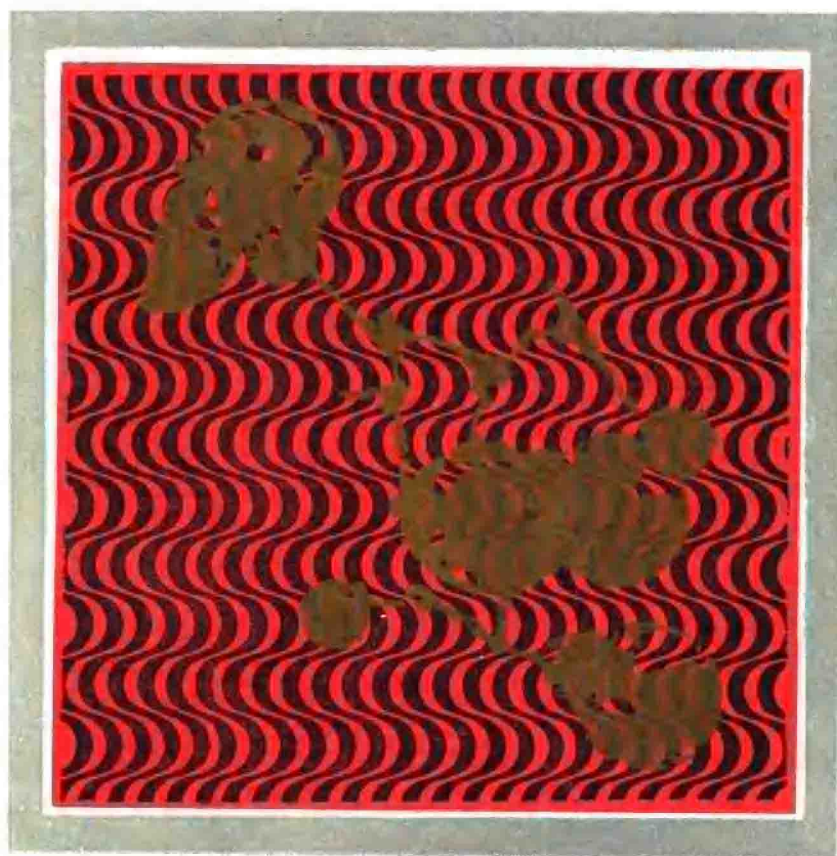


动量、热量与质量传递

题解

王绍基 汤志生 陈涛 张克 编



化学工业出版社

动量、热量与质量 传递习题解

王绍亭 陈 涛 编
杨志生 张 克

化 学 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本题解是配合高等院校本科生和研究生学习“动量、热量与质量传递过程”课程而编写,旨在帮助读者对该课程的内容能够加深理解和熟练应用。在编写本题解时,作者考虑到它的相对独立性和自成体系问题,在各章伊始,首先列出主要计算公式,然后再列出习题及其解答。

本题解共选编237题,内容深浅适宜,解答说明详尽。选编的习题可分三类:计算题、推导题和思考题。读者在使用本题解时,最好先自行解题,然后再对照题解的具体内容,检验自己的题解步骤和所获得的结果。

本题解虽是为高等院校有关专业师生的参考资料,但亦可供有关行业的科技人员参考或自学提高之用。王绍亭教授(天津大学)等四人编写。

动量、热量与质量传递习题解

王绍亭 陈 涛 编
杨志生 张克

责任编辑:李洪勋
封面设计:任 辉

化学工业出版社出版发
(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所经销

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张22 $\frac{1}{4}$ 字数562千字
1990年4月第1版 1990年4月北京第1次印刷
印 数 1—2,000
ISBN 7-5025-0336-6/TQ·249
定 价 12.65元

