

高等学校教学用书

传递过程原理

韩兆熊 编著

浙江大学出版社

内 容 简 介

本书从研究动量传递、热量传递和质量传递三种传递过程的机理着手，阐明传递过程的基本规律、基本概念、基本物理现象以及处理问题的基本方法。

全书内容共分三大部分：第一部分的中心问题是建立“传递过程”的基本方程组；第二部分向读者介绍普兰德(Prandtl)边界层模型，以及在层流和湍流两种截然不同的流体力学条件下的“传递现象”；第三部分讨论相间传递问题。在每章末尾附有一定数量的例题和习题(附有答案)。全书全部采用SI制。

本书可作为高等工业学校化工、机械、航天、热物理、土木等专业本科生和研究生“传递过程原理”课的教材。亦可作为上述专业的研究人员、设计人员和其他工程技术人员的参考书。

传 递 过 程 原 理

林兆熊 编著

责任编辑 贾晔柱

* * *

浙江大学出版社出版

浙江大学印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

787×1092 16开 印张33.125 785千字
1988年11月第1版 1988年12月第1次印刷
印数：1—2000

ISBN 7-308-00094-X

N·001 定价：6.45元

序

对“传递现象”这一自然界基本的物理现象的探索与研究，近年来愈来愈广泛地受到国内外许多科学工作者和工程技术人员的关注。特别应引起重视的是不少学者在发展理论的同时，成功地把“传递现象”的某些基本理论应用于机械、航天、化工、土木、生物等工程实践中，取得了颇有成效的结果。

本书试图从研究“传递现象”的机理着手，建立一个比较严密比较完整的体系，并努力阐明“传递现象”的基本规律、基本概念、基本物理现象以及处理问题的基本方法。全书内容共分三大部分：第一部分的中心问题是建立“传递现象”基本方程组，使读者一开始就对描述“传递现象”基本规律的方程组有一个全面完整的了解。这样立足于一般形式的方程组来考虑具体问题，能够站得高、看得远，这部分内容很基本，对今后进一步的研究十分有用。第二部分将向读者介绍普兰德(Prandtl)边界层模型，在分析传递机理的基础上，揭示出传递过程进行的“阻碍”所在。如果这方面知识掌握得扎实，对设备的强化及操作的合理性就有了较好的理论基础，将会对生产的发展带来很大的促进。这里将详细地分析在层流和湍流两种截然不同的流体力学条件下的“传递现象”。第三部分将讨论相间传递问题。详细介绍这种情况下传质过程的特殊性，相间传质(热)理论及其工业应用。当然在课程的初始阶段建立复杂的“传递现象”方程组会给一些读者带来难点较集中的问题，但是这些困难比起由此安排带来的好处相比还是第二位的，也是不难克服的。

本书力求既讲清直观的物理概念，又不忽略严格的数学处理，把物理概念和数学方法有机地结合起来。近年来，在研究一个系统中的动量、能量和质量传递现象时，向量分析的知识已成为必要的工具。三维空间坐标系的传递方程，一般都是很复杂的，为了把它们写成既简单又有意义的形式，必须借助向量分析这个重要的数学工具。而不少读者在这之前并没有系统地学过这方面的内容，因此本书将结合物理现象的描述，数学模型的建立和求解过程，初步地向读者介绍这部分数学内容，以便为进一步学习打下基础。为了便于自学，本书在引入一个概念或介绍一种方法时，力求讲清来龙去脉，讲清要点，并在每章末尾附有一定数量的例题与习题，它们是本书不可缺少的构成部分，希望读者尽可能多做这些习题，这是吸收和消化理论最好的方法。所有习题都附有答案，以备读者核对自己的结果。同时，作者认为对于“直观的物理概念”和“严格的数学处理”偏废任何一方都将会影响学生分析问题和解决问题能力的培养。

