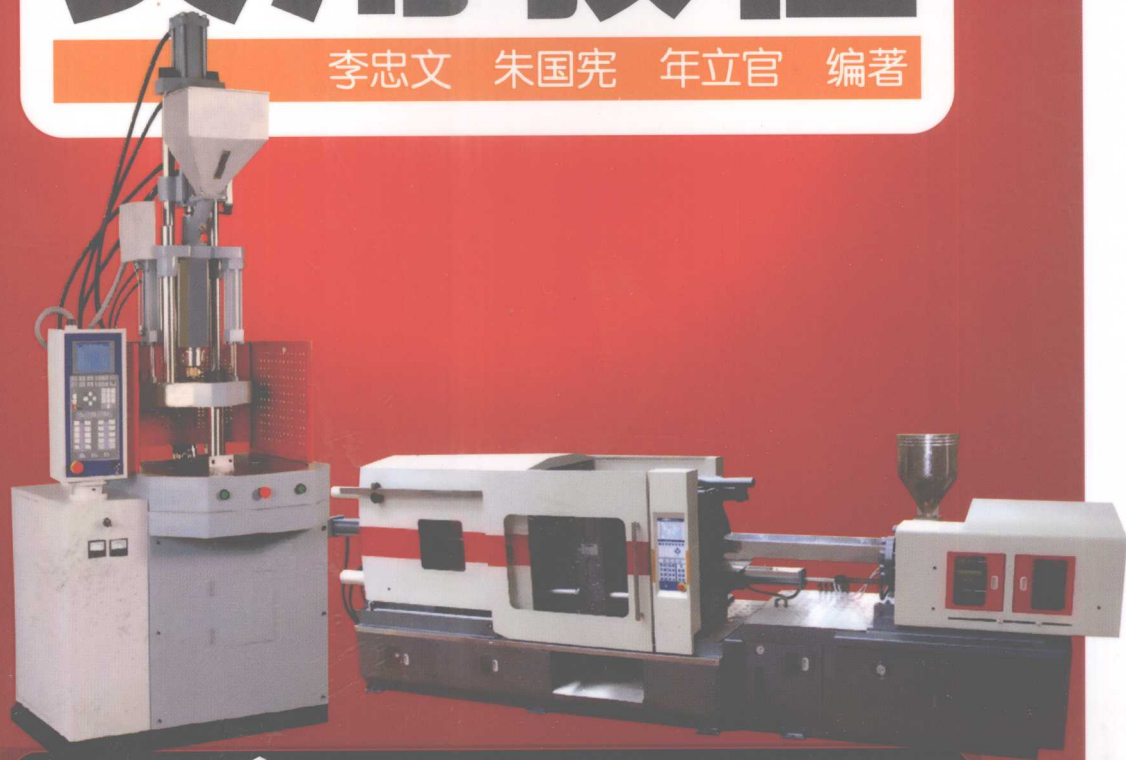


# 注塑机

## 维修

# 实用教程

李忠文 朱国宪 年立官 编著

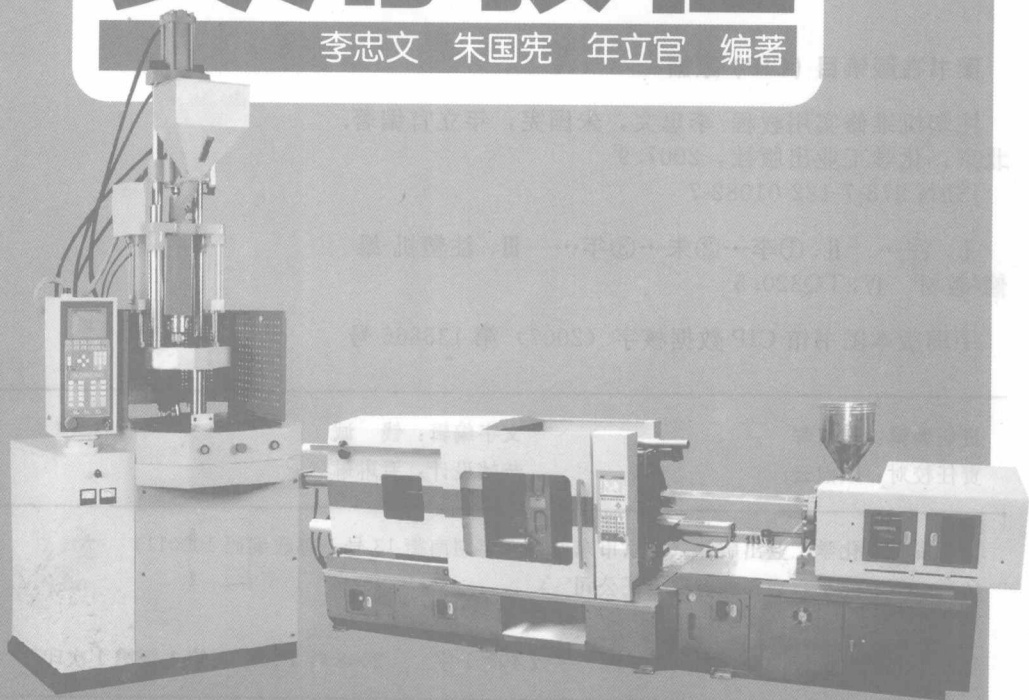


化学工业出版社

· 李德月人宋姓业 ·

# 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16½ 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)

## 编审委员会

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，意在相对实际传递及伴有热量、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效应与界面对流，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, $m^2$
$a$	相界面面积/混相体积, $m^2/m^3$
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
$B_{\alpha\beta}$	普化 M-S 方程中的系数矩阵分量
$C$	溶液 (总) 摩尔浓度, $kmol/m^3$
$c_\gamma$	$\gamma$ 组元摩尔浓度, $kmol/m^3$
$C_d$	阻力系数
$C_o$	扩散传递校正因子内涵
$c_p$	定压比热容, $J/(K \cdot kg)$ ( $C_p = M c_p$ )
