

PRINCIPLE

OF

传递过程原理

TRANSPORT

PROCESSES

曾作祥 主编



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

传递过程

PRINCIPLE

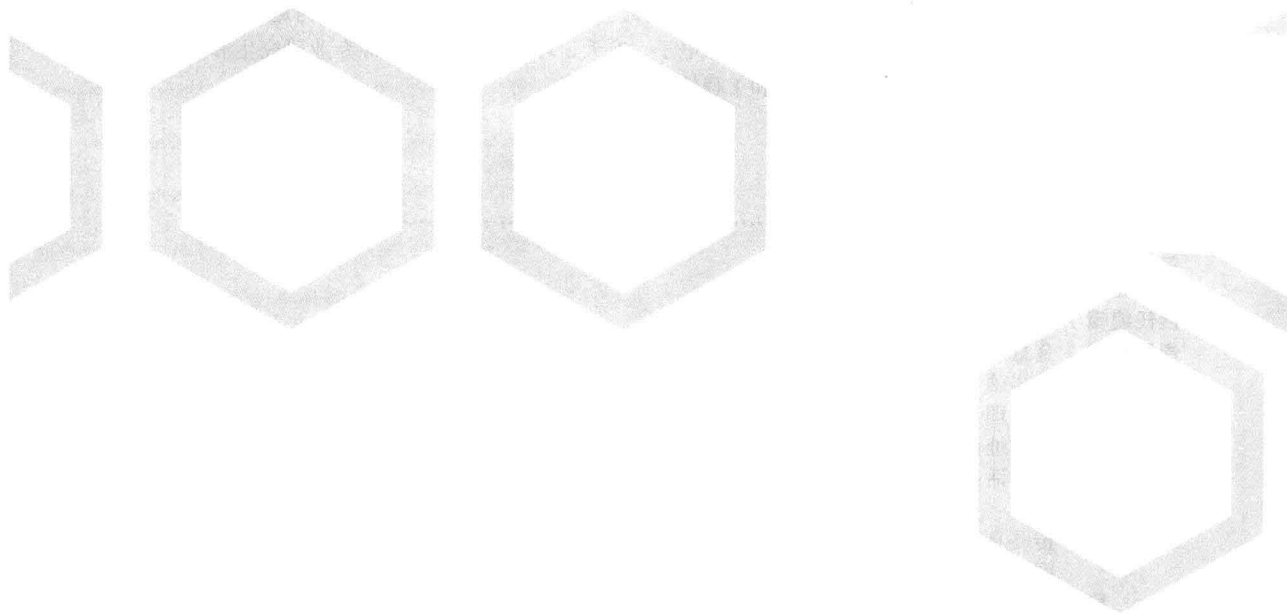
OF

TRANSPORT

PROCESSES

原理

曾作祥 主编



 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

传递过程原理/曾作祥主编. —上海:华东理工大学出版社,2013.6
ISBN 978-7-5628-3540-0

I. ①传… II. ①曾… III. ①传递-化工过程-理论 IV. ①TQ021

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 080836 号

内 容 提 要

本书从介绍传递过程的机理着手,试图阐明传递过程的基本物理现象、规律、概念及处理问题的基本方法。本书共 8 章:第 1 章为全书的基础;第 2、第 3 章为动量传递篇,运用欧拉法,以动量守恒定律(牛顿第二定律)为依据,先后导出了以应力表达的运动微分方程和奈维-斯托克斯方程,进而分别探讨了层流动量传递和湍流动量传递规律;第 4、第 5 章为热量传递篇,运用拉格朗日法,以热量守恒定律(热力学第一定律)为依据,导出了能量方程,进而探讨了导热和对流传热规律;第 6、第 7、第 8 章为质量传递篇,以质量守恒定律为依据导出了扩散方程,讨论了分子传质、对流传质和相间传质规律,并探讨了几个典型的“三传”同时进行的复杂传递规律。此外,各章还配有例题、思考题和习题。

本书可以作为化工、动力、机械、土建、电子、航天、环境和生物工程等专业研究生和教师的教学教材,也可以供上述专业的科研、设计和工程技术人员参考。

传递过程原理

主 编 / 曾作祥
策划编辑 / 焦婧茹
责任编辑 / 焦婧茹
责任校对 / 金慧娟
封面设计 / 肖祥德
出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司
地 址:上海市梅陇路 130 号,200237
电 话:(021)64250306(营销部)
(021)64252344(编辑室)
传 真:(021)64252707
网 址:press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司
开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 / 21
字 数 / 507 千字
版 次 / 2013 年 6 月第 1 版
印 次 / 2013 年 6 月第 1 次
书 号 / ISBN 978-7-5628-3540-0
定 价 / 48.00 元

