热过程及传质过程的统称，也称为传递理论或速率过程，是工程技术领域中普遍存在的物理现象。在冶金、材料、机械、能源及化工等领域经常会有传输现象发生。自12世纪中叶以来，人们开始用统一的观点来研究上述三种传输过程，可以说传输理论对工业的发展，尤其是在冶金、材料、化工等学科中起着重要的作用，并应用于许多工程领域之中。随着科学技术的发展，传输理论已成为一门独立学科。传输原理主要是研究传输过程的传递速率大小与传递推动力及阻力之间的关系。在传输过程中所传输的物理量为动量、热量和质量。动量传输是指在流体流动中垂直于流体流动方向上动量由高速度区向低速度区的转移；热量传输是指热量由高温区向低温区的转移；质量传输则是指物系中一个或几个组分由高浓度区向低浓度区的转移。当物系中存在着速度、温度与浓度梯度时，则会分别发生动量、热量和质量的传输过程。动量、热量和质量的传递，既可由分子的微观运动引起的分子扩散传递，也可由漩涡混合造成的流体微团的宏观运动引起的湍流传递。动量、热量和质量三种传输过程有其内在的联系，三者之间具有许多相似之处。在连续介质中发生的三种传输现象有着共同的传递机理，因而对其主要参数描述完全相同。如牛顿黏性定律、傅里叶定律、费克定律的相似性，这就是三种传输现象之间的类似性。由于这种性质，它们不但可以用类似的数学模型描述，而且描述三者的一些物理量之间还存在着某些定量关系。可以用这些类似关系和定量关系研究各种传输过程。另外，在工程实际中，三种传输过程常常是同时发生的。传输过程是一种物理过程，通常有理论研究、实验研究和数值计算三种方法。

本书共分为三篇，内容力求体现加强基础、便于自学、联系实际的原则。考虑到学生的专业性质，教材内容注重介绍了三种传输现象在冶金中的应用。第一篇为动量传输（第1章~第8章），介绍了动量传输的基本概念和定律，为了易于理解理论知识，加强了基本概念的叙述，并介绍了可压缩气体、气固两相流等在冶金中的应用。第二篇为热量传输（第9章~第14章），详细介绍了热量传输的三种基本方式的基本原理和计算方法。第三篇为质量传输（第15章~第18章），介绍了质量传输的基本概念和定律。本书虽是按动量、热量、质量的纵向方法编写，但又从传输理论系统的整体性出发，各章内容前后联系、循序渐进，力图从物理上和数学上阐明动量、热量和质量传输之间的相似性，用对照的方法研究三种传递过程，加强读者对三种传递过程的理解。分别介绍了由三种传输现象单独或综合构成的一些动量、热量和质量传递过程的基本原理。本书适于冶金、材料类本科生使用，也可供研究生和有关工程技术人员参考。按90学时进行内容的选择和编排，力求合理，考虑到各专业的发展，书的内容较多，讲授时可酌情删减。书中按章附有习题，以利于培养学生运用基本概念和解决实际问题的能力。