$c_{p\gamma}$	$\gamma$ 组元偏定压比热容, $J/(K \cdot kg\gamma)$ ( $C_{p\gamma} = M_\gamma c_{p\gamma}$ )
$D_{\alpha\beta}$	Fick 定律中 $\alpha$ 组元扩散系数, $m^2/s$ (对二元系, 简写为 $D_\alpha$ )
$D_{am}$	拟 Fick 定律中 $\alpha$ 组元扩散系数, $m^2/s$ (对二元系, 简写为 $D_\alpha$ )
$D_{\alpha\beta}$	普化 Fick 定律中 $\alpha$ 、 $\beta$ 对扩散系数, $m^2/s$
$D_{\alpha\beta}$	H-C-B 方程中 $\alpha$ 、 $\beta$ 对扩散系数, $m^2/s$
$D'_{\alpha\beta}$	普化 M-S 方程中 $\alpha$ 、 $\beta$ 对扩散系数, $m^2/s$
$D_f(\nu, \alpha, D_\gamma)$	扩散度, $m^2/s$
$D$	内径、粒径, $m$
$\vec{E}$	能量通量, $J/(s \cdot m^2)$ ; 能耗率, $J/s$
$E_A$	A 组元反应增强因子
$f$	比传递量, 传递量/kg
$f'$	传递量密度, 传递量/ $m^3$
$f(u, T, \omega)$	强度量 (速度、温度、 质量分数)
$\vec{f}$	无量纲强度量
$f$	阻力系数
$f_\gamma$	$\gamma$ 组元逸度, $N/m^2$ 、 $kg/(m \cdot s^2)$

