

工程传质学

上海机械学院 夏雅君 编

机械工业出版社

工 程 传 质 学

上海机械学院 夏雅君 编



机 械 工 业 出 版 社

工 程 传 质 学

上海机械学院 夏雅君 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $18 \frac{1}{4}$ · 字数 442 千字

1985年7月北京第一版·1985年7月北京第一次印刷

印数 0,001—4,850 · 定价 2.90 元

*

统一书号: 15033·5964

前 言

工程传质学是研究工程中质量传递规律的一门学科。它涉及到机械工业、石油化工工业、能源、原子能、火箭技术、宇航、环境保护、农业、轻工业、食品工业、医药、生物和气象等各个领域，是一门技术基础学科。

全书共分九章。第一章绪论，简要概述了传质学的本质及其应用、流体力学和传热学的基本知识。第二~四章介绍了传质学的机理；第二章传质过程的基础理论，第三章分子扩散，第四章对流传质。第五~九章为传质学的工程应用；第五章吸收，第六章工业增湿，第七章干燥，第八章燃烧，第九章金属与合金中的扩散。书中各章备有例题，通过这些例题可对传质学的机理作进一步的探讨，同时也可培养读者的分析和解决问题的能力。

本书出版前曾在上海机械学院动力系作为选修课教材。

本书可作为高等学校热能动力类、化工等专业的教材，也可供有关科技人员参考。

本书由华东化工学院陈敏恒和王仁辅审定。在编写过程中曾得到王仁辅、陈康民、张昌煜、楼惟秋、张国栋、周宏元、刘祥以及上海机械学院热工教研室同志们的指导、支持和帮助，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中必然会有不足之处，热忱地欢迎广大读者批评指正。

编者

1983年8月

主 要 符 号 表

符 号	意 义	单 位	
		中 文	代 号
A	表面积	米 ²	m ²
a	1.比表面积	米 ² /米 ³	m ² /m ³
	2.加速度	米/秒 ²	m/s ²
c	摩尔浓度	千摩尔/米 ³	kmol/m ³
c_p	定压比热	千焦/(千克·°C)	kJ/(kg·°C)
c^*	平衡浓度	千摩尔/米 ³	kmol/m ³
$c_{A,s}$	表面上组分 A 的浓度	千摩尔/米 ³	kmol/m ³
D_{AB}	组分 A 在组分 B 中的扩散系数	米 ² /秒	m ² /s
$D_{A,eff}$	有效扩散系数	米 ² /秒	m ² /s
$D_{h,eff}$	努森有效扩散系数	米 ² /秒	m ² /s
D_A	自扩散系数	米 ² /秒	m ² /s
d	直径	米	m
E	溶解度系数	千摩尔/(米 ³ ·帕)	kmol/(m ³ ·Pa)
E_D	湍流质扩散系数	米 ² /秒	m ² /s
E_H	湍流热扩散系数	米 ² /秒	m ² /s
E_M	湍流动量扩散系数	米 ² /秒	m ² /s
F	力	牛顿	N
g	重力加速度	米/秒 ²	m/s ²
H	1.焓	千焦	kJ
	2.亨利常数	帕	Pa
	3.塔的高度	米	m
h	1.焓	千焦/千克	kJ/kg
	2.高度	米	m
	3.换热膜系数	瓦/(米 ² ·°C)	W/(m ² ·°C)
	4.传质单元高度	米	m
J_i	组分 i 的摩尔通量	千摩尔/(米 ² ·秒)	kmol/(m ² ·s)
j_D	传质 j 因子		
j_H	传热 j 因子		
j_M	摩擦因子		
j_i	组分 i 的质量通量	千克/(米 ² ·秒)	kg/(m ² ·s)
K	传热系数	瓦/(米 ² ·°C)	W/(m ² ·°C)
k	1.玻尔兹曼常数		
	2.导热系数	瓦/(米·°C)	W/(m·°C)
k_c	传质膜系数	米/小时	m/h
k_G	气相传质分系数	摩尔/(米 ² ·秒· Δp 浓度单位)	mol/(m ² ·s· Δp 浓度单位)
k_L	液相传质分系数	摩尔/(米 ² ·秒· Δc 浓度单位)	mol/(m ² ·s· Δc 浓度单位)
k_x	以 $(x_i - x)$ 为推动力的液相传质分系数	摩尔/(米 ² ·秒· Δx)	mol/(m ² ·s· Δx)
k_y	以 $(y - y_i)$ 为推动力的气相传质分系数	摩尔/(米 ² ·秒· Δy)	mol/(m ² ·s· Δy)