主要符号表

英文符号

A ——面积、截面积、传热面积、传质面积	m^2
校正因数	无因次
A_{av} ——平均扩散面积	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} ——局部曳力系数	无因次
C_{st} ——组合常数	无因次
D ——直径	m
D_{AB} ——扩散系数	m^2/s
$D_{A,e}$ ——多组分系统中组分 A 的有效扩散系数	m^2/s
$D_{K,A}$ ——组特逊扩散系数	m^2/s
E_t ——总能量	J
F ——力	N
F_D ——总曳力	N
F_{dt}, F_{ds} ——形体曳力和摩擦曳力	N
F_x, F_y, F_z ——外力作力在直角坐标系 x, y, z 三个方向上的分量	N
G_A ——组分 A 的扩散速率	$kmol/s$
H ——焓	J/kg
H_G, H_L ——气相和液相传质单元高度	m
I ——湍动强度	无因次
I_0, I_1, I_n ——第一类修正过的贝塞尔函数	无因次
J_A ——组分 A 的摩尔通量 (相对于摩尔平均速度 u_m)	$kmol/m^2 \cdot s$
K ——分配系数	无因次
L ——管、板的长度或平板高度	m
L_e, L_t, L_D ——流动、传热和传质进口段长度	m
M ——质量	kg
M_A, M_B ——组分 A 、组分 B 的分子量	kg/mol
N ——总摩尔通量 (相对于静止坐标)	$kmol/m^2 \cdot s$
N_A, N_B, N_i ——组分 A, B, i 的摩尔通量 (相对于静止坐标)	$kmol/m^2 \cdot s$
P ——总压力	N/m^2
棒条的周边长度	m
Q ——单位质量吸收的热量	J/kg
R ——通用气体常数	$=8341 \text{ J/kmol} \cdot K$
$\dot{R}_i$ ——组分 i 的生成速率	kg/s
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	$m^3/atm \cdot m^3$

T ——绝对温度	K
V ——体积	m^3
W_s ——轴功率	J/s
$X、Y、Z$ ——直角坐标系 $x、y、z$ 方向上单位质量流体的质量力	N/kg
X_r ——球坐标系中 r 方向上单位质量流体的质量力	N/kg
X_z ——柱坐标系中 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 ——固体比热	J/kg·K
$c_A、c_B$ ——组分 $A、B$ 的摩尔浓度	kmol/ m^3
$c_{A1}、c_{A2}$ ——组分 A 在截面 1 和截面 2 处的摩尔浓度	kmol/ m^3
c_{Ab} ——组分 A 的主体平均浓度	kmol/ m^3
c_{A0} ——组分 A 在边界层外的均匀浓度、初始浓度	kmol/ m^3
c_{As} ——组分 A 在界面处的浓度	kmol/ m^3
c_{Am} ——组分 A 在膜中的平均浓度	kmol/ m^3
c_p ——定压比热	J/kg·K
$c'_{pA}、c'_{pB}$ ——组分 $A、B$ 的摩尔比热	J/kmol·K
d ——直径	m
d_c ——圆柱体直径	m
d_e ——当量直径	m
d_p ——球直径	m
e ——绝对粗糙度	mm
f ——范宁摩擦因数	无因次
g ——重力加速度	m/s^2
h ——对流传热系数或膜系数	$W/m^2·K$
$h_x、h_w$ ——局部 (x 处) 对流传热系数和平均对流传热系数	$W/m^2·K$
h_x^0 ——喷出参数为零时的局部对流传热系数	$W/m^2·K$
j_A ——组分 A 扩散的质量通量 (相对于质量平均速度 u)	$kg/m^2·s$
k ——导热系数	$W/m·K$
波尔茨曼常数, 1.3806×10^{-16}	erg/K
$k_g^0、k_g$ ——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
$k_G^0、k_G$ ——气相对流传质系数	kmol/ $m^2·s·Pa$
$k_y^0、k_y$ ——气相对流传质系数	kmol/ $m^2·s·\Delta y$
$k_x^0、k_x$ ——液相对流传质系数	kmol/ $m^2·s·\Delta x$
$k_{c,x}^0、k_{c,x}$ ——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
$(k_{c,x}^0)^0$ ——喷出参数为零时的局部传质系数	m/s
l ——长度、普兰德混合长	m
l_w ——每 kg 流体摩擦热或损耗功	J/kg
n ——总质量通量 (相对于静止坐标)	$kg/m^2·s$
$n_A、n_B$ ——组分 A 和组分 B 的质量通量 (相对于静止坐标)	$kg/m^2·s$
$p_A、p_B$ ——组分 A 和组分 B 的分压	N/ m^2
p_{BM} ——惰性组分 B 的对数平均分压	N/ m^2
p_{Bm} ——不扩散组分总分压的对数平均值	N/ m^2

