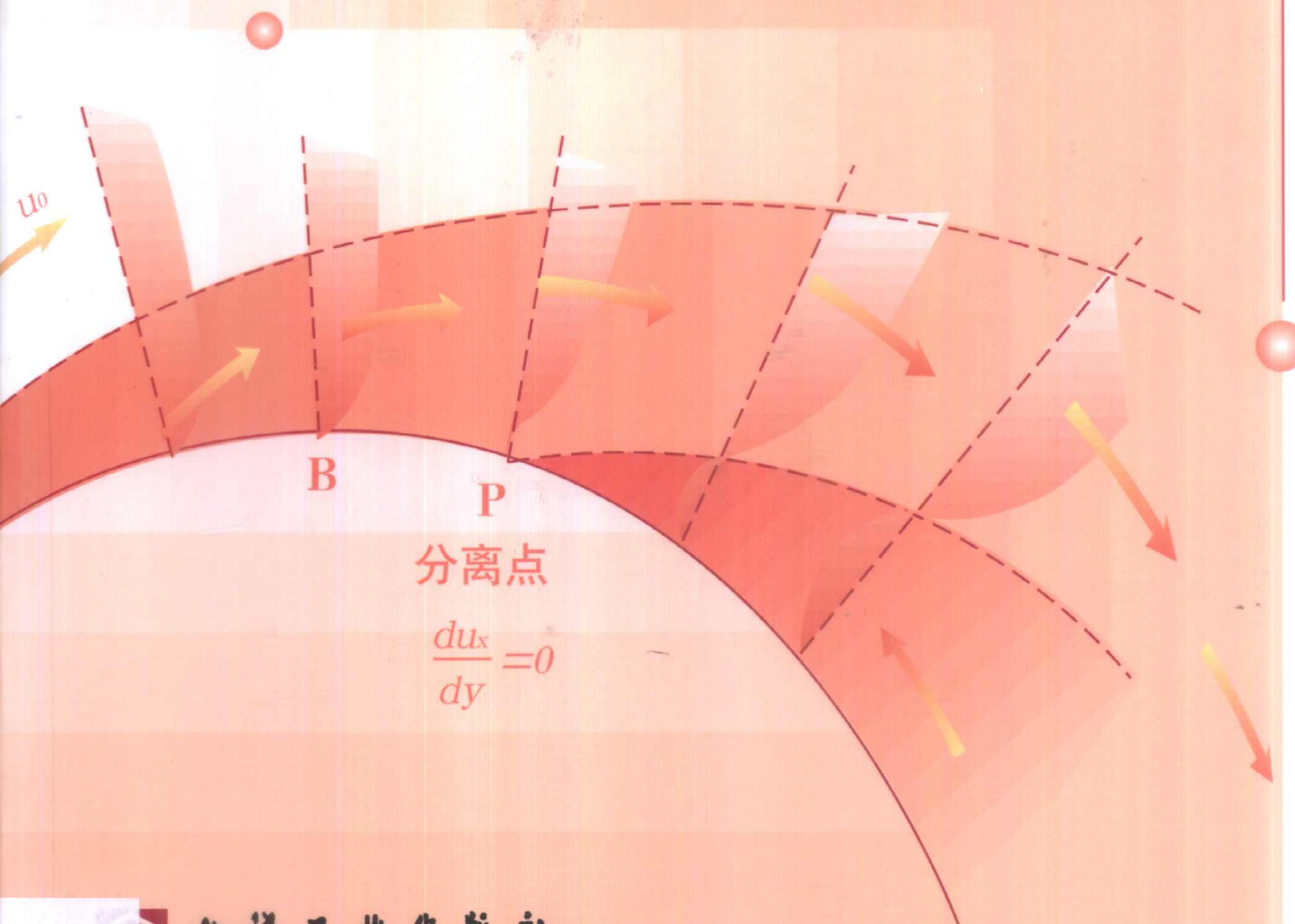




化工传递过程基础

(第二版)

陈 涛 张国亮 主编



国家“十五”规划教材

高等学校教材

化工传递过程基础

(第二版)

陈 涛 张国亮 主编

化学工业出版社
教材出版中心
· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工传递过程基础/陈涛, 张国亮主编. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2002.7

