

21

世纪高等院校教材·化工类

化工传递过程导论

阎建民 刘 辉 编



科学出版社

www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

化工传递过程导论

阎建民 刘 辉 编

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及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11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2~10章依次介绍了动量传递、热量传递和质量传递,每种传递过程均为3章篇幅并相互对应,其中,第2、5、8章分别介绍各种传递过程的机理和模型,第3、6、9章讲解各种分子传递过程的求解分析,第4、7、10章则介绍对流传递现象的规律和量化方法。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的本科生教材,也可作为石油化工、冶金工程、轻化工程、高分子化工、生物工程、环境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. —北京:科学出版社,2009
21世纪高等院校教材

ISBN 978-7-03-024874-9

I. 化… II. ①阎… ②刘… III. 化工过程-高等学校-教材
IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 105623 号

责任编辑:杨向萍 陈雅娟 魏晓焱 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年7月第一版 开本:B5(720×1000)
2009年7月第一次印刷 印张:19 3/4
印数:1—3 500 字数:373 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



科学出版社 高等教育出版中心

教学支持说明

科学出版社高等教育出版中心为了对教师的教学提供支持，特对教师免费提供本教材的电子课件，以方便教师教学。

获取电子课件的教师需要填写如下情况的调查表，以确保本电子课件仅为任课教师获得，并保证只能用于教学，不得复制传播用于商业用途。否则，科学出版社保留诉诸法律的权利。

地址：北京市东黄城根北街 16 号，100717

科学出版社 高等教育出版中心 化学与资源环境分社 杨向萍（收）

电话：010-64015208

传真：010-64033787

（登陆科学出版社网站：www.sciencep.com “教材天地”栏目可下载本表。）

请将本证明签字盖章后，传真或者邮寄到本社，我们确认销售记录后立即赠送。

如果您对本书有任何意见和建议，也欢迎您告诉我们。意见经采纳，我们将赠送书目，教师可以免费赠书一本。

证 明

兹证明 _____ 大学 _____ 学院 / _____ 系
第 _____ 学年 上 / 下学期开设的课程，采用科学出版社出版的
_____ / _____（书名/作者）作为上课教
材。任课老师为 _____ 共 _____ 人，学生 _____ 个
班共 _____ 人。

任课教师需要与本教材配套的电子课件。

电 话： _____

传 真： _____

E-mail： _____

地 址： _____

邮 编： _____

院长/系主任： _____（签字）

（盖章）

_____ 年 _____ 月 _____ 日

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是有限的。掌握动量传递、热量传递、质量传递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。古人云“格物致知”,以此强调基本原理对于认识世界的重要性,当代美国更通过重视基础研究最终奠定了在技术创新上的领先地位。当前,许多学生更加注重知识的实用性,但快餐不能造就健康,过分强调知识的功利色彩终将导致“知识无用”。读者应意识到: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,知识赋予一个人的内涵绝非一蹴而就。传递课程的内容似乎远离化工生产实际,却为学习者提供了认识各种过程的定量意识和方法。

在长期的教学实践中,笔者注意到,一些数学基础较差的学生往往被教材中连篇的数学公式吓住,传递课程成为他们必须经历的一次痛苦之旅;还有一些学生,包括某些优秀的学生,其学习视野完全被课程内容相关的数学推演所遮盖,而对相关联的化工过程及日常生活的广阔天地熟视无睹。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都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量化方法的学习领会。在形式上,笔者通过“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,介绍动量和热量传递,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,向两位先生致谢忱。

另外,在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(笔者的电子邮箱地址为 yanjm@sytu.edu.cn)。