$\bar{G}_\beta \equiv \mu_\beta$	Gibbs 偏摩尔自由能, $J/kmol \beta$
$\hat{G} \equiv \int \frac{dp}{\rho}$	正压流动中的比自由能, $J/kg$
$\vec{g}_\gamma$	$\gamma$ 组元比体力, $N/kg\gamma$
$h$	溶液比焓, $J/kg$
$h_\gamma$	$\gamma$ 组元偏比焓, $J/kg\gamma$
$h$	传热系数, $J/(s \cdot K \cdot m^2)$
$h \cdot$	扩散传热系数, $J/(s \cdot K \cdot m^2)$
$H_\alpha \equiv P_\alpha/c_\alpha$	$\alpha$ 组元亨利系数, $atm/(kmol\alpha/m^3)$
$\Delta H$	摩尔反应热, $J/kmol$
$I$	涡流强度
I、II	相别
$i, j$	向别
I.C.	初始条件
$j_m, j_h$	传质、传热 $j$ 因子
$\vec{j}_\gamma$	$\gamma$ 组元质量扩散通量 (质量基准), $kg\gamma/(s \cdot m^2)$
$\vec{J}_\gamma$	$\gamma$ 组元摩尔扩散通量 (摩尔基准), $kmol\gamma/(s \cdot m^2)$
$\vec{j}_s$	熵扩散通量, $J/(s \cdot K \cdot m^2)$
$j_{fy} (j_{ay}, q_y, \tau_{yx})$	$y$ 向扩散通量
$j_{fy}(t)$	扩散通量 $t$ 时刻值, $y$ 向
$k_f$	$u_{ys} \neq 0$ 时的传递系数
$k_f^\circ$	$u_{ys} = 0$ 时的传递系数
$k_f^\circ$	扩散传递系数
$k_x, k_y$	相传质系数 ( $x$ 相、 $y$ 相)
$K_x, K_y$	总传质系数 (总动力基于 $x$ 相、 $y$ 相的单位)
$K$	逸流无量纲数 $u_{ys} \sqrt{x}/(\nu U)$
$L$	膜厚、板长, $m$
$L_0$	长度基准, $m$
$M$	溶液摩尔质量, $kg/kmol$
$M_\gamma$	$\gamma$ 组元摩尔质量, $kg/kmol\gamma$



$m$	组元数	$\Delta$	差值
$m, n$	沿壁流动中楔角 $\beta$ 参数	$\Delta m$	单元面积, $m^2$
$\vec{n}$	单位矢量、外法线单位矢量	$\delta$	速度边界层约定厚度, $m$
$\vec{n}$	质量通量, $kg$ 溶液/ $(s \cdot m^2)$	$\delta_T$	温度边界层约定厚度, $m$
$\vec{n}_\gamma$	$\gamma$ 组元质量通量, $kg\gamma/(s \cdot m^2)$	$\delta_\rho$	浓度边界层约定厚度, $m$
$\vec{N}$	摩尔通量, $kmol$ 溶液/ $(s \cdot m^2)$	$\delta_\Delta$	黏性底层厚度, $m$
$\vec{N}_\gamma$	$\gamma$ 组元摩尔通量, $kmol\gamma/(s \cdot m^2)$	$\vec{\delta}_i$	$i$ 向单位矢量
$p$	压强, $N/m^2$	$\delta_{ij}$	单位矩阵 $[I]$ 中的元素
$\rho \equiv p + \rho g z$	修正压强, $N/m^2$	$\vec{\delta}_i \vec{\delta}_j$	单位并矢
$R$	通用气体常数, $8.314 J/(K \cdot mol)$	$\epsilon$	比内能, $J/kg$
$r$	半径, $m$	$\eta$	组合变量
$r_\gamma$	$\gamma$ 组元生成率体密度, $kg\gamma/(s \cdot m^3)$	$\theta$	角
$R_\gamma$	$\gamma$ 组元生成率体密度, $kmol\gamma/(s \cdot m^3)$	$\Delta_\gamma$	$\gamma$ 组元相变热, $J/kmol\gamma$
$S$	面积, $m^2$	$\lambda$	导热系数 $J/(s \cdot K \cdot m)$
$s$	熵, $J/(K \cdot kg)$	$\mu$	黏度, $kg/(s \cdot m)$
$T$	温度, $K$	$\mu'$	体积黏度, $kg/(s \cdot m)$
$t$	时间, $s$	$\mu_\beta$	偏摩尔化学位, $J/kmol\beta$
$\vec{t}$	单位切向矢量	$\mu'_\beta$	偏比化学位, $J/kg\beta$
$\vec{u}$	质量平均速度, $m/s$	$\nu$	运动黏度, $m^2/s$
$\vec{u}^*$	摩尔平均速度, $m/s$	$\Xi$	扩散传递通量校正因子
$\vec{u}_\gamma$	$\gamma$ 组元速度, $m/s$	$\xi_\alpha \equiv N_\alpha/N_t$	$\alpha$ 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, $m^3$	$\xi$	反应度, $kmol$
$\dot{V}$	体积流量, $m^3/s$	$\pi'_{ij}$	应力张量 $\vec{\pi}'$ 分量, $N/m^2$
$\bar{V}_\beta$	偏摩尔体积, $m^3/kmol\beta$	$\pi_{ij}$	动量扩散通量张量分量, $N/m^2$
$v$	比体积, $m^3/kg$	$\rho$	溶液密度, $kg/m^3$
$W$	质量, $kg$	$\rho_\gamma$	$\gamma$ 组元密度, $kg\gamma/m^3$
$\dot{W}$	质量流量, $kg/s$	$\sigma$	界面张力, $N/m$
$W$	外加功率, $J/s$	$\sigma_s$	熵产生率密度, $J/(s \cdot K \cdot m^3)$
$x_\gamma$	$\gamma$ 组元摩尔分数	$\vec{\tau}'_{ij}$	黏性应力张量, $N/m^2$
<b>二、希腊字母</b>		$\vec{\tau}_{ij}$	黏性动量扩散通量张量, $N/m^2$
$\alpha, A$	组元	$\phi$	角
$\alpha$	热扩散系数, $m^2/s$	$\varphi$	位函数
$\Gamma$	液流强度, $kg/(s \cdot m)$	$\phi_f$	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	$\Phi_{ij}$	动量通量张量分量, $N/m^2$
$\gamma$	任一组元 $\alpha, \beta, \dots, m$	$\Phi$	耗散函数, $1/s^2$
$\gamma_\alpha$	$\alpha$ 组元活度系数		