本书作为讲义曾在清华大学、北京理工大学、浙江大学等院校试用过，在征得各方面意见后完成了此稿。

本书承蒙华东化工学院戴干策教授对原稿进行了认真审阅和热忱帮助，并提出了宝贵的建议，使本书的质量有明显的提高，作者愿趁此机会向他表示衷心感谢。

本书在编写过程中得到天津大学王绍亭教授、陈涛副教授，清华大学张克、刘谦副教授的指导与帮助，谨此致谢。

作者感谢浙江大学出版社贾吉柱同志，由于他的辛勤劳动，大大地减少了书中的错误和疏漏。

由于作者学识有限，谬误和不妥之处一定不少，恳请读者批评指正，以便再版时修改。

韩兆熊

1987年2月15日于浙江大学

主要符号表

A	面积	m^2
C_p	热容	$J/^\circ C$
C_f	阻力(曳力)系数	无因次
C_{fx}	局部(x 处)的阻力(曳力)系数	无因次
C_{fL}	L 段的平均阻力(曳力)系数	无因次
D	管道直径	m
D_{AA}	组分 A 的自扩散系数	m^2/s
D_{AB}	组分 A 在双组分混合物 A 、 B 中的扩散系数	m^2/s
D_{AB}^0	稀溶液中,溶质 A 在溶剂 B 中的扩散系数	m^2/s
D_{ABP}	固体多孔介质中,有效分子扩散系数	m^2/s
D_{kp}	努森(Knudsen)扩散系数	m^2/s
D_p	多孔介质中,过渡区扩散时的扩散系数	m^2/s
D_{sp}	表面扩散系数	m^2/s
D_f	物质在厚度为 δ 的流体膜内的扩散系数	m^2/s
E	单位质量流体所具有的位能	J/kg
	化学反应增强因子	无因次
E_i	瞬时反应增强因子	无因次
E_t	单位质量流体所具有的总能量	J/kg
F	作用于运动物体上的合外力	N
F_B	流体所受到的质量力	N
F_{ds}	摩擦曳力	N
F_{df}	形体曳力	N
$F_{r_1}(F_{r_2})$	作用在环隙 $r_1(r_2)$ 面上的剪切力	N
F_s	流体所受到的表面力	N
G	气相摩尔通量	$mol/(m^2 \cdot s)$
G_s	单位时间内,通过单位横截面积不含溶质的气体摩尔数	$mol/(m^2 \cdot h)$
H	焓	J/kg
ΔH_A	正常沸点下的焓	J/mol
H_G	气相传质单元高度	m
H_L	液相传质单元高度	m
I	湍动强度	无因次
J_A	组分 A 相对于摩尔平均速度 u_M 的摩尔通量	$mol/(m^2 \cdot s)$
K_G	基于分压为推动力的总传质系数	$mol/(m^2 \cdot s \cdot \Delta p)$
K_L	基于液相浓度为推动力的总传质系数	$mol/(m^2 \cdot s \cdot \Delta c_A)$
L	定性长度	m
L_c	流动进口段长度	m

L_i	传热进口段长度	m
L_D	传质进口段长度	m
L_s	单位时间内通过单位横截面积不含溶质的液体总摩尔数	mol/(m ² ·h)
M	力矩	N·m
	分子量	kg/kmol
N	相对于静止坐标的总摩尔通量	mol/(m ² ·s)
$N_A(N_B)$	组分A(B)相对于静止坐标的摩尔通量	mol/(m ² ·s)
Q	单位质量流体所吸收的热量	J/kg
	物体在 θ 时刻的实际热损失	J
	湍流运动中任何瞬时值	
\bar{Q}	湍流运动中任何时均值	
Q'	湍流运动中任何脉动值	
Q_0	物体在初始时刻相对于环境温度的内能	J
R_i	单位体积中, 组分A的摩尔生成速率	mol/(m ³ ·s)
$R_0(R_1)$	零级(一级)反应速度常数	
U	单位质量流体所具有的内能	J/kg
V	体积	m ³
	原子体积	cm ³ /mol
$V_A(V_B)$	正常沸点下溶质分子体积	cm ³ /mol
	组分A(B)的分子扩散体积	cm ³ /mol
V_c	临界条件下的分子体积	cm ³ /mol
W	质量流速	kg/s
W_A	组分A的质量分数	无因次
W'	单位质量流体所作的有用功	J/kg
X	x 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	任何矢量	
a	填料有效比表面积	m ² /m ³
$c^{0.6}$	系统的总摩尔浓度	mol/m ³
c_A	组分A的摩尔浓度	mol/m ³
c_{Ab}	圆管中组分A的整体摩尔浓度	mol/m ³
c_{Ai}	相界面处组分A的摩尔浓度	mol/m ³
c_{Ae1}	与第二相主体相平衡的组分A的平衡浓度	mol/m ³
c_{Ae2}	与第一相主体相平衡的组分A的平衡浓度	mol/m ³
$c_{A\infty}$	组分A在主体流区域的摩尔浓度	mol/m ³
c_A^*	与气相 p_{AG} 相平衡的组分A的浓度	mol/m ³