高等学校教材

ISBN 7-5025-3642-6

I. 化… II. ①陈… ②张… III. 化工过程-高等学校-教材 IV. TQ021

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 040171 号

国家“十五”规划教材
高等学校教材

化工传递过程基础
(第二版)

陈涛 张国亮 主编

责任编辑: 骆文敏

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 于兵

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 18 $\frac{1}{4}$ 字数 450 千字

2002 年 7 月第 2 版 2002 年 7 月北京第 8 次印刷

ISBN 7-5025-3642-6/G·983

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

目 录

主要符号说明	1
绪论	6
第一章 传递过程概论	8
第一节 流体流动导论	8
一、静止流体的特性	8
二、流体流动的基本概念	12
第二节 动量、热量与质量传递的类似性	18
一、分子传递的基本定律	18
二、动量通量、热量通量与质量通量的普遍表达式	19
三、涡流传递的类似性	21
第三节 传递过程的衡算方法	22
一、总衡算	22
二、微分衡算	30
习题	32

第一篇 动量传递

第二章 连续性方程与运动方程	34
第一节 描述流动问题的两种观点	34
一、欧拉观点与拉格朗日观点	34
二、物理量的时间导数	35
第二节 连续性方程	36
一、连续性方程的推导	36
二、对连续性方程的分析	37
三、柱坐标与球坐标系的连续性方程	38
第三节 运动方程	39
一、用应力表示的运动方程	39
二、牛顿型流体的本构方程	43
三、奈维-斯托克斯方程	44
四、对奈维-斯托克斯方程的分析	46
习题	47
第三章 运动方程的应用	49
第一节 阻力系数	49
第二节 平壁间与平壁面上的稳态层流	51
一、平壁间的轴向平行层流	51
二、平壁面上的降落液膜流动	54

第三节	圆管与套管环隙间的稳态层流	56
一、	圆管中的轴向稳态层流	56
二、	套管环隙间的轴向稳态层流	58
三、	同心套管环隙间的周向层流	60
第四节	爬流	62
第五节	势流	67
第六节	平面流与流函数的概念	71
习题	72
第四章	边界层流动	74
第一节	边界层的概念	74
一、	普兰德边界层理论的要点	74
二、	边界层的形成过程	75
三、	边界层厚度的定义	76
第二节	普兰德边界层方程	77
一、	普兰德边界层方程的推导	77
二、	普兰德边界层方程的精确解	80
第三节	边界层积分动量方程	84
一、	边界层积分动量方程的推导	84
二、	平板壁面上层流边界层的近似解	86
第四节	管道进口段的流体流动	91
第五节	边界层分离	92
边界层分离与形体曳力		92
习题	95
第五章	湍流	96
第一节	湍流的特点、起因及表征	96
一、	湍流的特点	96
二、	湍流的起因	96
三、	湍流的表征	98
第二节	湍流时的运动方程	100
雷诺方程与雷诺应力		100
第三节	湍流的半经验理论	102
第四节	无界固体壁面上的稳态湍流	105
第五节	圆管中的湍流	107
一、	圆管稳态湍流的通用速度分布方程	107
二、	光滑圆管中的速度分布与流动阻力	109
三、	粗糙管中的速度分布与流动阻力	112
第六节	平板壁面上湍流边界层的近似解	114
第七节	因次分析在动量传递中的应用	116
一、	奈维-斯托克斯方程的因次分析	117
二、	伯金汉 π 定理	118

