

李敬生 等编著

传输原理及冶金过程 计算机模拟



陕西科学技术出版社

传 输 原 理 及 冶金过程计算机模拟

李敬生 等编著

陕西科学技术出版社

(陕) 新登字第 002 号

传输原理及冶金过程计算机模拟

李敬生 等编著

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街 131 号)。

西安建筑科技大学印刷厂印刷

850×1168 毫米 32 开本 13.75 印张 32 万字

1997 年 7 月第 1 版 1997 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1—1000

ISBN 7-5369-2740-1/TF·3

定价: 16.50 元

前言

在长期的教学实践中，经常有学生问我，在大学我们学习那么多的基础理论，如线性代数、微积分、化学热力学、动力学、计算机语言，甚至计算方法和传输原理，但在专业课程里，我们很少发现它们有什么用处，既然如此，为什么要学习这些课程呢？《传输原理与冶金过程计算机模拟》就是这样一本几乎覆盖了上述所有课程内容的综合性教材。

本书共分 5 章，前 3 章是传输原理的内容。为与目前国内外公开出版的传输原理教科书衔接（这方面的书已很多），我们还是按动量、热量和质量传输的纵向方法依次排序，并注意强调它们之间的横向联系。第 4 章前半部分是热力学和动力学的有关内容，后半部分是常用的数值计算方法。第 5 章——冶金过程计算机模拟——是前面几章“三传一反”和数值计算方法在冶金过程计算机模拟中的具体运用。

本书涉及到大学所学的许多基础课程，交叉性和综合性很强。所以适合于培养学生灵活运用所学知识分析和解决冶金工程中实际问题的能力。主要对象是大学生、研究生及有关科研人员，也可供其它有兴趣的读者参考。把传统的冶金学科与当代最先进的计算机计算技术结合起来，不但把大学生引入现代科技的前沿，而且为他们毕业以后的研究工作开辟了一条新的途径。在具体做法上，我们特别强调了同学们在学习过程中经常遇到的疑点和难点，

例如在调用子程序时(第4章),我们不但给出了已编好的子程序,并且给了调用的主程序示例及一个验证的实例,这样便于读者正确的理解“哑实结合”的原则,尽快的掌握调用子程序的方法。又如在第5章建立冶金过程的主要控制方程时,我们特别强调前3章已学过的守恒定律在具体情况下的综合运用,为的是让读者看到建立这些方程的“过程”,使读者们看到了某些看似复杂的方程组原来就是“三传一反”规律在具体情况下灵活运用结果,从而树立起学习的兴趣和信心。

本书的第1章(除1.4节外)为王守德老师编写;第2章为华建社老师编写;第3章及第1章的1.4节为朱军老师编写;第4~5章为李敬生老师编写。全书由李敬生老师统稿。

我们感谢本书在编写出版过程中来自各方面的大力支持和帮助,并恳切地渴望得到同行专家们的批评指导。

李敬生 博士

1997.1

目录

第 1 章 动量传输

1.1 流体的基本性质	(1)
1.1.1 流体的密度与比容	(1)
1.1.2 流体的压缩性和膨胀性	(2)
1.1.3 流体的粘度	(4)
1.1.4 流体的压强	(8)
1.2 流体静力学	(10)
1.2.1 作用于流体上的力	(11)
1.2.2 欧拉平衡方程式与等压面	(12)
1.2.3 流体静力学基本方程式	(16)
1.2.4 双流体静力学基本方程式	(20)
1.3 流体动力学	(22)
1.3.1 流体流动的基本概念	(23)
1.3.2 流体流动的连续性方程	(30)
1.3.3 动量、动量率及动量通量	(36)
1.3.4 边界层理论	(40)
1.3.5 流体流动时的动量平衡及动量传输方程	(45)
1.3.6 流体机械能平衡方程——柏努利方程	(53)

