

高等学校试用教材

化工传递过程基础

王绍亭 陈涛 编

化学工业出版社

化工传递过程基础

化学工业出版社

社

高等学校试用教材

化工传递过程基础

王绍亭 陈 涛 编

化学工业出版社
· 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/王绍亭, 陈涛编.—北京: 化学工业出版社, 1987.11(1998.8重印)

高等学校试用教材

ISBN 7-5025-1356-6

I.化… II.①王… ②陈… III.①化工过程-动量-传递-高等学校-教材 ②化工过程-传质-高等学校-教材 ③化工过程-热量-传递-高等学校-教材 IV.TQ021

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第01601号

高等学校试用教材

化工传递过程基础

王绍亭 陈涛 编

责任编辑: 李洪勋

封面设计: 官历

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市燕山联营印刷厂印刷

北京市燕山联营印刷厂装订

*

开本787×1092毫米1/16 印张18¹/₄ 字数434千字

1987年11月第1版 1998年8月北京第5次印刷

印数: 15171—20170

ISBN 7-5025-1356-6/G·346

定价: 19.50元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

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_{ac}	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	直径	m
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	单位质量的总能量	J/kg
E_t	总能量	J
F	力、外力	N
F_i	惯性力	N
F_s	表面力或机械力	N
F_x, F_y, F_z	外力在直角坐标系 x, y, z 三个方向上的分量	N
F_{xB}, F_{yB}, F_{zB}	质量力在直角坐标系 x, y, z 三个方向上的分量	N
F_{xg}, F_{yg}, F_{zg}	流体所受的重力在 x, y, z 三个方向上的分量	N
H	焓	J/kg
H_t	总焓	J
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 (浓度梯度引起的摩尔通量)	$kmol/m^2 \cdot s$
K	总传热系数	$W/m^2 \cdot K$
	比例系数、常数	无因次
L	长度	m
L_w, L_t, L_D	流动、传热、传质进口段长度	m
M	质量	kg
M_A, M_B	组分 A, B 的分子量	$kg/kmol$
M_m	平均分子量	$kg/kmol$
M_i	组分 i 的质量	kg
M'	摩尔量	$kmol$
M_i'	组分 i 的摩尔量	$kmol$
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	$kmol/m^2 \cdot s$
N_A^0	组分 A 的瞬时传质通量	$kmol/m^2 \cdot s$

P	总压力	N/m^2
P	线动量	$\text{kg}\cdot\text{m/s}$
Q	单位质量所吸收的热量	J/kg
R	通用气体常数	$\text{J/kmol}\cdot\text{K}$
R_i	组分 i 的生成速率	kg/s
R_i'	组分 i 生成的摩尔速率	kmol/s
R_A	单位体积中组分 A 生成的摩尔速率	$\text{kmol/m}^3\cdot\text{s}$
S	气体在固体中的溶解度	$\text{m}^3/\text{atm}\cdot\text{m}^3$
T	绝对温度	K
U	单位质量的内能	J/kg
U_t	总内能	J
V	体积	m^3
W	单位质量所作的功	J/kg
W_s	单位质量所作的轴功	J/kg
\dot{W}	作功速率、功率	J/s
\dot{W}_s	轴功率	J/s
X	x 方向上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	组分 A, B 的质量分数	无因次
c	固体比热	$\text{J/kg}\cdot\text{K}$
c_A, c_B	组分 A, B 的摩尔浓度	kmol/m^3
c_{A0}	组分 A 的主体平均浓度	kmol/m^3
c_{A0}	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	定压比热和定容比热	$\text{J/kg}\cdot\text{K}$
d	管径、孔径	m
d_e	当量直径	m
e	绝对粗糙度	m
f	范宁摩擦因数	无因次
g	重力加速度	m/s^2
h	对流传热系数 (膜系数)	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$
h_x, h_m	局部 (x 处) 和平均对流传热系数	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$
h_v^0	喷出参数为零时的局部对流传热系数	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$
j_A	相对于质量平均速度 u 的组分 A 的质量通量 (浓度梯度引起的质量通量)	$\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$
j_A'	组分 A 的涡流扩散通量	$\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$
k	导热系数	$\text{W/m}\cdot\text{K}$
k_g, k_g	气相对流传质系数	m/s
k_L, k_L	液相对流传质系数	m/s
k_G^0, k_G	气相对流传质系数	$\text{kmol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Pa})$
k_x^0, k_x	液相对流传质系数	$\text{kmol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\Delta x)$

