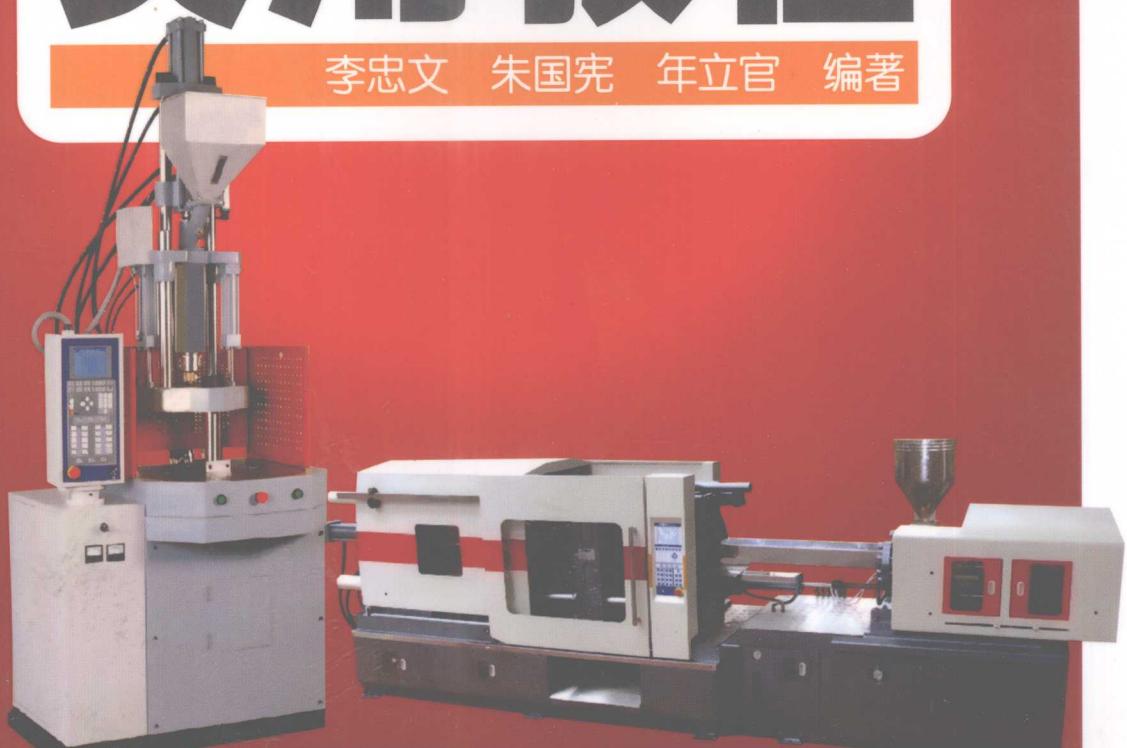


注塑机 维修 实用教程

李忠文 朱国宪 年立官 编著



化学工业出版社

· 指导员人朱处业 ·

注塑机 维修 实用教程

李忠文 朱国宪 年立官 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书围绕注塑机维修的知识和技术，介绍了电子电路、元器件和电气电路基本知识，重点讲解了注塑机的电气控制系统和微机控制系统，机械、液压和电气装置以及常见故障处理和维修技巧。本书收入大量作者在维修实践中积累的技术资料；对理论知识的引入以够用为原则，不做过多阐述；书末附注塑机维修工复习题和理论、操作模拟试题。

本书内容精炼，面向实际操作，可供注塑机维修技术工人培训、学习使用，也可供塑料制品加工企业技术人员参考。



图书在版编目 (CIP) 数据

注塑机维修实用教程/李忠文, 朱国宪, 年立官编著.

北京：化学工业出版社，2007.9

ISBN 978-7-122-01082-7

I. 注… II. ①李… ②朱… ③年… III. 注塑机-维修-教材 IV. TQ320.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 135866 号

责任编辑：李玉晖

文字编辑：钱 诚

责任校对：顾淑云

装帧设计：尹琳琳

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 1/2 字数 408 千字 2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：29.00 元

版权所有 违者必究

“研究生教育创新工程”化工类研究生教学用书

指导委员会

主任委员 余国琮院士（天津大学）

副主任委员
(按姓氏笔画排序)

杨锦宗院士（大连理工大学）

时铭显院士（中国石油大学）

欧阳平凯院士（南京工业大学）

金涌院士（清华大学）

委员
(按姓氏笔画排序)

马振基教授（新竹清华大学）

王祥生教授（大连理工大学）

元英进教授（天津大学）

石碧教授（四川大学）

曲景平教授（大连理工大学）

朱家骅教授（四川大学）

仲崇立教授（北京化工大学）

刘昌俊教授（天津大学）

刘洪来教授（华东理工大学）

孙彦教授（天津大学）

李永丹教授（天津大学）

李伯耿教授（浙江大学）

胡英院士（华东理工大学）

袁渭康院士（华东理工大学）

徐南平院士（南京工业大学）

李笃中教授（台湾大学）

余宝乐教授（香港科技大学）

张丰志教授（新竹交通大学）

陆小华教授（南京工业大学）

陈建峰教授（北京化工大学）

段雪教授（北京化工大学）

姚善泾教授（浙江大学）

钱宇教授（华南理工大学）

徐春明教授（中国石油大学）

谢国煌教授（台湾大学）

谭天伟教授（北京化工大学）

主任委员 王静康院士（天津大学）

副主任委员 费维扬院士（清华大学）

委员
(按姓氏笔画排序)

王志教授（天津大学）

刘晓勤教授（南京工业大学）

李忠教授（华南理工大学）

吴乃立教授（台湾大学）

辛忠教授（华东理工大学）

张卫东教授（北京化工大学）

元英进教授（天津大学）

陈纪忠教授（浙江大学）

陈国华教授（香港科技大学）

赵洪教授（清华大学）

郭绍辉教授（中国石油大学）

郭新闻教授（大连理工大学）

梁斌教授（四川大学）

序

“化工类研究生创新人才培养模式、教学内容、教学方法和教学技术改革的研究”是2005年获得教育部研究生教育创新计划专项立项的研究生教育创新工程项目。该项目由天津大学牵头，清华大学、华东理工大学、浙江大学、大连理工大学、北京化工大学、南京工业大学、中国石油大学、四川大学、华南理工大学、香港科技大学和化学工业出版社等共同承担。编著系列“化工类研究生教学用书”是该项目的重要内容之一。