$$\Phi_A \equiv J_{AA}$$

$A$  组元传质率密度,  $\text{kmolA}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$

$\psi$  流函数,  $\text{m}^2/\text{s}$

$\omega_\gamma$   $\gamma$  组元质量分数,  $\text{kg}\gamma/\text{kg}$  溶液

$\vec{\omega}$  旋度,  $1/\text{s}$

$\vec{\omega}$  角速度,  $1/\text{s}$

### 三、附标

上标

无量纲, 如  $\tilde{T}$ 、 $\tilde{u}$

单位质量, 如  $\hat{G}$ 、 $\hat{E}_V$

偏摩尔, 如  $\bar{G}_\beta$

拉氏变换, 如  $\bar{f}$

— 下标

平均, 如  $\bar{j}_f(t)$ 、 $\bar{u}_i$

上角标

$\circ$   $u_{ys} = 0$  时的传递系数, 如  $k_\rho^\circ$

$\bullet$  扩散传递系数, 如  $k_\rho^\bullet$

$*$  与主流平衡值, 如  $x_{ab}^*$ 、 $\omega_{ab}^*$

I、II 相别, 如  $k_\rho^I$ 、 $k_\rho^{II}$

下角标

$s$  界面值, 如  $T_s$

$b$  主流值、截面混合值, 如  $T_b$

$t$  切向

$\gamma$  组元, 如  $\omega_\alpha$ 、 $\omega_\beta$ 、 $\dots$ 、 $\omega_r$

# 目 录

第 1 章 传递过程导论 .....	1
<b>基本概念</b> .....	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
<b>数学基础</b> .....	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
<b>分析方法</b> .....	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

第 2 章 传递量衡算、扩散传递本构 方程、传递方程组 .....	24
<b>物量衡算</b> .....	24
2.1 有关概念 .....	24
2.1.1 浓度、组元速度和通量 .....	24
2.1.2 溶液速度和通量 .....	25
2.2 溶液中的扩散和化学变化 .....	27
2.2.1 组元扩散通量本构方程 .....	27
2.2.2 浓度扩散、M-S 方程、拟 二元扩散系数 .....	29
2.2.3 化学反应 .....	31
2.3 物量衡算方程 .....	32
2.3.1 组元质量衡算和质量 基准 .....	32
2.3.2 溶液（全组元）质量衡算 .....	33
2.3.3 摩尔衡算和摩尔基准 .....	35
<b>动量衡算</b> .....	35
2.4 有关概念 .....	35
2.4.1 外力类型和应力状态 .....	36
2.4.2 应力性质 .....	37
2.5 动量扩散本构方程 .....	39
2.5.1 Newton 型流体 .....	39
2.5.2 非 Newton 型流体 .....	40
2.6 动量衡算及有关方程 .....	42
2.6.1 动量衡算方程 .....	42
2.6.2 动量矩衡算方程 .....	44
2.6.3 动能变化方程——机械能 衡算方程 .....	45
<b>能量衡算和熵衡算</b> .....	48
2.7 能量衡算 .....	48
2.7.1 以比能量表示的衡 算方程 .....	48