k_g, h_g	气相对流传质系数	$\text{kmol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\Delta y)$
$k_{c,x}, h_{c,x}$	局部 (x 处) 对流传质系数	m/s
$k_{c,m}, k_{c,m}$	平均对流传质系数	m/s
$(k_{c,x}^0)^0$	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	$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$
n_A, n_B	相对于静止坐标的组分 A 、 B 的质量通量	$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$
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
p_{BM}	惰性组分 B 的对数平均分压	N/m^2
p_{A0}, p_{A1}	组分 A 在气相主体、气液界面处的分压	N/m^2
q	热流速率	J/s
\dot{q}	单位体积中释放的热速率	$\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{s}$
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 的生成速率	$\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{s}$
	组分 A 的分子半径	m
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_m	平均温度	K
t_w	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、相对于静止坐标的流体质量平均速度	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_i	层流内层外缘处的流速	m/s
u_M	相对于静止坐标的流体摩尔平均速度	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	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_{y_s}	在壁面处的法向速度	m/s
u^*	摩擦速度 $=\sqrt{\tau_w/\rho}$	m/s
v	比容	m^3/kg
v_A, v_B	组分 A 、 B 的分子扩散体积	cm^3/gmol
w	质量流率	kg/s
w'	摩尔流率	kmol/s

w_i'	组分 i 的摩尔流率	kmol/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
x_{cB}	惰性组分 B 的对数平均摩尔分数	无因次
y_A, y_B	组分 A, B 在气相中的摩尔分数	无因次
y_{BM}	气体惰性组分 B 的对数平均摩尔分数	无因次
z	高度、轴向距离、扩散距离	m
z_θ	在 θ 瞬时的扩散距离	m

希腊文符号

α	热扩散系数 (导温系数)	m^2/s
	速度向量与控制面外向法线之间的夹角	rad
	截面速度分布校正系数	无因次
β	x 轴与重力方向之间的夹角	rad
δ	速度边界层厚度	m
δ_b	层流内层 (层流底层) 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
ϵ_{AB}	A 与 B 分子之间作用的能量	erg
ϵ	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
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'	柱坐标系和球坐标系微分衡算方程中的时间	s
θ_0	有效暴露时间 (溶质渗透理论)	s
λ	分子运动平均自由程	\AA
μ	(动力) 粘度	$N \cdot s/m^2$
μ_B	溶剂的粘度	N/m^2
ν	运动粘度	m^2/s
ρ	密度、质量浓度、系统总密度	kg/m^3
ρ_A, ρ_B	组分 A, B 的密度	kg/m^3
ρ_{A0}	组分 A 在边界层外的均匀密度	kg/m^3
ρ_{As}	组分 A 在界面处的密度	kg/m^3
δ_{AB}	平均碰撞直径	\AA
τ	剪应力、表面应力 (机械应力)	N/m^2
	过剩温度或温度差	K
	曲折因数	无因次
τ_s	作用在壁面上的剪应力	N/m^2
$\tau_{s,x}$	局部处 (x 处) 的摩擦应力	N/m^2
τ'	涡流剪应力或雷诺应力	N/m^2