$\dot{Q}$ ——热流速率	J/s
$\dot{q}$ ——单位体积流体释放的热速率	J/m ³ ·s
r ——径向距离	m
r_A ——单位体积中组分 A 的生成速率	kg/m ³ ·s
组分 A 的分子半径	m
r_i ——管的内半径	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	无因次
t ——温度	K
t_b ——主体平均 (混合杯) 温度	K
t_f ——流体的温度	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、初始温度	K
t_w ——冷凝壁温度	K
t_{sat} ——蒸气的饱和温度	K
u ——速度, 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 和组分 B 相对于静止坐标的流速 (绝对速度)	m/s
u_b ——主体平均流速	m/s
u_M ——相对于静止坐标的流体摩尔平均流速	m/s
$u_{\max}$ ——最大流速、管中心速率	m/s
u_0 ——边界层外的均匀流速	m/s
u_x, u_y, u_z ——流速 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 u 在柱坐标系 r, θ, z 三个方向上的分量	m/s
u_{y0} ——在壁面处的法向速度	m/s
u^* ——摩擦速度, $=\sqrt{\tau_s/\rho}$	m/s
v_A, v_B ——组分 A 和组分 B 的分子扩散体积	cm ³ /gmol
w ——质量流率	kmol/s
x ——距平板前缘的距离, 直角坐标 x 方向上的距离	m
x_A, x_B, x_i ——组分 A、组分 B 和组分 i 的摩尔分数	无因次
x_{BM} ——惰性组分 B 的对数平均摩尔分数	无因次
x_0 ——临界距离	m
x_0 ——加热开始点距前缘的距离	m
x_1 ——平板的半厚度或由绝热壁算起的距离	m
y ——距壁面的距离, 直角坐标 y 方向上的距离	m
y_A, y_B ——组分 A 和组分 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, 直角坐标 z 方向上的距离	无因次
z_θ ——在 θ 瞬时的扩散距离	

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 ——温度系数	K^{-1}
Γ ——单位宽度液膜的质量流率	$kg/m \cdot s$
δ ——速度边界层厚度、膜厚度	m
δ_t, δ_D ——温度边界层和浓度边界层厚度	m
ε ——空隙率	无因次
ϵ ——涡流（运动）粘度	m^2/s
η_t ——透平机或涡轮机的效率	无因次
η_D ——泵或风机的效率	无因次
θ ——时间	s
θ' ——柱坐标和球坐标系方程中的时间	s
θ_c ——有效暴露时间	s
λ ——分子运动平均自由程	$\text{\AA}$
λ_A, λ_B ——组分 A 和组分 B 的气化潜热	J/kg
λ'_A, λ'_B ——组分 A 和组分 B 的摩尔气化潜热	$J/kmol$
μ ——粘度	$N \cdot s/m^2$
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 和组分 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
σ_{AB} ——分子平均碰撞直径	$\text{\AA}$
τ ——剪应力、表面应力	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
τ_{sx} ——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
$\bar{\tau}$ ——剪应力的时均值	N/m^2
$\bar{\tau}'$ ——涡流剪应力的时均值	N/m^2
$\bar{\tau}'$ ——总时均剪应力	N/m^2
$\tau_{r,\theta}$ ——作用在球体表面上与径向 r 垂直与 θ 向平行的剪应力	N/m^2
Φ ——速度势函数	m^2/s
单位体积流体的摩擦热速率	$J/m^3 \cdot s$
ϕ ——溶剂的缔合参数	无因次
ψ ——流函数	m^2/s
Ω_D ——分子扩散的碰撞积分	无因次