阎建民于交大园

2009年3月

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
C	混合物的总物质的量浓度	mol/m^3
C_D	阻力系数	无因次
C_{De}	局部阻力系数	无因次
c	物质的量浓度	mol/m^3
c_v	定容比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_p	定压比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c'	浓度脉动	mol/m^3
D	直径	m
D_{AB}	组分 A 相对 B 的分子扩散系数	m^2/s
$D_{i, \text{mixture}}$	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
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_m	塔板效率	无因次
e	绝对粗糙度	m
F	力, 外力	N
F_B	体积力	N
F_{df}	摩擦曳力	N
F_{ds}	形体曳力	N
F_s	表面力	N
F_ϵ	灰体黑度的校正因子	无因次
F_G	角系数	无因次
f	范宁摩擦系数	无因次
g	重力加速度	m/s^2

h	对流传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
h_x	局部对流传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
h_m	平均对流传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
I	湍流强度	无因次
j	分子扩散的质量通量	$kg/m^2 \cdot s$
J	分子扩散的摩尔通量	$mol/m^2 \cdot s$
k	导热系数	$W/(m \cdot K)$
k	玻耳兹曼常量 $k = 1.38 \times 10^{-23}$	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_{cx}	局部对流传质系数	m/s
k_{cm}	平均对流传质系数	m/s
l	混合长	m
L	长度、特征长度	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	无量纲
\dot{M}	摩尔速率	mol/s
m	质量	kg
n	传质的质量通量	$kg/m^2 \cdot s$
N	传质的摩尔通量	$mol/m^2 \cdot s$
P_0	驻点压力	N/m^2
p	压力	N/m^2
p_s	静压力	N/m^2
p_d	动力压力	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	$J/(m^3 \cdot s)$
R	半径	m
R	摩尔气体常量 $R = 8.31451$	$J/(mol \cdot K)$
R	反应速率	$mol/(m^3 \cdot s)$
r	管半径	m
t	时间	s

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
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
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
ν_A^T	表面扩散组分的热运动速度	m/s
w	质量流率	kg/s
W	功	J
\dot{W}	单位质量流体对环境所做的功	J
X, y	液体和气体的摩尔分数	无量纲
y^*	摩擦距离	m
希腊文符号		
α	质量分数	无量纲
α	导温系数	m ² /s
β	热膨胀系数	1/K
δ	速度边界层厚度, 液膜厚度	m
δ_f	静止膜层厚度	m
δ_T	温度边界层厚度	m
δ_D	浓度边界层厚度	m
λ	分子平均自由程	m/s
λ_A	组分 A 的摩尔蒸发焓	J
ψ	流函数	m ² /s
φ	势函数	m ² /s
ν	运动黏度	m ² /s
ρ	密度	kg/m ³

σ_0	斯蒂芬-玻耳兹曼常量 $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8}$	$W/(m^2 \cdot K^4)$
η	肋效率	无量纲
μ	黏度	$N \cdot s/m^2$
μ	化学势	$Pa \cdot s$
τ	剪切力	N/m^2
τ	固体内孔道的曲径因子	无量纲
τ_s	壁面剪应力	N/m^2
τ'	涡流剪应力	N/m^2
ϕ	内摩擦耗散热	$J/(m^3 \cdot s)$
ϵ	固体基体的空隙率	无量纲
ϵ	涡流黏度	m^2/s
ϵ_M	涡流扩散系数	m^2/s
γ	固体内孔道的收束因子	无量纲

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
A/B、1/2	二元体系的组分标识
i	多元体系的 i 组分标识

无量纲数群

		定义式
Bi	毕渥数	$\frac{hl}{k}$
C_A^*	无量纲浓度	$\frac{c_A - c_{As}}{c_{A0} - c_{As}}$
Fi	费克数	$\frac{tD_{AB}}{x^2}$
Fo	傅里叶数	$\frac{at}{R^2}$
Gr	格拉斯霍夫数	$\frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2}$
Kn	努森数	$\frac{\lambda}{d_p}$
Nu	努塞尔数	$\frac{hx}{k}$
Pr	普朗德常数	$\frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k}$
Re	雷诺数	$\frac{\rho u_b d}{\mu}$

Sc	施密特数	$\frac{\eta}{\rho D}$
Sh	施伍德数	$\frac{k_c^0 L}{D_{AB}}$
T^*	无量纲温度	$\frac{T - T_w}{T_0 - T_w}$
u^+	无量纲速度	$u \sqrt{\frac{\rho}{\tau_s}}$
y^+	无量纲距离	$\frac{\sqrt{\tau_s \rho} y}{\mu}$
η	无量纲位置	$y \sqrt{\frac{u_0}{\nu x}}$

