



全国高等院校化工类专业规划教材

化工传递过程导论

(第二版)

阎建民 刘 辉 编著



科学出版社

全国高等院校化工类专业规划教材

化工传递过程导论

(第二版)

阎建民 刘 辉 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是化工传递过程方面的基础教材,内容上重视传递过程物理原理解释和化工过程量化方法的阐述。第1章旨在帮助读者迅速理解课程的内容和意义;第12章总结了传递模型化方法并通过实例让读者领略其魅力;主体内容第2~11章依次介绍了动量传递、热量传递和质量传递,其中第2、5、8章分别介绍了各种传递过程的机理和模型,第3、6、9章讲解了各种分子传递过程的求解分析,第4、7、11章则介绍了对流传递现象的规律和量化方法,第10章补充了化工过程具有重要意义的多组分体系扩散传质的模型化方法。各章均附有例题、思考题和习题,并通过“学习提示”和“拓展文献”帮助读者理解运用本书内容。

本书可作为高等理工院校化学工程与工艺专业学生的基础教材或教学参考书,也可作为石油化工、环境工程、冶金工程、轻化工程等有关专业的研究人员和高校教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工传递过程导论 / 阎建民, 刘辉编著. —2版. —北京: 科学出版社, 2019.12

ISBN 978-7-03-062668-4

I. ①化… II. ①闫…②刘… III. ①化工过程-传递-教材 IV. ①TQ021

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第233567号

责任编辑: 陈雅娴 李丽娇 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

涿州市东南印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年7月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019年12月第 二 版 印张: 18 3/4

2019年12月第五次印刷 字数: 451 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

第二版前言

本书第一版问世已 10 年。此次修订中,在保持原总体结构和特色风格的前提下,对部分内容进行了调整、更新更正和充实,以期更好地帮助学生理解化工过程的基本原理。特别补充了一些在化工过程开发设计中重要性日趋显现、同时在化工基础教材中普遍被忽视的内容。例如,动量传递部分增加了化工过程常见的多相流问题简介,湍流部分增加了目前湍流计算常用的湍动能及其耗散的 $k-\varepsilon$ 模式的阐释;热量传递中完善了对辐射的基本概念和原理的介绍;质量传递中除补充多组分体系扩散传质模型外,还完善了对流体相际传质模型的解释。

笔者编写了与动量和热量传递相关的第 1~7 章,并承担了最后的统稿工作。刘辉教授编写了与质量传递相关的第 8~11 章,以及模型化方法运用展示的第 12 章。质量传递是“三传”中最具化工特色的传递过程,由于传统的菲克扩散模型用于多组分物系存在的局限,以及相应扩散系数在实验测量方法上的巨大困难,扩散系数在工程计算中的应用远落后于流动和传热中对应的传递系数(黏度和导热系数),多组分传质过程分析也基本属于目前国内化工专业本科教育阶段的知识盲点。Maxwell-Stefan(MS)扩散模型可以使用二元体系的扩散系数计算多组分物系内的扩散,并在 21 世纪已成功用于诸多工程传质问题的计算。此次修订增补了第 10 章与 MS 模型以及多组分菲克模型相关的内容,期望可以弥补国内同类教材在这方面的欠缺,同时促进传质教学更好地适应化工学科在这方面的发展趋势。作为教学信息化的尝试,笔者录制了几个教学短视频,可扫描书中的二维码观看,希望有助于读者对相关内容理解。

最后,感谢上海交通大学化工学科建设基金的资助和院系相关领导、老师的支持,感谢科学出版社责任编辑耐心细致的审阅校对。

由于笔者水平所限,书中难免有疏漏之处,希望读者批评指正。

阎建民

2019 年 5 月于交大园

第一版前言

化工生产过程千变万化,但本质上涉及的基本物理现象却有限。读者在学习中将逐渐认识到,掌握流动、传热与传质三种传递现象的物理规律是理解众多的新老化工操作单元的基础。近年流程模拟及计算流体力学软件正在深刻影响着化工基础课程的教学,在过程计算变得方便的情况下,仍离不开基本原理的指导。结合传递现象基本原理,学生可以更好更快地领会重要化工过程的原理,并便于日后将其用于解决复杂的实际工程问题。当前,许多学生更加注重知识的实用性,但过分强调知识的功利性也难免使人堕入“知识无用”的误区。我们应意识到:教育过程作为“特殊的生活过程”,乃是受教育引导的个人生活逐渐展开的过程,知识赋予一个人的综合素质绝非一蹴而就。