本书第一篇由沈巧珍编写，第二篇、第三篇由杜建明编写。

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

2006年3月

符 号 表

A	面积, m^2	g	重力加速度, m/s^2
A	吸收率, 无量纲	H	距离, m
Ar	阿基米德准数, 无量纲	Ho	时均数, 无量纲
a	音速, m/s	h	对流换热系数或表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
a	加速度, m/s^2	h_Σ	表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
a	热量传输系数 (或导温系数), m^2/s	h_c	对流传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
Bi	毕渥准数, 无量纲	h_r	辐射传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
Bi^*	传质毕渥准数, 无量纲	h_w	比能损失, J/kg
c_B	B 的浓度 (B 的物质的量浓度), mol/m^3	$h_{失}$	总阻力损失, N/m^2
c_A	组分 A 的浓度, mol/m^3	$h_{摩}$	沿程 (摩擦) 阻力损失, N/m^2
c_{A_s}	组分 A 在催化剂表面处的浓度, mol/m^3	$h_{局}$	局部阻力损失, Pa
c_0	黑体的辐射系数, $5.67 W/(m^2 \cdot K^4)$	I	辐射强度, $W/(m^2 \cdot Sr)$
c_1	普朗克第一常数, $c_1 = 3.742 \times 10^{-16} W \cdot m^2$	J_A	组分 A 的扩散摩尔通量, $kmol/(m^2 \cdot s)$
c_2	普朗克第二常数, $c_2 = 1.439 \times 10^{-2} m \cdot K$	j_A	组分 A 的扩散质量通量, $kg/(m^2 \cdot s)$
D	透射率, 无量纲	j_D	传质柯尔伯恩 j 因子, 无量纲
D_{AB}	组分 A 在组分 B 中的扩散系数, m^2/s	j_H	传热柯尔伯恩 j 因子, 无量纲
d	直径, m	J_0	相对旋转轴的动量矩, $kg \cdot m^2/s$
d_f	非球形颗粒直径, m	K	传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
d_p	固体球形颗粒直径, m	Kn	纽特逊数, 无量纲
d_s	水力直径, m	k	玻耳兹曼常数, $k = 1.380658 \times 10^{23} J/K$
E	辐射, W/m^2	k	绝热指数, 无量纲
E_b	黑体的辐射力, W/m^2	k	热导率, $W/(m \cdot ^\circ C)$
E_λ	单色辐射, W/m^2	k_r	反应速率常数, 无量纲
Eu	欧拉数, 无量纲	L	长度, m
E_v	体积弹性模数, Pa	M	动量, $kg \cdot m/s$
E_θ	θ 方向的方向辐射力, $W/(m^2 \cdot Sr)$	M_r	气体的相对分子质量, $kg/kmol$
F	力, N	Ma	马赫数, 无量纲
F_d	摩擦阻力, N	Na^*	组分 A 传质方向上的摩尔通量, $kmol/(m^2 \cdot s)$
Fo	傅里叶数, 无量纲	Nu	努塞尔数, 无量纲
Fo^*	传质傅里叶数, 无量纲	n_A	组分 A 的质量通量, $kg/(m^2 \cdot s)$
Fo_Δ	差分格式的傅里叶数, 无量纲	Pe	贝克来数, 无量纲
Fr	弗劳德准数, 无量纲	Pr	普朗特准数, 无量纲
f	单位质量力, kg	p	压力 (压强), N/m^2 或 Pa
G	投射辐射能, W/m^2	$p_{表}$	表压力, Pa
Ga	伽利略准数, 无量纲	$p_{绝}$	绝对压力, Pa
Gr	格拉晓夫数, 无量纲	$p_{大气}$	大气压力, Pa