高质量的教学用书是培养高素质创新人才的重要基础。上述化工学科著名的高等院校发挥各自的优势，共同组织优秀的化工教育教学专家编写了本系列教学用书。我们希望本系列教学用书既有中国特色又展示国际前沿，能够为规范研究生教学、开拓研究生视野、全面提高我国化工类研究生教育水平做出贡献。

中国工程院院士、天津大学教授

王静康

2005年9月

前 言

传递过程是自然界极为普遍的现象，它涉及工业、农业、医学、生理、土壤及气象等领域。在工业领域中，又包括化工、轻工、炼油、冶金、材料、煤化工、核化工、生物化工等行业，涉及的用途、知识和研究很多。

本书是为化工类研究生和教师撰写的教学参考书。化工传递过程是该类学科的基础课程之一，重要性和化工热力学、化学反应工程相当，着重阐述动量、热量和质量的传递实质，以及化工过程中强度量分布和传递速率。化工传递过程是化工技术分析的理论基础，是提高化工理论水平的重要内容，学习化工传递过程有利于提高研究能力，以及对化工文献的阅读能力、运用能力和创新能力。

化工传递过程的研究生教学参考用书不多，各书宗旨不同，构思各异。本书的特点是既重视基本概念、原理和方法的阐述，也重视与化工实际的联系。但这种阐述，旨在强调传递过程的实质和规律，并不深入相邻学科的讨论；这种联系，旨在剖析化工过程实际，并不罗列实验结果。

化工传递过程内容的选择，既考虑了本科阶段学过传递过程基础的学生，又兼顾了尚未学习传递过程内容的学生，因此对传递过程的基本内容做了回顾，以便承上启下。本书第1章、第2章为基本理论，回顾和补充了传递过程基础，但论述对象为多元溶液，数学语言加以扩充，以达到温故而知新。第3章、第4章为求解方法和典型解例，以方程类型为纲、化工实际过程为例，力求三传（动量传递、热量传递和质量传递）对比联系。近年来数值解法日兴，为此结合传递过程，对有限差分法和有限单元法作了扼要介绍，以弥补分析解的不足。第5章、第6章探讨化工实际过程，意在对相际传递及伴有热量、质量及化学变化的传递过程加以论述，并补充新进展。至于化工物性和化工设备的计算，因已有其他课程专门介绍，还有专著和手册可查，本书不再重复。

本书内容上有以下几个特点。

1. 重视化工传递过程的基本概念和分析方法。在以下一些方面有所补充或强调：流体运动的两种描述方法；传递量衡算中的两种方法；传递定理；流体运动学的基本知识；溶液衡算中的基准和单位；应力和动量通量；熵衡算和熵产生，以及扩散传递的不可逆性、偶合现象；多种传递系数及其关系；传热传质的归纳方程与有关因子；复位势和复速度，边界层模型的数学论述；湍流发生的数学分析；沿壁与自由湍流；界面性质与毛细运动；Marangoni效应与界面传流，界面位移速度和两侧通量关系，界旁传递模型的补充和三传类比；相变通量与有关的扩散通量校正因子。

2. 重视多元溶液作为论述对象。因为纯物质较少，在传递量衡算方程和扩散通量方程中能反映出更为深入的一些传递现象。在简单的情况下，如稳态、低维、恒物性、无化学变化以及恒温、恒浓等，可简化为相应的传递方程组，而无需重复推导。

3. 重视三传之间的相互联系。动量、热量及质量传递方程的推出和汇总全部置于一章，这样查用方便。求解也没有按动量、热量、质量传递逐次介绍，而是按传递方程组的结构和类型求解，即按扩散传递、理想流体运动。黏性流体的层流传递和湍流传递分节，求解中注意三传类比，如扩散解类比、层流解类比、湍流解类比以及模型解类比，特别是传热和传质的类比，避免了重复求解。

4. 重视数学工具的运用，因其简单便利，适合于化工传递过程的需要。例如，在建立方程组中，用到了矢量、张量、积分形式和导数形式的转换；在求解中，用到了组合变量法、拉氏变换法、分离变量法、位函数法、流函数法、复位势法、摄动法、权余法等。为此，本书备有数学基础一节，以便读者温故知新。

5. 对传递方程的数值解法作了初步介绍，包括有限差分法和有限单元法。前者包括差分法原理，域内和边界节点方程组的建立、解例；后者包括权余法原理、有限单元及近似函数、节点方程组的建立和求值，两法介绍限于二维问题，只能算是导引。最后还简介了有限体积法。

6. 对于流体的相际传递，补充了界面现象，论述了界面有位移速度时两侧各种通量的关系，补充了双参数模型、模型解的三传类比和扩散传递通量校正因子。

7. 对化工实际过程中的热质传递和化学变化传递作了专门阐述，尤其对多组元热质传递，介绍了较多内容，如普化 Maxwell-Stefan 方程、相平衡比值矩阵和斜率矩阵、传质通量的膜模型解。实例除了调湿外，还有多元精馏中的非平衡级分析。

8. 本书的典型解未能包括流体力学、传热学和传质学的各个方面，只能从化工传递过程角度出发，选择其中的典型例子来说明本书主要内容和学习方法。

9. 书中例题，以自撰为主，力求配合各节，有助于理解内容要点、分析化工实际、学会求解方法、重视内容对比和探讨疑难问题。

本书根据多年来的研究生教学实践和近期科技进展编写而成，各章末附有习题和参考材料，供读者练习和查阅。本书可作为化工、石油化工、煤化工、生物化工及轻工、冶金、环境工程等相关专业的研究生教材，亦可供有关教师和工程师参考。