无 因 次 数 群

$$Bi \text{——毕渥数} \quad \frac{hL}{k}$$

$$Nu \text{——努塞尔数} \quad \frac{hd}{k}$$

$$Fo \text{——傅立叶数} \quad \frac{\alpha \theta}{l^2}$$

$$Nu_x \text{——局部努塞尔数} \quad \frac{hx}{k}$$

$$Nu_m \text{——平均努塞尔数} \quad \frac{hL}{k}$$

$$Pr \text{——普朗德数} \quad \frac{\nu}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{k}$$

$$Re \text{——雷诺数} \quad \frac{\rho u_0 d}{\mu}$$

$$Re_L \text{——雷诺数} \quad \frac{\rho u_0 L}{\mu}$$

$$Re_x \text{——局部雷诺数} \quad \frac{\rho u_0 x}{\mu}$$

$$Re_{xc} \text{——临界雷诺数} \quad \frac{\rho u_0 x_c}{\mu}$$

$$Sc \text{——施密特数} \quad \frac{\nu}{D_{AB}} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$$

$$St \text{——斯坦顿数} \quad \frac{h}{c_p \rho u_0}$$

$$St_x \text{——局部斯坦顿数} \quad \frac{h_x}{c_p \rho u_0}$$

$$St' \text{——传质斯坦顿数} \quad \frac{k_c^0}{u_0}$$

$$St'_x \text{——局部传质斯坦顿数} \quad \frac{k_{cx}^0}{u_0}$$

$$sh \text{——舍伍德数} \quad \frac{k_c^0 d}{D_{AB}}$$

$$sh_x \text{——局部舍伍德数} \quad \frac{k_{cx}^0 x}{D_{AB}}$$

$$sh_m \text{——平均舍伍德数} \quad \frac{k_{cm}^0 L}{D_{AB}}$$

$$Kn \text{——组特逊数} \quad \frac{\lambda}{2r}$$

$$f_H \text{——传热 } j \text{ 因数} \quad St \cdot Pr^{1/3}$$

$$f_D \text{——传质 } j \text{ 因数} \quad St' \cdot Sc^{2/3}$$

$$L^* \text{——无因次长度} \quad x/l$$

$$m \text{——相对热阻} \quad \frac{k}{hx_1} = \frac{1}{Bi}$$

$$n \text{——相对位置} \quad x/x_1$$

$$C_A^* \text{——无因次浓度差} \quad \frac{C_A - C_{A1}}{C_{A0} - C_{A1}}$$

$$C_{Ab}^* \text{——无因次浓度差} \quad \frac{C_A - C_{Ab}}{C_{A0} - C_{Ab}}$$

$$T^* \text{——无因次温度差} \quad \frac{t - t_1}{t_0 - t_1}$$

$$T_b^* \text{——无因次温度差} \quad \frac{t - t_b}{t_0 - t_b}$$

$$u^+ \text{——无因次速度} \quad u/u^*$$

$$y^+ \text{——无因次距离} \quad \frac{yu^*}{\nu}$$

$$\eta \text{——无因次位置} \quad y \sqrt{\frac{u_0}{\nu x}}$$

$$f(\eta) \text{——无因次流函数} \quad \frac{\psi}{\sqrt{u_0 \nu x}}$$

目 录

主要符号表

绪论	1
习题 0-1~0-6	1
第一章 动量、热量与质量传递导论	4
主要计算公式	4
习题 1-1~1-15	5
第二章 总质量、总能量和总动量衡算	19
主要计算公式	19
习题 2-1~2-29	22
第三章 粘性流体流动的微分方程	71
主要计算公式	71
习题 3-1~3-14	72
第四章 运动方程的应用	87
主要计算公式	87
习题 4-1~4-18	90
第五章 边界层理论基础	108
主要计算公式	108
习题 5-1~5-16	110
第六章 湍流	127
主要计算公式	127
习题 6-1~6-20	131
第七章 热量传递概论与能量方程	154
主要计算公式	154
习题 7-1~7-8	155
第八章 热传导	162
主要计算公式	162
习题 8-1~8-25	168
第九章 对流传热	194
主要计算公式	194
习题 9-1~9-22	201
第十章 质量传递概论与传质微分方程	226
主要计算公式	226
习题 10-1~10-7	227
第十一章 分子传质(扩散)	236
主要计算公式	236