三、模型与相似	120
习题	121

第二篇 热量传递

第六章 热量传递概论与能量方程	123
第一节 热量传递的基本方式	123
一、热传导(导热)	123
二、对流传热	124
三、辐射传热	125
四、同时进行导热、对流传热及辐射传热的过程	125
第二节 能量方程	127
一、能量方程的推导	127
二、能量方程的特定形式	129
三、柱坐标系与球坐标系的能量方程	130
习题	132
第七章 热传导	133
第一节 稳态热传导	133
一、无内热源的一维稳态热传导	133
二、有内热源的一维稳态热传导	135
三、二维稳态热传导	137
第二节 不稳态热传导	140
一、忽略内部热阻的不稳态导热与集总热容法	141
二、忽略表面热阻的不稳态导热	143
三、内部热阻和表面热阻均不能忽略时的大平板的不稳态导热	151
四、多维不稳态导热	155
五、一维不稳态导热的数值解	157
习题	161
第八章 对流传热	163
第一节 对流传热的机理与对流传热系数	163
一、对流传热机理	163
二、温度边界层(热边界层)与对流传热系数	164
第二节 平板壁面对流传热	166
一、平板壁面上层流传热的精确解	167
二、平板壁面上层流传热的近似解	172
三、平板壁面上湍流传热的近似解	177
第三节 管内对流传热	181
一、管内强制层流传热的理论分析	181
二、管内对流传热的因次分析	187
三、圆管湍流传热的类似律	192
第四节 自然对流传热	198

一、自然对流系统的运动方程和能量方程·····	198
二、自然对流系统的对流传热系数·····	199
习题·····	202

第三篇 质量传递

第九章 质量传递概论与传质微分方程 ·····	205
第一节 质量传递概论·····	205
一、混合物组成的表示方法·····	205
二、质量传递的基本方式·····	207
三、传质的速度与通量·····	208
第二节 传质微分方程·····	213
一、传质微分方程的推导·····	213
二、传质微分方程的特定形式·····	215
三、柱坐标系与球坐标系的传质微分方程·····	216
习题·····	218
第十章 分子传质（扩散） ·····	219
第一节 稳态分子扩散的通用速率方程·····	219
一维稳态分子扩散通用速率方程的积分形式·····	219
第二节 气体中的分子扩散·····	219
一、组分 A 通过停滞组分 B 的稳态扩散·····	219
二、等分子反方向稳态扩散·····	222
三、伴有化学反应的气体稳态扩散·····	224
四、气体扩散系数·····	226
第三节 液体中的分子扩散·····	230
一、液体中的稳态分子扩散速率方程·····	230
二、组分 A 通过停滞组分 B 的稳态扩散·····	231
三、等分子反方向稳态扩散·····	231
四、液体中的扩散系数·····	232
第四节 固体中的扩散·····	234
一、与固体结构无关的稳态扩散·····	235
二、多孔固体中的稳态扩散·····	236
三、固体中的扩散系数·····	239
习题·····	239
第十一章 对流传质 ·····	241
第一节 对流传质系数·····	241
一、对流传质的机理·····	241
二、浓度边界层·····	242
三、对流传质系数·····	242
第二节 平板壁面对流传质·····	247
一、平板壁面上层流传质的精确解·····	247

二、平板壁面上层流传质的近似解·····	250
三、平板壁面上湍流传质的近似解·····	254
第三节 管内对流传质·····	255
一、管内的稳态层流传质·····	255
二、圆管湍流传质的类似律·····	259
第四节 对流传质模型·····	263
相际间的对流传质模型·····	263
习题·····	267
第十二章 同时进行动量、热量与质量传递的过程·····	269
平板壁面层流边界层中同时进行动量、热量与质量传递的过程·····	269
习题·····	274
主要参考文献·····	275
附录·····	276
附录 A 主要物理量的单位换算表·····	276
附录 B 误差函数表·····	277
附录 C 扩散系数·····	278
附录 D 分子扩散时 $\Omega_D \sim \frac{kT}{\epsilon_{AB}}$ 之间的关系表·····	279
附录 E 伦纳德-琼斯参数 σ 、 ϵ/k 数值表·····	280