c_{av}	组分 A 的平均总摩尔浓度	mol/m^3
c_G	气膜的填充因子	无因次
c_i	体积元的热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
c_p	定压比热	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
c_s	多孔介质中被吸附的扩散物质的表面浓度	kmol/m^3
c_v	定容比热	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
d	圆管直径	m
d_n	水力直径	m
e	管道的绝对粗糙度	mm
e_s	等效粗糙度	mm
f	范宁(Fanning)摩擦系数	无因次
h	对流传热系数或膜系数	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
\bar{h}	圆管中平均对流传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
h_m	平板上平均对流传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
h_{fg}	蒸汽的冷凝潜热	J/kg
h_x	局部 (x 处) 对流传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
j_A	组分 A 相对于质量平均速度 u 的质量通量	$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
j_D	Chilton-Colburn类似中传质 j 因子	无因次
j_H	Chilton-Colburn类似中传热 j 因子	无因次
k	导热系数	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
	一级反应速度常数	
k_c^0, k_c	气相对流传质系数	m/s
$k_{c_x}^0, k_{c_x}$	局部 (x 处) 对流传质系数	m/s
$k_{c_m}^0$	平均对流传质系数	m/s
k_f	流体的导热系数	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
k_G^0, k_G	气相对流传质系数	$\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\Delta p)$
k_L^0, k_L	液相对流传质系数	m/s
k_s	固体的导热系数	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
k_x^0, k_x	液相对流传质系数	$\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\Delta x)$
k_y^0, k_y	气相对流传质系数	$\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\Delta y)$
l	普兰德(Prandtl)混合长	m
l_w	单位质量流体所损失的摩擦功	J/kg
n	相对于静止坐标的总质量通量	$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
	每 1cm^3 中气体分子个数	
$n_A(n_B)$	组分 $A(B)$ 相对于静止坐标的质量通量	$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
n^+, n_-	正、负离子的价数	
p	总压力、瞬时压力	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
$p_A(p_B)$	组分 $A(B)$ 的分压	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$

\bar{p}	时均压力	N/m ² (Pa)
p'	脉动压力	N/m ² (Pa)
p_A^*	与液相主体浓度 c_{AL} 相平衡的组分A的分压	N/m ² (Pa)
$p_{AG}(p_{Ai})$	组分A在气相主体和气液界面处的分压	N/m ² (Pa)
p_{ave}	槽深一半处的压力	N/m ² (Pa)
p_{Blm}	惰性组分B的对数平均分压	N/m ² (Pa)
p_c	临界压力	N/m ² (Pa)
p_d	动力压强	N/m ² (Pa)
p_{st}	静压强	N/m ² (Pa)
p_m	流体主体流压强	N/m ² (Pa)
q	热流速率	J/s
\dot{q}	单位体积能量生成速率	J/(m ³ ·s)
q_r	r 方向热流速率	J/s
q_s	通过壁面单位面积的热流强度	J/(m ² ·s)
r_A	单位体积中生成组分A的质量速率	kg/(m ³ ·s)
r_{cr}	临界绝热半径	m
r_i	管道的半径	m
r_{max}	对应于最大流速处距中心线的距离	m
s	表面更新率	s ⁻¹
t	温度, 瞬时温度	K(或℃)
\bar{t}	时均温度	K(或℃)
t'	脉动温度	K(或℃)
t_b	层流底层外缘处的温度; 圆管中整体(混合室)温度; 流体的平均温度	K(或℃)
t_f	流体的膜温度	K(或℃)
t_g	液膜外缘的蒸汽温度; 过渡层外缘处的流体温度	K(或℃)
t_i	无限大平板、无限长圆柱体、 圆球的中心(面、线)的温度	K(或℃)
t_m	平均温度	K(或℃)
t_0	初始温度; 圆管内流动流体的中心温度	K(或℃)
t_s	固体表面温度	K(或℃)
t_w	固体壁面处流体的温度	K(或℃)
t_∞	边界层外主体流温度	K(或℃)
u	速度矢量	m/s
u	流速, 瞬时速度	m/s
\bar{u}	时均速度	m/s