习题 11-1~11-24	244
第十二章 对流传质	264
主要计算公式	264
习题 12-1~12-26	271
第十三章 同时进行动量、热量与质量传递的过程	305
主要计算公式	305
习题 13-1~13-7	307
附录	318
附录A 主要物理量的单位换算表	318
附录B 空气的物理性质表	322
附录C 水的物理性质表	323
附录D 水在不同温度下的粘度表	324
附录E 某些液体的主要物理性质表	325
附录F 某些气体的主要物理性质表	327
附录G 误差函数表	328
附录H 贝塞尔函数表	329
附录I 双曲线函数表	331
附录J 流体流过无限长圆柱体和球体时的 C_D-Re 关系图	332
附录K 圆管进口段 $\phi(x)$ 与 $\left(\frac{x}{D}\right)/Re$ 的关系图	333
附录L 混合长与径向位置关系图	333
附录M 圆管中摩擦系数与雷诺数的关系图	334
附录N 一维不稳态导热的简易算图	335
附录O 某些二元气体在大气压下的扩散系数表	341
附录P 某些物质在液体中的扩散系数表	342
附录Q 某些气体和固体在固体中的扩散系数 D_{AB} 表	342
附录R 分子扩散时 $\Omega_D-kT/\varepsilon_{AB}$ 之间的关系表	343
附录S 勒奈特-琼斯参数 σ, ε 数值表	343
附录T 求算气相和液相传质单元高度的常数表	345
附录U 平板层流边界层中喷出参数对 C_{Dx}, h_x 和 k_{cx}^2 的影响图	346

绪 论

习 题

0-1 以英制单位表示的气体常数 $R = 1545.3 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}_f}{\text{lbmol} \cdot ^\circ\text{R}}$, 试将其换算为 SI 和 工程单位。

〔解〕

由附录 A 查得:

$$1\text{ft} = 0.3048\text{m}, 1\text{lb}_f = 4.4482\text{N} = 0.4536\text{kg}_f$$

$$1 \text{ lbmol} = 0.4536\text{kmol}, 1^\circ\text{R} = \frac{5}{9} \text{ K}$$

1. 以 SI 表示的 R 值为:

$$\begin{aligned} R &= 1545.3 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}_f}{\text{lbmol} \cdot ^\circ\text{R}} = (1545.3) \frac{(0.3048\text{m})(4.4482\text{N})}{(0.4536\text{kmol}) \left(\frac{5}{9} \text{ K}\right)} \\ &= 8314 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2}{\text{kmol} \cdot \text{K}} = 8314 \text{ J/kmol} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

2. 以工程制表示的 R 值为:

$$\begin{aligned} R &= 1543.3 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}_f}{\text{lbmol} \cdot ^\circ\text{R}} = (1543.3) \frac{(0.3048\text{m})(0.4536\text{kg}_f)}{(0.4536\text{kmol}) \left(\frac{5}{9} \text{ K}\right)} \\ &= 847.8 \text{ kg}_f \cdot \text{m/kmol} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

0-2 100°C 、 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 下, 某烟道气的物性数据如下:

密度 $\rho = 5.931 \times 10^{-2} \text{lb/ft}^3$, 比热 $c_p = 0.255 \text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$,

导热系数 $k = 2.69 \times 10^{-2} \text{kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

试分别将上述物性值换算成 SI 制的值。

〔解〕

由附录 A 查得:

$$1\text{lb/ft}^3 = 1.602 \times 10^{-1} \text{kg/m}^3, 1\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C} = 4.187 \times 10^3 \text{J/kg} \cdot \text{K}$$

$$1\text{kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} = 1.163 \text{W/m} \cdot \text{K}$$

故烟道气的物性参数为:

$$\begin{aligned} \text{密度 } \rho &= 5.931 \times 10^{-2} \text{lb/ft}^3 = (5.931 \times 10^{-2})(1.602 \times 10^{-1}) \text{kg/m}^3 \\ &= 0.950 \text{kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{比热 } c_p &= 0.255 \text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C} = (0.255)(4.187 \times 10^3) \text{J/kg} \cdot \text{K} \\ &= 1.068 \times 10^3 \text{J/kg} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{导热系数 } k &= 2.69 \times 10^{-2} \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} = (2.69 \times 10^{-2})(1.163) \text{ W/m} \cdot \text{K} \\ &= 3.128 \times 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}\end{aligned}$$