主要符号说明

英文符号

A	面积、截面积、传热面积、传质面积	m^2
A_{av}	平均面积	m^2
C	系统的总摩尔浓度	$kmol/m^3$
C_{av}	液相的平均总摩尔浓度	$kmol/m^3$
C_D	曳力系数、平均曳力系数	无因次
C_{Dx}	局部 (x 处) 曳力系数	无因次
C_{Dx}^0	喷出参数为零时的局部曳力系数	无因次
D_{AB}	组分 A 通过组分 B 的扩散系数	m^2/s
D_{ABP}	有效扩散系数	m^2/s
D_{KA}	纽特逊扩散系数	m^2/s
E	单位质量流体的总能量	J/kg
E_t	总能量	J
F	力、外力	N
F_B	体积力或质量力	N
F_d	流体对物体施加的总曳力	N
F_t	惯性力	N
F_s	表面力或机械力	N
G	质量流速	$kg/(m^2 \cdot s)$
G_i	组分 i 的质量	kg
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 u_M 的组分 A 的摩尔通量	$kmol/(m^2 \cdot s)$
L	长度, 流动距离	m
L_e, L_t, L_D	管内流动、传热、传质的进口段长度	m
M	质量	kg
M_A, M_B, M_i	组分 A, B, i 的相对分子质量	$kg/kmol$
M_i	组分 i 的质量	kg
\bar{M}	平均相对分子质量	$kg/kmol$
N	相对于静止坐标的总摩尔通量	$kmol/(m^2 \cdot s)$
N_A, N_B	相对于静止坐标的组分 A, B 的摩尔通量	$kmol/(m^2 \cdot s)$
P	垂直作用于流体表面上的力	N
Q	吸热速率	J/s
\dot{Q}	单位质量流体所吸收的热量	J/kg
R	通用气体常数	$kJ/(kmol \cdot K)$
R_A	单位体积中组分 A 生成的摩尔速率	$kmol/(m^3 \cdot s)$
S	气体在固体中的溶解度	$m^3/(kPa \cdot m^3)$

T	绝对温度	K
U	单位质量流体的内能	J/kg
V	体积	m^3
V_s	体积流量	m^3/s
W	做功速率	J/s
\dot{W}	单位质量流体对环境所作的功	J/kg
W_e	轴功率	J/s
W_e	单位质量流体所作的轴功	J/kg
X	x 方向上的单位质量流体的质量力	N/kg
X_r, X_z, X_θ	柱坐标系中径向、轴向和方位角方向上单位质量流体的质量力	N/kg
X_r, X_ϕ, X_θ	球坐标系中径向、方位角和余纬度方向上单位质量流体的质量力	N/kg
Y	y 方向上单位质量流体的质量力	N/kg
Z	z 方向上单位质量流体的质量力	N/kg
a_A, a_B, a_i	组分 A、B、 i 的质量分数	无因次
c_A, c_B, c_i	组分 A、B、 i 的摩尔浓度	$kmol/m^3$
c_{Ab}	组分 A 的主体平均浓度	$kmol/m^3$
c_{As}	组分 A 在界面处的浓度	$kmol/m^3$
c_{A0}	组分 A 在边界层外的均匀浓度	$kmol/m^3$
c_p, c_v	定压比热容和定容比热容	J/(kg·K)
d	管径、孔径	m
d_e	当量直径	m
e	绝对粗糙度	mm
f	范宁摩擦因数	无因次
f_B	单位质量流体的质量力 (或重力)	N/kg
g	重力加速度	m/s^2
h	对流传热系数 (膜系数)	W/($m^2 \cdot K$)
	液柱高度	m
h_x, h_m	局部 (x 处) 和平均对流传热系数	W/($m^2 \cdot K$)
h_x^0	喷出参数为零时的局部对流传热系数	W/($m^2 \cdot K$)
j_A	相对于质量平均速度 u 的组分 A 的质量通量	$kg/(m^2 \cdot s)$
j_A^*	组分 A 的涡流质量通量	$kg/(m^2 \cdot s)$
k	导热系数	W/($m \cdot K$)
k_c^0, k_c	气相对流传质系数	m/s
k_L^0, k_L	液相对流传质系数	m/s
k_{cx}^0, k_{cx}	局部 (x 处) 对流传质系数	m/s
k_{cm}^0, k_{cm}	平均对流传质系数	m/s
$(k_{cx}^0)^0$	喷出参数为零时的局部对流传质系数	m/s
l	长度、普兰德混合长	m
n	相对于静止坐标的总质量通量	$kg/(m^2 \cdot s)$
n_A, n_B	相对于静止坐标的组分 A、B 的质量通量	$kg/(m^2 \cdot s)$
p	压力, 总压力	N/ m^2
p_A, p_B	组分 A、B 的分压	N/ m^2