Δp	压强差, Pa	δ	边界层厚度, m
q	热流密度, W/m^2	δ_0	层流底层厚度, m
q_m	质量流量, kg/s	δ_c	浓度边界层厚度, m
q_v	体积流量, m^3/s	δ_t	温度边界层厚度, m
R	反射率, 无量纲	Δ	绝对粗糙度, m
R	气体常数, $m^2/(s^2 \cdot K)$	$\bar{\Delta}$	相对粗糙度, 无量纲
Re	雷诺数, 无量纲	ε	发射率(黑度), 无量纲
Rec	临界雷诺数, 无量纲	ε	孔隙度, 无量纲
R_i	导热热阻, $m^2 \cdot K/W$	ε_g	气体发射率, 无量纲
r	半径, m	ξ	无因次阻力系数, 无量纲
S	平均射线程长, m	$\xi_{局}$	局部阻力损失系数, 无量纲
Sc	施密特数, 无量纲	ξ_D	总阻力系数, 无量纲
Sh	舍伍德数, 无量纲	ξ_f	当地摩擦阻力系数, 无量纲
St	斯坦顿准数, 无量纲	ζ_L	管长的修正系数, 无量纲
s	旋流数, 无量纲	ζ_R	弯管修正系数, 无量纲
T	绝对温度, K	ζ_t	温度修正系数, 无量纲
t	温度, $^{\circ}C$	η	运动黏性系数, m^2/s
t_m	膜温度, $^{\circ}C$	θ	夹角, ($^{\circ}$)
V	体积, m^3	λ	分子平均自由程, m
v	比体积(质量体积), m^3/kg	λ	沿程阻力损失系数, 无量纲
v	速度, m/s	μ	动力黏性系数, $Pa \cdot s$
\bar{v}	平均速度或时均值, m/s	μ_{eff}	有效黏性系数, $Pa \cdot s$
v'	脉动速度, m/s	π	圆周率, ≈ 3.142
v_0	主流区速度或表观速度, m/s	ρ	密度, kg/m^3
v_A	空腔流速, m/s	σ	表面张力, N/m
v_c	下临界速度, m/s	σ	斯忒藩-玻耳兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$
v_c'	上临界速度, m/s	τ	切应力, Pa
v_f	流体在孔隙中的实际流速, m/s	τ_0	塑变应力, Pa
v_r	流体对壁面的相对速度, m/s	τ_s	时刻, s
v_{θ}	切向速度, m/s	τ_{yx}	黏性动量通量, Pa
We	韦伯数, 无量纲	$\tau_{粘}$	黏性切应力, Pa
x	x 轴向距离	$\tau_{附}$	附加切应力, Pa
x_r	层流到过渡区的转折点, m	Φ	热流量, W
α	动能修正系数, 无量纲	ϕ	夹角, ($^{\circ}$)
α_v	体膨胀系数, K^{-1}	φ	流函数
α_p	体积压缩系数, $1/Pa$	ω	立体角, sr
β	马赫角, sr	$\psi_{i,j}$	表面 i 对表面 j 的角系数, 无量纲
γ	重度, N/m^3		

目 录

第一篇 动量传输

1 动量传输的基本概念	1
1.1 流体的概念及连续介质模型	1
1.1.1 流体的概念	1
1.1.2 连续介质模型	2
1.2 流体的主要物理性质	3
1.2.1 流体的惯性	3
1.2.2 流体的压缩性和膨胀性	4
1.2.3 可压缩流体和不可压缩流体	6
1.3 流体的黏性	6
1.3.1 黏性的概念	6
1.3.2 牛顿黏性定律	7
1.3.3 流体的黏度	8
1.3.4 牛顿流体与非牛顿流体	9
1.3.5 黏性流体与理想流体	10
1.4 作用在流体上的力	10
1.4.1 表面力	10
1.4.2 体积力	11
1.4.3 流体的静压力	11
1.5 体系与控制体	12
1.6 衡算方程	13
2 动量传输的基本方程	15
2.1 流体运动的描述	15
2.1.1 研究流体运动的方法	15
2.1.2 稳定流动与非稳定流动	16
2.1.3 迹线和流线、流束和流管	17
2.2 连续性方程	19
2.2.1 直角坐标系的连续性方程	20
2.2.2 一维总流的连续性方程	22
2.2.3 圆柱坐标系和球坐标系的连续性方程	23
2.3 理想流体动量传输微分方程——欧拉方程	24
2.4 实际流体动量传输方程——纳维尔-斯托克斯方程	26

2.5	伯努利方程	30
2.5.1	理想流体的伯努利方程	30
2.5.2	实际流体的伯努利方程	31
2.5.3	伯努利方程的几何意义和物理意义	31
2.5.4	实际流体总流的伯努利方程	32
2.5.5	热气体沿管道流动的伯努利方程	33
2.6	伯努利方程的应用	34
2.6.1	应用条件	34
2.6.2	应用举例	35
3	层流流动及湍流流动	40
3.1	流体的流动状态	40
3.1.1	雷诺试验	40
3.1.2	层流流动	42
3.1.3	湍流流动	45
3.2	管道中的流动	48
3.2.1	管道中的层流流动	48
3.2.2	管道中的湍流流动	51
3.3	流动阻力与能量损失	53
3.3.1	流动阻力的分类	53
3.3.2	沿程阻力损失	54
3.3.3	局部阻力损失	59
3.4	管路计算	60
3.4.1	简单管路的计算	60
3.4.2	串联管路的计算	60
3.4.3	并联管路的计算	61
4	边界层理论	64
4.1	边界层概念	64
4.1.1	边界层的定义	64
4.1.2	边界层的流态	65
4.1.3	管流边界层	66
4.2	边界层微分方程式	66
4.2.1	微分方程的建立	66
4.2.2	微分方程的解	68
4.3	边界层积分方程式	72
4.3.1	边界层积分方程的建立	72
4.3.2	层流边界层积分方程的解	74
4.3.3	湍流边界层积分方程的解	75
4.4	平板绕流摩擦阻力计算	75
4.4.1	不可压层流平板绕流的摩擦阻力	76
4.4.2	不可压湍流平板绕流的摩擦阻力	77