联系我们:电子邮箱 press@ecust.edu.cn
官方微博 e.weibo.com/ecustpress
淘宝网 <http://shop61951206.taobao.com>

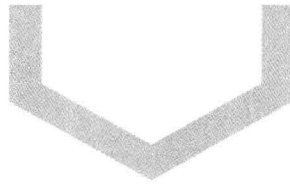
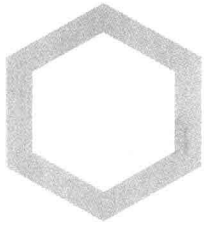




前言

传递过程原理是探讨动量传递、热量传递和质量传递(简称“三传”)速率规律的一门科学。一名合格的化学工程师要求对传递过程具有深刻的认识并能熟练求解相关问题,因此传递过程原理已成为所有工科专业,特别是化学工程与工艺专业研究生的必修课之一。其主要内容包括:传递机理和传递现象基本方程(现象定律和连续性方程)、动量传递(运动方程、层流、湍流的速度分布和摩擦因数)、传热理论(能量方程、导热、对流传热机理、传热系数及相间传热理论)、传质理论(扩散方程、分子扩散、对流传质机理、传质系数及相间传质理论)及三传同时进行的传递规律等。随着三传理论和应用方面研究的不断深入,新的知识点也在不断增加,使得现在出版的有关传递学的教材越来越厚,这将不能满足工科类专业课学时减少的改革趋势。

本书是以工科专业特别是化学工程与工艺专业的研究生为对象编写的。第1章为全书的基础,从传递机理和现象定律入手,运用质量守恒定律导出了连续性方程并对各项物理意义进行了分析,同时引出了随体导数的概念和两种观察事物的方法(欧拉法和拉格朗日法);第2、第3章为动量传递篇,运用欧拉法,以动量守恒定律(牛顿第二定律)为依据,先后导出了以应力表达的运动微分方程和奈维-斯托克斯方程,进而分别探讨了层流动量传递和湍流动量传递规律,系统介绍了边界层理论、普朗特动量传递理论及布拉修斯相似原理;第4、第5章为热量传递篇,运用拉格朗日法,以热量守恒定律(热力学第一定律)为依据,导出了能量方程,进而探讨了导热和对流传热规律;第6、第7、第8章为质量传递篇,以质量守恒定律为依据导出了扩散方程,讨论了分子传质和对流传质及相间传质规律,并探讨了几个典型的三传同时进行的复杂传递规律。此外,各章还配有例题、思考题和习题。



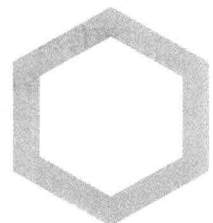
本书的特色在于系统地介绍了相间传热和相间传质的规律。全书注重问题的提出,并试图引导读者从不同视角分析解决同一问题。希望读者能从中体会三传之间的内在联系,并能融会贯通地用动量传递的信息解决传热和传质问题。

全书是编者结合自己多年的研究生教学实践而编写的,并由袁渭康院士主审。编写本书时参考了国内外相关专著、期刊等文献,分别列在各章之后的参考文献部分,在此对相关作者表示感谢。

由于编者水平有限,不妥或错误之处恳请读者批评指正。

编者

2012年11月于上海



主要符号说明



英文字母

- A ——面积、截面积、传热面积、传质面积, m^2 ;
 A_{av} ——平均面积, m^2 ;
 A_r ——径向 r 处的面积, m^2 ;
 c ——系统的总摩尔浓度, kmol/m^3 ;
 c_A, c_B ——组分 A、B 的摩尔浓度, kmol/m^3 ;
 c_{Ab} ——组分 A 的主体平均浓度, kmol/m^3 ;
 c_{Am} ——组分 A 的平均浓度, kmol/m^3 ;
 c_{A0} ——组分 A 在边界层外的均匀浓度, kmol/m^3 ;
 c_{Aw} ——组分 A 在壁面处的浓度, kmol/m^3 ;
 c_{Ai} ——组分 A 两相界面处的浓度, kmol/m^3 ;
 \bar{c}_A ——组分 A 的时均浓度, kmol/m^3 ;
 c'_A ——组分 A 的脉动浓度, kmol/m^3 ;
 c_{av} ——液相平均总摩尔浓度, kmol/m^3 ;
 C_D ——曳力(阻力)因数, 量纲为一;
 C_{Dx} ——局部(x 处)曳力因数, 量纲为一;
 C_{Dx}^0 ——喷出参数为零时局部曳力因数, 量纲为一;
 D ——直径, m ;
 D_{AB} ——组分 A 通过组分 B 的扩散系数, m^2/s ;
 D_{AEP} ——有效扩散系数, m^2/s ;
 D_{Am} ——多组分系统中组分 A 的扩散系数, 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、合外力, N ;
 F_B ——质量力或体积力, N ;
 F_d ——曳力、摩擦曳力, N ;
 F_g ——单位质量流体所受的重力, N/kg ;
 F_s ——表面力或机械力, N ;