目 录

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	5
拓展文献	9
学习提示	10
思考题	10
习题	10
第 2 章 流体流动的机理与模型化	12
2.1 流体与流动的基本概念	12
2.1.1 流体的连续性	12
2.1.2 流速和流率	13
2.1.3 定态流动与非定态流动	14
2.1.4 黏性流体与理想流体	14
2.1.5 层流和湍流	14
2.1.6 牛顿黏性定律	15
2.1.7 动量传递现象	16
2.1.8 流动阻力与阻力系数	18
2.2 描述流动问题的方法	19
2.2.1 系统和控制体	19
2.2.2 拉格朗日法和欧拉法	19
2.2.3 物理量的时间导数	20
2.3 微分质量衡算与连续性方程	21
2.3.1 连续性方程的推导	21
2.3.2 连续性方程的分析	23
2.3.3 柱坐标系和球坐标系中的连续性方程	24
2.4 流体的受力	25

2.4.1	体积力和表面力	26
2.4.2	表面应力与应变速率的关系	28
2.5	一维流动的薄壳动量衡算	30
2.5.1	薄壳衡算	30
2.5.2	通过圆管的流动	31
2.6	微分运动方程	35
2.6.1	用应力表示的微分运动方程	35
2.6.2	运动方程与机械能方程	37
2.6.3	奈维-斯托克斯方程	38
2.6.4	奈维-斯托克斯方程的求解	40
2.7	量纲分析与放大	42
2.7.1	量纲与单位	44
2.7.2	奈维-斯托克斯方程的量纲分析	45
2.7.3	白金汉方法	49
	拓展文献	54
	学习提示	54
	思考题	55
	习题	56
第3章	微分运动方程的若干解析	59
3.1	一维定态流动	59
3.1.1	平壁间定态层流	59
3.1.2	平壁面上降膜流动	62
3.1.3	套管环隙间的轴向定态层流	63
3.1.4	套管环隙间的周向层流	67
3.2	非定态流动问题简介	69
3.3	流函数和势函数	72
3.3.1	平面流、轴对称流动和流函数	72
3.3.2	流线和迹线	74
3.3.3	理想流体和欧拉方程	75
3.3.4	势流和势函数	75
3.4	二维绕流	76
3.4.1	绕无限长圆柱体的势流	77
3.4.2	爬流	79
	拓展文献	83

学习提示	83
思考题	84
习题	84
第 4 章 近壁区域的大雷诺数流动	87
4.1 边界层流动	88
4.1.1 边界层概念	88
4.1.2 平板层流边界层方程	89
4.1.3 平板层流边界层方程的精确解	91
4.1.4 边界层的分离和尾流	95
4.2 湍流流动	96
4.2.1 湍流与湍流边界层	97
4.2.2 湍流的表征	100
4.2.3 雷诺方程和雷诺应力	101
4.2.4 湍流的半经验模型	103
4.2.5 湍流的通用速度分布	105
4.3 圆管内的入口段和湍流流动	106
4.3.1 圆管入口段流动	107
4.3.2 圆管湍流的速度分布	108
4.3.3 光滑圆管湍流的范宁摩擦因数	110
4.3.4 粗糙圆管湍流的范宁摩擦因数	111
4.4 卡门动量积分方程	113
4.4.1 平板上边界层的动量衡算	113
4.4.2 平板上层流边界层的近似解	116
4.4.3 平板上湍流边界层的近似解	117
拓展文献	119
学习提示	120
思考题	121
习题	121
第 5 章 热量传递及其微分方程	124
5.1 热量传递方式	125
5.1.1 热传导	125
5.1.2 对流传热	126
5.1.3 热辐射	127
5.1.4 实例说明	128

5.2 能量方程	129
5.2.1 能量方程的推导	129
5.2.2 能量方程的特定形式	132
5.2.3 柱坐标系和球坐标系的能量方程	133
5.2.4 能量方程的定解条件	134
拓展文献	135
学习提示	135
思考题	135
习题	136
第6章 热传导	138
6.1 定态热传导	138
6.1.1 无内热源的一维定态热传导	138
6.1.2 有内热源的一维定态热传导	141
6.1.3 肋的定态热传导	142
6.1.4 多维定态热传导	147
6.2 非定态热传导	151
6.2.1 非定态热传导过程概述	151
6.2.2 忽略内部热阻的非定态导热与集总热容法	154
6.2.3 内部和表面热阻均不可忽略的一维非定态导热	156
6.2.4 多维非定态导热	159
拓展文献	161
学习提示	161
思考题	162
习题	163
第7章 对流传热	166
7.1 对流传热与对流传热系数	166
7.1.1 对流传热的种类与研究方法	166
7.1.2 温度边界层、流体温度分布与对流传热系数	167
7.2 平板壁面对流传热	169
7.2.1 平板壁面上层流传热的精确解	169
7.2.2 平板壁面上层流传热的近似解	173
7.2.3 平板壁面上湍流传热的近似解	175
7.3 圆管内对流传热	176
7.3.1 圆管内对流传热系数	177

7.3.2 圆管入口段的对流传热	178
7.3.3 圆管内强制层流传热的理论分析	179
7.3.4 圆管内强制对流传热的经验关联式	183
7.4 自然对流传热简介	185
拓展文献	186
学习提示	187
思考题	187
习题	188
第 8 章 质量传递:现象、机理及模型	190
8.1 过程单元中的传质	190
8.2 传质机理	193
8.2.1 扩散传质	193
8.2.2 对流传质	195
8.2.3 传质的工程描述	195
8.3 传质中的基本物理量	197
8.3.1 物质的数量、浓度和组成	197
8.3.2 传质速度	198
8.3.3 传质通量	199
8.4 传质微分方程	201
8.4.1 传质微分方程的建立	201
8.4.2 传质微分方程的应用和求解	205
拓展文献	208
学习提示	208
思考题	209
习题	209
第 9 章 气体、液体及固体中的扩散传质	212
9.1 气体中的定态扩散传质	212
9.1.1 组分 A 经停滞组分 B 的定态扩散	212
9.1.2 等分子反方向定态扩散	216
9.1.3 伴有化学反应的定态扩散	218
9.1.4 气体中组分的扩散系数	220
9.2 液体中的定态扩散传质	222
9.2.1 液体中的扩散和扩散系数	222
9.2.2 两组分混合物定态扩散	225

9.3 固体中的定态扩散传质	227
9.3.1 非结构化扩散模型	228
9.3.2 结构化扩散模型	230
9.4 停滞介质中非定态扩散传质;热质类比法	235
9.4.1 问题的提出	235
9.4.2 热质类比法求解示例	237
拓展文献	239
学习提示	239
思考题	240
习题	241
第 10 章 传质边界层及对流传质理论	245
10.1 浓度边界层和对流传质	245
10.1.1 浓度边界层的概念、定性和定量特征	245
10.1.2 浓度边界层与对流传质系数	248
10.2 定态层流传质的精确解	250
10.2.1 平板壁面上层流传质的精确解	251
10.2.2 圆管内层流传质的精确解	255
10.3 浓度边界层积分传质方程	259
10.3.1 平板壁面上层流传质的近似解	259
10.3.2 平板壁面上湍流传质的近似解	263
10.4 动量传递、热量传递以及质量传递间的类似律	265
10.4.1 扩散传递过程的类比关系	266
10.4.2 对流传递过程的类比关系	266
拓展文献	271
学习提示	271
思考题	272
习题	272
第 11 章 传递过程模型化方法	276
11.1 模型化方法简述	276
11.2 模型化方法应用实例	278
11.2.1 物理模型和假设	279
11.2.2 控制方程	280
11.2.3 定解条件	280
11.2.4 模型求解	281