在长期的教学实践中,笔者注意到,一些学生往往被教材中连篇的数学公式所羁绊,学习传递课程成为他们必须经历的一场“囫途”;还有一些学生的学习视野完全被相关的数学推演所迷惑,而忽视了这些推演所欲深入揭示的那些鲜活多样的化工过程,以及日常生活中的流水潺潺、乍暖还寒和暗香浮动等现象。传递课程也因此在学生中素有“老虎课程”的形象。毋庸置疑,传递课程需要数学语言,不断涌现的传递教材也大多很注重基本理论描述的数学严谨性。笔者也认同:培养学生的数学思想和意识,理解掌握化工过程的量化方法,是本课程学习的主要目的之一。同时,数学于本课程的作用,更应该是理解传递现象之物理本质的工具,学习中更应强调物理概念、方程的物理解释以及所得结果在物理上的合理性。

教学中固然要引导学生理解、重视数学模型的理论意义,但如何通过有限的学时,让学生充分认识到传递课程中抽象数学模型的实用性和方法论意义,在数学模型的学习中自觉地把握千差万别化工过程的一些共性规律呢?基于这方面的理解和思考,笔者与北京化工大学刘辉教授共同编写了本书,旨在阐释动量、热量和质量传递过程的基本规律和一些重要的量化方法。内容上,在不影响读者理解的前提下力求简化数学处理,更强调对传递过程物理意义的理解和过程模型化方法的学习领会。在形式上,编者通过“学习提示”阐释对学科内容的一些体会,也希望给读者一些启发,并对内容进行总结归纳;各章节提供“拓展文献”帮助有心的读者开阔视野,以更好地理解课程内容及其与化工过程的联系。在篇章结构上,逐一讲解动量、热量和质量传递,以方便学生对传递过程物理意义的理解。

质量传递是“三传”中最具化工特色的传递过程,刘辉教授编写了相关的第8~11章,其中融入了他长年在传质领域从事科研和教学工作的诸多心得体会,并特别强调传质理论在分离单元操作、工业反应器分析中的作用。笔者编写了第1~7章,并承担了最后统稿工作。刘辉教授对书稿其余部分也提出了许多中肯的意见。

化学工程与工艺专业学生在学习化工原理或化学工程基础过程中或学习之后,可将本书作为基础教材或教学参考书,也可作为化工类其他专业的选修课教材。

华东理工大学戴干策教授和中国科学院过程研究所毛在砂研究员分别审阅了全部书稿,两位前辈都是传递学科领域的著名学者,他们在充分肯定书稿质量的同时也提供了睿智的指导意见,并指出了许多具体的表达疏漏或文字缺欠,为本书增色良多。戴干策先生细致地阐

释了他对书中一些内容安排、重要概念讲解的看法，笔者在讨论中对学科现状及教学内容安排方面受到很多启发。在此，向两位先生恭致谢忱。

另外，本书编写过程中参考了许多同类书籍资料，一并列在书末对各位编著者表示衷心的感谢。

最后，感谢上海交通大学教材出版基金的资助和院校相关领导、老师的支持。

由于笔者水平所限，书中难免有疏漏谬误之处，希望读者批评指正(笔者电子邮箱地址为yanjm@sjtu.edu.cn)。

阎建民

2009年3月于交大园

主要符号说明

英文符号

A	面积	m^2
A_m	对数平均面积	m^2
a_i	组分 i 活度	量纲为一
C	混合物的总摩尔浓度	mol/m^3
C_D	阻力系数	量纲为一
C_{Dx}	局部阻力系数	量纲为一
C_μ	涡流黏度计算常数	量纲为一
c	摩尔浓度	mol/m^3
c_p	定压比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_v	定容比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c'	浓度脉动	mol/m^3
D	直径	m
D	菲克扩散系数	m^2/s
$D_{i,\text{eff}}$	组分 i 相对其余组分的分子扩散系数	m^2/s
D_{ij}^0	无限稀释扩散系数	m^2/s
$\bar{D}$	MS 扩散系数	m^2/s
d	圆管管径	m
d_e	当量直径	m
d_{jump}	表面扩散的跳跃距离	m
E	扩散活化能	J/mol
E_{mv}	塔板板效率	量纲为一
e	绝对粗糙度	m
F	力、外力或传质驱动力	N
F_B	体积力	N