- F_{df} ——形体曳力(阻力), N;
 F_{ds} ——摩擦曳力(阻力), N;
 F_{AB} ——组分 A 在组分 B 中扩散时的比例系数, $\text{kg}/(\text{kmol} \cdot \text{s})$;
 G ——质量速度、质量通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 气相摩尔流率, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
 H ——焓, J/kg,
 亨利常数, 量纲为一;
 I ——湍动强度, 量纲为一;
 J_A ——组分 A 的扩散摩尔通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
 K ——总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,
 平衡常数, 量纲为一;
 L ——长度, m;
 L_e, L_t, L_D ——流动、传热、传质进口段长度, m;
 M ——分子量, kg/kmol ;
 M_A ——组分 A 的分子量, kg/kmol ;
 M_m ——平均分子量, kg/kmol ;
 N ——相对于静止坐标的总摩尔通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
 N_A ——相对于静止坐标的组分 A 的摩尔通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
 N_{A0} ——组分 A 的瞬时传质通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
 P_x, P_y, P_z ——动量在 x, y, z 三个方向上的分量, $(\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}$;
 Q ——单位质量吸收的热量, J/kg;
 R ——通用气体常数, 为 $8\,314.34 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;
 R_A ——单位体积中组分 A 的生成摩尔速率, $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$;
 T ——温度、绝对温度, K;
 T_m ——平均温度, K;
 T_w ——壁面温度, K;
 T_0 ——基准温度、初始温度、边界层外的均匀温度, K;
 U ——单位质量的内能, J/kg;
 U_t ——总内能, J;
 V ——体积, m^3 ,
 体积流率, m^3/s ;
 W ——单位质量所做的功, J/kg;
 W_s ——单位质量所做的轴功, J/kg;
 \dot{W} ——做功速率、功率, J/s;
 \dot{W}_s ——轴功率, J/s;

- X, Y, Z —— x, y, z 三个方向上单位质量流体的质量力, N/kg ;
- a ——比表面积, m^2/m^3 ;
- a_A, a_B ——组分 A、B 的质量分数, 量纲为一;
- c_p ——比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;
- c_v ——比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;
- d ——管径、孔径, m ;
- d_p ——颗粒直径, m ;
- f ——范宁摩擦因数, 量纲为一;
- g ——重力加速度, m/s^2 ;
- h ——对流传热系数或膜系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- h_x ——局部处(x 处)的对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- h_m ——平均对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- h_x^0 ——喷出参数为零时的局部对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- j_A ——组分 A 的扩散质量通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
- k ——导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
- k_c^0, k_c ——气相传质系数, m/s ;
- k_L^0, k_L ——液相传质系数, m/s ;
- k_G^0, k_G ——气相传质系数, $\text{kmol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa})$;
- k_y^0, k_y ——气相传质系数, $\text{kmol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \Delta y)$;
- k_x^0, k_x ——气相传质系数, $\text{kmol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \Delta x)$;
- k_{cx}^0, k_{cx} ——局部处(x 处)的对流传质系数, m/s ;
- k_{cm}^0, k_{cm} ——平均对流传质系数, m/s ;
- l ——普朗特混合长, 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 ——总压, Pa ;
- p_A ——组分 A 的分压, Pa ;
- p_d ——动力压力, Pa ;
- p_s ——静压力, Pa ;
- p_0 ——远离物体处的压力, Pa ;
- p_{BM} ——惰性组分 B 的对数平均分压, Pa ;
- p_{iM} ——不扩散组分的对数平均分压, Pa ;
- p_{AG}, p_{Ai} ——组分 A 在气相主体、气液界面处的分压, Pa ;
- 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_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 ;
 \hat{s} ——表面更新率, s^{-1} ;
 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 相对静止坐标的速度(绝对速度), m/s ;
 u_b ——主体平均流速, m/s ;
 u_o ——远离物体的平行流流速、边界层外的均匀流速, 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_x, u_y, u_z ——流速在 x, y, z 三个方向上的分量, m/s ;
 u_r, u_θ, u_z ——流速在 r, θ, z 三个方向上的分量, m/s ;
 u_r, u_ϕ, u_θ ——流速在 r, ϕ, θ 三个方向上的分量, m/s ;
 u_{yw} ——在壁面处垂直于壁面方向上的速度, m/s ;
 u^* ——摩擦速度, $\sqrt{\tau_s/\rho}$, m/s ;
 v ——流体的比容, m^3/kg ;
 w ——质量流率, kg/s ;
 x_c ——临界距离, m ;
 x_i ——组分 i 的摩尔分数(分子分数), 量纲为一;
 x_{BM} ——惰性组分 B 的对数平均摩尔分数, 量纲为一;
 y_A, y_B ——组分 A、B 在气相中的摩尔分数, 量纲为一;
 y_{BM} ——气相惰性组分 B 的对数平均摩尔分数, 量纲为一。