符 号	意 义	单 位	
		中 文	代 号
K_G	以 $(p_G - p^*)$ 为推动力的气相总传质系数	摩尔/(米 ² ·秒· Δp 浓度单位)	mol/(m ² ·s· Δp 浓度单位)
K_L	以 $(c^* - c_L)$ 为推动力的液相总传质系数	摩尔/(米 ² ·秒· Δc 浓度单位)	mol/(m ² ·s· Δc 浓度单位)
K_X	以 $(X^* - X)$ 为推动力的总传质系数	摩尔/(米 ² ·秒· ΔX)	mol/(m ² ·s· ΔX)
K_Y	以 $(Y - Y^*)$ 为推动力的总传质系数	摩尔/(米 ² ·秒· ΔY)	mol/(m ² ·s· ΔY)
L	特性尺度	米	m
l	普朗特混合长度	米	m
M	分子量		
m	1. 质量 2. 相平衡系数	千克	kg
N	1. 功率 2. 摩尔通量	千瓦 千摩尔/(米 ² ·秒)	kW kmol/(m ² ·s)
n	1. 混合物中组分数目 2. 传质单元数 3. 摩尔数		
P	压力	千牛/米 ²	kN/m ²
$P_{A,c}$	主流体中组分 A 的分压	千牛/米 ²	kN/m ²
$P_{A,i}$	界面上组分 A 的分压	千牛/米 ²	kN/m ²
$P_{B,m}$	无扩散时气体的对数平均分压	千牛/米 ²	kN/m ²
Q	1. 热量 2. 流量 3. 激活能	千焦 千克/秒 千焦/千摩尔	kJ kg/s kJ/kmol
q	热通量	千焦/(米 ² ·小时)	kJ/(m ² ·h)
R	气体常数	千焦/(千克·°C)	kJ/(kg·°C)
R_M	摩尔气体常数	千焦/(千摩尔·°C)	kJ/(kmol·°C)
r	1. 半径 2. 汽化潜热	米 千焦/千克	m kJ/kg
T	温度		K; °C
T_d	露点		°C
T_w	湿球温度		°C
t	时间	秒	s
t_e	表面单元的暴露时间	秒	s
u	速度	米/秒	m/s
V	容积	米 ³	m ³
v	比容	米 ³ /千克	m ³ /kg
W	1. 功 2. 重量	千焦 牛顿	kJ N
w	湿基含水量	千克水/千克湿物料	kg水/kg湿物料
w_A	组分 A 的质量分数		

(续)

符 号	意 义	单 位	
		中 文	代 号
X	1. 液相的比摩尔分数 2. 干基含水量	千克水/千克绝对干料	kg水/kg绝对干料
x	湿度	千克/千克干空气	kg/kg干空气
x*	平衡湿度	千克/千克干空气	kg/kg干空气
x _A	液相或固相中组分 A 的摩尔分数		
Y	气相的比摩尔分数		
y _A	气相中组分 A 的摩尔分数		
y _{B, m}	静止气体中的对数平均摩尔分数		
α	热扩散系数, $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$	米 ² /秒	m ² /s
β	流体的体积膨胀系数		°C ⁻¹
β _c	压缩系数	米 ² /牛	m ² /N
β _T	膨胀系数		K ⁻¹
δ	流动边界层厚度	毫米	mm
δ _T	热边界层厚度	毫米	mm
δ _c	浓度边界层厚度	毫米	mm
ε	空隙率		
ε _{AB}	分子间作用的能量 (勒奈特-琼斯势参数)		
η	效率		%
θ	温度		°C
θ _w	湿球温度		°C
μ	动力粘度	牛·秒/米 ²	N·s/m ²
ν	运动粘度	米 ² /秒	m ² /s
ρ	密度	千克/米 ³	kg/m ³
ρ _i	组分 i 的质量浓度	千克/米 ³	kg/m ³
σ _{AB}	平均碰撞直径 (勒奈特-琼斯势参数)		Å
τ	1. 切应力 2. 曲折因数	牛/米 ²	N/m ²
φ	相对湿度		%
ψ	流函数		
Ω _D	碰撞积分, $\Omega_D = f\left(\frac{kT}{\epsilon_A}\right)$		