F_{df}	摩擦曳力	N
F_{ds}	形体曳力	N
F_G	角系数	量纲为一
F_s	表面力	N
F_e	灰体黑度的校正因子	量纲为一
f	范宁摩擦因数	量纲为一
g	重力加速度	m/s^2
h	对流传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
h_m	平均对流传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
h_x	局部对流传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
I	湍流强度	量纲为一
J	扩散的摩尔通量	$mol/(m^2 \cdot s)$
j	扩散的质量通量	$kg/(m^2 \cdot s)$
k	湍流尺度相关的波数	$1/m$
k	湍动能	J
k	导热系数	$W/(m \cdot K)$
k	玻尔兹曼常量= 1.38×10^{-23}	J/K
k_c	对流传质系数	m/s
k_c^0	对流传质系数(仅考虑纯粹的扩散传质)	m/s
k_{cm}	平均对流传质系数	m/s
k_{cx}	局部对流传质系数	m/s
L	长度、特征长度	m
l	混合长	m
l	涡旋大小相关的湍流尺度	m
l_c	肋片的特征尺寸	m
l_e	特征尺寸	m
M	力矩	$N \cdot m$
M	相对分子质量	量纲为一
$\dot{M}$	传质摩尔速率	mol/s

m	质量	kg
N	传质的摩尔通量	$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
n	传质的质量通量	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
P_0	驻点压强	N/m^2
p	压强	N/m^2
p_d	动力压强	N/m^2
p_s	静压强	N/m^2
Q	热流速率	J/s
$\dot{Q}$	单位质量流体所吸收的热	J/kg
q	热通量	W/m^2
$\dot{q}$	内热源产热速率	$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
R	半径	m
R	摩尔气体常量=8.31451	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
R	反应速率	$\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
R	脉动速度相关系数	量纲为一
r	管半径	m
T	温度	K
T_b	流体主体温度	K
T_m	液膜温度	K
T_s	环境流体温度	K
T_w	壁面温度	K
T_0	初始温度	K
t	时间	s
U	单位质量流体的热力学能	J/kg
u	流动速度、传质的质量平均速度	m/s
u_b	主体平均流速	m/s
u_m	摩尔平均流速	m/s
u_0	边界层外的均匀流速	m/s
$\bar{u}$	分子速度的平均值	m/s

u'	流体微团的脉动速度	m/s
u^*	摩擦速度	m/s
V	体积	m ³
V_s	体积流率	m ³ /s
v_A^T	表面扩散组分的热运动速度	m/s
W	功	J
$\dot{W}$	单位质量流体对环境所做的功	J
w	质量流率	kg/s
x, y	液体、气体的摩尔分数	量纲为一
y^*	摩擦距离	m
希腊文符号		
α	质量分数	量纲为一
α	导温系数	m ² /s
β	热膨胀系数	1/K
Γ	热力学校正因子	量纲为一
γ	固体内孔道的收束因子	量纲为一
γ	活度系数	量纲为一
δ	速度边界层厚度, 液膜厚度	m
δ_f	静止膜层厚度	m
δ_D	浓度边界层厚度	m
δ_T	温度边界层厚度	m
ε	湍动能耗散率	J/s
ε	固体基体的空隙率	量纲为一
ε_M	涡流扩散系数	m ² /s
ζ	MS 摩擦系数	N · s/(mol · m)
η	肋效率	量纲为一
λ	分子平均自由程	m/s
λ_A	组分 A 的摩尔蒸发焓	J
μ	黏度	Pa · s

μ	化学势	J/mol
ν	运动黏度	m ² /s
ν'	涡流黏度	m ² /s
ρ	密度	kg/m ³
σ_0	斯特藩-玻尔兹曼常量=5.67×10 ⁻⁸	W/(m ² · K ⁴)
τ	剪切力	N/m ²
τ	固体内孔道的曲径因子	量纲为一
τ_s	壁面剪应力	N/m ²
τ'	涡流剪应力	N/m ²
φ	势函数	m ² /s
ϕ	内摩擦耗散热	J/(m ³ · s)
ψ	流函数	m ² /s
下标		
$x/y/z$	直角坐标系的坐标分量	
$r/\theta/z$	柱坐标系的坐标分量	
$r/\theta/\varphi$	球坐标系的坐标分量	
$i/j/k$	坐标系的任意方向坐标分量	
A/B、1/2	二元体系的组分	
i	多元体系的 i 组分	
量纲为一数群		定义式
Bi	毕渥数	$\frac{hl}{k}$
C_A^*	量纲为一的浓度	$\frac{c_A - c_{As}}{c_{A0} - c_{As}}$
Fi	菲克数	$\frac{tD_{AB}}{x^2}$
Fo	傅里叶数	$\frac{at}{R^2}$
Fr	弗劳德数，外弗劳德数	$\frac{U^2}{gL}$
Gr	格拉斯霍夫数	$\frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2}$