2.7.2	以温度表示的衡算方程	50
2.8	熵衡算	53
2.8.1	熵衡算方程	53
2.8.2	熵产生率密度	54
	<b>传递方程组的定解</b>	56
2.9	定解说明	56
2.9.1	定解前提	57
2.9.2	近壁工况和传递系数	58
2.10	其他形式和解法概述	61
2.10.1	正交曲线坐标系的运用和传递方程组汇总	61
2.10.2	无量纲式和传递过程中的特征数汇总	66
2.10.3	解法概述	68
	习题	69
	参考文献	70

### 第3章 传递方程组的典型解和分析解法

	<b>扩散传递</b>	71
3.1	基本解法	72
3.1.1	扩散传递方程和定解条件的整形	72
3.1.2	组合变量法, 广平壁单向暂态扩散 (B. C. I)	74
3.1.3	拉氏变换法, 广平壁单向暂态扩散 (B. C. III)	76
3.1.4	分离变量法, 广平壁双向暂态扩散 (B. C. III, B. C. I)	77
3.2	化工要例	81
3.2.1	球体	81
3.2.2	正六面体	83
3.2.3	圆柱段	85
	<b>理想流体运动</b>	88
3.3	理想流体运动的解法和实例	89
3.3.1	位函数法和流函数法	89
3.3.2	Bernoulli 方程	92
3.3.3	复位势法	93
3.3.4	叠加位势法	95

	<b>层流传递</b>	99
3.4	层流传递简化情况	99
3.4.1	沿斜壁稳态层流	99
3.4.2	沿圆管稳态层流	103
3.4.3	绕球稳态爬流	107
3.5	层流边界层传递	111
3.5.1	边界层模型	112
3.5.2	层流边界层方程组	113
3.5.3	边界层传递中的相似性和相似转换	115
3.5.4	沿楔层流边界层传递解	117
3.5.5	边界层积分方程组	122
3.5.6	边界层分离	126
	<b>湍流传递</b>	127
3.6	湍流传递基础	127
3.6.1	流型转变	128
3.6.2	湍流特征	129
3.6.3	时均方程组	132
3.7	沿壁湍流	135
3.7.1	沿壁湍流核心区模型	136
3.7.2	沿管湍流速度分布及阻力系数	137
3.7.3	沿平板湍流阻力系数和三传湍流类比	141
3.8	非沿壁湍流	145
3.8.1	自由流动提要	145
3.8.2	圆形淹没射流	148
3.8.3	Taylor 涡流扩散 (弥散)	150
	习题	151
	参考文献	152

