



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化工传递过程基础

(第三版)

陈涛 张国亮 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等教育“十五”国家级规划教材

化工传递过程基础

(第三版)

陈 涛 张国亮 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系普通高等教育“十五”国家级规划教材《化工传递过程基础》(陈涛、张国亮主编, 化学工业出版社, 2002)的修订版, 为“十一五”国家级规划教材。

本教材系统论述了化学工程中动量、热量与质量传递(“三传”)的基本原理、数学模型及求解方法, 传递速率的理论计算, “三传”的类比及传递理论的工程应用等内容。全书共12章。第一章为传递过程概论, 阐述流体流动导论、三传的类似性和衡算方法; 第二~五章为动量传递, 包括动量传递概论与动量传递微分方程、动量传递方程的若干解、边界层流动和湍流; 第六~八章为热量传递, 包括热量传递概论和能量方程、热传导和对流传热; 第九~十一章为质量传递, 包括质量传递概论和传质微分方程、分子传质和对流传质; 第十二章为多种传递同时进行的过程, 论述湍流下热、质同时传递和平壁面上层流边界层中同时进行“三传”的精确解。各章均附有例题和习题, 以帮助读者对本书内容的理解和运用。本书还配有免费的教学支持材料可供参考, 有需要的教师可登录 www.cipedu.com.cn 免费下载。

本书可作为“化学工程与工艺”专业的专业基础课教材, 亦可作为化工类其他专业的选修课教材, 也可供在化工领域从事科研、设计和生产的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工传递过程基础/陈涛, 张国亮主编. —3版. —北京: 化学工业出版社, 2009.5
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-04698-7

I. 化… II. ①陈… ②张… III. 化工过程-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第011899号

责任编辑: 徐雅妮 何丽
责任校对: 宋夏

文字编辑: 丁建华
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装订: 三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张19 字数516千字 2009年4月北京第3版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 32.00元

版权所有 违者必究

目 录

主要符号说明	1
绪论	4
第一章 传递过程概论	6
第一节 流体流动导论	6
一、静止流体的特性	6
二、流体流动的基本概念	9
第二节 动量、热量和质量传递的类似性	15
一、分子传递的基本定律	15
二、动量通量、热量通量和质量通量的普遍表达式	16
三、涡流传递的类似性	18
第三节 传递过程的衡算方法	19
一、总衡算	19
二、微分衡算	26
习题	28

第一篇 动量传递

第二章 动量传递概论与动量传递微分方程	30
第一节 动量传递概论	30
一、动量的分子传递与涡流传递	30
二、流体通过相界面的动量传递	32
第二节 描述流动问题的观点与时间导数	33
一、欧拉观点与拉格朗日观点	33
二、物理量的时间导数	34
第三节 连续性方程	35
一、连续性方程的推导	35
二、对连续性方程的分析	36
三、柱坐标与球坐标系的连续性方程	37
第四节 运动方程	38
一、用应力表示的运动方程	38
二、牛顿型流体的本构方程	41
三、牛顿型流体的运动方程	42
四、对奈维-斯托克斯方程的分析	44
习题	46
第三章 动量传递方程的若干解	48
第一节 曳力系数与范宁摩擦因数	48
一、绕流流动	48
二、封闭管道内的流动	49
第二节 平壁间与平壁面上的稳态层流	50
一、两平壁间的稳态层流	51