p_d 、 p_s	动力压力和静压力	N/m^2
q	热流速率	J/s
\dot{q}	单位体积中释放的热速率	$J/(m^3 \cdot s)$
r	管半径、径向距离	m
r_i	管的内半径	m
r_A	单位体积中组分 A 的质量生成速率	$kg/(m^3 \cdot s)$
r_{max}	最大流速处距管中心的距离	m
\bar{r}	孔道的平均半径	m
S	表面更新率	s^{-1}
t	温度	K
t_b	主体平均 (混合杯) 温度	K
t_f	定性温度	K
t_m	平均温度	K
t_s	壁面温度	K
t_0	边界层外的均匀温度	K
	不稳态导热中的初始温度	K
u	流速、相对于静止坐标的质量平均速度	m/s
u_A 、 u_B	组分 A、B 相对于静止坐标的速度 (绝对速度)	m/s
u_b	主体平均流速	m/s
u_M	相对于静止坐标的摩尔平均速度	m/s
u_{max}	最大流速、管中心处流速	m/s
u_0	边界层外的均匀流速, 远离物体表面的流速	m/s
u_x 、 u_y 、 u_z	流速向量 u 在直角坐标系 x 、 y 、 z 三个方向上的分量	m/s
u_r 、 u_θ 、 u_z	流速向量 u 在柱坐标系 r 、 θ 、 z 三个方向上的分量	m/s
u_r 、 u_ϕ 、 u_θ	流速向量 u 在球坐标系 r 、 ϕ 、 θ 三个方向上的分量	m/s
u_{ys}	在壁面处的法向速度	m/s
u^*	摩擦速度 = $\sqrt{\tau_s/\rho}$	m/s
ν	比容	m^3/kg
w	质量流率	kg/s
x	流动方向上距平板前缘的距离	m
x_1	平板的半厚度或由绝热壁算起的厚度	m
x_A 、 x_B 、 x_i	组分 A、B、 i 的摩尔分数	无因次
x_c	临界距离	m
y_A 、 y_B	组分 A、B 在气相中的摩尔分数	无因次
y^*	摩擦距离 = $\nu/\sqrt{\tau_s/\rho}$	m
z	高度、轴向距离、扩散距离	m

希腊文符号

α	导温系数 (热扩散系数)	m^2/s
δ	速度边界层厚度, 液膜厚度	m
δ_b 、 δ_m 、 δ_c	层流内层、缓冲层、湍流核心厚度	m
δ_D 、 δ_t	浓度边界层和温度边界层厚度	m
ϵ	空隙率	无因次

	涡流 (运动) 粘度	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
ζ	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'	柱坐标系和球坐标系微分衡算方程中的时间	s
λ	分子运动平均自由程	m
μ	(动力) 粘度	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
ν	运动粘度	m^2/s
ρ	密度, 系统总密度或质量浓度	kg/m^3
ρ_A, ρ_B	组分 A、B 的质量浓度	kg/m^3
ρ_{A0}	组分 A 在边界层外的质量浓度	kg/m^3
ρ_{As}	组分 A 在界面处的质量浓度	kg/m^3
τ	剪应力、表面应力 (机械应力)	N/m^2
	过剩温度或温度差	K
	曲折因素	无因次
τ_s	作用在壁面上的剪应力	N/m^2
τ_{sx}	局部处 (x 处) 的摩擦应力	N/m^2
τ^r	湍流应力或雷诺应力	N/m^2
$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$	作用在与 x 、 y 、 z 轴相垂直面上 x 、 y 、 z 方向上的法向应力分量	N/m^2
τ_{xy}	作用在与 x 轴相垂直面上 y 方向上的剪应力分量	N/m^2
φ	单位体积流体的摩擦热速率	$\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$
	速度势函数	m^2/s
Ψ	流函数	m^2/s