希腊字母

- α ——热扩散系数(导温系数), m^2/s ;
 δ ——速度边界层厚度, m ;
 δ_b ——层流内层厚度, m ;
 δ_i ——虚拟的导热膜厚度, m ;
 δ_c ——浓度边界层厚度, m ;
 δ_T ——温度边界层厚度, m ;
 ϵ ——涡流(运动)黏度, m^2/s ; 空隙率, 量纲为一; 绝对粗糙度, mm ;
 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 。

- θ ——时间, s; 柱坐标方位角、球坐标余纬角, rad;
 θ' ——柱、球坐标系微分衡算方程中的时间, s;
 θ_c ——有效暴露时间(溶质渗透理论), s;
 λ ——分子平均自由程, Å;
 μ ——黏度, Pa · s;
 ν ——运动黏度, m²/s;
 ρ ——流体密度, kg/m³;
 ρ_A, ρ_B ——组分 A、B 的密度, kg/m³;
 ρ_{Am} ——组分 A 的平均密度, kg/m³;
 ρ_{A0} ——组分 A 在边界层外的均匀密度, kg/m³;
 ρ_{Aw} ——组分 A 在界面处的密度, kg/m³;
 σ ——表面张力, N/m;
 τ ——剪应力, N/m²; 曲折因数, 量纲为一;
 τ_w ——作用在壁面上的剪应力, N/m²;
 τ' ——涡流剪应力或雷诺应力, N/m²;
 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$ ——法向应力分量, N/m²;
 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ——剪应力分量, N/m²;
 Φ ——单位体积流体的摩擦热速率, J/(m³ · s);
 ϕ ——球坐标系中的方位角、夹角, rad,
 速度势函数, m²/s;
 Ψ ——流函数, m²/s;
 ω ——角速度, rad/s。

量纲为一数群

- Nu ——努塞尔数, $\frac{hd}{k}$;
 Nu_x ——局部努塞尔数, $\frac{hx}{k}$;
 Pr ——普朗特数, $\frac{\gamma}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k}$;
 Re ——雷诺数, $\frac{\rho u_b d}{\mu}$;
 Re_c ——临界雷诺数, $\frac{\rho u_0 x_c}{\mu}$;
 Sc ——施密特数, $\frac{\gamma}{D_{AB}} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$

St ——斯坦顿数, $\frac{h}{c_p \rho u_b}$;

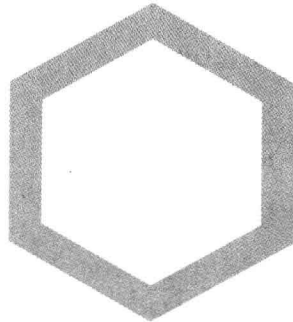
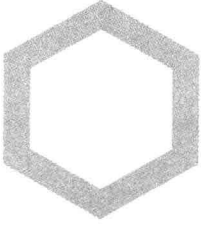
St' ——传质斯坦顿数, $\frac{k_c^0}{u_b}$;

Sh ——修伍德数, $\frac{k_c^0 d}{D_{AB}}$;