限于编者水平，本书难免有不足之处，敬请读者及各位同行不吝施教，以便在今后修订时加以改进。

编 者

2007年10月于南京工业大学

主要符号表

一、英文符号

A	流动截面积, m^2	$\bar{G}_\beta \equiv \mu_\beta$	Gibbs 偏摩尔自由能, $\text{J}/\text{kmol} \beta$
a	相界面积/混相体积, m^2/m^3	$\hat{G} \equiv \int \frac{dp}{\rho}$	正压流动中的比自由能, J/kg
B.C.I、B.C.II、 B.C.III	分别为第一类、第二类、 第三类边界条件	\vec{g}_γ	γ 组元比体力, $\text{N}/\text{kg} \gamma$
$B_{\alpha\beta}$	普化 M-S 方程中的系数矩阵分量	h	溶液比焓, J/kg
C	溶液(总)摩尔浓度, kmol/m^3	h_γ	γ 组元偏比焓, $\text{J}/\text{kg} \gamma$
c_γ	γ 组元摩尔浓度, $\text{kmol} \gamma/\text{m}^3$	h	传热系数, $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2)$
C_d	阻力系数	h^\cdot	扩散传热系数, $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2)$
C_o	扩散传递校正因子内涵	$H_\alpha \equiv P_\alpha/c_\alpha$	α 组元亨利系数, $\text{atm}/(\text{kmol} \alpha/\text{m}^3)$
c_p	定压比热容, $\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg}) (C_p = M c_p)$	ΔH	摩尔反应热, J/kmol
$c_{p\gamma}$	γ 组元偏定压比热容, $\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg} \gamma) (C_{p\gamma} = M_\gamma c_{p\gamma})$	I	涡流强度
$D_{\alpha\beta}$	Fick 定律中 α 组元扩散系数, m^2/s (对二元系, 简写为 D_α)	I、II	相别
D_{am}	拟 Fick 定律中 α 组元扩散系数, m^2/s (对二元系, 简写为 D_α)	i, j	向别
$D_{\alpha\beta}$	普化 Fick 定律中 α, β 对扩散系数, m^2/s	I.C.	初始条件
.	.	j_m, j_h	传质、传热 j 因子
$D_{\alpha\beta}$	H-C-B 方程中 α, β 对扩散系数, m^2/s	\vec{j}_γ	γ 组元质量扩散通量 (质量基准), $\text{kg} \gamma/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$
$D'_{\alpha\beta}$	普化 M-S 方程中 α, β 对扩散系数, m^2/s	\vec{j}_γ	γ 组元摩尔扩散通量 (摩尔基准), $\text{kmol} \gamma/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$
$D_f(\nu, \alpha, D_\gamma)$	扩散度, m^2/s	j_s	熵扩散通量, $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2)$
D	内径、粒径, m	$j_{fy}(j_{ay}, q_y, \tau_{yx})$	y 向扩散通量
\vec{E}	能量通量, $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; 能耗率, J/s	$j_{fy}(t)$	扩散通量 t 时刻值, y 向
E_A	A 组元反应增强因子	k_f	$u_{ys} \neq 0$ 时的传递系数
f	比传递量, 传递量/ kg	\dot{k}_f	$u_{ys} = 0$ 时的传递系数
f'	传递量密度, 传递量/ m^3	k_f^\cdot	扩散传递系数
$f(u, T, \omega)$	强度量 (速度、温度、 质量分数)	k_x, k_y	相传质系数 (x 相、 y 相)
\vec{f}	无量纲强度量	K_x, K_y	总传质系数 (总动力基于 x 相、 y 相的单位)
f	阻力系数	K	逸流无量纲数 $u_{ys} \sqrt{x/(vU)}$
f_γ	γ 组元逸度, $\text{N}/\text{m}^2, \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$	L	膜厚、板长, m
		L_0	长度基准, m
		M	溶液摩尔质量, kg/kmol
		M_γ	γ 组元摩尔质量, $\text{kg}/\text{kmol} \gamma$

m	组元数	Δ	差值
m, n	沿壁流动中楔角 β 参数	Δ	单元面积, m^2
\vec{n}	单位矢量、外法线单位矢量	δ	速度边界层约定厚度, m
\vec{n}_γ	质量通量, $kg \cdot 溶液/(s \cdot m^2)$	δ_T	温度边界层约定厚度, m
\vec{n}_γ	γ 组元质量通量, $kg\gamma/(s \cdot m^2)$	δ_ρ	浓度边界层约定厚度, m
\vec{N}	摩尔通量, $kmol \cdot 溶液/(s \cdot m^2)$	δ_A	黏性底层厚度, m
\vec{N}_γ	γ 组元摩尔通量, $kmol\gamma/(s \cdot m^2)$	$\vec{\delta}_i$	i 向单位矢量
p	压强, N/m^2	δ_{ij}	单位矩阵 $[I]$ 中的元素
$p \equiv p + \rho g z$	修正压强, N/m^2	$\vec{\delta}_i \vec{\delta}_j$	单位并矢
R	通用气体常数, $8.314J/(K \cdot mol)$	ϵ	比内能, J/kg
r	半径, m	η	组合变量
r_γ	γ 组元生成率体密度, $kg\gamma/(s \cdot m^3)$	θ	角
R_γ	γ 组元生成率体密度, $kmol\gamma/(s \cdot m^3)$	Λ_γ	γ 组元相变热, $J/kmol\gamma$
S	面积, m^2	λ	导热系数 $J/(s \cdot K \cdot m)$
s	熵, $J/(K \cdot kg)$	μ	黏度, $kg/(s \cdot m)$
T	温度, K	μ'	体积黏度, $kg/(s \cdot m)$
t	时间, s	μ_β	偏摩尔化学位, $J/kmol\beta$
\vec{t}	单位切向矢量	μ'_β	偏比化学位, $J/kg\beta$
\vec{u}	质量平均速度, m/s	ν	运动黏度, m^2/s
\vec{u}^*	摩尔平均速度, m/s	Ξ	扩散传递通量校正因子
\vec{u}_γ	γ 组元速度, m/s	$\xi_a \equiv N_a / N_t$	α 组元通量分数
U	边界层外位流速度, m/s	$\vec{\xi}$	正交曲线坐标系中坐标矢量、物质坐标矢量
V	体积, m^3	ξ	反应度, $kmol$
\dot{V}	体积流量, m^3/s	π'_{ij}	应力张量 $\vec{\pi}'$ 分量, N/m^2
\bar{V}_β	偏摩尔体积, $m^3/kmol\beta$	π_{ij}	动量扩散通量张量分量, N/m^2
v	比体积, m^3/kg	ρ	溶液密度, kg/m^3
W	质量, kg	ρ_γ	γ 组元密度, $kg\gamma/m^3$
\dot{W}	质量流量, kg/s	σ	界面张力, N/m
W	外加功率, J/s	σ_s	熵产生率密度, $J/(s \cdot K \cdot m^3)$
x_γ	γ 组元摩尔分数	$\vec{\tau}_{ij}$	黏性应力张量, N/m^2
二、希腊字母		$\vec{\tau}_{ij}$	黏性动量扩散通量张量, N/m^2
α, A	组元	ϕ	角
α	热扩散系数, m^2/s	φ	位函数
Γ	液流强度, $kg/(s \cdot m)$	ϕ_f	强度量校正因子
$\Gamma(u)$	速度环流, m^2/s	$\phi(t)$	暂态模型中龄期概率密度, $1/s$
$\Gamma_{\alpha\beta}$	热力学因子矩阵 $[\Gamma]$ 的分量	Φ_{ij}	动量通量张量分量, N/m^2
γ	任一组元 α, β, \dots, m	Φ	耗散函数, $1/s^2$
γ_α	α 组元活度系数		