Kn	克努森数	$\frac{\lambda}{d_p}$
Nu	努塞特数	$\frac{hx}{k}$
Pr	普朗特数	$\frac{v}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k}$
Re	雷诺数	$\frac{\rho u_b d}{\mu}$
Sc	施密特数	$\frac{\mu}{\rho D}$
Sh	舍伍德数	$\frac{k_c^0 L}{D_{AB}}$
T^*	量纲为一的温度	$\frac{T - T_w}{T_0 - T_w}$
u^+	量纲为一的速度	$u \sqrt{\frac{\rho}{\tau_s}}$
y^+	量纲为一的距离	$\frac{\sqrt{\tau_s \rho}}{\mu} y$
η	量纲为一的位置	$y \sqrt{\frac{u_0}{\nu x}}$

目 录

第二版前言

第一版前言

主要符号说明

第 1 章 绪论	1
1.1 化工科学的发展与传递学科的成长	1
1.2 化工过程的平衡与速率	3
1.3 传递过程速率的量化方法	4
拓展文献	8
学习提示	8
思考题	8
习题	9
第 2 章 流体流动及其微分方程	10
2.1 流体与流动的基本概念	10
2.1.1 连续介质假定	10
2.1.2 流速和流率	11
2.1.3 定态流动与非定态流动	11
2.1.4 外部流动与内部流动	12
2.1.5 黏性流体与理想流体	12
2.1.6 层流和湍流	12
2.1.7 牛顿黏性定律	13
2.1.8 动量传递现象	14
2.1.9 流动阻力与阻力系数	15
2.2 描述流动问题的方法	15
2.2.1 系统和控制体	16
2.2.2 拉格朗日法和欧拉法	16
2.2.3 物理量的时间导数	17
2.3 微分质量衡算与连续性方程	18
2.3.1 连续性方程的推导	18
2.3.2 连续性方程的分析	19
2.3.3 柱坐标系和球坐标系中的连续性方程	20
2.4 流体的受力	21
2.4.1 体积力和表面力	21
2.4.2 表面应力与应变速率的关系	23
2.5 一维流动的薄壳动量衡算	25
2.5.1 薄壳衡算	25

2.5.2 通过圆管的流动	26
2.6 微分运动方程	29
2.6.1 用应力表示的微分运动方程	29
2.6.2 运动方程与机械能方程	31
2.6.3 纳维-斯托克斯方程	32
2.6.4 纳维-斯托克斯方程的求解	34
2.7 量纲分析与放大	36
2.7.1 量纲与单位	37
2.7.2 纳维-斯托克斯方程的量纲分析	38
2.7.3 白金汉方法	41
拓展文献	46
学习提示	46
思考题	47
习题	47
第3章 微分运动方程的若干解析	50
3.1 一维定态流动	50
3.1.1 平壁间定态层流	50
3.1.2 平壁面上降膜流动	52
3.1.3 套管环隙间的轴向定态层流	53
3.1.4 套管环隙间的周向层流	56
3.2 非定态流动问题简介	58
3.3 流函数和势函数	61
3.3.1 平面流、轴对称流动和流函数	61
3.3.2 流线和迹线	62
3.3.3 理想流体和欧拉方程	63
3.3.4 势流和势函数	63
3.4 二维绕流	64
3.4.1 绕无限长圆柱体的势流	64
3.4.2 爬流	66
拓展文献	69
学习提示	70
思考题	70
习题	71
第4章 边界层流动与相际动量传递	73
4.1 边界层流动	73
4.1.1 边界层概念	74
4.1.2 平板层流边界层方程	75
4.1.3 平板层流边界层方程的精确解	76
4.1.4 边界层的分离和尾流	80
4.2 湍流流动	81