4.4.3	平板混合边界层的摩擦阻力	78
4.5	边界层脱离现象	81
4.5.1	边界层内的流动与脱离现象	81
4.5.2	边界层的控制	83
5	射流	84
5.1	自由射流	84
5.1.1	自由射流的结构	84
5.1.2	动量守恒	85
5.1.3	射流截面上的速度分布	85
5.1.4	射流中心线上的流速	86
5.2	半限制空间射流	86
5.3	旋转射流	87
5.3.1	旋流强度	89
5.3.2	旋流强度对气流结构的影响	89
6	可压缩气体流动	91
6.1	可压缩气体的一些基本概念	91
6.1.1	音速	91
6.1.2	马赫数	93
6.2	一元恒定等熵气流的基本方程及流速公式	94
6.2.1	连续性方程	94
6.2.2	动量方程	95
6.2.3	状态方程	95
6.2.4	流速公式	96
6.3	一元恒定等熵气流的基本特性	97
6.3.1	滞止状态	97
6.3.2	临界状态	98
6.3.3	极限状态	99
6.4	气流参数与流通截面的关系	101
6.5	渐缩喷管与拉瓦尔喷管	103
6.5.1	渐缩喷管	103
6.5.2	拉瓦尔喷管	105
6.6	激波和膨胀波	107
6.6.1	激波	107
6.6.2	膨胀波	108
7	气固两相流动	110
7.1	单个颗粒在流体中的运动	110
7.1.1	球形颗粒在流体中的稳定运动	110
7.1.2	颗粒沉降计算	111
7.2	通过固定床的流动	112
7.2.1	管束理论和埃根 (Ergun) 方程	113

7.2.2	围壁效应	116
7.3	通过流化床的流动	117
7.3.1	流化机理	117
7.3.2	开始流化速度	118
7.3.3	流化极限速度	119
7.4	气力输送系统	120
8	相似原理与模型研究方法	123
8.1	相似的基本概念	123
8.1.1	运动相似	124
8.1.2	动力相似	124
8.1.3	热相似	124
8.1.4	对现象的一般数学描述及单值条件	125
8.2	流体流动过程中相似准数的导出	126
8.2.1	相似准数的导出	127
8.2.2	相似准数的意义与性质	129
8.3	相似三定理	129
8.3.1	相似第一定理	129
8.3.2	相似第二定理	129
8.3.3	相似第三定理	130
8.4	量纲分析法	130
8.4.1	量纲	130
8.4.2	量纲表达式	131
8.4.3	量纲和谐原理	131
8.4.4	π 定理	131
8.4.5	相似准数的转换	133
8.5	模型研究方法	133
8.5.1	模型相似条件	134
8.5.2	近似模化法	135
8.5.3	流体流动的稳定性与自模化性	135
8.5.4	模型设计	136
8.5.5	实验数据的整理	137

第二篇 热量传输

9	概论	140
9.1	研究的对象和目的	140
9.2	热量传输的三种方式	141
9.2.1	传导传热 (导热)	141
9.2.2	对流传热 (对流换热, 对流给热)	142