二、竖直平壁面上的降落液膜流动	54
第三节 圆管与套管环隙间的稳态层流	55
一、圆管中的轴向稳态层流	55
二、套管环隙间的轴向稳态层流	58
三、同心套管环隙间的周向稳态层流	59
第四节 爬流	61
一、爬流的概念与爬流运动方程	62
二、粒子在流体中的沉降与斯托克斯定律	62
第五节 势流	65
一、理想流体的运动方程	65
二、流体的旋度与速度势函数	66
三、势流的求解	67
第六节 平面流与流函数的概念	69
一、平面流的概念	69
二、流函数	70
习题	71
第四章 边界层流动	74
第一节 边界层的概念	74
一、普朗特边界层理论的要点	74
二、边界层的形成过程	74
三、边界层厚度的定义	76
第二节 普朗特边界层方程	76
一、普朗特边界层方程的推导	76
二、平板层流边界层的精确解	80
第三节 边界层积分动量方程	84
一、边界层积分动量方程的推导	84
二、平板层流边界层的近似解	87
第四节 管道进口段内的流体流动	91
第五节 边界层分离	92
习题	94
第五章 湍流	96
第一节 湍流的特点、起因及表征	96
一、湍流的特点	96
二、湍流的起因	96
三、湍流的表征	98
第二节 湍流时的运动方程	100
一、雷诺方程	100
二、雷诺应力	101
第三节 湍流的半经验理论	102
一、波希尼斯克的湍应力公式	102
二、普朗特混合长理论	102
第四节 无界固体壁面上的稳态湍流	104
第五节 圆管中的湍流	107
一、圆管稳态湍流的通用速度分布方程	107

二、光滑圆管中的速度分布与流动阻力	108
三、粗糙管中的速度分布与流动阻力	111
第六节 平板壁面上湍流边界层的近似解	113
第七节 量纲分析在动量传递中的应用	115
一、奈维-斯托克斯方程的量纲分析	115
二、伯金汉 π 定理	117
三、模型与相似	118
习题	119

第二篇 热量传递

第六章 热量传递概论与能量方程	122
第一节 热量传递的基本方式	122
一、热传导(导热)	122
二、对流传热	124
三、辐射传热	125
四、同时进行导热、对流传热及辐射传热的过程	126
第二节 能量方程	127
一、能量方程的推导	127
二、能量方程的特定形式	129
三、柱坐标系与球坐标系的能量方程	130
习题	132
第七章 热传导	133
第一节 稳态热传导	133
一、无内热源的一维稳态热传导	133
二、有内热源的一维稳态热传导	136
三、二维稳态热传导	138
第二节 不稳态热传导	141
一、忽略内部热阻的不稳态导热——集总热容法	141
二、忽略表面热阻的不稳态导热	144
三、内部热阻和表面热阻均不能忽略时的大平板的不稳态导热	152
四、多维不稳态导热	156
五、一维不稳态导热的数值解	158
习题	161
第八章 对流传热	163
第一节 对流传热的机理与对流传热系数	163
一、对流传热机理	163
二、温度边界层(热边界层)	164
三、对流传热系数	164
第二节 平板壁面对流传热	166
一、平板壁面上层流传热的精确解	166
二、平板壁面上层流传热的近似解	171
三、平板壁面上湍流传热的近似解	176
第三节 管内对流传热	180
一、管内强制层流传热的理论分析	180

二、管内对流传热的量纲分析·····	186
三、管内湍流传热的类似律·····	191
第四节 自然对流传热·····	196
一、自然对流系统的运动方程和能量方程·····	197
二、自然对流系统的对流传热系数·····	197
习题·····	200

第三篇 质量传递

第九章 质量传递概论与传质微分方程 ·····	203
第一节 质量传递概论·····	203
一、混合物组成的表示方法·····	203
二、质量传递的基本方式·····	205
三、传质的速度与通量·····	207
第二节 传质微分方程·····	211
一、传质微分方程的推导·····	211
二、传质微分方程的特定形式·····	213
三、柱坐标系与球坐标系的传质微分方程·····	214
习题·····	216
第十章 分子传质（扩散） ·····	218
第一节 一维稳态分子扩散的通用速率方程·····	218
第二节 气体中的分子扩散·····	218
一、组分 A 通过停滞组分 B 的稳态扩散·····	218
二、等分子反方向稳态扩散·····	221
三、气体扩散系数的测定和计算·····	223
第三节 液体中的分子扩散·····	226
一、液体中的稳态分子扩散速率方程·····	227
二、组分 A 通过停滞组分 B 的稳态扩散·····	227
三、等分子反方向稳态扩散·····	228
四、液体扩散系数的计算·····	228
第四节 固体中的扩散·····	231
一、与固体结构无关的稳态扩散·····	231
二、多孔固体中的稳态扩散·····	232
三、固体中的扩散系数·····	235
第五节 伴有化学反应的分子扩散过程·····	235
一、具有非均相化学反应的一维稳态分子扩散·····	235
二、具有均相化学反应的一维稳态分子扩散·····	236
习题·····	238
第十一章 对流传质 ·····	241
第一节 对流传质的机理与对流传质系数·····	241
一、对流传质机理·····	241
二、浓度边界层·····	242
三、对流传质系数·····	242
第二节 平板壁面对流传质·····	247
一、平板壁面上层流传质的精确解·····	247