1.3.7	奈维-斯托克斯方程式的应用	(64)
1.4	流体流动阻力计算	(68)
1.4.1	概述	(68)
1.4.2	关于因次与单位	(70)
1.4.3	因次分析法及直管阻力的计算	(71)
1.4.4	非圆形管内的摩擦损失	(78)
1.4.5	局部阻力的计算	(80)
1.4.6	减少流体阻力的途径	(83)
1.4.7	供气管道的布置原则与计算	(84)
	思考题	(87)
	习题	(87)

第 2 章 热量传输

2.1	传导传热	(92)
2.1.1	导热的基本定律	(92)
2.1.2	导热系数与热量传输系数	(92)
2.1.3	平壁导热	(97)
2.1.4	曲壁导热	(99)
2.1.5	平均导热面积与壁内温度的实际分布线	(101)
2.2	傅立叶-克希荷夫热量传输方程	(105)
2.3	对流传热的基本概念	(108)
2.3.1	概述	(108)
2.3.2	牛顿冷却公式与对流传热系数	(109)
2.3.3	热边界层概念与对流传热机理	(109)
2.3.4	对流传热系数	(111)
2.3.5	对流传热系数的求解方法	(112)

2.4 流体流过平板时的强制对流传热	(113)
2.4.1 层流边界层对流传热微分方程	(113)
2.4.2 近似积分法求对流传热系数	(113)
2.5 流体在管内流动的强制对流传热	(119)
2.5.1 管内流动时对流换热特点	(119)
2.5.2 圆管内层流对流传热	(121)
2.5.3 管内的紊流对流传热	(126)
2.6 自然对流传热的基本特点	(138)
2.7 自然对流传热的经验公式	(139)
2.8 沸腾与冷凝过程的传热	(142)
2.8.1 沸腾传热	(142)
2.8.2 冷凝传热	(145)
2.9 不稳定态导热的基本概念	(149)
2.9.1 不稳定态导热过程及其求解方法	(149)
2.9.2 不稳定态导热的分析解法及热相似准数	(151)
2.10 一维不稳定态导热的分析解法	(153)
2.10.1 薄材与厚材	(154)
2.10.2 薄材在恒温介质中加热或冷却	(154)
2.11 辐射传热	(156)
2.11.1 热辐射的基本概念	(156)
2.11.2 黑体、白体和透热体	(157)
2.12 黑体辐射的基本定律	(158)
2.12.1 普朗克定律	(158)
2.12.2 斯蒂芬-波尔兹曼定律	(160)
2.13 灰体及实际物体的辐射与吸收	(160)
2.13.1 黑体	(160)
2.13.2 灰体的辐射能力	(163)
2.13.3 物体吸收率与辐射率的关系——	

克希荷夫定律.....	(163)
2.14 固体表面间的辐射传热	(165)
2.14.1 距离平方定律.....	(165)
2.14.2 余弦定律.....	(166)
2.14.3 角度系数.....	(168)
2.14.4 任意两表面间的辐射.....	(171)
2.14.5 固体表面间辐射传热的网络解法.....	(173)
2.15 气体的辐射与吸收	(175)
2.15.1 气体辐射与吸收的特点.....	(175)
2.15.2 气体的吸收率与黑度.....	(177)
2.15.3 气体与壁面间的辐射传热.....	(183)
思考题	(185)
习题	(185)

第 3 章 质量传输

3.1 质量扩散的基本特征	(188)
3.1.1 传质的基本特点	(188)
3.1.2 混合相中物质组成的表示方法	(191)
3.1.3 扩散速度与扩散通量	(192)
3.2 菲克第一定律与扩散系数	(193)
3.2.1 菲克第一定律	(193)
3.2.2 扩散系数	(194)
3.3 稳态扩散传质	(204)
3.3.1 等分子逆向扩散	(205)
3.3.2 A 组元通过呆滞组分 B 的扩散	(207)
3.3.3 气体通过固体层的扩散	(211)