无因次数群

Bi	毕渥数	$\frac{hl}{k}$
Eu	欧拉数	$\frac{p}{\rho u^2}$
Fo	傅立叶数	$\frac{a\theta}{l^2}$
Fr	弗鲁德数	$\frac{u^2}{gL}$
Gr	格拉斯霍夫数	$\frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta t}{\mu^2}$
Nu	努塞尔数	$\frac{hd}{k}$
Nu_x	局部努塞尔数	$\frac{hx}{k}$
Nu_m	平均努塞尔数	$\frac{hL}{k}$
Pr	普兰德数	$\frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k}$
Re	雷诺数 (管内流动)	$\frac{\rho u_b d}{\mu}$
Re_L	雷诺数 (平板壁面上的流动)	$\frac{\rho u_0 L}{\mu}$

Re_x	局部 (x 处) 雷诺数	$\frac{\rho u_0 x}{\mu}$
Re_{x_c}	临界雷诺数	$\frac{\rho u_0 x_c}{\mu}$
Sc	施米特数	$\frac{\nu}{D_{AB}} = \frac{u}{\rho D_{AB}}$
St	斯坦顿数	$\frac{h}{c_p \rho u_b}$
St'	传质斯坦顿数	$\frac{k_c^0}{u_b}$
St_x	局部斯坦顿数	$\frac{h_x}{c_p \rho u_0}$
St'_x	局部传质斯坦顿数	$\frac{k_{cx}^0}{u_0}$
Sh	施伍德数	$\frac{k_c^0 d}{D_{AB}}$
Sh_x	局部施伍德数	$\frac{k_{cx}^0 x}{D_{AB}}$
Sh_m	平均施伍德数	$\frac{k_{cm}^0 L}{D_{AB}}$
Kn	纽特逊数	$\frac{\lambda}{2r}$
j_H	传热 j 因数	$St Pr^{2/3}$
j_D	传质 j 因数	$St' Sc^{2/3}$
L^*	无因次长度	$\frac{x}{l}$
m	相对热阻	$\frac{k}{hx_1} = \frac{1}{Bi}$
n	相对位置	$\frac{x}{x_1}$
c_A^*	无因次浓度差	$\frac{c_A - c_{As}}{c_{A0} - c_{As}}$
T^*	无因次温度差	$\frac{t - t_s}{t_0 - t_s}$
T_b^*	无因次温度差	$\frac{t - t_b}{t_0 - t_b}$
U^*	无因次速度	$\frac{u_x}{u_0}$
u^+	无因次速度	$\frac{u}{u^*}$
y^+	无因次距离	$\frac{yu^*}{\nu}$
η	无因次位置	$y \sqrt{\frac{u_0}{\nu x}}$
$f(\eta)$	无因次流函数	$\frac{\Psi}{\sqrt{u_0 \nu x}}$

绪 论

化学工业是指对原料进行化学加工，以改变物质的结构或组成，或合成新物质，从而获得有用产品的制造业。由于原料、产品的多样性以及生产过程的复杂性，形成了数以万计的化工生产工艺。化学工程是研究化学工业及相关过程工业（Process industry）生产中所进行的物理过程和化学反应过程共同规律的一门工程学科。它的研究范围包括了所有采用化学加工技术的场合，不但覆盖了整个化学与石油化学工业，而且渗透到能源、环境、生物、材料、制药、冶金、轻工、卫生、信息等行业及技术领域。

化学工程学科的形成与发展经历了如下几个阶段。在 20 世纪 20 年代以前，人们对于化工过程的研究主要侧重于单一化工过程的工艺特性方面。那时，对于每一类化工过程的工艺，均被视为一门专门的“工艺知识”。化学工程的早期课程，即是以学习各种化工过程的工艺知识为基础。例如，化学肥料制造业、硫酸工业等等均被作为彼此独立的专门知识。20 年代以后，人们逐渐发现，各种化学工艺都可以分解为若干相对独立的操作“单元”，而且不同工艺的不同操作单元遵循着相同的原理。例如，无论是在制糖工业中，还是在肥料工业中，都会遇到由溶液蒸发溶剂（水）的操作，两者所遵循的原理是相同的，于是人们开始由原来的工艺知识转为“单元操作”（unit operations）的研究。蒸发是最早被提出的单元操作之一。被称为单元操作的还有：流体输送、过滤、加热与冷却、干燥、蒸馏、吸收、萃取、结晶等等。以单元操作作为研究和学习的主要内容，是化学工程学科在 20 世纪前半期发展阶段的基本情况。