准则数

$$Eu = \frac{p}{\rho u^2} \quad \text{欧拉准则}$$

$$Fr = \frac{u^2}{gL} \quad \text{弗鲁德准则}$$

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad \text{雷诺准则}$$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad \text{格拉晓夫准则}$$

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad \text{努塞尔特准则}$$

$$Pe = Re \cdot Pr \quad \text{贝克列准则}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad \text{普朗特准则}$$

$$St = \frac{h}{\rho c_p u}$$

斯丹登准则

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$$

施米特准则

$$Gr_{AB} = \frac{g L^3 \Delta \rho_A}{\rho \nu^2}$$

传质格拉晓夫准则

$$Sh = \frac{k_c L}{D_{AB}}$$

舍伍德准则

$$Le = \frac{k}{D_{AB} \rho c_p}$$

路易斯准则

$$St_{AB} = \frac{k_c}{\rho u}$$

传质斯丹登准则

下标

<i>A</i>	组分 <i>A</i>
<i>act</i>	实际
<i>air</i>	空气
<i>av</i>	平均
<i>B</i>	组分 <i>B</i>
<i>boil</i>	沸点
<i>c</i>	浓度
<i>cal</i>	计算
<i>cond</i>	导热
<i>c_r</i>	临界状态
<i>D</i>	质交换
<i>eff</i>	有效的
<i>end</i>	端
<i>exp</i>	实验
<i>G</i>	气体
<i>H</i>	热交换
<i>i</i>	瞬时, 组分

<i>L</i>	液体
<i>lam</i>	层流
<i>m</i>	对数平均
<i>max</i>	最大的
<i>min</i>	最小的
<i>n</i>	法线方向
<i>o</i>	起始点, 驻点, 坐标原点
<i>s</i>	分离点, 壁面的, 饱和
<i>soln</i>	溶液
<i>t</i>	总的
<i>turb</i>	湍流
<i>x, y, z</i>	坐标的 <i>x, y, z</i> 方向
∞	自由来流

上标

—	时平均
,	脉动
*	平衡

目 录

主要符号表

第一章 绪论	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 流体力学基础	5
§ 1-3 传热学基础	19
第二章 传质过程的基础理论	24
§ 2-1 分子扩散	24
§ 2-2 对流传质	49
第三章 分子扩散	51
§ 3-1 传质微分方程	51
§ 3-2 无化学反应的一维稳态分子扩散	54
§ 3-3 二维和三维系统	61
§ 3-4 不稳态的分子扩散	71
第四章 对流传质	79
§ 4-1 概述	79
§ 4-2 层流和湍流边界层及浓度边界层	79
§ 4-3 因次分析在对流传质中应用	86
§ 4-4 质量、动量和热量传递的类比	89
§ 4-5 各种因素对对流传质的影响	96
第五章 吸收	107
§ 5-1 概述	107
§ 5-2 相际平衡	109
§ 5-3 吸收机理和过程方程	114
§ 5-4 过程的计算	130
§ 5-5 吸收设备	146
第六章 工业增湿	149
§ 6-1 概述	149
§ 6-2 湿空气的性质及湿度图	149
§ 6-3 工业增湿应用	158
第七章 干燥	169
§ 7-1 概述	169
§ 7-2 干燥的基本原理	177
§ 7-3 沸腾干燥	179
§ 7-4 典型工业干燥器的分析和设计计算	194
第八章 燃烧	212
§ 8-1 液体燃料的燃烧	212