第1章	传递过程导论	1
基本概念		1
1.1	物相性质	1
1.1.1	物相性质含义	1
1.1.2	连续介质	2
1.1.3	传递量	2
1.2	传递方式	3
1.2.1	扩散传递	3
1.2.2	对流传递	4
1.2.3	辐射传递	4
数学基础		5
1.3	张量语言	5
1.3.1	数量和矢量	5
1.3.2	二阶张量	7
1.3.3	积分变换定理	9
1.4	曲线坐标	10
1.4.1	坐标特点和元素转换	10
1.4.2	算子转换——正交曲线坐标系	11
分析方法		12
1.5	流体运动的描述	12
1.5.1	空间描述法	12
1.5.2	物质描述法	13
1.5.3	两种方法之间的关系	14
1.5.4	物质导数	15
1.6	流场分析	16
1.6.1	邻点速差	16
1.6.2	旋度	19
1.7	衡算方法	20
1.7.1	两种衡算法	21
1.7.2	传递定理	21
习题		23
参考文献		23

10

2.7.2	以温度表示的衡算方程	50	层流传递	99	
2.8	熵衡算	53	3.4	层流传递简化情况	99
2.8.1	熵衡算方程	53	3.4.1	沿斜壁稳态层流	99
2.8.2	熵产生率密度	54	3.4.2	沿圆管稳态层流	103
传递方程组的定解		56	3.4.3	绕球稳态爬流	107
2.9	定解说明	56	3.5	层流边界层传递	111
2.9.1	定解前提	57	3.5.1	边界层模型	112
2.9.2	近壁工况和传递系数	58	3.5.2	层流边界层方程组	113
2.10	其他形式和解法概述	61	3.5.3	边界层传递中的相似性和 相似转换	115
2.10.1	正交曲线坐标系的运用和传递 方程组汇总	61	3.5.4	沿楔层流边界层传递解	117
2.10.2	无量纲式和传递过程中的 特征数汇总	66	3.5.5	边界层积分方程组	122
2.10.3	解法概述	68	3.5.6	边界层分离	126
习题		69	湍流传递	127	
参考文献		70	3.6	湍流传递基础	127
第3章 传递方程组的典型解和分析 解法		71	3.6.1	流型转变	128
扩散传递		71	3.6.2	湍流特征	129
3.1	基本解法	72	3.6.3	时均方程组	132
3.1.1	扩散传递方程和定解 条件的整形	72	3.7	沿壁湍流	135
3.1.2	组合变量法, 广平壁单向暂态 扩散 (B.C. I)	74	3.7.1	沿壁湍流核心区模型	136
3.1.3	拉氏变换法, 广平壁单向暂态 扩散 (B.C. III)	76	3.7.2	沿管湍流速度分布及阻力 系数	137
3.1.4	分离变量法, 广平壁双向暂态 扩散 (B.C. III, B.C. I)	77	3.7.3	沿平板湍流阻力系数和 三传湍流类比	141
3.2	化工要例	81	3.8	非沿壁湍流	145
3.2.1	球体	81	3.8.1	自由流动提要	145
3.2.2	正六面体	83	3.8.2	圆形淹没射流	148
3.2.3	圆柱段	85	3.8.3	Taylor 涡流扩散 (弥散)	150
理想流体运动		88	习题		151
3.3	理想流体运动的解法和实例	89	参考文献		152
3.3.1	位函数法和流函数法	89	第4章 传递方程组的数值 解法	154	
3.3.2	Bernoulli 方程	92	有限差分法	154	
3.3.3	复位势法	93	4.1	域内节点方程组	154
3.3.4	叠加位势法	95	4.1.1	导数转换	154
			4.1.2	热传导方程的转换	156
			4.1.3	传递方程组的转换	158
			4.2	边界节点方程组	159
			4.2.1	简单边界	160