$\overline{\tau}$	湍流剪应力的时均值	N/m^2
τ'	总时均剪应力	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
τ_{xz}	作用在与 x 轴相垂直面上 z 方向上的剪应力分量	N/m^2
τ_{yz}	作用在与 y 轴相垂直面上 z 方向上的剪应力分量	N/m^2
τ_{zx}	作用在与 z 轴相垂直面上 x 方向上的剪应力分量	N/m^2
τ_{zy}	作用在与 z 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 (散逸热速率)	$\text{J/m}^3 \cdot \text{s}$
φ_m	管内平均流速与中心处流速的比值	无因次
ψ	流函数	m^2/s

无因次数群

Bi	皮欧数	$\frac{hL}{k}$
Fo	傅立叶数	$\frac{\alpha\theta}{l^2}$
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	普朗德数	$\frac{\nu}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{k}$
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_{xc}	临界雷诺数	$\frac{\rho u_0 x_c}{\mu}$
Sc	施米特数	$\frac{\nu}{D_{AB}} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$
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	$\frac{k_{c,x}^0}{u_0}$
Sh	舍伍德数	$\frac{k_c^0 d}{D_{AB}}$

Sh_x	局部舍伍德数	$\frac{v_{c,0} x}{D_{AB}}$
Sh_m	平均舍伍德数	$\frac{k_{cm} L}{D_{AB}}$
$K\eta$	组特逊数	$\frac{\lambda}{2r}$
j_H	传热 j 因数	$St Pr^{1/3}$
j_D	传质 j 因数	$St' Sc^{2/3}$
L^*	无因次长度	$\frac{x}{l}$
R	相对热阻	$\frac{k}{hx_1} = \frac{1}{Bi}$
x	相对位置	$\frac{x}{x_1}$
c^*	无因次浓度差	$\frac{c_A - c_{A0}}{c_{A0} - c_{A0}}$
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	$\frac{y u^*}{\nu}$
η	无因次位置	$y \sqrt{\frac{u_0}{\nu x}}$
$f(\eta)$	无因次流函数	$\frac{\psi}{\sqrt{u_0 \nu x}}$

内 容 提 要

本书是化工部教育司组织的“教材评审会”推荐出版的“化学工程”及相近专业的专业基础课教材。

书中论述了化学工程中动量传递、热量传递与质量传递的基本原理、数学模型及其求解方法；三类传递过程的类似性和传递理论的一些工程应用等。全书共十三章，各章中均附有定数量的例题和习题，以便帮助学生对本书内容的理解和运用。

本书可作为高等院校“化学工程”专业及相近的化工类各专业大学本科教材，也可供化工领域中从事科研、设计和生产的科学技术人员参考。

全书由天津大学化学工程系丁绪淮教授审定。

目 录

主要符号说明	
绪言	1
习题	1
第一章 动量、热量与质量传递导论	2
第一节 动量、热量与质量传递的 类似性	2
1-1 分子传递的基本定律	2
1-2 动量通量、热量通量与质量通量的 普遍表达式	4
1-3 涡流传递的类似性	7
第二节 圆管中的稳态层流	8
1-4 圆管中稳态层流时的速度分布	8
1-5 主体流速	9
习题	10
第二章 总质量、总能量和总动量衡算	12
第一节 总质量衡算	12
2-1 简单几何体的质量衡算	12
2-2 通用的总质量衡算方程	19
第二节 总能量衡算	22
2-3 通用的总能量衡算方程	22
2-4 化工流体流动的总能量衡算	24
第三节 总动量衡算	29
2-5 通用的总动量衡算方程	29
习题	32
绪言、一、二章主要参考文献	34
第三章 连续性方程与运动方程	35
第一节 连续性方程	35
3-1 连续性方程的推导	35
3-2 对连续性方程的分析	37
第二节 运动方程	41
3-3 用应力表示的运动方程	41
3-4 应力与形变速率之间的关系	45
3-5 奈维-斯托克斯方程	46
习题	50
第四章 运动方程的若干解	52
第一节 平壁间的稳态层流	52
4-1 平壁间的稳态层流	52
第二节 圆管中与套管环隙中的稳态 层流	56
4-2 圆管中的稳态平行层流	56
4-3 套管环隙中的稳态层流	58
第三节 爬流与势流的基本概念	61
4-4 爬流	61
4-5 势流	64
第四节 流线与流函数	66
4-6 流线与流线方程	66
4-7 流函数	68
习题	70
第五章 边界层流动	72
第一节 边界层概念	72
5-1 边界层的形成	73
5-2 边界层厚度的定义	74
第二节 曳力系数	74
5-3 曳力系数与范宁摩擦因数	74
第三节 边界层方程	75
5-4 普兰德边界层方程的推导	75
第四节 边界层积分动量方程	78
5-5 边界层积分动量方程的推导	78
5-6 流体沿平板壁面流动时层流边界 层的计算	81
5-7 管道进口段的流体流动	85
第五节 边界层分离	86
5-8 边界层分离与形体曳力	88
习题	88
第六章 湍流	89
第一节 湍流的特点、起因及表征	89
6-1 湍流的特点	89
6-2 湍流的起因	90
6-3 时均量与脉动量	91
6-4 湍动强度	92
第二节 湍流时的流体运动方程	91
6-5 雷诺方程与雷诺应力	94