IV

§ 8-2 固体燃料的燃烧	221
§ 8-3 燃烧废气的大气扩散污染	225
第九章 金属与合金中的扩散	230
§ 9-1 扩散机理和激活能	230
§ 9-2 影响扩散的因素	236
§ 9-3 工程应用	238
§ 9-4 钢在加热和冷却时的转变	239
§ 9-5 钢的化学热处理	243
附录	248
附图1 浓度-时间图(I)	248
附图2 浓度-时间图(II)	251
附图3 低温度湿度图	256
附图4 湿空气的H-x图	257
附表1 单位换算	258
附表2 一些液体的物理性质	260
附表3 金属的物性	261
附表4 非金属的物性	262
附表5 饱和水的热物理性质	264
附表6 饱和液体的物性	265
附表7 大气压力下气体的物性	267
附表8 干饱和水蒸气的热物理性质	269
附表9 一些有机物的蒸气压	270
附表10 气体的平均摩尔比热	271
附表11 气体在液体中的溶解度	272
附表12 一些填料的性质	274
附表13 若干燃料在空气中的物理和燃烧性质	276
参考文献	278
内容索引	280
外文人名索引	283

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

工程传质学是研究工程中质量传递过程规律的一门科学。它是传热学、热力学、热物理学、流体力学、统计力学、分散系统分子物理学与化学动力学的综合性学科,是把这些学科的基本知识应用到质量传递这一自然现象的一门学科,是近代科学的一个重要方面。其基本原理是一个系统若有两种或多种组分组成,并存在浓度差时,质量就自发地从高浓度区域传到低浓度区域,从而产生质量传递。经过质量传递,系统的浓度自发地趋于一致。所以传质是指系统中的组分从一个区域向另一个区域转移的现象。

在自然界和实际生活中有许多传质现象。例如,将糖块放入牛奶中,最后可使糖完全溶解,均匀扩散到牛奶中去。地面上的水分汽化后,增加了大气的湿度。香烟厂的烟味会向四周扩散,使厂附近都能闻到。烟囱中排放的烟气,在空中逐渐消散,等等。这些都是质量传递的现象。

在科学技术领域里,传质学的使用更为广泛。无论是机械工业、石油化学工业、冶金工业、能源、原子能、火箭技术、宇航、轻工业、食品工业、农业、环境保护、气象、生物、医药、低温等各个方面都有许多传质的课题需要研究。在这些学科领域里传质学具有很大的现实意义。因此,传质学是一门基础技术性学科,它涉及到各个学科领域。

在机械工业方面,传质学的应用甚为广泛。各种热能动力装置的燃料燃烧,其温度分布、浓度分布以及扩散速率问题,就是传质学的问题。换热器、冷却塔和空气冷凝器的使用都与传热传质学有关。金属切削和研磨工艺中的冷却问题,铸造工艺的浇注过程都有传热传质问题。金属的渗碳直接涉及分子扩散、浓度分布问题。近代表面强化的新方法——离子镀渗就是根据斐克定律来确定渗入物质的时间和深度。

在化学工业生产过程中,经常接触到物质借扩散作用从一相转移到另一相的过程。例如,利用液体溶剂的选择作用以吸收气体或蒸气混合物中的一种组分;萃取固体或液体混合物中的一种组分;以及利用蒸馏的方法以分离液体混合物中的易挥发组分等。

在冶金工业方面,质量传递起着十分重要的作用,尤其是高温下的冶金反应。例如,金属的氧化和还原、渗碳、渣铁反应等等,整个过程的速率往往决定于物质在某种介质中的传递。

在能源工程方面,热管的应用,天然气的液化和输运,煤的地下汽化过程,低温差廉价的换热器是研制海洋温差发电和地热发电等新能源利用中的关键问题。热泵和太阳能的利用也有待换热器的新发展。选择性吸收表面涂层和集热器的最佳化是太阳能利用中的重大课题。地热利用方面需要研究地质结构的热物性和地热源的温度分布。