0-3 20°C的水以0.1ft/s的平均流速流过内径为1.5in的圆管,试确定水的流型。

〔解〕 由附录C查得20°C时水的物性常数为:

$$\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3, \mu = 1.0042 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

由已知条件可得:

$$u = 0.1 \text{ ft/s} = (0.1)(0.3048) \text{ m/s} = 0.03048 \text{ m/s}$$

$$D = 1.5 \text{ in} = (1.5)(2.54 \times 10^{-2}) \text{ m} = 3.81 \times 10^{-2} \text{ m}$$

故

$$Re = \frac{u\rho D}{\mu} = \frac{(0.03048)(998.2)(3.81 \times 10^{-2})}{1.0042 \times 10^{-3}} = 1154 < 2000$$

故水在圆管内的流型为层流。

0-4 某温度下水分自空气中蒸发的速度可用下式表示:

$$G = 0.00322 u^{0.8} \Delta p \text{ [lb/h} \cdot \text{ft}^2\text{]}$$

式中 u —— 空气的流速, ft/s;

Δp —— 空气温度下水的饱和蒸气压与空气中水蒸气分压之差, mmHg。

如将 G 的单位变为 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$, u 的单位变为 m/s , Δp 的单位变为 atm , 试问原计算式将如何变化?

〔解〕

由式 $G = 0.00322 u^{0.8} \Delta p$ 可得:

$$\frac{G}{u^{0.8} \Delta p} = 0.00322$$

由上式可以看出, 常数0.00322是有因次的, 因此当等式左端因次发生变化时, 右端常数应乘以相应的系数 K_1 加以调整。

等式左端原来的单位为:

$$\left[\frac{\frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2}}{\frac{\text{ft}^{0.8}}{\text{s}^{0.8}} \cdot \text{mmHg}} \right] = \left[\frac{\text{lb} \cdot \text{s}^{0.8}}{\text{ft}^{2.8} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}} \right]$$

将其化为所要求的单位, 可得:

$$\left[\frac{(0.4536) \text{ kg} \cdot \text{s}^{0.8}}{(0.3048)^{2.8} \text{ m}^{2.8} \cdot \text{h} \cdot \frac{1}{760} \text{ atm}} \right]$$

故因次系数为:

$$K_1 = \frac{0.4536}{(0.3048)^{2.8} 1/760} = 9599.4$$

原计算式即化为:

$$\begin{aligned}G &= K u^{0.8} \Delta p = (0.00322)(9599.4) u^{0.8} \Delta p \\ &= 30.91 u^{0.8} \Delta p \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{h}]\end{aligned}$$

式中 $[u] = [m/s]$, $[\Delta p] = [atm]$ 。

0-5 正庚烷的饱和蒸气压与温度的关系可由下式表达,

$$\log P^\circ = 6.926 - \frac{1284}{t + 219}$$

式中 P° ——饱和蒸气压, mmHg;

t ——温度, $^\circ\text{C}$ 。

试采用SI单位表达上式。

〔解〕

由附录 1 查得:

$$1\text{mmHg} = 133.3\text{N/m}^2, T = 273 + t \text{ K}$$

将原式改写成下式:

$$\log P^\circ = 6.926 - \frac{1284}{(t + 273) - 54} = 6.926 - \frac{1284}{T - 54}$$

欲改变 P° 的单位时, 则:

$$\log \frac{P'}{\text{mmHg}} = 6.926 - \frac{1284}{T - 54}$$

$$\log \frac{P'}{\text{mmHg}} + \log \frac{1\text{mmHg}}{133.3\text{N/m}^2} = 6.926 - \frac{1284}{T - 54}$$

$$\log \frac{P'}{\text{N/m}^2} + \log \frac{1}{133.3} = 6.926 - \frac{1284}{T - 54}$$

于是原式即变为以SI单位表达的式子如下:

$$\log P^\circ = 9.508 - \frac{1284}{T - 54}$$

式中 P° 单位 N/m^2 , T 单位 K 。

0-6 飞船上宇航员所穿的宇航服在地球上的重量约为 889.6N 。已知月球的平均重力加速度为地球上的 $1/6$, 试问宇航服在月球上的重量为若干?