u'	脉动速度	m/s
$\dot{\mathbf{u}}$	加速度矢量	m/s
u^*	摩擦速度	m/s
$u_{\text{平}}(u_b)$	平均速度	m/s
u_b	层流底层外缘处的速度	m/s
u_{in}	假想速度	m/s
u_M	摩尔平均速度	m/s
u_n	界面处速度的法向分量	m/s
u_s	界面处速度的切向分量	m/s
u_{ys}	固体壁面与壁面垂直方向的流体速度	m/s
u_{∞}	边界层外主体流速度	m/s
v	比容	m ³ /kg
\bar{v}	分子的平均速度	m/s
\bar{v}_A	组分 A 分子的平均速度; $\sqrt{\frac{8KT}{\pi M_A}}$	m/s
x_i	组分 i 的摩尔分数	无因次
x_c	临界距离	m
x_0	定温区长度	m
$y_A(y_B)$	气相中组分 A(B) 的摩尔分数	无因次
α	热扩散系数 (导热系数); 速度向量与控制面外法线方向的夹角; x 轴与重力方向 之间的夹角	m ² /s rad
α_e	电量扩散系数	m ² /s
β	热膨胀系数	1/K
	y 轴与重力方向之间的夹角	rad
Γ	单位宽度平板上流体的质量流量	kg/(m·s)
r	活度系数	无因次
	z 轴与重力方向之间的夹角	rad
δ	速度边界层的厚度	m
δ_b	层流底层的厚度	m
δ'_b	当量层流底层的厚度	m
δ_c	浓度边界层的厚度	m
δ_t	温度边界层的厚度	m
ε	空隙率	无因次
$\varepsilon_A, \varepsilon_{AB}$	Lennard-Jones 势参数	10 ⁻⁷ J
ε_H	涡流热量扩散系数	m ² /s
ε_M	涡流运动粘度	m ² /s
ε_m	涡流质量扩散系数	m ² /s

θ	时间	s
θ'	柱坐标系、球坐标系中微分衡算方程中的时间	s
$\bar{\lambda}$	分子运动平均自由程	10^{-10}m
λ_+^0, λ_-^0	零浓度的电导率	$(\text{A}/\text{cm}^2)(\text{V}/\text{cm})(\text{mol}/\text{cm})$
μ	动力学粘度	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
$\mu_A, (\mu_A^0)$	组分A的化学势和标准状态下的化学势	J/kmol
ν	运动粘度; 动量扩散系数	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
Π	润滑周边	m
ρ	密度; 质量浓度; 系统总密度	kg/m^3
$\rho_A(\rho_B)$	组分A(B)的密度	kg/m^3
ρ_{A_s}	组分A在壁面处的密度	kg/m^3
ρ_{A_∞}	主体流中组分A的密度	kg/m^3
ρ_G	气相密度	kg/m^3
ρ_L	液相密度	kg/m^3
$\sigma(\sigma_{AB})$	Lennard-Jones势参数	10^{-10}m
$\sigma_{xx}(\sigma_{yy}, \sigma_{zz})$	法向粘性应力	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
τ	切应力; 表面应力	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
	曲折因数	无因次
τ_s	作用在壁面上的切应力	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
τ_{xx}	局部(x处)的切应力	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
τ^r	雷诺应力	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
τ_{ab}	作用在与a轴向相垂直的平面上, b方向上的切应力分量	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
$\bar{\tau}$	分子应力的时均值	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
$\bar{\tau}^r$	雷诺应力的时均值	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
$\bar{\tau}^t$	总切应力的时均值	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
Φ	势函数	
	微元平面的前倾角	rad
	单位体积流体内部逸散能量的速率	$\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$
ϕ	浓度边界层厚度与边界层厚度之比, δ_c/δ	无因次
φ	任何标量	
ψ	流函数	
$\Omega_s(\Omega_s)$	基于Lennard-Jones势参数的碰撞积分(对于粘度和导热系数)	
Ω_0	基于Lennard-Jones势参数的碰撞积分(对于质量扩散系数)	
ω	角速度	rad/s
Bi	毕渥(Biot)数	hL/k