现代科学技术突飞猛进,核动力的大型化,空间技术的深入发展,低温超导,环境污染的治理,城市气候的控制,以及七十年代以来出现的能源危机,加快了对新能源的开发利用的步伐,给传质的研究以新的推动。例如,具有高速飞行的物体,突然进入大气层时,前方

产生强烈的冲击波,在这种冲击波的后面,特别是在驻点附近的气流温度变得非常高,例如,火箭发动机尾喷管温度高达 $2000 \sim 3000^{\circ}\text{C}$;当导弹以几十倍音速穿越大气层时,弹头表面温度高达 $4000 \sim 5000^{\circ}\text{C}$,气流借对流和辐射的传热方式传递给飞行物,而目前一般金属材料最高熔点只有 3900°C ,因此会使飞行物烧蚀。所以,必须通过各种途径,将这些有害于飞行物的热量进行排除。排除的方法有好多种,如利用绝热材料;隔热涂料的吸水法和反射法;利用多孔性固体的升华和融解时所生成的气体,扩散到外部气流中去,以消除和隔绝来自气流的热量。这些都是宇航工业所关心的课题,所以,从过程和基础理论来分析,这是气流绕高速飞行物的运动,且是一种生有大量热量的运动过程。显然这是属于气体动力学和动量传递的范畴,可是如何将热量排除,这是属于热量传递的范畴,而在排除热量时所采用的措施中,有些又是质量传递的范畴。由此可见,需要将动量传递、热量传递和质量传递很好地协调配合,才能使飞行物在空中按照人们的意志进行自由飞翔。就整个运动来分析,动量传递和气体动力学是个必要条件,而热量传递和质量传递是个充分条件。

在食品工业方面,食品加工中的加热、冷冻、干燥过程以及冷藏等都有传质问题,此外,研究逆向渗透的现象,对制作浓缩果汁、牛奶等是有用的,其中主要均是传质问题。

在农业方面,热带地区动物房舍的温度和湿度的控制问题,土壤中温度、时间和深度三者间的相互关系,不仅对控制作物的生长率有关,而且有益于研究农作物的吸水量,肥料的消耗量等。农作物的加工,包括粮食的干燥,水果和蔬菜的保鲜,水果的人工催熟等;如何使粮食种子的质量不变而提高其发芽能力,则需改进干燥作物的复环流方法及研究制订干燥粮食作物的方法,还必须研究粮食在热处理过程中防止癌化合物的渗入问题。

在医药、生物学和生态学方面,人体和周围环境间的换热规律(辐射、对流和蒸发)。对人体内的变换机理,如肺和肾中的传热传质,血液内的空穴和气泡的形成,体温分布的测定可以帮助判断身体的发育是否正常,可对疾病的判断提供依据。

在环境保护和生态平衡方面,空气和水的污染防治问题是环境保护中的一个重要课题,这就需要分析和研究含尘烟和有害气体的上升、下降、弥散和横向扩散;需要研究和控制河系的运输,弥散和净化污染物的速率,以及河系湍流运动的纵横向的扩散、掺混和沿流动方向的稀释。

从上述可知,传质问题涉及的面是很广的。但从传质问题来看,归纳起来不外有两类:一类是着眼于传质通量的大小及其控制问题;另一类则着眼于浓度分布的大小及其控制问题。

当然要控制传质,必须按客观规律办事,一切从实际出发,具体情况具体分析。象其它工程学科一样,在解决实际工程传质问题时需要作适当的假定,忽略其次要方面作出近似处理,这样可使复杂的问题简化,从而使传质问题得到基本解决。理论的基础是实践,获得的理论又为实践服务。随着科学技术的日新月异的发展,特别是原子能和其它新能源的开发利用以及宇航等尖端技术不断提出的新问题,从而促使工程传质学这门新兴学科迅速发展。