〔解〕

已知宇航服在地球上的重量 F_1 为 889.6N , 其质量 m 为:

$$m = F_1 / g_1 = 889.6 / 9.81 = 90.68\text{kg}$$

式中 g_1 为地球上的平均重力加速度, 等于 9.81m/s^2 。

由已知条件可得月球上的重力加速度为:

$$g_2 = \frac{1}{6} g_1 = 9.81 / 6 = 1.635\text{m/s}^2$$

故宇航服在月球上的重量为:

$$F_2 = m g_2 = (90.68)(1.635) = 148.26\text{N}$$

第一章 动量、热量与质量传递导论

主要计算公式

一、现象定律

1. 牛顿粘性定律

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

式中 τ ——剪应力, N/m^2 ;
 μ ——动力粘度 (粘度), $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ 或 $\text{Pa}\cdot\text{s}$;
 u_x —— x 方向上的流速, m/s ;
 y ——传递方向上的距离, m 。

2. 傅立叶定律

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

式中 q/A ——导热通量, $\text{J/m}^2\cdot\text{s}$;
 k ——导热系数, $\text{W/m}\cdot\text{K}$;
 t ——温度, K ;
 y ——传递方向上的距离, m 。

3. 费克定律

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

式中 j_A ——组分 A 的质量通量, $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$;
 D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的扩散系数, m^2/s ;
 ρ_A ——组分 A 的质量浓度 (密度), kg/m^3 ;
 y ——传递方向上的距离, m 。

二、通量的普遍表达式

1. 动量通量

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

式中 $\nu = \mu/\rho$ ——运动粘度, m^2/s

2. 热量通量

$$q/A = -\frac{k}{\rho c_p} \frac{d(\rho c_p t)}{dy} = -a \frac{d(\rho c_p t)}{dy} \quad (1-5)$$

式中 ρ ——密度, kg/m^3 ;
 c_p ——定压比热, $\text{J/kg}\cdot\text{K}$;

$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ ——导温系数或热量扩散系数, m^2/s 。

3. 质量通量

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

三、不可压缩牛顿型流体在水平圆管中作一维、稳态层流流动时的表达式

1. 速度分布式

$$u = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \quad (1-6)$$

2. 压力降公式

$$u_{\max} = - \frac{\Delta p r_i^2}{4\mu L} \quad (1-7)$$

或

$$\tau_s = - \frac{\Delta p D}{4L} \quad (1-8)$$

上二式中 u ——圆管截面上任意点处的流速, m/s ;
 $u_{\max}$ ——圆管中心处的流速 (最大流速), m/s ;
 r_i ——圆管的内半径, m ;
 r ——圆管截面上任意点距管中心的距离, m ;
 τ_s ——圆管壁面处的剪应力, N/m^2 ;
 L ——圆管长度, m ;
 D ——圆管直径, m ;
 Δp ——流体流过 L 管长时的压力降, N/m^2 。

四、主体平均流速的定义式

$$u_b = \frac{1}{A} \iint_A u dA \quad (1-9)$$

式中 u_b ——主体流速或平均流速, m/s ;
 u ——圆管截面上任意点处的流速, m/s ;
 A ——圆管截面积, m^2 。

习 题

1-1 一圆管中, r 表示径向距离, y 表示由壁面算起垂直方向上的距离。试分别写出在圆管中流体沿 r 方向和 y 方向流动时的牛顿粘性定律。

〔解〕

因速度梯度的方向为 y 方向, 或 $-r$ 方向, 故动量传递的方向为 r 方向或 $-y$ 方向, 此情况下, 牛顿粘性定律的表达形式为:

$$\tau = -\mu \frac{du_x}{dr}$$

或

$$\tau = \mu \frac{du_x}{dy}$$

1-2 试分别对式 (1-4)、(1-5) 与 (1-3) 进行因次式运算, 证明运动粘度 ν 、热扩散系数 α 与扩散系数 D_{AB} 具有相同的因次 L^2T^{-1} 。