Cb	毛细管浮力准数	$\nu \left(\frac{\rho^3 g}{\sigma^3} \right)^{1/4}$
Co	冷凝准数	$h_m \left[\frac{\mu^2}{k^3 \rho (\rho - \rho_s) g} \right]^{1/3}$
$ Fo$	傅里叶(Fourier)数	$\frac{\alpha \theta}{L}$
$ Gr$	传热的葛拉晓夫(Grashof)数	$\frac{g \beta (t_s - t_\infty) L^3 \rho^2}{\mu^2}$
$ Gr_M$	传质的葛拉晓夫数	$\frac{\gamma g (W_{A_s} - W_{A_\infty}) L^3}{\nu^2}$
$ Gr_z$	格雷茨(Grätz)数	$Re Pr \frac{d}{L}$
$ Le$	路易斯(Lewis)数	$\frac{k}{\rho c_p D_{AB}}$
$ Nu$	努赛尔特(Nusselt)数	$\frac{hd}{k}$
$ Nu_x$	局部(x 处)的努赛尔特数	$\frac{hx}{k}$
$ \overline{Nu}$	对应于 \bar{h} 的努赛尔特数	$\frac{\bar{h}d}{k}$
$ Nu_m$	对应于 h_m 的努赛尔特数	$\frac{h_m \dot{L}}{k}$
$ Pe$	贝克利(Peclet)数	$\frac{du \rho c_p}{k}$
$ Pr$	普兰德(Prandtl)数	$\frac{c_p \mu}{k}$
$ Ra$	瑞利(Rayleigh)数	$\frac{\beta g (t_s - t_\infty) L^3}{\nu \alpha}$
$ Ra_M$	传质时的瑞利数	$\frac{\gamma g (W_{A_s} - W_{A_\infty}) L^3}{\nu D_{AB}}$
$ Re$	雷诺(Reynolds)数	$\frac{\rho u_b d}{\mu} ; \frac{\rho u_\infty L}{\mu}$
$ Re_{xc}$	临界雷诺数	$\frac{\rho u_x x_c}{\mu}$
$ Re_f$	凝结系统雷诺数	$\frac{D_H \rho u \pi}{\mu_f}$
$ Sc$	施密特(Schmidt)数	$\frac{\mu}{\rho D_{AB}}$
$ Sh$	修伍德(Sherwood)数	$\frac{k_c^0 d}{D_{AB}}$
$ Sh_x$	局部(x 处)的修伍德数	$\frac{k_{c,x}^0 x}{D_{AB}}$