4.2.2 复杂边界	161	5.4 界旁传递要例	204
4.3 解例	164	5.4.1 沿壁下降液膜	205
4.3.1 暂态导热	164	5.4.2 气泡和液滴的运动	208
4.3.2 稳态层流	165	5.4.3 分散接触中的传质	210
有限单元法	167	相际传递通量	213
4.4 权余法	167	5.5 二元传质通量	214
4.5 有限单元求值法	169	习题	215
4.5.1 有限单元概要	169	参考文献	216
4.5.2 插值函数与近似函数	169		
4.6 节点方程组的建立和求解	171		
4.6.1 节点方程组的建立	171		
4.6.2 方程系数和常数的求法	172		
4.7 有限体积法	174		
习题	175		
参考文献	176		
第5章 相际传递	177		
相界面及其传递工况	177		
5.1 相界面	177		
5.1.1 界面张力	178		
5.1.2 Laplace 公式和 Kelvin 公式	179		
5.1.3 毛细现象	180		
5.1.4 阻挡效应和 Marangoni 效应	183		
5.1.5 宏观产生的界面对流运动	184		
5.2 界面传递工况	185		
5.2.1 双相物系的传递定理、相变通量	185		
5.2.2 双相物系的传递量衡算和相界面两侧传递通量关系	187		
5.2.3 界面边界条件	189		
界旁传递模型及实例	192		
5.3 界旁传递模型	192		
5.3.1 膜模型	193		
5.3.2 渗入模型	195		
5.3.3 界面更新模型	198		
5.3.4 传递模型中的三传类比和小结	199		
		热质传递过程	217
		6.1 多元扩散本构方程及其矩阵形式补充	217
		6.1.1 普化 Maxwell-Stefan 方程	217
		6.1.2 普化 Fick 定律	219
		6.2 相际热质传递中多元工况补充	220
		6.2.1 界面两侧强度量关系，相平衡比值矩阵和斜率矩阵	220
		6.2.2 界面两侧通量关系，补定条件和补定矩阵	221
		6.3 多元溶液的界旁扩散通量	223
		6.3.1 界旁多元扩散膜模型	223
		6.3.2 单相膜模型解求 (J) 和 (N)	226
		6.4 相际多元溶液传质通量	229
		6.4.1 总传质系数	229
		6.4.2 相界面组成	230
		6.5 调湿过程	230
		6.5.1 调湿工况	230
		6.5.2 调湿分析	231
		6.6 蒸馏过程	232
		6.6.1 界面局部工况分析	232
		6.6.2 非平衡级分析	235
		6.6.3 传质系数的估计	237
		化学变化传递过程	238
		6.7 化学变化传递的分析基础	238