Sh_x ——局部修伍德数, $\frac{k_{cx}^0 x}{D_{AB}}$;

j_H ——传热 j 因数, $St Pr^{2/3}$;

j_D ——传质 j 因数, $St' Sc^{2/3}$ 。





第 1 章 传递现象及其基本定律	1
1.1 传递机理	1
1.2 分子传递与现象定律	2
1.2.1 牛顿黏性定律	3
1.2.2 傅里叶定律	4
1.2.3 费克定律	4
1.2.4 分子传递的类似性——现象定律	5
1.3 总质量、总动量和总能量衡算	6
1.3.1 控制体和控制面	7
1.3.2 总质量衡算	7
1.3.3 总能量衡算	10
1.3.4 总动量衡算	12
1.4 微分衡算与连续性方程	14
1.4.1 微分衡算方程	14
1.4.2 直角坐标系中连续性方程的推导	14
1.4.3 随体导数	15
1.4.4 连续性方程的分析及其各项物理意义	17
1.4.5 欧拉法和拉格朗日法	18
1.4.6 连续性方程的化简	19
1.4.7 柱坐标系和球坐标系中的连续性方程	20
1.5 量纲分析法	21
1.5.1 量纲与量纲为一化	21
1.5.2 Π 定理——Bridgman 方程	22
1.5.3 量纲为一的数的意义及其应用	24
参考文献	26
思考题	26
习 题	27
第 2 章 运动方程与层流动量传递	28
2.1 运动方程——动量传递微分方程	28
2.1.1 体积力	29
2.1.2 表面力	29
2.1.3 以应力表示的运动方程	31

2.1.4	奈维-斯托克斯方程——N-S方程	32
2.2	简单流场内的层流	36
2.2.1	平行平板间的稳态层流	36
2.2.2	圆管内的稳态层流	39
2.2.3	套管环隙间的轴向流动	42
2.3	旋转层流流动	44
2.4	振荡流动——非稳态流动	45
2.4.1	静止流体中的平板启动	46
2.4.2	平板简谐振荡	46
2.5	流线和流函数	48
2.5.1	流线及其特性	48
2.5.2	流线方程	49
2.5.3	流管	49
2.5.4	流函数	50
2.6	势流	52
2.6.1	势流与欧拉方程	52
2.6.2	势流的速度分布和压力分布——伯努利方程	55
2.7	爬流	57
2.7.1	爬流运动微分方程	57
2.7.2	绕球层流运动与斯托克斯流	58
2.7.3	斯托克斯阻力定律	61
2.7.4	斯托克斯阻力定律的应用	62
2.7.5	奥森流	64
2.8	边界层理论基础	65
2.8.1	边界层的形成	66
2.8.2	边界层分离	68
2.9	边界层运动微分方程	70
2.9.1	边界层方程的推导	70
2.9.2	边界层方程的精确解——布拉修斯相似原理	74
2.9.3	位移厚度与动量厚度	78
2.9.4	圆管进口段的流动	79
2.10	边界层积分动量方程	80
2.10.1	边界层积分动量方程的推导	80
2.10.2	层流边界层的近似计算	82
	参考文献	84
	思考题	84
	习题	85

第 3 章 湍流动量传递	87
3.1 湍流的特征	87
3.1.1 湍流的主要特征	87
3.1.2 时均值与脉动值	88
3.1.3 湍动强度	90
3.1.4 湍流的起源	90
3.2 湍流基本方程——雷诺方程	94
3.2.1 雷诺转换与雷诺方程	94
3.2.2 动量传递与湍流附加应力	96
3.3 普朗特动量传递理论——湍流唯象理论	97
3.3.1 涡流黏度	97
3.3.2 普朗特混合长	97
3.4 光滑管中的湍流	99
3.4.1 层流内层的速度分布方程	99
3.4.2 湍流主体的速度分布方程	101
3.4.3 过渡层的速度分布方程	102
3.4.4 速度衰减定律	103
3.4.5 流动阻力与摩擦因数	103
3.4.6 范宁摩擦因数的经验关联式	104
3.5 粗糙管中的流动	106
3.5.1 粗糙度与范宁摩擦因数	106
3.5.2 速度分布方程与流动阻力	108
3.6 平板壁面的湍流边界层	109
3.6.1 边界层速度分布方程	109
3.6.2 边界层厚度	110
3.6.3 流动阻力	111
3.7 自由湍流	112
3.7.1 自由射流的发展	112
3.7.2 卷吸机理	114
3.7.3 自由射流特性参数的估计	114
3.7.4 自由射流的实验观测	116
3.7.5 复杂射流	120
参考文献	121
思 考 题	121
习 题	121