为了逐步认识和掌握传质规律,先观察糖块溶入牛奶中的现象。糖溶于牛奶中所需的时间取决于是自然溶解还是用匙搅拌。在静止流体中,传质现象是由随机分子运动来完成的。在流动的流体中,则是借助于流体的运动来完成的。前者称为分子扩散,后者称为对流传质。它们与传热学中的导热和对流换热相似。当质量的气、液、固的一相传递至另一相时,其机理是一样的。这就与传热一样,不论在气体、液体或固体中的导热,都可以用傅里叶定律来描述。

传质学中的质量传递和动量传递、热量传递一样。三者具有共同的特点。

牛顿粘性定律说明了流体等温流动时的分子动量传递。该定律可写成：

$$\tau_{y,x} = -\nu \frac{d(\rho u_x)}{dy}$$

式中 $\tau_{y,x}$ ——单位时间内，每单位面积所传递的动量， $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ ；

ν —— $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ，运动粘度，亦称为动量扩散系数， m^2/s ；

$\frac{d(\rho u_x)}{dy}$ —— y 方向动量变化梯度， $\frac{\text{kg}}{(\text{m}^2 \cdot \text{s})} / \text{m}$ 。

例题1-1

如图 1-1 所示，若两平板之间的距离为 0.1cm ，上平板速度为 10cm/s 。流体为 20°C 的水。试计算稳态的动量流率。

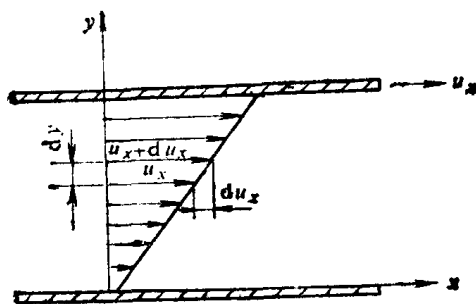


图1-1 速度分布

解 根据上式，积分得

$$\tau_{y,x} \int_0^{0.001} dy = -\mu \int_{0.1}^0 du_x$$

查表得知 20°C 水的 $\mu = 1.004 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ，将已知数据代入求得

$$\tau_{y,x} = 0.1004 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$$

傅里叶导热定律用来说明分子热扩散结果：当流体的密度 ρ 和比热 c_p 为常数时，则该定律可写成

$$q_x = -\alpha \frac{d(\rho c_p T)}{dy}$$

式中 q ——热通量， $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

α ——热扩散系数， $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ ， m^2/s ；

k ——导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

ρ ——密度， kg/m^3 ；

c_p ——定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

$\frac{d(\rho c_p T)}{dy}$ —— y 方向的热流梯度, $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ 。

例题1-2

有一完全静止的流体被置于两平行平板之间, 其间距为 0.15cm 。上板温度均为 80°C , 下板温度均为 78°C 。流体的导热系数 k 为 $60 \times 10^{-2} \text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, 并认为在这一温度范围中 k 为常数。求具有均匀壁温的两壁间的导热热量。

解 积分上式得

$$q_x \int_0^{0.0015} dy = -k \int_{80}^{78} dT$$

将已知数据代入求得

$$q_x = 800 \text{W}$$

斐克定律用来说明质量的分子扩散, 流体中的分子扩散通量可写成

$$J_{A,y} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dy}$$

式中 $J_{A,y}$ ——组分 A 在 y 方向作分子扩散时的摩尔通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的分子扩散系数, m^2/s ;

$\frac{dc_A}{dy}$ —— y 方向的质扩散梯度, $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$ 。

例题1-3

甲烷 (CH_4) 和氦 (He) 的混合物盛于某一容器中, 温度为 25°C , 总压力为 $10^5 \text{N}/\text{m}^2$ 。其中某点的 CH_4 的分压力为 p_{A1} 等于 $0.6 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2$, 离此点距离 2.0cm 处分压力为 p_{A2} 等于 $0.2 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2$ 。容器中总压力为常数。扩散系数 $D_{\text{CH}_4-\text{He}} = 0.675 \text{cm}^2/\text{s}$ 。试计算甲烷在稳态时的质量通量。