6.7.1 化学变化及传递回顾	238
6.7.2 相际化学变化传质特征	240
6.8 液相不可逆1级化学变化传质	242
6.8.1 不可逆1级化学变化传质模型分析	242
6.8.2 不可逆1级化学变化传质结果讨论	245
6.9 液相不可逆二元化学变化传递	246
6.9.1 相内不可逆2级飞速化学变化传质	246
6.9.2 相内不可逆2级一般化学变化传质	248
6.9.3 相内不可逆($m-n$)级化学变化传质	250
化传质	251
6.10 液相其他化学变化传质	252
6.10.1 相内可逆化学变化传质概述	252
6.10.2 相内可逆瞬时化学变化传质	254
6.10.3 相内串并联化学变化传质	255
6.11 相际化学变化传质和传质性能测算	257
6.11.1 相际化学变化传质通量和界面溶质浓度	257
6.11.2 化学法测算	258
习题	260
参考文献	262
第十一章 工业传质及其分离操作	263
11.1 表面传质系数	263
11.1.1 表面传质系数的测定方法	263
11.1.2 表面传质系数的计算	265
11.2 蒸发操作	267
11.2.1 蒸发器的类型	267
11.2.2 蒸发器的操作	268
11.2.3 蒸发器的传质系数	270
11.2.4 蒸发器的传质效率	271
11.2.5 蒸发器的传质通量	272
11.3 精馏操作	273
11.3.1 精馏塔的类型	273
11.3.2 精馏塔的操作	274
11.3.3 精馏塔的传质系数	275
11.3.4 精馏塔的传质通量	276
11.3.5 精馏塔的传质效率	277
11.4 吸收操作	278
11.4.1 吸收塔的类型	278
11.4.2 吸收塔的操作	279
11.4.3 吸收塔的传质系数	280
11.4.4 吸收塔的传质通量	281
11.4.5 吸收塔的传质效率	282
11.5 萃取操作	283
11.5.1 萃取塔的类型	283
11.5.2 萃取塔的操作	284
11.5.3 萃取塔的传质系数	285
11.5.4 萃取塔的传质通量	286
11.5.5 萃取塔的传质效率	287
11.6 干燥操作	288
11.6.1 干燥器的类型	288
11.6.2 干燥器的操作	289
11.6.3 干燥器的传质系数	290
11.6.4 干燥器的传质通量	291
11.6.5 干燥器的传质效率	292
11.7 其他分离操作	293
11.7.1 聚合物分离操作	293
11.7.2 脱色操作	294
11.7.3 脱臭操作	295
11.7.4 脱盐操作	296
11.7.5 脱水操作	297
11.7.6 脱气操作	298
11.7.7 脱溶剂操作	299
11.7.8 脱杂质操作	300
11.7.9 脱味操作	301
11.7.10 脱色操作	302
11.7.11 脱臭操作	303
11.7.12 脱盐操作	304
11.7.13 脱水操作	305
11.7.14 脱气操作	306
11.7.15 脱溶剂操作	307
11.7.16 脱杂质操作	308
11.7.17 脱味操作	309
11.7.18 脱色操作	310
11.7.19 脱臭操作	311
11.7.20 脱盐操作	312
11.7.21 脱水操作	313
11.7.22 脱气操作	314
11.7.23 脱溶剂操作	315
11.7.24 脱杂质操作	316
11.7.25 脱味操作	317
11.7.26 脱色操作	318
11.7.27 脱臭操作	319
11.7.28 脱盐操作	320
11.7.29 脱水操作	321
11.7.30 脱气操作	322
11.7.31 脱溶剂操作	323
11.7.32 脱杂质操作	324
11.7.33 脱味操作	325
11.7.34 脱色操作	326
11.7.35 脱臭操作	327
11.7.36 脱盐操作	328
11.7.37 脱水操作	329
11.7.38 脱气操作	330
11.7.39 脱溶剂操作	331
11.7.40 脱杂质操作	332
11.7.41 脱味操作	333
11.7.42 脱色操作	334
11.7.43 脱臭操作	335
11.7.44 脱盐操作	336
11.7.45 脱水操作	337
11.7.46 脱气操作	338
11.7.47 脱溶剂操作	339
11.7.48 脱杂质操作	340
11.7.49 脱味操作	341
11.7.50 脱色操作	342
11.7.51 脱臭操作	343
11.7.52 脱盐操作	344
11.7.53 脱水操作	345
11.7.54 脱气操作	346
11.7.55 脱溶剂操作	347
11.7.56 脱杂质操作	348
11.7.57 脱味操作	349
11.7.58 脱色操作	350
11.7.59 脱臭操作	351
11.7.60 脱盐操作	352
11.7.61 脱水操作	353
11.7.62 脱气操作	354
11.7.63 脱溶剂操作	355
11.7.64 脱杂质操作	356
11.7.65 脱味操作	357
11.7.66 脱色操作	358
11.7.67 脱臭操作	359
11.7.68 脱盐操作	360
11.7.69 脱水操作	361
11.7.70 脱气操作	362
11.7.71 脱溶剂操作	363
11.7.72 脱杂质操作	364
11.7.73 脱味操作	365
11.7.74 脱色操作	366
11.7.75 脱臭操作	367
11.7.76 脱盐操作	368
11.7.77 脱水操作	369
11.7.78 脱气操作	370
11.7.79 脱溶剂操作	371
11.7.80 脱杂质操作	372
11.7.81 脱味操作	373
11.7.82 脱色操作	374
11.7.83 脱臭操作	375
11.7.84 脱盐操作	376
11.7.85 脱水操作	377
11.7.86 脱气操作	378
11.7.87 脱溶剂操作	379
11.7.88 脱杂质操作	380
11.7.89 脱味操作	381
11.7.90 脱色操作	382
11.7.91 脱臭操作	383
11.7.92 脱盐操作	384
11.7.93 脱水操作	385
11.7.94 脱气操作	386
11.7.95 脱溶剂操作	387
11.7.96 脱杂质操作	388
11.7.97 脱味操作	389
11.7.98 脱色操作	390
11.7.99 脱臭操作	391
11.7.100 脱盐操作	392
11.7.101 脱水操作	393
11.7.102 脱气操作	394
11.7.103 脱溶剂操作	395
11.7.104 脱杂质操作	396
11.7.105 脱味操作	397
11.7.106 脱色操作	398
11.7.107 脱臭操作	399
11.7.108 脱盐操作	400
11.7.109 脱水操作	401
11.7.110 脱气操作	402
11.7.111 脱溶剂操作	403
11.7.112 脱杂质操作	404
11.7.113 脱味操作	405
11.7.114 脱色操作	406
11.7.115 脱臭操作	407
11.7.116 脱盐操作	408
11.7.117 脱水操作	409
11.7.118 脱气操作	410
11.7.119 脱溶剂操作	411
11.7.120 脱杂质操作	412
11.7.121 脱味操作	413
11.7.122 脱色操作	414
11.7.123 脱臭操作	415
11.7.124 脱盐操作	416
11.7.125 脱水操作	417
11.7.126 脱气操作	418
11.7.127 脱溶剂操作	419
11.7.128 脱杂质操作	420
11.7.129 脱味操作	421
11.7.130 脱色操作	422
11.7.131 脱臭操作	423
11.7.132 脱盐操作	424
11.7.133 脱水操作	425
11.7.134 脱气操作	426
11.7.135 脱溶剂操作	427
11.7.136 脱杂质操作	428
11.7.137 脱味操作	429
11.7.138 脱色操作	430
11.7.139 脱臭操作	431
11.7.140 脱盐操作	432
11.7.141 脱水操作	433
11.7.142 脱气操作	434
11.7.143 脱溶剂操作	435
11.7.144 脱杂质操作	436
11.7.145 脱味操作	437
11.7.146 脱色操作	438
11.7.147 脱臭操作	439
11.7.148 脱盐操作	440
11.7.149 脱水操作	441
11.7.150 脱气操作	442
11.7.151 脱溶剂操作	443
11.7.152 脱杂质操作	444
11.7.153 脱味操作	445
11.7.154 脱色操作	446
11.7.155 脱臭操作	447
11.7.156 脱盐操作	448
11.7.157 脱水操作	449
11.7.158 脱气操作	450
11.7.159 脱溶剂操作	451
11.7.160 脱杂质操作	452
11.7.161 脱味操作	453
11.7.162 脱色操作	454
11.7.163 脱臭操作	455
11.7.164 脱盐操作	456
11.7.165 脱水操作	457
11.7.166 脱气操作	458
11.7.167 脱溶剂操作	459
11.7.168 脱杂质操作	460
11.7.169 脱味操作	461
11.7.170 脱色操作	462
11.7.171 脱臭操作	463
11.7.172 脱盐操作	464
11.7.173 脱水操作	465
11.7.174 脱气操作	466
11.7.175 脱溶剂操作	467
11.7.176 脱杂质操作	468
11.7.177 脱味操作	469
11.7.178 脱色操作	470
11.7.179 脱臭操作	471
11.7.180 脱盐操作	472
11.7.181 脱水操作	473
11.7.182 脱气操作	474
11.7.183 脱溶剂操作	475
11.7.184 脱杂质操作	476
11.7.185 脱味操作	477
11.7.186 脱色操作	478
11.7.187 脱臭操作	479
11.7.188 脱盐操作	480
11.7.189 脱水操作	481
11.7.190 脱气操作	482
11.7.191 脱溶剂操作	483
11.7.192 脱杂质操作	484
11.7.193 脱味操作	485
11.7.194 脱色操作	486
11.7.195 脱臭操作	487
11.7.196 脱盐操作	488
11.7.197 脱水操作	489
11.7.198 脱气操作	490
11.7.199 脱溶剂操作	491
11.7.200 脱杂质操作	492
11.7.201 脱味操作	493
11.7.202 脱色操作	494
11.7.203 脱臭操作	495
11.7.204 脱盐操作	496
11.7.205 脱水操作	497
11.7.206 脱气操作	498
11.7.207 脱溶剂操作	499
11.7.208 脱杂质操作	500
11.7.209 脱味操作	501
11.7.210 脱色操作	502
11.7.211 脱臭操作	503
11.7.212 脱盐操作	504
11.7.213 脱水操作	505
11.7.214 脱气操作	506
11.7.215 脱溶剂操作	507
11.7.216 脱杂质操作	508
11.7.217 脱味操作	509
11.7.218 脱色操作	510
11.7.219 脱臭操作	511
11.7.220 脱盐操作	512
11.7.221 脱水操作	513
11.7.222 脱气操作	514
11.7.223 脱溶剂操作	515
11.7.224 脱杂质操作	516
11.7.225 脱味操作	517
11.7.226 脱色操作	518
11.7.227 脱臭操作	519
11.7.228 脱盐操作	520
11.7.229 脱水操作	521
11.7.230 脱气操作	522
11.7.231 脱溶剂操作	523
11.7.232 脱杂质操作	524
11.7.233 脱味操作	525
11.7.234 脱色操作	526
11.7.235 脱臭操作	527
11.7.236 脱盐操作	528
11.7.237 脱水操作	529
11.7.238 脱气操作	530
11.7.239 脱溶剂操作	531
11.7.240 脱杂质操作	532
11.7.241 脱味操作	533
11.7.242 脱色操作	534
11.7.243 脱臭操作	535
11.7.244 脱盐操作	536
11.7.245 脱水操作	537
11.7.246 脱气操作	538
11.7.247 脱溶剂操作	539
11.7.248 脱杂质操作	540
11.7.249 脱味操作	541
11.7.250 脱色操作	542
11.7.251 脱臭操作	543
11.7.252 脱盐操作	544
11.7.253 脱水操作	545
11.7.254 脱气操作	546
11.7.255 脱溶剂操作	547
11.7.256 脱杂质操作	548
11.7.257 脱味操作	549
11.7.258 脱色操作	550
11.7.259 脱臭操作	551
11.7.260 脱盐操作	552
11.7.261 脱水操作	553
11.7.262 脱气操作	554
11.7.263 脱溶剂操作	555
11.7.264 脱杂质操作	556
11.7.265 脱味操作	557
11.7.266 脱色操作	558
11.7.267 脱臭操作	559
11.7.268 脱盐操作	560
11.7.269 脱水操作	561
11.7.270 脱气操作	562
11.7.271 脱溶剂操作	563
11.7.272 脱杂质操作	564
11.7.273 脱味操作	565
11.7.274 脱色操作	566
11.7.275 脱臭操作	567
11.7.276 脱盐操作	568
11.7.277 脱水操作	569
11.7.278 脱气操作	570
11.7.279 脱溶剂操作	571
11.7.280 脱杂质操作	572
11.7.281 脱味操作	573
11.7.282 脱色操作	574
11.7.283 脱臭操作	575
11.7.284 脱盐操作	576
11.7.285 脱水操作	577
11.7.286 脱气操作	578
11.7.287 脱溶剂操作	579
11.7.288 脱杂质操作	580
11.7.289 脱味操作	581
11.7.290 脱色操作	582
11.7.291 脱臭操作	583
11.7.292 脱盐操作	584
11.7.293 脱水操作	585
11.7.294 脱气操作	586
11.7.295 脱溶剂操作	587
11.7.296 脱杂质操作	588
11.7.297 脱味操作	589
11.7.298 脱色操作	590
11.7.299 脱臭操作	591
11.7.300 脱盐操作	592
11.7.301 脱水操作	593
11.7.302 脱气操作	594
11.7.303 脱溶剂操作	595
11.7.304 脱杂质操作	596
11.7.305 脱味操作	597
11.7.306 脱色操作	598
11.7.307 脱臭操作	599
11.7.308 脱盐操作	600
11.7.309 脱水操作	601
11.7.310 脱气操作	602
11.7.311 脱溶剂操作	603
11.7.312 脱杂质操作	604
11.7.313 脱味操作	605
11.7.314 脱色操作	606
11.7.315 脱臭操作	607
11.7.316 脱盐操作	608
11.7.317 脱水操作	609
11.7.318 脱气操作	610
11.7.319 脱溶剂操作	611
11.7.320 脱杂质操作	612
11.7.321 脱味操作	613
11.7.322 脱色操作	614
11.7.323 脱臭操作	615
11.7.324 脱盐操作	616
11.7.325 脱水操作	617
11.7.326 脱气操作	618
11.7.327 脱溶剂操作	619
11.7.328 脱杂质操作	620
11.7.329 脱味操作	621
11.7.330 脱色操作	622
11.7.331 脱臭操作	623
11.7.332 脱盐操作	624
11.7.333 脱水操作	625
11.7.334 脱气操作	626
11.7.335 脱溶剂操作	627
11.7.336 脱杂质操作	628
11.7.337 脱味操作	629
11.7.338 脱色操作	630
11.7.339 脱臭操作	631
11.7.340 脱盐操作	632
11.7.341 脱水操作	633
11.7.342 脱气操作	634
11.7.343 脱溶剂操作	635
11.7.344 脱杂质操作	636
11.7.345 脱味操作	637
11.7.346 脱色操作	638
11.7.3	