### 第4章 传递方程组的数值解法

	<b>有限差分法</b>	154
4.1	域内节点方程组	154
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
	<b>有限单元法</b>	167		<b>相际传递通量</b>	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	<b>第6章 热质及化学变化传递</b>		217
4.6.1	节点方程组的建立	171		<b>热质传递过程</b>	217
4.6.2	方程系数和常数的求法	172	6.1	多元扩散本构方程及其矩	
4.7	有限体积法	174		阵形式补充	217
	习题	175	6.1.1	普化 Maxwell-Stefan	
	参考文献	176		方程	217
<b>第5章 相际传递</b>		177	6.1.2	普化 Fick 定律	219
	<b>相界面及其传递工况</b>	177	6.2	相际热质传递中多元工	
5.1	相界面	177		况补充	220
5.1.1	界面张力	178	6.2.1	界面两侧强度量关系, 相	
5.1.2	Laplace 公式和 Kelvin			平衡比值矩阵和斜率	
	公式	179		矩阵	220
5.1.3	毛细现象	180	6.2.2	界面两侧通量关系, 补定	
5.1.4	阻挡效应和 Marangoni			条件和补定矩阵	221
	效应	183	6.3	多元溶液的界旁扩散通量	223
5.1.5	宏观产生的界面对		6.3.1	界旁多元扩散膜模型	223
	流运动	184	6.3.2	单相膜模型解求	
5.2	界面传递工况	185		(J) 和 (N)	226
5.2.1	双相物系的传递定理、		6.4	相际多元溶液传质通量	229
	相变通量	185	6.4.1	总传质系数	229
5.2.2	双相物系的传递量衡算和		6.4.2	相界面组成	230
	相界面两侧传递通		6.5	调湿过程	230
	量关系	187	6.5.1	调湿工况	230
5.2.3	界面边界条件	189	6.5.2	调湿分析	231
	<b>界旁传递模型及实例</b>	192	6.6	蒸馏过程	232
5.3	界旁传递模型	192	6.6.1	界面局部工况分析	232
5.3.1	膜模型	193	6.6.2	非平衡级分析	235
5.3.2	渗入模型	195	6.6.3	传质系数的估计	237
5.3.3	界面更新模型	198		<b>化学变化传递过程</b>	238
5.3.4	传递模型中的三传类比		6.7	化学变化传递的分析基础	238
	和小结	199			



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级飞速度学变化传质	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)级化学变化传递	248

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 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<sup>[1~3]</sup>。

### 1.1 物相性质

#### 1.1.1 物相性质含义<sup>[4,5]</sup>

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  $\Omega$  时的概率密度，则  $p(\Omega)d\Omega$  为粒群运动状态处于  $\Omega$  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<sup>[4]</sup>，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  $\Omega$  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<sup>[4]</sup>。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  $2.7 \times 10^{19}$  个/cm<sup>3</sup>，这时有以下相应量

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

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

$$\text{分子数} = 2.7 \times 10^7 \longrightarrow \text{物性已无起伏}$$

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 and 强度量。换算关系为

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

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

$$G = \int_w f dW = \int_V \rho f dV$$

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<sup>[6]</sup>或物性专著<sup>[7]</sup>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 <sup>3</sup> 溶液
溶液质量, kg	1,	kg/kg
溶液体积, m <sup>3</sup>	比体积 $v$ ,	m <sup>3</sup> /kg
A 元质量, kg	A 元比质量 $\omega_A$ ,	kgA/kg
动能, kg·m/s	比动能 $\vec{u}$ ,	(kg·m/s)/kg
动能, J	比动能 $u^2/2$ ,	J/kg
内能, J	比内能 $\epsilon$ ,	J/kg
焓, J	比焓 $h$ ,	J/kg
		溶液质量密度 $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>
		1, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
		A 元质量密度 $\rho_A$ , kgA/m <sup>3</sup>
		动能密度 $\rho \vec{u}$ , (kg·m/s)/m <sup>3</sup>
		动能密度 $\rho u^2/2$ , J/m <sup>3</sup>
		内能密度 $\rho \epsilon$ , J/m <sup>3</sup>
		焓密度 $\rho h$ , J/m <sup>3</sup>

## 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、对流传体和辐射传递，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  $\omega_A$  高处扩散至低处。

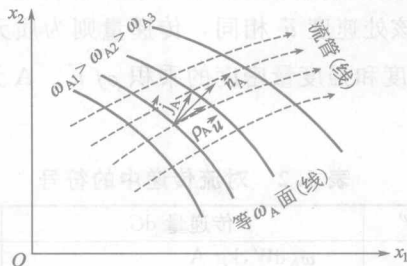


图 1.1 传递方式示意

(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  $\nabla f$  相反，传递通量在低  $\nabla f$  下与之成正比，这就是唯象律，是扩散传递现象的实验规律<sup>[1]</sup>。

Fick 扩散定律（二元扩散）：

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

Fourier 导热定律：

① 对于  $\rho \neq \text{常数}$  的情况，右式是不正确的。如暖气片旁空气， $\rho_A$  不为常数，但  $\omega_A$  为常数，故  $j_{AS} = 0$ <sup>[14]</sup>。