9.2.3 辐射传热	143
9.3 综合传热和热阻	145
10 稳态导热	148
10.1 导热的基本概念和定律	148
10.1.1 温度场	148
10.1.2 稳态和非稳态传热	148
10.1.3 等温面(线)	148
10.1.4 温度梯度	149
10.2 导热基本定律	149
10.2.1 傅里叶定律	149
10.2.2 热导率 λ	150
10.3 导热微分方程	151
10.3.1 直角坐标系中的导热微分方程	151
10.3.2 导热微分方程的单值性条件	155
10.4 通过平壁的一维稳态导热	156
10.4.1 第一类边界条件: 表面温度为常数	156
10.4.2 第三类边界条件(对流边界, 已知介质的温度及换热系数)	159
10.5 通过长圆筒壁的一维稳态导热	162
10.5.1 第一类边界条件下的一维稳态导热	162
10.5.2 第三类边界条件下的稳态导热(介质温度为常数)	164
11 非稳态导热	170
11.1 非稳态导热的基本概念	170
11.1.1 非稳态导热的特点	170
11.1.2 加热或冷却过程的三个阶段	170
11.1.3 边界条件对导热系统温度分布的影响	171
11.1.4 薄材和厚材的概念	172
11.2 薄材的不稳态导热(集总参数法)	173
11.3 半无限厚物体在第一类边界条件下的一维非稳态导热	178
11.4 有限厚物体在第三类边界条件下的一维非稳态导热	179
11.4.1 厚为 2δ 的无限大平板	180
11.4.2 无限长圆柱体和球体	182
11.5 二维、三维物体的不稳态导热	186
12 有限差分法的基本原理	190
12.1 导热问题数值求解的基本思想	190
12.2 差分的概念	192
12.3 变量区域离散化	193
12.4 二维稳态导热的差分计算	193
12.4.1 有限差分方程的建立(内节点)	193
12.4.2 边界节点的差分方程	195
12.5 差分方程组的求解方法	197

12.6 非稳态导热的有限差分法	199
12.6.1 一维不稳态导热的差分解	199
12.6.2 二维非稳态导热的差分解	202
13 对流传热	206
13.1 传热过程的一般分析	206
13.1.1 对流给热过程简介	206
13.1.2 对流换热过程的分类	206
13.1.3 换热系数和换热微分方程式	207
13.1.4 影响换热系数的因素	208
13.1.5 对流传热的研究方法	210
13.1.6 热边界层概念	210
13.1.7 普朗特数 Pr	211
13.2 对流传热的数学描述	212
13.2.1 局部对流传热系数和平均对流传热系数	212
13.2.2 能量微分方程	213
13.2.3 动量微分方程	215
13.2.4 质量微分方程	215
13.2.5 传热微分方程	215
13.3 对流传热的实验研究方法	216
13.3.1 相似三定律	216
13.3.2 对流传热中的相似准数	216
13.3.3 对流换热的准数方程式	218
13.3.4 特征尺寸、定性温度和特征速度	220
13.3.5 实验求解准数方程式步骤	221
13.4 管内强制对流传热	224
13.4.1 管内流动传热特点	224
13.4.2 管内湍流 ($Re \geq 10^4$) 时的对流传热计算	226
13.4.3 管内过渡状态的强制对流传热	229
13.5 纵掠平板对流传热	230
13.5.1 流动和传热特点	231
13.5.2 平板层流时的准数关联式	232
13.5.3 平板流动全部为湍流时的准数关联式	232
13.5.4 平板为混合边界层时的准数关联式	232
13.5.5 横掠圆柱(管)对流传热	233
13.6 自然对流传热	234
13.6.1 流动和传热的特点	235
13.6.2 大空间自然对流实验关联式	236
14 辐射传热	241
14.1 热辐射基本概念	241
14.1.1 热辐射的特点	241

14.1.2	吸收率、反射率、透射率	242
14.1.3	几个重要的辐射参数	243
14.2	黑体辐射的基本定律	245
14.2.1	黑体与人工黑体	245
14.2.2	普朗克定律	246
14.2.3	斯忒藩-玻耳兹曼定律	247
14.2.4	兰贝特余弦定律	247
14.3	实际物体的辐射	248
14.3.1	实际物体的辐射特性与黑度(发射率)	248
14.3.2	实际物体的吸收辐射的特性	249
14.4	角系数	253
14.4.1	角系数及定义	253
14.4.2	角系数的性质	254
14.4.3	角系数的确定方法	255
14.5	表面间的辐射换热	259
14.5.1	黑体表面间的辐射换热	259
14.5.2	有效辐射	260
14.5.3	灰体表面间的辐射换热	261
14.5.4	热辐射网络法简介	264
14.5.5	强化辐射传热过程的措施	267
14.6	气体辐射	269
14.6.1	气体辐射的特点	269
14.6.2	气体对辐射能的吸收	270
14.6.3	气体辐射的黑度和吸收率	271
14.6.4	气体与围壁表面间的辐射换热	275
14.7	辐射换热系数	275