第1章 传递过程导论

第1章 传递过程导论

化工传递过程主要研究化工过程中动量、热量和质量的传递规律和通量，因此涉及物料的速度、温度和浓度的分布。

化工传递过程是化工过程和设备研究、开发和应用的理论基础。无论是流体输送、换热、分离和反应，还是单相床或多相床（固定床、流化床、泡沫床、乳浊液、悬浮液），总存在着速度、温度或浓度的分布以及动量、热量或质量等传递通量问题。

以蒸馏为例，塔内有气液流动，气液间有质量、热量和动量的交换。再以反应为例，催化剂固定床中有流体流动，流体与固体之间亦有组元、热量和动量的传递，输入反应剂，带走反应物和反应热。有时传递过程甚至成为整个反应过程的控制步骤。

同时，化学工程类课题的文献查阅、模型建立和实验总结，也往往需要这方面的基础知识。因此，化工传递过程是化学工程类研究生的学位课程，化工传递过程的掌握程度反映出某种化工技术水平。本书的目的，就是帮助读者达到这一水平。

本章是本书全部内容的基础，也是本科同名课程的回顾和提高，包括基本概念、数学基础和分析方法三部分。

基本概念

化工传递过程是在物相之内或之间进行的。故首先要阐明与物相性质和传递方式有关的概念^[1~3]。

1.1 物相性质

1.1.1 物相性质含义^[4,5]