Sh_m	对应于 k_{cm} 的修伍德数	$\frac{k_{cm}^0 L}{D_{AB}}$
Sh_D	均匀的传质量时, 发展着的浓度边界层局部(x 处)的修伍德数(5-116式)	
$\overline{Sh_D}$	恒定壁面浓度时, 发展着的浓度边界层 L 段的修伍德数(5-117式)	
©	无因次浓度差	$\frac{C_A - C_{As}}{C_{A\infty} - C_{As}}$
n	无因次长度	$\frac{x}{L}$
m	相对热阻	$\frac{k}{hL} = \frac{1}{Bi}$
u^+	无因次速度	$\frac{u}{u^*}$
y^+	拟雷诺数	$\frac{yu^*}{\nu}$
⊖	无因次温度差	$\frac{t - t_s}{t_{\infty} - t_s}$
η	无因次位置	$y\sqrt{\frac{u_{\infty}}{\nu x}}$
K	波尔兹曼常数	$1.38054 \times 10^{-23} \text{J/K}$
N	阿佛加德罗常数	$6.02252 \times 10^{23} / \text{mol}$
R	气体常数	$8.314 \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

目 录

绪论	(1)
0-1 “传递过程原理”的发展和内容	(1)
0-2 现象方程	(2)
1. 动量通量	(2)
2. 能量通量	(4)
3. 质量通量	(5)

第一篇 “传递现象”基本方程组

第一章 微分衡算方程	(9)	2. 边界条件	(47)
1-1 连续介质流体及其研究方法	(9)	1-6 分子扩散传递性质	(50)
1. 连续介质假定	(9)	1. 粘度系数	(50)
2. 描述流体运动的两种观点——拉格朗日(Lagrange)观点和欧拉(Euler)观点	(10)	2. 导热系数	(53)
3. 轨迹与流线	(15)	3. 质量扩散系数	(56)
4. 系统和控制体	(18)	例题	(66)
1-2 质量守恒定律——连续性方程	(18)	习题	(78)
1. 单组分体系	(19)	第二章 纳维-斯托克斯方程的某些解	(81)
2. 双组分体系	(23)	2-1 流体在无限大平行板间的等温稳定层流	(81)
1-3 动量定律——运动方程	(26)	1. 两板均静止	(81)
1. 质量力	(26)	2. 下板静止, 上板以恒速U运动(称为Couette流动)	(86)
2. 表面力	(27)	2-2 流体在旋转着的同轴线双层圆筒之间的Couette流	(87)
3. 应力与应变的关系	(29)	2-3 流体在圆管与套管环隙中作等温稳定层流	(90)
4. 粘性流体的运动微分方程——纳维-斯托克斯方程	(36)	1. 圆管内流动	(90)
1-4 热力学第一定律——能量方程	(39)	2. 套管环隙内的流动	(92)
1. 用欧拉观点推导微分能量衡算方程	(40)	2-4 不稳定流动	(95)
2. 用拉格朗日的观点推导微分能量衡算方程	(44)	2-5 爬流	(98)
3. 能量方程的简化形式	(45)	2-6 无粘性流动	(102)
1-5 初始条件和边界条件	(47)	1. 欧拉方程	(103)
1. 初始条件	(47)	2. 流体的点旋度	(104)
		3. 流函数	(105)
		4. 速度势函数	(110)
		习题	(113)

第三章 能量方程在热传导中的某些解(117)

3-1 稳定导热问题的数学分析解	(118)
3-2 不稳定导热问题的数学分析解	(122)
1. 集总热容系统——不计内部热阻的系统	(123)
2. 可忽略表面热阻时的不稳定导热	(125)
3. 表面热阻和内部热阻皆为有限值时物体的加热(或冷却)	(130)
4. 进入半无限大介质的热渗透	(132)
5. 不稳定导热问题的图解形式	(135)
3-3 多维不稳定导热——Newman 法则	(142)
3-4 正规状况法的概念	(144)
1. 正规状况第一法—— α 的测定	(144)
2. 用正规状况法测定其它热物性	(147)
3-5 导热问题的数值计算法	(154)
1. 稳定导热问题的数值计算法	(154)
2. 不稳定导热问题的数值计算法	(163)
例题	(167)
习题	(191)

第四章 质量衡算方程的某些解 ... (194)

4-1 描述质量分子扩散现象的数学表达式	(194)
1. 混合物的浓度	(194)
2. 速度	(195)