第三节 湍流的半经验理论	98	似解	170
6-6 普兰德动量传递理论	98	9-6 管内层流传热	176
第四节 圆管中的湍流	101	第三节 湍流下的热量传递	181
6-7 普兰德混合长与通用速度分布 方程	101	9-7 涡流热扩散系数与混合长	181
6-8 光滑管中的速度分布与流动 阻力	106	9-8 雷诺类似律与泰勒-普兰德的 修正式	182
6-9 粗糙管中的速度分布与流动 阻力	110	9-9 卡门类似律	187
第五节 流体沿平板壁面流动时湍流边界 层的计算	112	9-10 柯尔本的 j_H 因数类似法	188
6-10 湍流边界层的计算	112	9-11 平板壁面湍流边界层传热的 近似解	191
习题	115	习题	196
三、四、五、六章主要参考文献	116	七、八、九章主要参考文献	197
第七章 能量方程	118	第十章 质量传递概论与传质微分方程	198
7-1 能量方程的推导	118	第一节 质量传递的基本方式	198
7-2 能量方程的特定形式	121	10-1 分子传质	198
7-3 柱坐标系和球坐标系的能量 方程	123	10-2 对流传质	199
习题	125	第二节 分子传质的速度与通量	199
第八章 热传导	126	10-3 扩散速度与平均速度	200
第一节 稳态热传导	126	10-4 扩散通量与主体流动通量	201
8-1 无内热源的一维稳态导热问题的分 析解	126	第三节 质量传递微分方程	204
8-2 有内热源的一维稳态导热	128	10-5 质量传递微分方程的推导	204
8-3 二维稳态导热的数值解	130	10-6 传质微分方程的特定形式	207
第二节 不稳态热传导	135	习题	209
8-4 忽略内热阻的不稳态导热	135	第十一章 分子传质	211
8-5 半无限固体的不稳态导热	137	第一节 稳态分子扩散的通用速率 方程	211
8-6 大平板的不稳态导热	141	11-1 停滞介质中稳态分子扩散速率方 程的通用积分形式	211
8-7 多维不稳态导热	150	第二节 气体中的分子扩散	211
8-8 一维不稳态导热的数值解	152	11-2 组分A通过停滞组分B的稳态 扩散	211
习题	156	11-3 组分A通过停滞组分B的拟稳态 扩散	215
第九章 对流传热	158	11-4 等分子反方向稳态扩散	216
第一节 对流传热的机理与膜系数	158	11-5 气体扩散系数	217
9-1 对流传热的机理	158	第三节 液体中的分子扩散	221
9-2 温度边界层(热边界层)	159	11-6 液体中的稳态分子扩散速率 方程	221
9-3 对流传热系数(膜系数)	159	11-7 液体中的扩散系数	224
第二节 层流下的热量传递	161	第四节 固体中的扩散	226
9-4 平板壁面上层流传热的精 确解	161	11-8 与固体结构无关的稳态扩散	227
9-5 平板壁面上层流传热的近		11-9 多孔固体中的稳态扩散	229