3.4	菲克第二定律——非稳态扩散	(216)
3.4.1	菲克第二定律	(216)
3.4.2	表面浓度恒定时, 半无限厚物体中的非稳态传质	(217)
3.5	质量平衡方程	(219)
3.6	不同相间的传质	(222)
3.6.1	相系平衡	(223)
3.6.2	传质方程式	(225)
3.6.3	相间传质理论	(226)
3.7	对流传质	(231)
3.8	相界面有化学反应的传质——炭粒燃烧过程	(234)
3.8.1	反应传质速率	(234)
3.8.2	炭燃烧时间的计算	(236)
3.9	“三传”现象的相似性	(238)
	思考题	(241)
	习题	(242)

第4章 冶金反应动力学与常用数值方法

4.1	反应动力学方程的分类和反应速度的表示	(244)
4.2	基元反应和反应级数	(246)
4.3	简单反应和复杂反应	(246)
4.3.1	简单反应	(247)
4.3.2	复杂反应	(247)
4.4	反应速率方程的确定	(250)
4.4.1	作图法确定速率方程参数	(250)
4.4.2	计算法确定速率方程参数	(251)

4.5	冶金过程的常见反应	(268)
4.5.1	液—液相反应	(269)
4.5.2	气—液相反应	(271)
4.5.3	气—固相反应	(276)
4.5.4	综合反应速度	(280)
4.6	常用线性方程组的数值解法	(284)
4.6.1	解线性方程组的高斯消去法	(285)
4.6.2	解三对角线性方程组的追赶法	(290)
4.6.3	解大型稀疏线性方程组的迭代法	(294)
4.7	求一个实系数非线性方程全部根 的牛顿-亚弗生法	(299)
4.8	求一组非线性方程组实根的梯度法	(305)
4.9	常微分方程组的数值解法	(309)
4.9.1	四阶变步长龙格-库塔积分法	(310)
4.9.2	变步长龙格-库塔-默森(RKM)积分法	(317)
4.9.3	某些高阶常微分方程的解法	(324)
4.10	偏微分方程的差分解法	(325)
4.10.1	基本概念与偏微分方程的分类	(325)
4.10.2	两点边值问题的求解：一维差分方程	(328)
4.10.3	二种常用偏微分方程的求解： 二维差分方程	(335)
	思考题	(345)
	习题	(345)

第5章 冶金过程计算机模拟

5.1	冶金过程计算机模拟的目的和内容	(349)
-----	-----------------------	-------

5.2	冶金过程数学模型的分类	(349)
5.3	冶金过程的特点及计算机模拟的任务	(351)
5.4	建立冶金过程数学模型的一般步骤	(352)
5.5	炼铁过程的计算机模拟	(355)
5.5.1	回转窑中铁直接还原的计算机模拟	(355)
5.5.2	高炉的一维计算机模拟	(359)
5.5.3	闪速熔炼炉炉身部分的计算机模拟	(365)
5.5.4	DL 烧结机烧结过程的计算机模拟	(369)
5.6	炼钢过程的计算机模拟	(376)
5.6.1	氧化精炼过程的计算机模拟	(376)
5.6.2	底吹钢包钢液循环状况的计算机模拟	(379)
5.6.3	电弧炉炼钢氧化期的计算机模拟	(384)
5.6.4	LD 转炉炼钢过程的计算机模拟	(391)
5.7	有色冶金过程的计算机模拟	(402)
5.7.1	流化床中硫化锌氧化过程的计算机模拟	(402)
5.7.2	铅锌蒸汽真空冷凝过程的计算机模拟	(405)
5.7.3	氧化铝生产过程的计算机模拟	(410)
5.7.4	铅鼓风炉冶炼过程的计算机模拟	(416)
5.8	冶金过程计算机模拟的特点及今后的任务	(422)
思考题		(424)
参考文献		(425)
附录 1		(427)
附录 2		(428)

动量传输

液体和气体统称为流体，流体的特征是具有流动性即其抗剪切和抗张的能力很小，而动量传输就是研究流体流动特性的基本方法。本章将着重研究流体流动过程的基本原理及流体在管内的流动规律，并运用这些原理与规律去分析和计算流体的输送问题^[1~4]。