3. 扩散通量	(195)
4. 质量分子扩散现象的数学表达式	(195)
4-2 传质过程中的初始条件与边界条件	(202)
4-3 质量的一维稳定分子扩散传递的数学分析解	(203)
1. 组分A通过静止组分B的扩散	(203)
2. 组分A通过静止组分B的拟稳定扩散	(206)
3. 等摩尔反方向扩散	(207)
4. 具有化学反应的一维稳定扩散	(209)
4-4 质量的二维稳定分子扩散传递的数学分析解	(214)
4-5 质量的不稳定分子扩散传递的数学分析解	(216)
1. 忽略表面阻力的不稳定扩散	(217)
2. 半无限大介质中的不稳定扩散	(217)
3. 质量的不稳定分子扩散数学分析解的图解形式	(218)
4-6 质量的分子扩散传递的数值计算法	(219)
4-7 单向不稳定分子扩散传递的图解法——Schmidt 图	(221)
4-8 对流传质系数	(222)
1. 等分子反方向扩散时的传质系数	(223)
2. 组分A通过静止组分B扩散时的传质系数	(224)
例题	(226)
习题	(234)

第二篇 普兰德(Prandtl)边界层理论及其在传递现象中的应用

第五章 边界层理论及层流边界层中的传递现象	(237)
5-1 边界层理论的要点	(237)

5-2 流动边界层的形成和发展	(240)
5-3 传热、传质的进口段	(243)

5-4 边界层方程	(247)	6-6 粗糙管中的湍流	(354)
1. 普兰德边界层方程	(247)	1. 管壁粗糙度对摩擦阻力的影响	(354)
2. 边界层方程的分析解	(253)	2. 粗糙管中的速度分布	(356)
3. 边界层方程的近似解	(272)	3. 粗糙管中的阻力系数	(357)
4. 圆管内层流流动的传热和传质	(294)	4. 圆管内混合长的计算	(358)
5-5 边界层的分离	(302)	6-7 平板湍流边界层	(360)
1. 边界层的分离现象	(303)	1. 卡门边界层动量方程在平板湍流边界层中的应用	(360)
2. 边界层分离的条件	(304)	2. 层流底层厚度的估算	(362)
3. 边界层分离对传热、传质过程的影响	(307)	3. 壁面上切应力 τ_s 与阻力系数 C_f	(363)
例题	(310)	6-8 湍流传热与传质	(365)
习题	(324)	1. 湍流传热(传质)微分方程	(365)
第六章 湍流边界层中的传递现象	(327)	2. 湍流传热(传质)的雷诺类似律	(370)
6-1 湍流的起因	(327)	3. 普兰德(Prandtl)和台劳(Taylor)修正	(371)
1. 漩涡的形成	(328)	4. 卡门(Karman)修正	(377)
2. 漩涡脱离原来的流层	(329)	5. 却尔登(Chilton)-柯尔帮(Colburn)类似律	(382)
6-2 湍流运动的特征和处理方法	(330)	6. 平板上湍流传热与传质	(383)
6-3 雷诺方程与雷诺应力	(333)	6-9 自然对流体系的传热与传质	(386)
6-4 普兰德混合长理论	(339)	1. 自然对流传热	(386)
6-5 光滑管中的湍流	(345)	2. 自然对流体系的等温传质	(395)
1. 通用速度分布	(345)	例题	(396)
2. $u_{\text{平}}$ 与 u^* 的关系	(347)	习题	(413)
3. 指数型速度分布	(349)		
4. 速度分布与流体阻力	(351)		
5. 层流底层的厚度	(353)		

第三篇 两相界面间的传热与传质

第七章 两相界面间质量与热量传递模型	(416)	7-3 基于实验数据建立的方程	(432)
7-1 两相界面间的质量传递模型	(416)	1. 湿壁塔中两相界面的传质问题	(433)
1. 双膜理论	(417)	2. 填充床中的传质	(438)
2. 渗透理论	(419)	3. 球内、滴内、泡内的传质	(440)
3. “膜-渗透”理论	(424)	例题	(444)
7-2 两相界面间的热量传递模型	(428)	习题	(455)
		第八章 传质设备	(457)