习题	233	12-10 传质理论	264
第十二章 对流传质	235	习题	267
第一节 对流传质系数	235	第十三章 同时进行动量、热量与质量传递的过程	269
12-1 速度边界层对传质的影响	235	13-1 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
12-2 对流传质系数的定义	236	习题	275
12-3 浓度边界层	240	十、十一、十二、十三章主要参考文献	275
第二节 层流下的质量传递	241	附录	276
12-4 平板壁面上层流传质的精确解	242	附录 A 主要物理量的单位换算表	276
12-5 平板壁面上层流传质的近似解	247	附录 B 误差函数表	277
12-6 管内层流传质	251	附录 C 分子扩散时 $\Omega_D \sim \frac{kT}{\epsilon_{AB}}$ 之间的关系表	278
第三节 湍流下的质量传递	254	附录 D 勒奈特-琼斯参数 σ 、 ϵ 数值表	278
12-7 涡流扩散系数与混合长	254		
12-8 质量、热量与动量传递之间的类似律	255		
12-9 平板壁面上湍流边界层质量传递的近似解	261		

绪 言

远在化学工程学科开始被重视之前,已经有不少化学工业建立起来。那时,每一类化学工业的工艺,均被视为一门专门知识。但是后来发现,各类不同化学工艺的物理过程,几乎都是由性质类似的“单元”、即“单元操作”(unit operations)组成。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“蒸发”便成为最早被提出的单元操作之一。被称为单元操作的还有:流体流动、过滤、传热、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,是化学工程学科在二十世纪前半期发展阶段的基本情况。

当单元操作被了解得更加深入以后,又发现若干单元操作之间存在着共性。例如,蒸发不过是热量传递的一种形式;吸收与萃取都含有质量传递的特性;干燥与蒸馏则属于热量传递和质量传递同时进行的过程。作为单元操作基础的流体流动也可视为一种传递现象,即动量传递。由此可知,对于单元操作任何深入的研究,最终都可归结为对于动量传递、热量传递和质量传递的研究,这就是1960年前后,“动量、热量与质量传递”(Momentum, Heat, and Mass Transfer)或“传递现象”(Transport Phenomena)这一学科或课程形成的来源。

与“化工热力学”不同,“化工传递过程”是一门探讨传递速率的课程。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,可以发现三类传递过程之间存在着基本的类似性。

对于化工工作者而言,学习“化工传递过程”课程还具有如下两个最基本的目的。第一,它可以帮助化工工作者深入地了解各“传递过程”的机理,这对于改善各类传递过程和设备的设计、操作和控制过程十分重要;第二,为所研究的过程提供基础数学模型,有了过程的基础数学模型后,在电子计算机的帮助下,就可以进行过程数学模拟的研究。当然,这并不是说“化工传递过程”课程的内容仅与科学研究有关而尚未达到实用阶段,事实上,本书中所讨论的相当部分内容,已经成功地应用于工程生产实际中了。

本书是继学完“化工原理”、“化工热力学”和“化工应用数学”之后,进一步学习化学工程专业的基础课教材。

本书使用的计量单位采用1984年2月国家计量局制定的“中华人民共和国法定计量单位”。鉴于国内外计量单位的现况,在本书附录A列出了一个主要物理量换算表。

习 题

- 0-1 在1atm大气压力下,测得某容器内的真空度为60mmHg,试求算容器内的绝对压力(用SI单位表示)。
- 0-2 比热的工程单位为kcal/kg·°C,SI单位为J/kg·K,试定出二者之间的换算因数。
- 0-3 粘度的工程单位为cP、SI单位为Pa·s,试证明二者之间的换算因数为 1×10^{-3} 。
- 0-4 热辐射中的斯蒂芬-波尔茨曼常数 $\sigma = 4.96 \times 10^{-8} \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°K}^4$,试将 σ 换算成以SI单位 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 表示的值。
- 0-5 CS₂的水以0.8ft/s的平均流速流过内径为1.5in的圆管,试确定水在管中流动的流型。