在研究流体流动时，常将流体视为由无数分子集团组成的连续介质。把每个分子集团称为质点，其大小与容器或管路相比是微不足道的，质点在流体内部一个挨一个，它们之间没有空隙，即可认为流体充满其所占据的空间。把流体视为连续介质，其目的是为了摆脱复杂的分子运动，而从宏观的角度来研究流体的流动规律。但是，并不是在任何情况下，都可以把流体视为连续介质，如高度真空下的气体，就不能再视为连续介质了。

1.1 流体的基本性质

1.1.1 流体的密度与比容

密度是指单位体积的流体所具有的质量，对于均质流体，密度可由下式表示

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1.1)$$

式中 m ——流体的质量，kg； V ——流体的体积， m^3 。

在热力学和气体动力学中，用比容 v 来度量气体体积。比容是

指单位质量流体所具有的体积，对于均质流体比容的计算式

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1.2)$$

由此可知，比容与密度互为倒数。

在冶金生产中所遇到的流体，往往是含有几个组分的混合物。通常手册中所列出的为纯物质的密度，所以混合物的平均密度 ρ_m 还得通过以下公式进行计算。

对于液体混合物各组分的浓度常用质量分率表示，现以 1kg 混合液体为基准，若各组分在混合前后其体积不变，则 1kg 混合物的体积等于各组分单独存在时的体积之和

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{WA}}{\rho_A} + \frac{x_{WB}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{Wn}}{\rho_n} \quad (1.3)$$

式中 $\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各纯组分的密度, kg/m^3 ;

$x_{WA}, x_{WB}, \dots, x_{Wn}$ ——液体混合物中各组分的质量分率。对于气体混合物，各组分的浓度常用体积分率来表示，现以 1m^3 混合气体为基准，若各组分在混合前后其质量不变，则 1m^3 混合气体的质量等于各组分的质量之和

$$\rho_m = \rho_A x_{VA} + \rho_B x_{VB} + \dots + \rho_n x_{Vn} \quad (1.4)$$

式中 $x_{VA}, x_{VB}, \dots, x_{Vn}$ ——气体混合物中各组分的体积分率。

1.1.2 流体的压缩性和膨胀性

当作用在流体上的压力增加时，流体所占有的体积将减小，这种特性称为流体的压缩性。当温度变化时，流体的体积也随之变化，温度升高，体积膨胀，这种特性称为流体的膨胀性。实验指出压强每升高一个大气压时，水的体积只改变 $\frac{1}{20000}$ 左右。因此，在一般情况下，可认为水是不可压缩的，其它液体也与此类似，实验也指出，在温度较低时，温度每升高 1°C ，水的体积最大只改变 $\frac{1.5}{10000}$ 。因此，在工程上，可不考虑水的膨胀性，对于其它液体的

情况也是相类似的。

气体分子间距较大,彼此间的引力很小,当压力或温度发生变化时,其体积密度等都将相应地发生变化,当气体的压强不太高而温度又不太低时,则气体的性质与理想气体的偏差不大,在工程计算中,这种变化的数量关系可近似地用理想气体状态方程式进行计算,若用 P_0 、 V_0 、 T_0 分别表示气体在标准状态下的压强、体积和绝对温度,气体的质量为 m ,分子量为 M ,则气体状态方程式

$$P_0 V_0 = \frac{m}{M} R T_0$$

式中 R 为气体常数。当气体的压强为 P 、体积为 V 、绝对温度为 T 时,气体状态方程式为:

$$PV = \frac{m}{M} R T$$

将上二式相除,则得

$$\frac{P_0 V_0}{PV} = \frac{T_0}{T}$$

解得 V 为:

$$V = V_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0} \quad (1.5)$$

由式 (1.1) 可知,质量为 m (kg) 的气体密度

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ 及 } \rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