8-1	分批式接触设备	(460)	1.	气体吸收	(474)
8-2	连续式逆流接触设备	(462)	2.	精馏	(476)
8-3	连续式并流接触设备	(467)	3.	液-液萃取	(478)
8-4	连续式接触设备的焓平衡	(468)	例题		(481)
			习题		(492)
8-5	填料塔直径的计算	(469)	附录1	二元体系的质量扩散系数	(494)
8-6	塔内构件及其选择	(471)	附录2	Lennard-Jones参数	(497)
1.	分级的板式塔	(471)	附录3	高斯误差函数表	(499)
2.	仿平衡板-折流塔和淋降塔盘	(472)	附录4	气体和液体的物性参数	(500)
3.	填料塔	(473)	附录5	固体的物性参数	(504)
8-7	传质操作中,各种接触设备的比较	(474)	附录6	标准大气的物性参数	(505)
			附录7	不稳定传递问题解的图表	(506)
			附录8	国际单位制及其符号	(512)
			主要参考文献		(513)

结 论

0-1 “传递过程原理”的发展和内容

以化学工业为对象研究传递过程，是在“化工原理”或“化工单元操作”的基础上，进一步综合其中有关动量、热量和质量传递的共同规律而发展起来的新课程。它的形成和出现标志着化学工程学科又发展到了一个新的高度。

有关化学工程学科早期发展的概况，在一般的“化工原理”教材中都作了介绍。即：在化学工程学科开始被重视之前，那时虽然已经有不少化学工业建立起来，但当时每一种化学工业的工艺都被认为是一门特殊的知识。因此，国外高等院校在十九世纪九十年代开始设置“化学工程系”时，开出的课程，大都以学习各种化学工业的工艺学为基础的。

随着生产力的发展，人们对事物运动规律性的认识也愈来愈深化，愈来愈具有概括性。

二十世纪初，人们逐渐认识到各工艺过程中存在着通用的物理过程的共性。二十年代，[美]麻省理工学院(M.I.T)的一些学者提出不管化工生产的工艺如何千差万别，但它们却在很多典型设备中进行着原理相同的物理过程。这一新见解，在1922年美国化工学会年会上取得公认，从而引出了“单元操作”(Unit Operation)的概念，即“化工原理”。譬如，无论在制糖还是在化肥工业中，从溶液中蒸发液体所遵循的原理是相同的，于是蒸发成为最早提出的单元操作之一。被称为单元操作的还有流体流动、传热、干燥、吸收、萃取、结晶、过滤等。以这些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的基本情况。二十世纪二十年代出版了世界上第一部“化工原理”教科书。这种把千变万化，千差万别的工艺过程概括成“单元操作”是生产力发展到一定水平的反映，而化工单元操作的理论也就成为迅速发展化学工业的重要基石。可以认为“单元操作”是化学工程学科发展中的第一个概括。

当单元操作被了解得更加深化以后，人们又发现各单元操作之间存在着共性。过滤只是流体流动的一个特例，蒸发不过是传热的一种形式，萃取，吸收都包含着质量的传递，干燥与蒸馏则是传热与传质都重要的操作。于是单元操作可以看成是传热、传质及流体流动的特殊情况或特定的组合。作为单元操作的基础——流体流动同传热与传质一样，也被视为一种传递现象，这是因为在真实流体流动中，必然存在着动量传递。人们进一步又发现了动量传递，热量传递和质量传递之间具有类似性。因此，二十世纪中期以来，人们开始用统一的观点来研究上述三种传递过程，并求出其相互关系。1960年[美]威斯康辛大学(Univ. Wisconsin)的R.B. Bird等出版了“Transport Phenomena”一书(Phenomena含义，不仅是指“现象”，而更多地指过程的“实质”或“机理”)，首次把三种传递现象用统一的观点来处理，它对化学工程学科的发展起着重要的作用。

对这些传递现象的研究，不仅是化学工程学的重要基础，同时在生物工程、机械、航