物相是物系中的均一部分。物系中只能有一种气相，但可以有几种液相和几种固相。

物相是由微观粒子组成的，如分子、原子、离子、电子等，它们都是不连续的，很小且很多，不断进行着热运动。热运动是随机的，且运动状态不同，具有某种概率密度。

若 $p(\Omega)$ 为粒群运动状态处于 Ω 时的概率密度，则 $p(\Omega)d\Omega$ 为粒群运动状态处于 Ω 和 $\Omega+d\Omega$ 之间的概率。所有运动状态概率的总和为 1，即有归一条件

$$\int_{\Omega} p(\Omega) d\Omega = 1$$

粒群运动状态概率密度的研究，属于统计物理的范围^[4]，气体的 Maxwell 分布，就是其中一个例子。

物相性质是物相的宏观性质，即粒群微观性质的统计平均值

$$f = \int_{\Omega} f(\Omega) p(\Omega) d\Omega \quad (1.1.1)$$

式中， $f(\Omega)$ 是运动状态为 Ω 时的粒子性质，如分子内能、位能、动能、速度等； f 是物相性质，亦即所有运动状态下粒群的相应统计平均值，如物相的内能、位能、动能、速度等。其中速度为矢量，平均时正反方向部分相消。完全相消时，即物相的宏观速度为零。

通常认为，式(1.1.1) 对平衡态和非平衡态均适用^[4]。但概率密度，统计物理中对平衡态讨论较多，对非平衡态则甚少。工程上，物相中一点的物性，常按局部平衡态的假设取值，即以该点的宏观状态取值。

还要强调，式(1.1.1) 是粒群的统计平均值，粒数过少，平均值将有起伏，也就失去宏观意义。只有粒数足够多时，平均值才稳定，这就引出了物相的连续介质模型。

1.1.2 连续介质

将物相看作连续介质，是早已采用的模型，而且卓有成效。模型的背景是对于很多科技问题，包括传递问题在内，只需知道物相的宏观性质，不必深究粒群的微观行为。这就突出了科技问题本身。

模型的便利在于，对于连续介质，数学上可用微积分来分析，从而避开了粒子的不连续性和热运动的随机性，简化了现象的分析。

微积分的适用基础是在足够小的物相体积单元或质元中，通常已含有足够多的粒子，具有稳定的物相。例如，标准状态下的空气，其分子数密度为 2.7×10^{19} 个/cm³，这时有以下相应量

体元 $\Delta V = 1 \mu m^3 = 1 \times 10^{-18} m^3 \rightarrow dV$ (够小)

质元 $\Delta W = 1.293 \times 10^{-18} kg \rightarrow dW$ (够小)

分子数 = $2.7 \times 10^7 \rightarrow$ 物性已无起伏

化工过程中，除了微体积和超低压的气体外，分子数密度都很大，有稳定值，故物相可看作连续介质。这意味着：质元是由足够多的粒子组成，其物性已无起伏；物相又是由足够多的质元组成，相内物性的变化是连续的。

在本书的叙述中，质元 dW 与体元 dV 相应，而质点意味着体元小到和空间一点相应。

1.1.3 传递量

化工传递过程中，涉及的物性很多，通常可分为广度性和强度性两类。

① 广度性或外延性，与物相的质量或体积有关，用广度量 G 表示。

② 强度性或内含性，与物相的质量或体积无关，用强度量 f 或 f' 表示。

表 1.1 中列出了传递过程中经常用到的广度量和强度量。换算关系为

$$f' = \rho f \quad \text{或} \quad f = v f' \quad (1.1.2)$$

$$dG = f dW = f' dV = \rho f dV \quad (1.1.3)$$

$$G = \left\{ \begin{array}{l} \int_W f dW \\ \int_V \rho f dV \end{array} \right\} \quad (1.1.3)$$

对于物性数据，最好采用实验结果或实验式，可从化工、化学、物理、热工等手册^[6]或物性专著^[7]中查找。

表 1.1 传递过程中的量

广度量	强度量	
G	比传递量 $f \equiv \frac{dG}{dV}$, G/kg 溶液	传递量密度 $f' \equiv \rho f \equiv \frac{dG}{dV}$, G/m ³ 溶液
溶液质量, kg	1, kg/kg	溶液质量密度 ρ , kg/m ³
溶液体积, m ³	比体积 v , m ³ /kg	1, m ³ /m ³
A 元质量, kg	A 元比质量 ω_A , kgA/kg	A 元质量密度 ρ_A , kgA/m ³
动量, kg · m/s	比动量 \vec{u} , (kg · m/s)/kg	动量密度 $\rho \vec{u}$, (kg · m/s)/m ³
动能, J	比动能 $u^2/2$, J/kg	动能密度 $\rho u^2/2$, J/m ³
内能, J	比内能 ϵ , J/kg	内能密度 $\rho \epsilon$, J/m ³
焓, J	比焓 h , J/kg	焓密度 ρh , J/m ³

1.2 传递方式

传递过程意味着传递量在静止坐标系中的移动过程。传递方式因此常分为以下三种：扩散传递、对流传递和辐射传递，下面就简单情况说明其特征。

1.2.1 扩散传递

物相是由分子、原子等组成的，且不断进行着热运动，所以通过位移和碰撞，就能交换其携带的质量、能量和动量。如果相内这些强度量是不均匀的，则交换的净结果将使这些传递量从强度量高处传至低处，这就是扩散传递方式。例如图 1.1 中，组元 A 由 ω_A 高处扩散至低处。

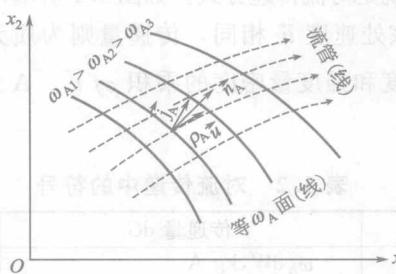


图 1.1 传递方式示意

(为清楚起见, 设图中 x_3 向强度量不变)

实验表明，扩散传递方向与传递强度量梯度 ∇f 相反，传递通量在低 ∇f 下与之成正比，这就是唯象律，是扩散传递现象的实验规律^[1]。

Fick 扩散定律（二元扩散）：

$$j_{Ai} = -D_A \rho \frac{\partial \omega_A}{\partial x_i} = -D_A \frac{\partial \rho_A}{\partial x_i} \quad (1.1.4)$$

Fourier 导热定律：

① 对于 $\rho \neq$ 常数的情况，右式是不正确的。如暖气片旁空气， ρ_A 不为常数，但 ω_A 为常数，故 $j_{AS} = 0$ ^[14]。