第三篇 质量传输

15	质量传输的概述	283
15.1	基本概念	283
15.1.1	浓度的表示方法	283
15.1.2	质量传输的两种方式	284
15.2	分子扩散的速度与通量	286
15.2.1	扩散速度与平均速度	286
15.2.2	扩散通量与主体流动通量	287
16	质量传输微分方程	290
16.1	质量传输微分方程的导出	290
16.2	质量传输微分方程的特定形式	293

16.3	柱坐标系和球坐标系的质量传输微分方程	293
16.4	传质微分方程的定解条件	294
17	分子扩散传质	295
17.1	稳态扩散传质的通用速率方程	295
17.2	气体中的分子扩散	295
17.2.1	组分 A 通过停滞组分 B 的分子扩散	295
17.2.2	组分 A 通过停滞组分 B 的拟稳态分子扩散	299
17.2.3	等分子反向定态扩散	300
17.2.4	气体扩散系数	302
17.3	液体中的分子扩散	305
17.3.1	组分 A 通过停滞组分 B 的定态扩散	305
17.3.2	等分子反向定态扩散	306
17.3.3	液体中的扩散系数	306
17.4	固体中的分子定态扩散	308
17.4.1	与固体结构无关的稳态扩散	309
17.4.2	与固体结构有关的稳态扩散	310
17.4.3	与固体结构无关的非稳态扩散	313
18	对流传质	315
18.1	对流传质的基本概念	315
18.1.1	对流传质系数	315
18.1.2	浓度边界层	315
18.1.3	对流传质系数的确定方法	316
18.2	对流传质的解析解	317
18.3	对流传质的相关准数	318
18.4	动量、热量和质量传输的类比	320
18.4.1	三种传输现象的类似性	320
18.4.2	传输现象的类似律	321
18.5	对流传质实验关联式	323
18.5.1	流体平板为湍流的对流传质	323
18.5.2	流体在圆管内湍流时的传质	324
18.5.3	流体流过单个球体时的传质	324
18.5.4	流体流过填充床时的传质	325
18.6	对流传质系数的理论模型	325
18.6.1	薄膜理论	326
18.6.2	渗透理论	326
18.6.3	表面更新理论	327
附 录		329

第一篇

动量传输

流体流动即动量传输现象是自然界及工程技术中普遍存在的现象，与大多数金属的提取和精炼过程有着密切的联系。冶金中的化学反应，往往也同时伴随着热量的传输和质量的传输，而这些现象都是在物质的流动过程中发生的，也就是说，传热与传质过程与流体流动特性密切相关。例如，冶金中高温炉的供风与水冷装置、炉内气体流动规律、贮槽中液位高度的确定、烟道中烟气的流动阻力及烟道设计、管路的设计计算、流态化反应器床层阻力的计算等等，都与流体的流动有关。

而流体流动过程中流速的变化即反映动量的变化，因此，研究流体流动及动量传输，掌握其有关规律性，对冶金设备的设计与改进以及冶金过程的优化与控制具有重要意义。

动量传输是研究流体在外界作用下运动规律的科学，即流体力学，它的研究对象是流体（即液体和气体）。之所以称之为动量传输，是因为从传输的观点来看，它与热量传输和质量传输在传输的机理、过程、物理数学模型等方面具有类比性和统一性。用动量传输的观点讨论流体的流动问题，不仅有利于传输理论的和谐，而且可以揭示三传现象类似的本质与内涵。