20 世纪 50 年代以后，随着单元操作研究的不断深入，人们又发现若干单元操作之间亦存在着共性。例如，过滤是流体流动的一种特殊情况；蒸发是一种热量传递过程；吸收或萃取都遵循着质量传递的原理；而干燥与蒸馏则为热量和质量传递同时进行的过程。由此可知，对于单元操作原理的深入研究，最终都可以归结为对于动量传递、热量传递和质量传递的研究。1960 年，R. B. Bird, S. E. Stewart 和 E. N. Lightfoot 的著作《传递现象》（Transport Phenomena）首次问世，系统地阐述了动量、热量传递和质量传递的基本原理。嗣后，各种论述“动量、热量传递和质量传递”（momentum, heat, and mass transfer）的著作相继出版，从此传递过程原理这一课程成为化学工程学科的主干课程之一。

化学工程学科研究的两个基本问题：一为过程的平衡、限度；二为过程的速率以及实现过程所需要的设备。过程的平衡、限度问题属于化工热力学研究的范畴；而过程的速率问题包括化学反应过程的速率和物理过程的速率。化学反应过程的速率及实现过程的设备是化学反应动力学和化学反应工程研究的内容；物理过程的速率以及实现过程的设备是本课程和化工单元操作研究的内容。化工传递过程侧重于物理过程的速率及传递机理的探讨，而单元操作则注重解决过程的设备及工程方面的问题。

因此，传递过程原理是化工单元操作的基础，它注重从理论上揭示各种单元操作过程和设备的基本原理。结合特定的单元操作的过程和设备，深入地研究其动量、热量与质量传递的机理，不但可以为研究的过程提供基础数学模型，而且可以从理论上计算过程的速率。这对于化工过程和设备的开发、设计和优化起着十分重要的作用。另一方面，将动量、热量与

质量传递现象归结为速率问题进行综合探讨，还可以发现三类传递过程之间存在着基本的类似性。

综上所述，本课程的目的有二：一是研究各种物理过程的速率问题。具体地说，对于各种与流体流动相关的过程，如流体的输送、过滤、混合等，研究其动量传递的速率或流动的阻力；对于热量与质量传递过程，如物料的加热与冷却、吸收、萃取等，研究热量与质量传递的速率。二是探讨动量、热量传递和质量传递之间的类似性。这是因为三种传递过程之间，无论是传递机理还是数学描述以及结果方面，都有着惊人的类似。因此，研究它们之间的类似性，可以将一个传递过程的研究成果应用于另外的传递过程。这样可以取得事半功倍的效果。

本书与化工单元操作（化工原理）一起，是以研究化工中物理过程的速率以及实现过程的设备为主要内容的化学工程专业的基础课教材。在教学安排上，本教材既适于本科生学完化工原理后开设本课程之用，也适用于化工原理与本课程平行开设以及未学化工原理单独开设本课程的学生使用。

第一章 传递过程概论

传递现象是自然界和工程技术中普遍存在的现象。通常所说的平衡状态，是指物系内具有强度性质的物理量如温度、组分浓度等不存在梯度而言的。例如热平衡是指物系内的温度各处均匀一致；气体混合物的平衡是指物系内各处具有相同的组成等。反之，若物系处于不平衡状态，即具有强度性质的物理量在物系内不均匀时，则物系内部就会发生变化。例如，冷、热两物体互相接触，热量会由热物体流向冷物体，最后使两物体的温度趋于一致。对于任何处于不平衡状态的物系，一定会有某些物理量由高强度区向低强度区转移。物理量朝平衡转移的过程即为传递过程。

在传递过程中所传递的物理量一般为质量、能量、动量和电量等等。质量传递是指物系中一个或几个组分由高浓度区向低浓度区的转移；能量传递是指热量由高温区向低温区的转移。由此可见，质量、热量与动量传递之所以发生，是由于物系内部存在有浓度、温度和速度梯度的缘故。

在化学工程领域中，传递过程大多是在流体流动的状态下进行的。因此，流体流动与动量、热量和质量传递有非常密切的关系。

动量、热量与质量传递是一种探讨速率的科学，三者之间具有许多类似之处，它们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着某些定量关系。这些类似关系和定量关系会使研究三类传递过程的问题得以简化。