解 因为总压力为常数, 所以, 可把上式改写为

$$J_{A,y} = -\frac{D_{AB}}{RT} \frac{dp_A}{dy}$$

在稳态下, 积分上式得

$$J_{A,y} = \frac{D_{AB}(p_{A1} - p_{A2})}{RT(y_2 - y_1)}$$

式中 R ——通用气体常数, $R = 8.3 \times 10^3 \text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$;

T ——绝对温度, $T = 273 + 25 = 298\text{K}$ 。

所以

$$\begin{aligned} J_{A,y} &= \frac{(0.675 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s})(1 \times 10^5 - 0.6 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2)}{(8.3 \times 10^3 \text{N}\cdot\text{m}/(\text{kmol}\cdot\text{K}))(298\text{K})(0.02 \text{m})} \\ &= 5.45 \times 10^{-5} \text{kmol/s} \end{aligned}$$

上面三个方程式的左端分别表示动量通量、热量通量和质量通量，它们分别表示在单位时间内，每单位面积所传递的动量、热量和质量。右端的 ν 、 α 和 D_{AB} 分别表示传递性质，而 $\frac{d(\rho u_x)}{dy}$ 、 $\frac{d(\rho c_p T)}{dy}$ 和 $\frac{dc_A}{dy}$ 分别表示梯度。

这三个过程彼此之间主要的相似之处，在于动量、热量和质量的扩散速率都与这些量的浓度梯度成正比。

综上所述可知，如果只有分子传递时，则动量、热量和质量的扩散关系式可归纳为如表 1-1 所示。

表 1-1

动 量 传 递	传 热	传 质
$\tau_{y,x} = -\nu \frac{d(\rho u_x)}{dy}$	$q_x = -\alpha \frac{d(\rho c_p T)}{dy}$	$J_{A,y} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dy}$

§ 1-2 流 体 力 学 基 础

流体是液体和气体的统称。在流体力学中，假设流体具有连续性，即认为流体之间没有空隙存在，完全充满所占空间，所以是一种连续性的介质。

一、流体的主要物理性质

(一) 密度

流体的密度是流体的重要属性之一，它表征流体在空间某点质量的密集程度。

某一点处的密度可表示成

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

式中 ρ ——密度， kg/m^3 ；

dm ——所取某微元体的质量， kg ；

dV ——质量为 dm 的微元体的体积， m^3 。

式中 $\Delta V \rightarrow 0$ 是取的连续介质的极限。

(二) 重力 (重量)

地球上任何物体都受到重力的作用。同一物体在地球上各个地方所受到的重力，一般是不同的。根据牛顿第二定律，流体的重力和质量的关系为

$$G = mg$$

式中 G ——流体的重力， N ；

g ——重力加速度， m/s^2 。

(三) 膨胀性和压缩性

1. 膨胀性

在一定压力下，流体的体积随温度升高而增大的性质称为流体的膨胀性。膨胀性的大小用体积膨胀系数 β 来度量，它表示增加单位温度时所引起的体积相对增大量，即

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$$

式中 β ——流体的体积膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

V ——流体的体积, m^3 ;

dV ——流体体积的增量, m^3 ;

dT ——流体温度的增量, $^{\circ}\text{C}$ 。

液体的体积膨胀系数很小。在大气压力作用下, 温度在 $0 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 范围内时, 水的体积膨胀系数 $\beta = 14 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

2. 压缩性

在一定温度下, 流体体积随压力增加而缩小的性质称为流体的压缩性。压缩性的大小用体积压缩系数 β_v 来度量, 它表示增加单位压力时所引起的体积相对缩小量, 即

$$\beta_v = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP}$$

式中 β_v ——流体体积压缩系数, m^2/N ;

V ——流体的体积, m^3 ;

dV ——流体体积的缩小量, m^3 ;

dP ——流体压力的增量, N/m^2 。

液体的体积压缩系数很小。当 $P = 1 \sim 500 \text{ atm}$ 及 $T = 0 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 时, 水的体积压缩系数约为二万分之一。