第一章 动量、热量与质量传递导论

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；动量传递则是在垂直于实际流体流动方向上，动量由高速区向低速区的转移。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。

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规律的问题得以简化。

第一节 动量、热量与质量传递的类似性

1-1 分子传递的基本定律

如物系中存在着速度、温度和浓度梯度，则分别发生动量、热量和质量的传递现象。动量、热量和质量传递，既可由分子的微观运动引起，也可由旋涡混合造成的流体微团的宏观运动引起。前者称为分子传递，后者称为涡流传递。由分子运动引起的动量传递，可采用牛顿粘性定律描述；由分子运动引起的热量传递为热传导的一种形式，可采用傅立叶定律描述；而由分子运动引起的质量传递称为分子扩散，则采用费克定律描述。牛顿粘性定律、傅立叶定律和费克定律都是描述分子运动引起的传递现象的基本定律。

一、牛顿粘性定律

工程技术中所遇到的流体均为实际流体。实际流体与所谓“理想”流体的一个根本区别，在于前者具有粘性而后者则无粘性。因此，当理想流体运动时，两个互相接触的流体层之间不会产生剪切力。此外，理想流体流过固体壁面时，还会产生滑脱现象。但当实际流体运动时，由于粘性作用，流体层之间会产生剪切力，而且当其流过固体壁面时，它会附着于壁面上而不滑脱。

如图1-1所示，设想在静止的流体中放置两块彼此平行的无限大平板，上板静止，下板以恒速向右运动，于是紧贴在运动平板表面上（即 $y=0$ ）的一层流体，将跟随着平板一起运动，并获得一定量的沿 x 方向的动量（表为 x -动量）。由于实际流体存在粘性，

所以板面上的这层流体必然会将其动量的一部分传递给与之毗邻的上层流体，而使后者亦沿 x 方向运动起来。当然，后者的流速要低一些。由此可知， x -动量会沿 y 方向层层传递，而使两板间的全部流体沿 x 方向产生运动，最后建立一个一定的速度分布。如流速不大时，两板间的流体作层流流动，此时由于动量传递而使两流体层之间产生剪应力（单位面积上的剪切力）。实验证明，剪应力与速度梯度成正比，用公式表示为：

$$\tau = -\mu \frac{du_x}{dy} \quad (1-1)$$

式中： τ ——剪应力；

μ ——动力粘度（粘度）；

du_x/dy ——速度梯度或剪切速率。

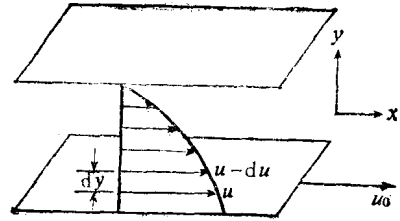


图 1-1 粘性与动量传递图

式 (1-1) 称为牛顿粘性定律 (Newton's law of viscosity)。剪应力 τ 是作用在与 y 方向相垂直的单位面积上的力，它由 x -动量在 y 方向上的通量而产生。式中的负号表示动量通量的方向与速度梯度的方向相反，即动量朝着速度降低的方向传递。比例常数 μ 为流体的动力粘度，一般简称为粘度。

式 (1-1) 中的 τ 仅表示流体沿 x 方向作一维流动时， x -动量在 y 方向传递的动量通量所引起的一个力。若流体作三维流动时，流体的表面应力将有九个之多，上述的力只是其中的一个分量。关于流体作三维流动时所产生的剪应力的表达方法，将在第三章中讨论。