1 动量传输的基本概念

1.1 流体的概念及连续介质模型

1.1.1 流体的概念

流体力学是研究流体受力和运动规律的科学。物质是由分子组成的，在一定的外界条件下，根据组成物质的分子间的距离和相互作用的强弱不同，物质的存在状态分为气态、液态和固态。气态物质在标准状态（ 0°C ， 101325Pa ）下分子间的平均距离大于分子直径的10倍，分子间的相互作用微弱，不能保持一定的体积和形状，当外部压力增大时，其体积按一定的规律缩小，具有较大的可压缩性。液态物质分子间平均距离约为分子直径的1倍，分子间相互作用较大，通常可以保持其固有体积，但不能保持其形状。固态物质则

具有固定的形状和体积。从物质受力和运动的特性来看,物质又可分为两大类:一类物质不能抵抗切向力,在切向力的作用下可以无限地变形,这种变形称为流动,这类物质称为流体,其变形的速度即流动速度与切向力的大小有关,气体和液体都属于流体;另一类是固体物质,它能承受一定的切应力,其切应力与变形的大小呈一定的比例关系。

液体和气体的区别是液体可以随其容器形状不同而改变其形状,且在相当大的压力下几乎不改变其原有的体积,故通常称为不可压缩流体。液体与其他流体形成的分界面称为自由表面。气体则具有很大的压缩性和膨胀性,如果对气体施加压力,则其体积很容易缩小,反之,如果压力无限减小,则气体可无限地膨胀,充满容纳它的空间,所以它没有自由表面,故通常称为可压缩流体。但是流体的可压缩性与否不是绝对的,不是所有液体在任何情况下都作为不可压缩流体来看待,亦不是所有气体都必须按可压缩流体来处理,例如泵站突然断电时以及水电站中因载荷变化而关小阀门来改变管道的流量时所发生的水击现象,就必须考虑水的压缩性,而气体在低速流动时(一般马赫数 Ma 小于 0.3 时),则可认为它服从于不可压缩流体的运动规律。

流体与固体之间并没有明显的界线,同一物质在不同的条件下可以呈现不同的力学特性,既可能呈现流体的特性,也可能呈现固体的特性。众所周知的例子是沥青,在短期载荷下可作固体处理,而在长期载荷下,表现出流体特性。介于流体和固体力学特性间的还有其他的物质,例如塑体等。

综上所述,根据力学特性可以将物质分为流体和固体两大类,呈现流体力学特性的都属于流体,如冶金过程中的钢液、高炉煤气等等。宏观地研究流体受力和运动规律的科学称为流体力学,它是力学的一个重要分支。

1.1.2 连续介质模型

流体是由分子组成的。分子之间保持一定的距离,流体的分子处在永无休止的运动状态中。因此,从微观的角度来看,流体的物理量如质量、温度在空间上的分布是不连续的。另外,由于分子运动的随机性,流体的物理量在时间上的分布也是不连续的。因此,如果从微观方面研究流体力学问题,就要用分子运动学说,研究每一个分子的微观运动规律。但在工程流体力学中,所讨论问题的特征尺寸远大于流体的分子平均自由行程,人们所感兴趣的问题并不是流体分子的微观运动特征,而是宏观特性,即大量分子的统计平均特性,例如流体的密度、温度、压强等。因此,从宏观上研究流体的运动规律,有理由把流体视作为连续介质,即流体是在空间上和时间上连续分布的物质。1775年,欧拉在建立流体运动的微分方程时,就是采用连续介质这样一个基本假说,认为液体和气体充满一个体积时不留任何空隙,其中没有真空,没有分子间的间隙,流体的密度、温度等物理量是连续分布的。实践证明,采用连续介质模型来解决一般工程实际问题,其结果是能满足要求的。例如,在正常情况下, 1mm^3 的体积里,水有 3.3×10^{19} 个分子,空气有 2.7×10^{16} 个分子,即使在 10^{-10}mm^3 的体积(相当于一粒灰尘体积)里,空气还有 2.7×10^6 个分子。这么多的分子,其物理量仍然具有统计平均的特性,因此,在流体力学中采用连续介质模型是合理的。这样,流体的一切特性,例如压强、温度、密度、速度等都可以看成是时间和空间连续分布的函数,流体力学的问题可以用连续函数这个有力的数学工具来进行研究。