4.2.1 湍流与湍流边界层	81
4.2.2 湍流的表征	84
4.2.3 雷诺方程和雷诺应力	85
4.2.4 湍流的半经验模型	86
4.2.5 壁湍流的通用速度分布	88
4.2.6 湍动能及其耗散	90
4.2.7 k - ε 模式方程	92
4.3 圆管入口段流动和湍流流动	93
4.3.1 圆管入口段流动	93
4.3.2 圆管湍流的速度分布	94
4.3.3 光滑圆管湍流的范宁摩擦因数	95
4.3.4 粗糙圆管湍流的范宁摩擦因数	96
4.4 卡门动量积分方程	98
4.4.1 平板上边界层的动量衡算	98
4.4.2 平板上层流边界层的近似解	101
4.4.3 平板上湍流边界层的近似解	102
4.5 多相流问题简介	104
拓展文献	106
学习提示	107
思考题	107
习题	108
第 5 章 热量传递及其微分方程	110
5.1 热量传递方式	111
5.1.1 热传导	111
5.1.2 对流传热	112
5.1.3 热辐射	113
5.1.4 实例说明	116
5.2 能量方程	117
5.2.1 能量方程的推导	117
5.2.2 能量方程的特定形式	119
5.2.3 柱坐标系和球坐标系的能量方程	120
5.2.4 能量方程的定解条件	121
拓展文献	122
学习提示	122
思考题	122
习题	123
第 6 章 热传导	124
6.1 定态热传导	124
6.1.1 无内热源的一维定态热传导	124
6.1.2 有内热源的一维定态热传导	127

6.1.3 肋的定态热传导	128
6.1.4 多维定态热传导	131
6.2 非定态热传导	134
6.2.1 非定态热传导过程概述	134
6.2.2 忽略内部热阻的非定态导热与集总热容法	137
6.2.3 内部和表面热阻均不可忽略的一维非定态导热	139
6.2.4 多维非定态导热	141
拓展文献	143
学习提示	143
思考题	144
习题	144
第7章 对流传热	147
7.1 对流传热与对流传热系数	147
7.1.1 对流传热的种类与研究方法	147
7.1.2 温度边界层、流体温度分布与对流传热系数	148
7.2 平板壁面对流传热	150
7.2.1 平板壁面上层流传热的精确解	150
7.2.2 平板壁面上层流传热的近似解	153
7.2.3 平板壁面上湍流传热的近似解	155
7.3 圆管内对流传热	156
7.3.1 圆管内对流传热系数	157
7.3.2 圆管入口段的对流传热	158
7.3.3 圆管内强制层流传热的理论分析	159
7.3.4 圆管内强制对流传热的经验关联式	162
7.4 自然对流传热简介	164
拓展文献	165
学习提示	166
思考题	166
习题	167
第8章 质量传递：现象、机理及模型	169
8.1 过程单元中的传质	169
8.2 传质机理	171
8.2.1 扩散传质	171
8.2.2 对流传质	173
8.2.3 传质的工程描述	173
8.3 传质中的基本物理量	175
8.3.1 物质的数量、浓度和组成	175
8.3.2 传质速度	175
8.3.3 传质通量	177
8.4 传质微分方程	179

8.4.1 传质微分方程的建立	179
8.4.2 传质微分方程的应用和求解	181
拓展文献	184
学习提示	185
思考题	185
习题	185
第 9 章 两组分气体、液体及固体混合物中的扩散传质	187
9.1 两组分气体中的定态扩散传质	187
9.1.1 组分 A 经停滞组分 B 的定态扩散	187
9.1.2 等分子反方向定态扩散	190
9.1.3 伴有化学反应的定态扩散	192
9.1.4 气体中组分的扩散系数	193
9.2 两组分液体中的定态扩散传质	194
9.2.1 液体中的扩散和扩散系数	194
9.2.2 液体两组分混合物中的定态扩散	197
9.3 两组分固体中的定态扩散传质	198
9.3.1 非结构化扩散模型	199
9.3.2 结构化扩散模型	201
9.4 停滞介质中非定态扩散传质：热质类比法	205
9.4.1 问题的提出	205
9.4.2 热质类比法求解示例	207
拓展文献	208
学习提示	208
思考题	209
习题	210
第 10 章 多组分传质的 Maxwell-Stefan 模型和菲克模型	212
10.1 多组分传质的 Maxwell-Stefan 模型	212
10.1.1 问题的引出	212
10.1.2 MS 方程的导出	213
10.1.3 MS 方程中的其他驱动力及其一般形式	215
10.1.4 MS 方程的附加关系	218
10.1.5 MS 方程中的摩擦系数和扩散系数	218
10.1.6 MS 方程的差分近似	219
10.1.7 MS 方程应用示例：差分近似计算	221
10.2 多组分传质的菲克模型	223
10.2.1 简要回顾两组分混合物中的菲克模型	223
10.2.2 从两组分到多组分：菲克模型的有效扩散系数法	225
10.2.3 从两组分到多组分：一般化菲克模型	227
拓展文献	234
学习提示	235