根据流体的密度 (或体积) 随温度和压力的变化情况, 通常可把流体分为不可压缩流体和可压缩流体两种。

(四) 粘滞性

流动着流体, 如果各层流体的速度不相等, 则在两个相邻的流层接触面上, 将形成一对等值而反方向的摩擦力, 称为内摩擦力。流体的这种性质, 称为粘滞性。

设有两块平行平板, 其间充满流体, 如图 1-1 所示。假设下板固定, 上板以某一速度 u_x 向右移动。由于流体与板间的附着力, 紧贴板的流体将附着在板上, 具有与板相同的流速 u_x , 并向右运动。而紧贴在下板的一层流体将和下板一样静止不动。界于两板之间的各层流体, 将以自上而下逐层递减的速度向右移动。流动较快的流体层带动流动较慢的流体层; 反之, 流动较慢的流体层阻滞运动较快的流体层, 从而在流体层之间产生内摩擦力。

大部分流体运动所产生的内摩擦力与沿接触面法线方向的速度梯度成正比, 与接触面的面积成正比, 与流体的物理性质有关, 而与接触面上的压力无关。这个关系称为牛顿内摩擦定律。可写成:

$$F = \mu A \frac{du_x}{dy}$$

式中 F ——流体层接触面上的内摩擦力, N ;

A ——流体之间的接触面积, m^2 ;

$\frac{du_x}{dy}$ ——沿接触面法线方向的速度梯度, s^{-1} ;

μ ——动力粘度。

单位面积上的内摩擦力 τ (切应力) 可表示为:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du_x}{dy} \quad (1.1)$$

在运动流体中, 切应力总是成对出现的, 并且大小相等、方向相反。流体静止时, 速度梯度 $\frac{du_x}{dy} = 0$, 所以不呈现切应力。在流体力学中常引用动力粘度和密度的比值, 称为运动粘度, 用 ν 来表示, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, 单位为 m^2/s 。

1. 流体的粘度与温度和压力的关系。

温度对流体粘度的影响很大。液体的粘度随着温度的上升而减小, 而气体的粘度却随着温度的上升而增大。即温度对这两类流体粘度的变化趋向的影响恰好相反。这是由于构成它们的粘性的主要因素不同。因为液体分子间的空隙比气体要小近千倍, 因而液体分子间的吸引力比气体的要大得多。分子间的吸引力是构成液体粘性的主要因素。当温度上升时, 分子间的空隙增大, 吸引力减小, 故液体的粘度降低。相反, 气体分子间的吸引力很小, 构成气体粘性的主要因素是气体分子作混乱运动时在不同流速的流层间所进行的动量交换, 温度越高, 气体分子的混乱运动越强烈, 动量交换越频繁, 气体的粘度越大。

一般压力对流体的粘度几乎没有什么影响, 可以认为, 流体的粘度仅随温度变化。但在高压作用下, 气体和液体的粘度均将随压力的升高而增大。

水的动力粘度与温度的关系, 可近似地用下述经验公式计算

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.0337 T + 0.000221 T^2}$$

式中 μ_0 ——水在 0°C 时的动力粘度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$;

T ——水的温度, $^\circ\text{C}$;

气体的动力粘度与温度的关系, 可近似地用下述经验公式计算

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + c}{T + c} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}}$$

式中 μ_0 ——气体在 0°C 时的动力粘度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$;

T ——气体的热力学温度, K ;

c ——依气体种类而定的常数。

某些常用气体和液体的动力粘度和运动粘度随温度的变化曲线如图 1-2 和图 1-3 所示。

2. 牛顿流体和非牛顿流体

由实验证明, 大多数气体、水和许多润滑油类, 以及低碳氢化合物均能遵守牛顿内摩擦定律。当温度一定时, 流体的粘度 μ 保持不变, 即作用在流体上的内摩擦力与速度梯度之间存在着线性关系。这种流体称为牛顿流体, 如图 1-4 中的 A 线所示。但是还有许多流体的内摩擦力 τ 和速度梯度 $\frac{du_x}{dy}$ 之间不存在线性关系。这种流体称为非牛顿流体。有些非牛顿流体, 如未成型塑料, 它的性质还随时间而变化, 情况更为复杂。对于与时间无关的非牛顿流体大致可分为三类: