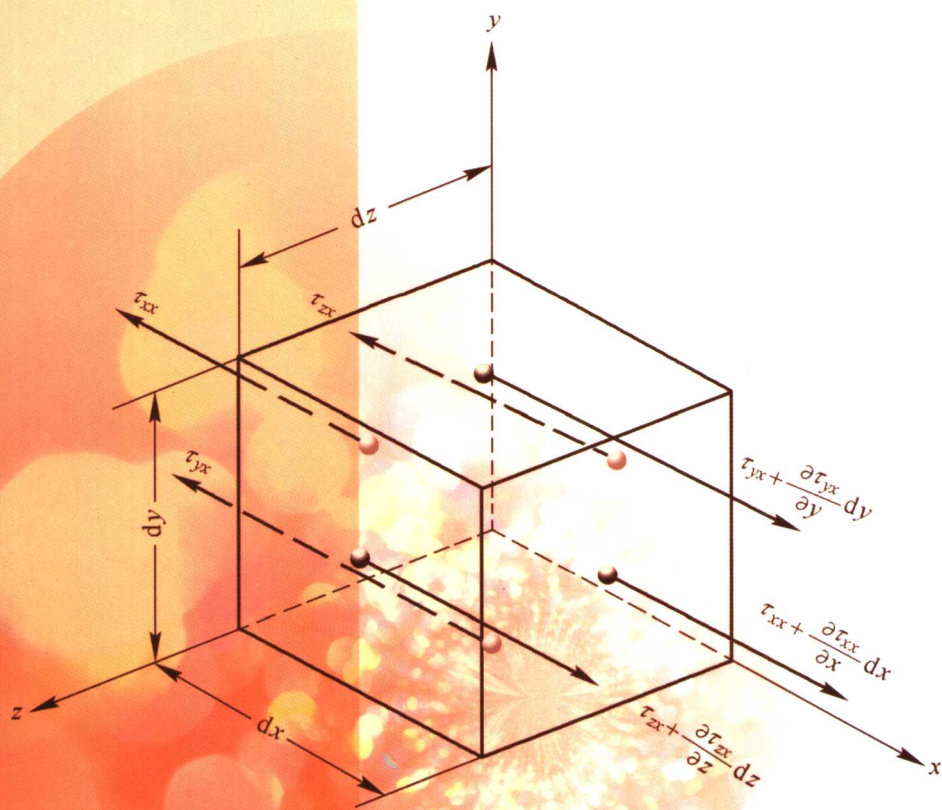


CHUANDI XIANXIANG JICHU

传递现象基础

梁文懂 肖时钧 编著



冶金工业出版社

传递现象基础

梁文懂 肖时钧 编著
沈士德 审

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2006

内 容 简 介

本书侧重介绍处理动量、能量、质量传递问题的科学方法,从传递现象的机理出发,论述了传递过程的基本原理、内在规律、数学模型的建立及其求解方法,阐明了三类传递过程的相互联系及其类似性。全书共 10 章,主要包括传递现象导论、传递现象基本方程、流体运动方程的应用、边界层流动、湍流流动、热传导、对流传热、质量传递过程概论、分子传质、对流传质等。

本书可作为工程类专业的基础教材,适用于化工、冶金、机械、热能、环境和生物工程等专业的高年级本科生和研究生学习基础知识的需要,也可作为上述专业的科研人员和其他工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

传递现象基础/梁文懂等编著. —北京:冶金工业出版社, 2006. 8

ISBN 7-5024-4008-9

I. 传… II. 梁… III. 传递-现象 IV. TQ021.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 066295 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 朱华英 (联系电话 010-64027929 电子信箱 [zhuhuaying 51@sina.com](mailto:zhuhuaying51@sina.com))

美术编辑 李 心 责任校对 杨 力 李文彦 责任印制 丁小晶

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2006 年 8 月第 1 版, 2006 年 8 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 14 印张; 336 千字; 209 页; 1—3000 册

29.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价 (元)
钢铁冶金原理 (第3版)	黄希祜 编	40.00
冶金物理化学研究方法 (第3版)	王常珍 主编	48.00
现代冶金学 (钢铁冶金卷)	朱苗勇 主编	36.00
冶金物理化学	张家芸 主编	39.00
冶金工程实验技术	陈伟庆 主编	39.00
合金相与相变 (第2版)	肖纪美 主编	37.00
金属学原理	余永宁 编	57.00
金属学原理习题解答	余永宁 编著	19.00
现代材料表面技术科学	戴达煌 等著	99.00
相图原理与冶金相图	陈国发 等编	20.00
现代流体力学的冶金应用 (英文)	李宝宽 著	25.00
球团矿生产知识问答	张一敏 主编	56.00
球团矿生产技术	张一敏 主编	38.00
炭材料生产技术 600 问	许 斌 编著	35.00
炼焦新技术	潘立慧 魏松波	56.00
干熄焦	潘立慧 魏松波	58.00
烧结生产技能知识问答	薛俊虎 主编	48.00
烧结生产管理	孙文东 主编	25.00
冶金传输原理	张先梓 主编	50.00
炉外精炼	徐曾啓 主编	22.50
冶金过程检测与控制 (职业技术学院教材)	郭爱民 主编	20.00
炼钢原理及工艺 (职业技术学院教材)	刘根来 主编	40.00
冶金传输原理基础	沈颐身 等编著	49.00
传输理论和计算	贺友多 编著	24.00
传输过程基本原理	乐启炽 崔建忠 主编	26.00
大学化学	王林山 牛 盾 主编	20.00
现代色谱分析法的应用	王瑞芬 编	28.00
工程地震勘探	单娜琳等编著	22.00
化验师技术问答	李华昌 符 斌 主编	79.00
系统综合评价技术及应用	叶义成 柯丽华 编著	39.00
冶金传输原理	沈巧珍 杜建国 编著	46.00
ISO 14001 (新版) 标准在企业中的贯彻执行	孙永军 编著	56.00
统计地球化学及其应用	蒋 志 著	15.00
冶金物理化学教程 (第2版)	郭汉杰 编著	45.00
现代金银分析	成都印钞公司	
工业防毒技术	袁昌明	28.00

前 言

动量、热量和质量的传递，普遍存在于自然界和各种工程领域。传递现象作为统一考察动量、热量和质量传递特性及其相互联系的学科，是装置设计和工程应用的基础。随着传递过程理论和实践的发展，传递现象的应用领域不断扩大。目前，传递现象像热力学、电子学等课程一样，被机械、环境、电力及冶金等类专业所接受，成为工科院校的公共课程。不同的学科有不同的侧重点，对同一问题或同一现象又可以从不同视角、用不同方法去认识、描述，因此，适应不同专业、不同层次教学的需要，国内外有多种《传递过程原理》或《传递现象》教材出版。

传递现象是一门数理解析较多的课程。内容较为抽象，数学推导繁杂。本书在编写过程中，避开了一些冗长而繁复的数学推导，力求在先行基础课程的基础上，做到由浅入深、简明扼要地阐明传递机理，介绍理论模型的建立和模型的解析方法，以及现象中由此及彼的类似概念，加强阐述过程中的系统性。编写时，首先针对不同的传递现象，建立统一的传递现象基本方程，注重物理概念和数学表达的一致性。然后分别按照动量、热量、质量传递的顺序进行阐述，并注意前后呼应，对三种既相互关联又各有特点的传递过程进行较为全面和系统的分析，强调了三种传递过程的共性。

本书由梁文懂主编，第1章和第8章由肖时钧编写，其余各章由梁文懂编写。童仕唐教授、颜家保教授对本书的编写提出了宝贵的建议。在文字录入工作中，得到了俞丹青老师、崔正威老师、毛磊老师、董志军老师以及研究生何水、管晶、宋合兴、风晓华等多位同学的大力协助，作者对他们的辛勤劳动表示感谢。承蒙沈士德教授审阅全稿，并且在内容的取舍和结构方面提出了宝贵意见，在此表示感谢。

本书的出版得到了武汉科技大学教育基金资助。在编写过程中，参考了多部国内外的有关教材和专著，在此，作者对这些编著者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有欠妥之处，敬请读者和各位同仁批评指正。

作 者

2006年4月

主要符号说明

符 号	意 义	SI 单位
A	面积、传热面积、传质面积	m^2
a	热扩散系数	m^2/s
	加速度	m/s^2
b	宽度	m
C	积分常数	无因次
C_D	阻力系数	无因次
c	物质的量浓度	kmol/m^3
c_{Aw}	壁面浓度	kmol/m^3
c_{A0}	流体主体浓度	kmol/m^3
c_A^*	无因次浓度	无因次
c_V	质量定容热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_p	质量定压热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	扩散系数	m^2/s
D_{AB}	组分 A 在组分 B 中的扩散系数	m^2/s
D_{AK}	纽特逊扩散系数	m^2/s
D_{ABS}	有效扩散系数	m^2/s
d	管径、孔径	m
d_e	当量直径	m
E	弹性模量	N/m^2
e	绝对粗糙度	m
F	力、外力	N
F_m	质量力或体积力	N
F_s	表面力	N
f	范宁摩擦系数	无因次
G_i	混合物中 i 组分的质量	kg
g	重力加速度	m/s^2
H	单位质量流体的焓	J/kg
I	湍动强度	无因次
J_A	相对于摩尔平均速度的组分 A 的摩尔通量	$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
j_A	相对于质量平均速度的组分 A 的质量通量	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
j_{As}	组分 A 的涡流质量通量	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
k	对流传质系数	m/s

k_c^0	等分子反方向扩散时的气相对流传质系数	m/s
k_c	单向扩散时的气相对流传质系数	m/s
k_L^0	等分子反方向扩散时的液相对流传质系数	m/s
k_L	单向扩散时的液相对流传质系数	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	长度、流动距离	m
L_e	圆管流动边界层进口段长度	m
L_{eT}	圆管传热边界层进口段长度	m
L_{ec}	圆管传质边界层进口段长度	m
l	长度、普朗特混合长	m
M	相对分子质量	kg/kmol
M_i	组分 i 的相对分子质量	kg/kmol
m	质量	kg
N	相对于静止坐标的总摩尔通量	kmol/(m ² · s)
N_A	相对于静止坐标的组分 A 的摩尔通量	kmol/(m ² · s)
N_B	相对于静止坐标的组分 B 的摩尔通量	kmol/(m ² · s)
n	相对于静止坐标的总质量通量	kg/(m ² · s)
n_A	相对于静止坐标的组分 A 的质量通量	kg/(m ² · s)
n_B	相对于静止坐标的组分 B 的质量通量	kg/(m ² · s)
p	压力	Pa
p_A	组分 A 的分压	Pa
p_B	组分 B 的分压	Pa
p_d	动压力	Pa
p_s	静压力	Pa
Q	热流量	W
q	热通量 (热流速率)	W/m ²
q_e	涡流热通量	W/m ²
$\dot{q}$	单位体积、单位时间由内热源产生的热量	W/m ³
R	通用气体常数	kJ/(kmol · K)
R_A	单位体积中组分 A 的生成摩尔速率	kmol/(m ³ · s)
r_A	单位体积中组分 A 的生成质量速率	kg/(m ³ · s)
r_i	半径	m
$r_{\max}$	最大流速处距管中心的位置	m
$\bar{r}$	孔道的平均半径	m
S	表面更新率	s ⁻¹

T	温度	K
T^*	无因次温度	无因次
T_{av}	定性温度	K
T_0	流体主体温度或物体初始温度	K
T_w	壁面温度	K
U	热力学能	J/kg
u	流速、质量平均流速	m/s
u_A	组分 A 相对于静止坐标的速度 (绝对速度)	m/s
u_B	组分 B 相对于静止坐标的速度 (绝对速度)	m/s
u_0	来流速度、边界层外的均匀流速	m/s
u_{yw}	壁面喷出速度	m/s
u_M	相对于静止坐标的摩尔平均流速	m/s
u_m	流体主体平均流速	m/s
u_{max}	最大流速	m/s
u^*	摩擦速度	m/s
u^+	无因次摩擦速度	无因次
V	体积	m ³
$\bar{v}$	分子平均运动速度	m/s
V_s	体积流率	m ³ /s
v	体积质量	m ³ /kg
w	质量分数	无因次
X	作用在单位质量流体上的质量力在 x 方向的分量	N/kg
x	液相或固相中的摩尔分数	无因次
x_c	临界距离	m
Y	作用在单位质量流体上的质量力在 y 方向的分量	N/kg
y	气相中的摩尔分数	无因次
Z	作用在单位质量流体上的质量力在 z 方向的分量	N/kg
z	高度、轴向距离、扩散距离	m
α	对流传热系数	W/(m ² · K)
δ	速度边界层厚度、液膜厚度	m
δ_T	温度边界层厚度	m
δ_c	浓度边界层厚度	m
ε	涡流黏度	m ² /s
ε_H	涡流热扩散系数	m ² /s
ε_M	涡流质量扩散系数	m ² /s
ξ	温度边界层厚度与速度边界层厚度之比 (δ_T/δ)	无因次
θ	时间	s

θ'	曲线坐标系微分衡算方程中的时间	s
λ	热导率	W/(m · K)
λ	摩擦系数	无因次
μ	(动力) 黏度	Pa · s
μ_s	有效黏度	Pa · s
ν	运动黏度	m ² /s
ρ	密度	kg/m ³
ρ_B	质量浓度	kg/m ³
η	无因次位置	无因次
τ	剪应力、机械力 (表面应力)	Pa
τ	曲折因数	无因次
τ_w	作用在壁面上的剪应力	Pa
τ_s	涡流剪应力或雷诺应力	Pa
φ	速度势函数	m ² /s
ϕ	散逸热速率	J/(m ² · s)
ψ	流函数	m ² /s
Re	雷诺数	无因次
Bi	毕渥数	无因次
Fo	傅里叶数	无因次
Le	路易斯数	无因次
Pr	普朗特数	无因次
Nu	努塞尔数	无因次
Sc	施密特数	无因次
St	斯坦顿数	无因次
Sh	舍伍德数	无因次

目 录

1 传递现象导论	1
1.1 传递现象的分析和描述	1
1.2 传递现象的基本研究方法	2
1.2.1 理论分析方法	3
1.2.2 实验研究方法	3
1.2.3 数值计算方法	4
1.3 传递现象的物理机制及其数学描述	4
1.3.1 分子传递机理	4
1.3.2 分子传递现象的数学描述	6
1.3.3 现象定律的通量表达式	8
1.3.4 涡流传递	11
1.3.5 不同传递现象之间的准数关联	12
习题	13
2 传递现象基本方程	14
2.1 微分衡算基础	14
2.1.1 连续介质模型	14
2.1.2 流体的不可压缩性	15
2.1.3 稳态过程和非稳态过程	15
2.1.4 描述流体运动的两种观点	15
2.1.5 常用的几种时间导数	17
2.1.6 流体运动的几何描述	18
2.2 传递过程通用微分衡算方程	19
2.3 质量微分衡算——连续性方程	21
2.3.1 单组分系统的连续性方程	21
2.3.2 多组分系统的质量传递微分方程	23
2.4 微分动量衡算——运动方程	26
2.4.1 运动流体所受力之间的关系	26
2.4.2 用应力表示的运动微分方程	26
2.4.3 黏性流体的运动微分方程	34
2.4.4 $N-S$ 方程在曲线坐标中的表述	35
2.5 微分能量衡算——能量方程	36

2.5.1	能量方程的推导	36
2.5.2	能量方程的分析与简化	38
2.5.3	曲线坐标系的能量方程	39
2.6	传递现象基本方程的类比	40
2.7	传递现象基本方程的分析和求解	41
2.7.1	定解条件	41
2.7.2	奈维-斯托克斯方程组的适定性和适用性分析	45
2.7.3	方程的数学性质及其解析方法	45
	习题	46
3	流体运动方程的应用	48
3.1	不可压缩流体稳态层流时运动方程的解析解	48
3.1.1	具有封闭界面的流体流动	49
3.1.2	具有自由界面的稳定流动—降膜流动	58
3.2	爬流和势流	60
3.2.1	爬流	61
3.2.2	势流	66
	习题	72
4	边界层流动	74
4.1	普朗特 (Prandtl) 边界层理论	74
4.1.1	普朗特边界层理论模型	74
4.1.2	边界层的形成和发展	75
4.1.3	边界层厚度	77
4.1.4	边界层的基本特征	77
4.2	普朗特边界层方程	77
4.3	普朗特边界层方程的精确解	81
4.3.1	边界层方程的变换-布拉修斯方程	81
4.3.2	边界层方程的求解	83
4.3.3	解析结果分析	85
4.4	边界层动量积分方程	86
4.4.1	卡门动量积分方程	86
4.4.2	平板壁面上层流边界层的近似解	89
4.5	边界层分离	91
	习题	94
5	湍流流动	95
5.1	湍流的基本特性及其起因	95
5.1.1	湍流的基本特性	95

5.1.2 湍流的起因	96
5.2 湍流问题的处理方法	97
5.2.1 湍流的统计平均	97
5.2.2 常用的几种时均运算规则	98
5.2.3 湍动强度	100
5.3 湍流的基本方程	100
5.3.1 湍流的时均化连续性方程	100
5.3.2 湍流的时均化运动方程	101
5.4 普朗特混合长理论	103
5.5 固体壁面上的稳态湍流	105
5.5.1 壁面湍流时的时均速度分布	105
5.5.2 光滑壁面湍流流动的通用速度分布	108
5.6 圆管中的湍流流动	108
5.6.1 通用速度分布方程和各层厚度的估算	108
5.6.2 光滑管内的湍流流动	109
5.6.3 粗糙管中的湍流流动	110
5.7 平板壁面湍流边界层的近似解	113
5.7.1 卡门边界层动量积分方程及其求解	113
5.7.2 摩擦阻力	114
习题	115
6 热传导	116
6.1 热量传递概论	116
6.1.1 热传导	116
6.1.2 对流传热	116
6.1.3 辐射传热	117
6.2 热传导方程及其求解方法	117
6.2.1 能量微分方程的简化——热传导方程	117
6.2.2 热传导方程的求解	118
6.3 稳态热传导	119
6.3.1 无内热源的一维稳态热传导	120
6.3.2 有内热源的一维稳态热传导	121
6.3.3 无内热源的二维稳态热传导	122
6.4 非稳态热传导	128
6.4.1 非稳态热传导方程	128
6.4.2 忽略内部热阻的非稳态热传导——集总热容法	129
6.4.3 忽略外部热阻的非稳态热传导	130
6.4.4 两种热阻均不能忽略的非稳态热传导	134
6.4.5 一维非稳态热传导的数值解	136

6.4.6 多维非稳态热传导	138
习题	138
7 对流传热	139
7.1 对流传热的基本理论	139
7.1.1 对流传热机理	139
7.1.2 传热边界层的形成和发展	140
7.1.3 对流传热系数	142
7.2 对流传热的控制方程	143
7.3 层流传热	144
7.3.1 平板层流传热	144
7.3.2 管内层流传热	152
7.4 湍流传热	156
7.4.1 平壁湍流传热的近似解	156
7.4.2 湍流传热的比拟理论	157
习题	164
8 质量传递过程概论	165
8.1 混合物组成的表示方法	165
8.1.1 质量浓度和质量分数	165
8.1.2 物质的量浓度和摩尔分数	166
8.2 多组分系统的运动速度	167
8.3 传质通量	167
8.3.1 组分的质量通量	167
8.3.2 组分的摩尔通量	168
8.3.3 几种传质通量之间的关系	168
8.4 质量传递微分方程	169
8.4.1 质量传递通用微分方程	170
8.4.2 传质微分方程的特定形式	170
8.4.3 质量传递微分方程的定解条件	172
习题	173
9 分子传质	174
9.1 稳态分子传质	174
9.1.1 一维稳态分子传质	174
9.1.2 二维稳态分子扩散	180
9.2 非稳态分子传质	181
习题	182

10 对流传质	183
10.1 对流传质的基本理论.....	183
10.1.1 对流传质机理.....	183
10.1.2 传质边界层的形成和发展.....	184
10.1.3 对流传质系数.....	185
10.1.4 相际间的对流传质模型.....	186
10.2 层流状态下的对流传质.....	190
10.2.1 平板层流传质.....	191
10.2.2 圆管内的层流对流传质.....	198
10.3 湍流传质.....	199
10.3.1 平板壁面湍流传质的近似解.....	200
10.3.2 湍流传递的比拟理论.....	201
习题.....	205
附 录	206
附录 A 常见物系的扩散系数.....	206
附录 B 误差函数表.....	208
参考文献	209

1 传递现象导论

传递现象又称传递过程，或具体地称之为“动量、热量和质量传递”，简称“三传”。主要研究的是物体相内及相际间的传递现象，侧重于对物理量的传递速率和传递机理的探讨，有着鲜明的物理特征。传递现象作为定量把握自然过程的方法，涉及到很多工程领域。是一门从统一的观点出发，解析现象的变化和方向的重要应用理论学科。传递现象的理论为已有设备的改良和新设备的设计、操作和控制提供理论基础，对过程开发和设计、生产操作及控制优化、过程机理分析等都有着重要意义。

传递现象是在单元操作的基础上，以过程工业为研究对象综合三传的共同规律而发展起来的，是单元操作和反应工程的理论基础。作为一门独立的学科，传递现象理论形成于20世纪中期。随着化工“单元操作”被了解得更加深入，人们发现不同单元操作之间存在着共性。如过滤显然只是流体流动的一个特例；蒸发只不过是传热的一种形式；萃取和吸收操作中都包含有物质的转移或传递过程；蒸馏和干燥则是热量和质量传递同时进行的过程。可以说，单元操作只不过是热量传递、质量传递和动量传递的特例或特定的组合。对单元操作的任何进一步研究，最终都归结为对动量、质量和热量传递的研究。伯德(Bird)等首先在1958年出版了《Notes on Transport Phenomena》一书，作为威斯康星大学化工系的必修课教材，并于1960年出版了经典的《Transport Phenomena》，系统阐述了传递现象的基本原理，研究了动量传递、热量传递和质量传递之间的类似性。随着研究的不断深入，人们发现不同的传递现象不但可以用类似的数学模型描述，而且描述三者的一些物理量之间还存在某些定量关系，从而使研究得以简化。

传递现象研究三种传递的实质和变化规律，是化学工业及化学工程学科发展和进步的产物，它的形成标志着化学工程学科发展到了一个新的高度。目前，传递现象作为一门基础课程，不仅在化学工程专业开设，在冶金、机械、热能、环境等专业也均在开设，而且业已扩展到水利、航空等专业。

1.1 传递现象的分析和描述

传递现象是自然界和工业生产中普遍存在的现象，考察的是物系内某物理量从高强度区域自动地向低强度区域转移的过程。对于物系中每一个具有强度性质的物理量（如速度、温度、浓度）来说，都存在着相对平衡的状态。当物系偏离平衡状态时，就会发生物理量的这种转移过程，使物系趋向平衡状态，所传递的物理量可以是质量、能量、动量或电量等。现象的变化，遵从热力学第一定律和第二定律。在适当的坐标系下，可得非线性偏微分方程，根据初始条件和边界条件，可用以描述各种现象，实现对各种现象进行预测、并应用于装置设计、危险的预防和对策等领域。现象变化的方向，遵从热力学第二定律，换言之，也可以说现象总是向熵增的方向进行。例如物系内温度不均匀，则热量将由高温区向低温区传递。一般在工业生产中所涉及到的物理量只是动量、热量和质量，所发

生的传递现象为动量传递、热量传递和质量传递。因具体过程不同,三种传递过程可能分别单独存在;也可能是其中任意两种或三种过程同时存在。

传递现象可以在三种不同的尺度上发生,即分子尺度、微团尺度和设备尺度。在不同尺度上运用守恒原理分析传递规律,就构成了传递现象研究的核心。

分子尺度上的传递,即考察由于分子运动所引起的动量、热量和质量的传递。以分子运动论的观点,借助统计方法,确立传递规律,如牛顿黏性定律、傅里叶定律和费克定律。与分子运动有关的物质的宏观传递特性表示为黏度、热扩散系数、分子扩散系数等。

微团尺度上的传递,即考察由大量分子所构成的流体微团运动所造成的动量、热量和质量的传递。微团又称流体质点,其尺寸远小于运动空间。微团常忽略流体由分子组成、内部存在空隙这一事实,而将流体视为连续介质,从而使用连续函数的数学工具,从守恒原理出发,以微分方程的形式建立描述传递规律的连续性方程、运动方程、能量方程和扩散方程,通过求解这些微分方程得到速度分布、温度分布和浓度分布。当流体做湍流运动时,与流体微团运动有关的传递特性表示为涡流黏度、涡流热扩散系数和涡流质量扩散系数,这些传递特性与流动状况、设备结构等有关,不是流体的物性。

设备尺度上的研究,通常考察流体在设备中的整体运动所导致的传递现象,以守恒原理为基础,就一定范围进行总体衡算。设备尺度上的传递特性表示为传热系数和传质系数等,这些传递特性与流动条件直接有关,同样也不是物系的物性。

三种尺度上的传递现象相互联系,彼此相关,一般小尺度上的传递规律是研究下一级更大尺度上的传递现象的基础。

传递过程的研究一般是从守恒定律求出相应的速度分布、温度分布、浓度分布,然后由这些分布相应求出摩擦阻力系数、传热系数和传质分系数。鉴于这些传递系数均是解析结果,因而一般形式较为复杂。由于这些解析解是在特定的边界条件、初始条件及简化假定下得到的,因而也可用这些解析解来界定与之相近的经验公式适用范围。传递现象之所以采用这样的步骤求解,是由于既然有传递发生,就应该有相应的推动力,而要形成推动力就必然要有对应的物理量分布。

研究传递现象的程序可归纳为:对传递现象进行物理分析,建立并化简数学模型,给定初始条件和边界条件(对于稳态传递过程,由于被传递的物理量不随时间变化,因此无须给出初始条件),通过数学运算解决实际问题。可见,给定初始条件和边界条件,对于传递现象的研究,是必不可少的环节。为解决某一个具体传递过程,必须用定解条件对方程组加以限制或约束,从而使具有普遍意义的方程转化为针对某一个具体问题的方程。因此,一个完整的数学模型,除了数学模型本身以外,还应当包括与之相适应的定解条件(包括初始条件和边界条件)。通过求解这些模型方程得到解析解或数值解,用以分析和解释物理现象,得出结论,并用来指导实践。传递现象的研究需要坚实的理论基础、先进的实验技术和现代的计算方法。

1.2 传递现象的基本研究方法

归纳起来,传递现象的研究方法主要有三种方法,即理论分析方法、实验研究方法和数值计算方法。

1.2.1 理论分析方法

理论分析方法一般分为三个阶段。

(1) 确定简化的物理模型。这是理论研究方法最关键也是最困难的一步。建立模型的关键,并不在于无所不包地把各种因素都考虑和罗列进去。这不仅会使问题复杂化而得不到解决,而且也是不必要的。恰恰相反,应当努力做出尽可能合理的简化,使之易于求解而又符合实际。当然要能正确地做出这种简化,需要对过程实质有深切的认识,而这一点正是问题的关键。通过实验和观测对流体的物理性质及运动特性进行分析研究,抓住主要因素对流体或运动进行简化和近似,设计出合理的理论模型。模型既要反映问题的主导方面,又要便于理论处理。

简化是模型建立的重要特征,没有简化就不能称其为模型,模型的优劣也取决于对过程简化的合理性。要求做到简化而不失其真实性;使简化能满足应用要求并能适应当前的实验条件,以便能进行模型鉴别和参数估计。同时也要求简化能适应现有计算能力。

(2) 建立数学模型。对于上述理论模型,建立描写流体传递规律的封闭方程组,及相应的初始条件和边界条件。数学模型建立之后,就将一个物理问题转变成了数学问题。数学模型法立足于对所研究过程的深刻理解,没有深刻的理解就不能做出恰如其分的简化。模型法是解决工程问题的重要手段,该方法的实质是用已知的模拟未知的,用可见的、规则的模拟不可见、不规则的,用简单的模拟复杂的。

(3) 数学求解。利用各种数学工具(主要是偏微分方程、常微分方程、复变函数、近似计算等)准确或近似地解出上述问题,并将结果和试验或观察资料相对照,确定解的准确程度及其使用范围。

1.2.2 实验研究方法

实验研究方法在传递现象的研究中有着广泛的应用,它是研究问题不可缺少的一个方面。简化模型的提出,需要实验提供数据;计算结果的正确性和可靠性,需要实验来检验;当所研究的问题极其复杂,模型不容易建立,或虽有模型但因方程复杂或边界条件复杂难于求解时,实验研究就显得必要。依靠实验来确定过程变量之间的关系,一般是通过无因次数群(或称准数)构成的关系式来表达这种关系,这是一种工程上通用的基本方法。

实验研究能够在所研究的问题完全相同或大体相同的条件下进行观测,因此通过实验所得出的结果一般来说是可靠的。缺点是实验方法往往受到模型尺寸的限制、实验过程中边界影响不能全部满足等。

长期以来,化学工程的发展更多地依赖于实验研究。但实验研究的结果往往只包含一些个别数据和个别规律,主要反映的是在实验条件下各种现象所独有的特点。如欲将个别数据整理概括再加以推广应用,以达到由此及彼、以小见大的目的,就需要有一套完整的理论和方法。用于达到上述目的的实验研究方法主要有因次分析法和相似论方法,这两种方法主要用于传递过程和单元操作的实验研究,它们都是以无因次(无量纲)数群的形式来表达实验结果,可使实验工作大为简化。它们曾对化学工程学科的形成和发展起过重大作用,至今也仍有应用的价值。