传递过程规律的研究，常采用衡算方法，即依据质量守恒、能量守恒（热力学第一定律）和动量守恒（牛顿第二运动定律）原理，在运动的流体中选择一特定的空间范围进行质量、能量和动量衡算，导出有关的衡算方程来解决传递过程规律问题。

本章作为研究动量、热量和质量传递的基础，主要论述流体流动的基本概念，动量、热量与质量传递的类似性及衡算方法等内容。

第一节 流体流动导论

流体是气体和液体的统称。流体由大量的彼此之间有一定间隙的分子所组成，各个分子都作着无序的随机运动。因此流体的物理量在空间和时间上的分布是不连续的。

对流体内部任意微小体积考察可知，由于流体分子随机运动跃入与跃出此体积的分子数并不时时平衡，而是随机波动，从而导致质量的变化，流体表现分子的个性。但当考察的微元体积增加至相对于分子几何尺寸足够大、而相对于容器尺寸充分小的某一特征体积时，便可不计分子随机运动进出此特征体积分子数变化所导致的质量变化，这时流体的宏观特性即为分子统计平均特性。此一特征体积中所有流体分子的集合称为流体质点。利用质点这一宏观概念，可将流体视为有无数质点所组成的连续介质，流体所占的空间全部为这个连续介质充满。工程实际中，主要研究流体的宏观运动规律而不探讨流体分子的运动，便可将流体作为连续介质处理。在传递过程中，可方便地运用数学上的连续函数理论研究流体运动问题。

一、静止流体的特性

流体静止状态是流体运动的特定状态，即流体在外力作用下处于相对静止或平衡状态。

静止流体的特性如密度、静压力和流体平衡规律等与流体流动有密切关系。

(一) 流体的密度

密度是流体的重要物理性质。单位体积流体所具有的质量称为流体的密度。

对于质量分布均匀的流体（均质流体），设在体积 V 内包含的质量为 M ，则密度的定义式为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度；
 V ——流体的体积；
 M ——流体的质量。

对于非均质流体，由于空间各点单位体积所包含的流体质量数值不同，流体的密度可用某一点处的值（点密度）表示。设流体某点周围的微元体积 dV 中包含质量 dM ，点密度的定义式为

$$\rho = \frac{dM}{dV} \quad (1-2)$$

由于假定流体为连续介质，故在同一时刻流体点密度是空间的连续函数。流体的其他物理量，如压力、浓度、速度、温度等，在给定时刻均为空间的连续函数。

流体的密度都随着温度和压力变化。对于液体，温度改变时其密度略有改变，工程应用中，可忽略压力的改变对液体密度的影响（极高压力除外）。气体密度受温度和压力改变的影响较明显，低压气体密度可按理想气体状态方程计算；高压气体密度可用实际气体的状态方程计算。

气体混合物或液体混合物的密度一般通过纯态物质的密度及各组分的质量分数进行计算。

单位流体质量的体积称为流体的比体积（或质量体积），其定义式为

$$v = \frac{V}{M} \quad (1-3)$$

式中 v ——流体的比体积。

流体的密度 ρ 与比体积 v 互为倒数，即

$$\rho v = 1 \quad (1-4)$$

(二) 可压缩流体与不可压缩流体

流体在外力的作用下，其体积发生变化而引起密度变化，作用在流体的外力增加时，其体积减小。流体的这种特性称为可压缩性。

一般情况下，液体的压缩性很小，甚至无压缩性；气体体积受压力和温度的影响较大，可压缩性较为明显。

密度不随空间位置和时间变化的流体，称为不可压缩流体。通常液体可视为不可压缩流体。

密度随空间位置或时间变化的流体，称为可压缩流体。气体为可压缩流体，但在某些情况下，如气体等温流动且压力改变不大时，也可近似按不可压缩流体处理。

(三) 流体的压力

静止流体受各种外力的作用而处于平衡状态，其中一种外力垂直作用于流体的表面。垂直作用于流体单位面积上的力，称为流体的压强，习惯上称为压力。若均匀地垂直作用于