第 4 章 能量方程与导热	123
4.1 传热方式与传热机理	124
4.1.1 分子传递与热传导	124
4.1.2 涡流传递与对流传热	124
4.1.3 辐射传热	124
4.2 能量方程——传热微分方程	125
4.2.1 直角坐标系中能量方程的推导	125
4.2.2 不可压缩流体的能量方程	127
4.2.3 固体的导热	127
4.2.4 柱坐标系和球坐标系中的能量方程	128
4.2.5 边界条件	129
4.3 稳态导热	130
4.3.1 无内热源的一维稳态导热	130
4.3.2 有内热源的一维稳态导热	131
4.3.3 无内热源的二维稳态导热	132
4.4 非稳态导热	133
4.4.1 半无限固体的非稳态导热	133
4.4.2 平板两端面温度恒定的非稳态导热	136
4.4.3 具有两个对流传热边界的大平板非稳态导热	139
4.4.4 一维非稳态导热的简易图算法	141
4.5 二维稳态导热的数值解	142
参考文献	146
思考题	146
习 题	147
第 5 章 对流传热	149
5.1 对流传热概论	149
5.1.1 对流传热基本概念	149
5.1.2 对流传热系数——传热膜系数	151
5.2 平壁层流边界层能量方程精确解	152
5.3 平壁层流传热的近似解	155
5.4 圆管层流传热	160
5.4.1 管壁热通量恒定的传热	161
5.4.2 管壁温度恒定的传热	163
5.4.3 圆管入口段传热	163
5.5 自然对流传热	165
5.5.1 传热特点及基本方程	165

5.5.2	无界垂直平壁	167
5.6	湍流传热	171
5.6.1	湍流能量方程	171
5.6.2	涡流热扩散系数与混合长	172
5.6.3	雷诺类似律——单层模型	173
5.6.4	普朗特类似律——双层模型	176
5.6.5	卡门类似律——三层模型	178
5.6.6	Chilton - Colburn 类似律	180
5.6.7	湍流传热系数经验关联式	181
5.7	冷凝与沸腾传热	182
5.7.1	管内冷凝	182
5.7.2	沸腾传热中的多相流	183
5.7.3	管内沸腾	186
	参考文献	189
	思考题	190
	习 题	190
第 6 章	扩散方程与分子传质	193
6.1	传质概论	193
6.1.1	传质机理与传质方式	194
6.1.2	传质基本概念及其表征	195
6.2	扩散方程——传质微分方程	199
6.2.1	双组分扩散方程的推导	199
6.2.2	扩散方程的化简	201
6.2.3	扩散方程的初始条件和边界条件	202
6.3	稳态分子传质	204
6.3.1	气体中的分子扩散	204
6.3.2	多组分气体混合物的扩散	210
6.3.3	液体中的溶质扩散	215
6.3.4	固体中的稳态扩散	218
6.4	非稳态分子传质	221
6.4.1	半无限长区域内的非稳态扩散	221
6.4.2	无限大平板中沿厚度方向进行的非稳态扩散	222
6.5	伴有化学反应的分子传质	224
6.5.1	伴有零级化学反应的分子扩散	225
6.5.2	伴有一级化学反应的分子扩散	225
6.6	二维和三维分子传质	227

6.6.1	具有分析解的二维、三维分子扩散	228
6.6.2	二维稳态分子扩散的数值解	229
参考文献	.....	232
思考题	.....	232
习题	.....	233
第7章	对流传质	236
7.1	对流传质概论	236
7.1.1	对流传质基本概念	236
7.1.2	对流传质系数	237
7.2	层流质量传递	240
7.2.1	平壁层流传质系数精确解	240
7.2.2	浓度边界层的近似解	245
7.2.3	圆管内的层流传质	247
7.3	湍流质量传递	250
7.3.1	平壁湍流浓度边界层近似解	250
7.3.2	动量、热量与质量传递类似性	253
7.3.3	动量、热量与质量传递类似律	255
7.4	动量、热量与质量同时进行的传递	259
7.4.1	动量与质量同时进行的传递	259
7.4.2	动量、热量与质量同时进行的传递	263
参考文献	.....	268
思考题	.....	269
习题	.....	269
第8章	相间传质	272
8.1	相间传质概论	272
8.1.1	相间传质基本概念	272
8.1.2	相间传质系数	273
8.2	相间传质理论	274
8.2.1	双膜理论	274
8.2.2	溶质渗透理论	276
8.2.3	表面更新理论	278
8.2.4	传质理论进展	279
8.2.5	界面湍动与 Marangoni 效应	280
8.3	固体颗粒的相间传质	282
8.3.1	球形颗粒与静止流体间的传质	282