质量、长度、时间与温度的因次符号分别为 M 、 L 、 T 与 θ 。

〔解〕

1. 运动粘度 ν 的因次

由式 (1-4), 得:

$$\nu = \frac{-\tau}{d(\rho u_x)/dy}$$

上式的因次关系为:

$$[\nu] = \frac{[\tau][y]}{[\rho][u_x]} = \frac{[MLT^{-2}L^{-2}][L]}{[ML^{-3}][LT^{-1}]} = [L^2T^{-1}]$$

2. 热扩散系数 α 的因次

由式 (1-5), 得:

$$\alpha = \frac{-q/A}{d(\rho c_p t)/dy}$$

上式的因次关系为:

$$[\alpha] = \frac{[q/A][y]}{[\rho][c_p][t]} = \frac{[ML^2T^{-3}L^{-2}][L]}{[ML^{-3}][L^2T^{-2}\theta^{-1}][\theta]} = [L^2T^{-1}]$$

3. 扩散系数的因次

由式 (1-3), 得:

$$D_{AB} = -\frac{j_A}{d\rho_A/dy}$$

上式的因次关系为:

$$[D_{AB}] = \frac{[j_A][y]}{[\rho_A]} = \frac{[ML^{-2}T^{-1}][L]}{[ML^{-3}]} = [L^2T^{-1}]$$

1-3 根据三维导热的傅立叶定律:

$$\frac{\vec{q}}{A} = -k\nabla t$$

写出柱坐标系中 r 、 θ 、 z 三个方向的导热现象方程。假定有关物性常数恒定。

〔解〕

将三维导热的傅立叶定律化为三维导热现象方程, 得:

$$\frac{\vec{q}}{A} = -k\nabla t = -\frac{k}{\rho c_p} \nabla(\rho c_p t) = -\alpha \nabla(\rho c_p t)$$

又根据柱坐标系中梯度的定义, 得:

$$\nabla(\rho c_p t) = \frac{\partial(\rho c_p t)}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho c_p t)}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{\partial(\rho c_p t)}{\partial z} \vec{e}_z$$

式中 $\vec{e}_r$ 、 $\vec{e}_\theta$ 与 $\vec{e}_z$ 分别为沿 r 、 θ 、 z 方向的单位向量。根据上式写出 r 、 θ 、 z 各方向的导热现象方程为:

$$\left(\frac{q}{A}\right)_r = -\alpha \frac{\partial(\rho c_p t)}{\partial r}$$

$$\left(\frac{q}{A}\right)_\theta = -\frac{\alpha}{r} \frac{\partial(\rho c_p t)}{\partial \theta}$$

$$\left(\frac{q}{A}\right)_z = -\alpha \frac{\partial(\rho c_p t)}{\partial z}$$

1-4 试证明不可压缩流体在水平圆管中作一维、稳态层流时, 其主体平均速度 u_b 为管中心处最大速度 $u_{\max}$ 的 $1/2$ 。

〔解〕

根据题设条件, 速度分布式可用式(1-6)表达, 即:

$$u = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

按平均流速定义式 (1-9), 为:

$$u_b = \frac{1}{A} \iint_A u dA \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)可得:

$$\begin{aligned} u_b &= \frac{1}{\pi r_i^2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{r_i} u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] r dr \\ &= \frac{1}{\pi r_i^2} 2\pi u_{\max} \int_0^{r_i} \left[r - \frac{r^2}{r_i^2} \right] dr = \frac{2u_{\max}}{r_i^2} \left[\frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4r_i^2} \right]_0^{r_i} \\ &= \frac{2u_{\max}}{r_i^2} \left[\frac{r_i^2}{2} - \frac{r_i^2}{4} \right] = \frac{u_{\max}}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

1-5 令 68°F 的水流经内径为 $1/2\text{in}$ 的水平圆管, 管中心处流速为 3in/s , 试求当管长为 10ft 时, 压力降为若干 N/m^2 ?

〔解〕

将各已知数据换算成SI制:

$$T = \frac{68 - 32}{1.8} + 273 = 293\text{K}$$

$$L = 10\text{ft} = (10)(0.3048) = 3.048\text{m}$$

$$D = \frac{1}{2}\text{in} = \left(\frac{1}{2}\right)(0.0254) = 0.0127\text{m}$$

$$u_{\max} = 3\text{in/s} = (3)(0.0254) = 0.0762\text{m/s}$$