将上式整理后代入式 (1.5) 中,消去 V 和 V_0 。

$$\rho = \rho_0 \frac{P T_0}{P_0 T} \quad (1.6)$$

当压力恒定时,式 (1.5) 还可以写成

$$V = V_0 \cdot \frac{T_0 + t}{T_0} = V_0 (1 + \beta t) \quad (1.7)$$

式中 t 为摄氏度, $^{\circ}\text{C}$ 。同理,式 (1.6) 还可以写成

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_0 + t} = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \quad (1.8)$$

式中 $\beta = \frac{1}{273}$ ，为气体的体积膨胀系数。

各种气体的有关参数列于表 1.1

表 1.1 各种常见气体的气体常数及有关性质

气体名称	分子量	密度(标态)	千摩尔体积	气体常数 R	
		kg/m ³	m ³ /(kmol)	J/(kg · K)	m/K
空 气	28.964	1.293	22.40	287	29.27
水蒸汽	18.016	0.804	22.41	462	47.08
N ₂	28.014	1.250	22.41	297	30.28
O ₂	32.00	1.429	22.39	260	26.49
H ₂	2.016	0.0899	22.42	4124	420.6
CO	28.011	1.250	22.41	297	30.28
CO ₂	44.011	1.9768	22.26	189	19.26
SO ₂	64.06	2.9265	21.89	130	13.23
Cl ₂	70.906	3.214	22.06	117	11.96
HCl	36.461	1.6391	22.24	228	23.25

在许多工程问题中，气体的压力变化不大($P < 0.1$ 大气压)或流速不太高($u < 70\text{m/s}$)时，可以忽略气体的压缩性，而按不可压缩流体流动问题处理，当然随着流速增高或压强增大，气体压缩性的影响变得不可忽略，应按压缩性流体处理。

1.1.3 流体的粘度

注意观察冶金生产中所遇到的各种流体时，可以明显地发现各种流体在流动性上有很大的差异，这种差异是由流体具有不同的粘性所造成的，粘度就是用来量度流体粘性大小的一个物理量。

由于流体具有粘性，使其在流动过程中产生分层现象，层与层之间发生了相对运动，快速层对慢速层产生了一个拖动力使它加速，而慢速层对快速层就有一个阻止它向前运动的阻力，拖动

力和阻力是大小相等方向相反的一对力，分别作用在两个紧挨着但速度不同的流层上，流层的速度不相等，就意味着动量不相等；一个流层带动另外一个流层流动，就意味着前者将动量传给后者，因此速度不相等的流层之间这种粘性带动作用，实际就是在进行着动量的传输。

如图 1.1 所示，由运动的流体中取出相邻的两层流体，设流层间的接触面积为 A ，上层的流速为 $u + du$ ，下层的流速为 u ，即两层的相对速度为 du ，层间垂直距离为 dy ，实验证明，两层流体间所产生的内摩擦力 F 与层间的接触面积 A ，相对速度 du 成正比，而与垂直距离 dy 成反比

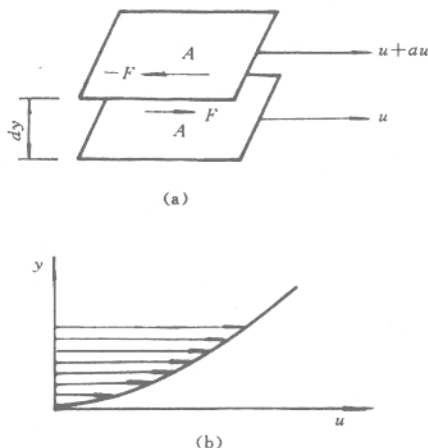


图 1.1 牛顿粘性定律推导示意图

$$F \propto -A \frac{du}{dy}$$

将其写成等式

$$F = -\mu A \frac{du}{dy}$$

单位面积上的内摩擦力

$$\tau = -\frac{F}{A} = -\mu \frac{du}{dy} \quad (1.9)$$

式中 $\tau = -\frac{F}{A}$ ——单位面积上的内摩擦力或称粘性力 N/m^2 ；

$\frac{du}{dy}$ ——垂直于流体运动方向的速度变化率或称速度梯度，