粘度是流体的一种物理性质，它仅为流体的状态（压力、温度、组成）的函数，与剪应力或速度梯度（剪切速率）无关。气体的粘度随温度的升高而增加；液体的粘度随温度的升高而降低。所有液体的粘度与同温度下该液体变为蒸气状态的粘度相比要高得多。理想气体的粘度与压力无关，但实际气体和液体的粘度一般随压力的升高而增加。

凡是遵循牛顿粘性定律的流体统称为牛顿型流体。所有气体和低分子量的大多数液体均属于牛顿型流体。不遵循牛顿粘性定律的流体统称为非牛顿型流体，某些泥浆、污水、聚合物溶液和油漆等，均属于非牛顿型流体。研究非牛顿型流体的学科称为流变学 (Rheology)。本书仅针对牛顿型流体进行探讨。

二、傅立叶定律

对于导热现象，可采用傅立叶定律 (Fourier's law) 描述：

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dt}{dy} \quad (1-2)$$

式中： q/A ——热通量；

k ——物质的导热系数；

dt/dy ——温度梯度。

式 (1-2) 中的 q 为 y 方向的导热速率， A 为垂直于热流方向 (y 向) 的导热面积。式中负号表示热通量方向与温度梯度的方向相反，即热量是朝着温度降低的方向传递的。

导热系数 k 也是物质的物理性质。不同物质的 k 值差别很大。对于同一物质，导热系数主要是温度的函数，压力对它的影响不大，但气体的导热系数在高压或真空下则受压力

的影响。对于同一物质， k 值可以随不同方向变化，若 k 值与方向无关，则在此情况下的导热称为各向同性导热。

三、费克定律

在混合物中若各组分存在浓度梯度时，则发生分子扩散。对于两组分系统，分子扩散所产生的质量通量，可用下式描述：

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (1-3)$$

式中： j_A ——组分 A 的扩散质量通量；

D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的扩散系数；

$d\rho_A/dy$ ——组分 A 的质量浓度（密度）梯度。

式 (1-3) 为费克定律 (Fick's law) 的一种表达形式。式中 j_A 为组分 A 在单位时间内通过与扩散方向 (y 向) 相垂直方向上的单位面积的质量。式中负号表示质量通量的方向与浓度梯度的方向相反，即组分 A 朝着浓度降低的方向传递。扩散系数 D_{AB} 与组分的种类、温度、组成等因素有关。

由牛顿粘性定律、傅立叶定律和费克定律的数学表达式 (1-1)、(1-2)、(1-3) 可以看出，动量、热量与质量传递过程的规律存在着许多类似性，即：各过程所传递的物理量都与其相应的强度因素的梯度成正比，并且都沿着负梯度（降度）的方向传递。各式中的系数只是状态的函数，与传递的物理量或梯度无关。因此，通常将粘度、导热系数和分子扩散系数均视为表达传递性质或速率的物性常数。由于上述三式中，传递的物理量与相应的梯度之间均存在线性关系，故上述这三个定律又常称为分子传递的线性现象定律。

1-2 动量通量、热量通量与质量通量的普遍表达式

一、动量通量

假设所研究的流体为不可压缩流体，即密度 ρ 为常数，则牛顿粘性定律式 (1-1) 便可写成如下形式：

$$\tau = -\frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho u_x)}{dy} = -\nu \frac{d(\rho u_x)}{dy} \quad (1-4)$$

及

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

式中： τ ——剪应力或动量通量，其单位为：

$$[\tau] = \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2}{\text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

ν ——运动粘度或称动量扩散系数，其单位为：

$$[\nu] = \frac{[\mu]}{[\rho]} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right] \left[\frac{\text{m}}{\text{kg}} \right] = [\text{m}^2/\text{s}]$$

ρu_x ——动量浓度，其单位为：

$$[\rho u_x] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}}{\text{m}^3} \right]$$