二、平板壁面上层流传质的近似解·····	250
三、平板壁面上湍流传质的近似解·····	253
第三节 管内对流传质·····	255
一、管内稳态层流传质·····	255
二、管内湍流传质的类似律·····	258
第四节 对流传质模型·····	262
一、停滞膜模型·····	263
二、溶质渗透模型·····	263
三、表面更新模型·····	265
习题·····	266
第十二章 多种传递同时进行的过程 ·····	268
第一节 热量和质量同时传递的过程·····	268
一、湍流下热量和质量同时传递的过程·····	268
二、空气-水物系中热量和质量同时传递的过程·····	272
第二节 平板壁面层流边界层中同时进行动量、热量和质量传递的过程·····	280
一、平板层流边界层中动量、热量和质量传递的基本微分方程·····	280
二、平板层流边界层中同时进行动量、热量和质量传递的精确解·····	280
习题·····	284
附录 ·····	286
附录 A 主要物理量的单位换算表·····	286
附录 B 误差函数表·····	287
附录 C 扩散系数·····	287
附录 D 分子扩散时 $\Omega_D \sim \frac{kT}{\epsilon_{AB}}$ 之间的关系表·····	289
附录 E 伦纳德-琼斯参数 σ 、 ϵ/k 数值表·····	289
参考文献 ·····	291

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	R	通用气体常数, $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
A_{av}	平均面积, m^2	\dot{R}_A	单位体积中组分 A 生成的摩尔速率, $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
C	系统的总物质的量浓度, kmol/m^3	S	气体在固体中的溶解度, $\text{m}^3/(\text{kPa} \cdot \text{m}^3)$
C_{av}	液相的平均总物质的量浓度, kmol/m^3	T	热力学温度, K
C_D	曳力系数、平均曳力系数, 无量纲	U	单位质量流体的内能, J/kg
C_{Dx}	局部 (x 处) 曳力系数, 无量纲	V	体积, m^3
C_{Dx}^0	喷出参数为零时的局部曳力系数, 无量纲	V_s	体积流率, m^3/s
D_{AB}	组分 A 通过组分 B 的扩散系数, m^2/s	W	做功速率, J/s
D_{ABP}	有效扩散系数, m^2/s	\dot{W}	单位质量流体对环境所做的功, J/kg
D_{KA}	纽特逊扩散系数, m^2/s	W_e	轴功率, J/s
E	单位质量流体的总能量, J/kg	\dot{W}_e	单位质量流体所做的轴功, J/kg
E_t	总能量, J	X	x 方向上的单位质量流体的质量力, N/kg
F	力、外力, N	X_r, X_z, X_θ	柱坐标系中径向、轴向、方位角方向上单位质量流体的质量力, N/kg
F_B	体积力或质量力, N	X_r, X_ϕ, X_θ	球坐标系中径向、方位角、余纬度方向上单位质量流体的质量力, N/kg
F_d	流体对物体施加的总曳力, N	Y	y 方向上单位质量流体的质量力, N/kg
F_i	惯性力, N	Z	z 方向上单位质量流体的质量力, N/kg
F_S	表面力或机械力, N	a_A, a_B, a_i	组分 A、B、 i 的质量分数, 无量纲
G	质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	c_A, c_B, c_i	组分 A、B、 i 的物质的量浓度, kmol/m^3
G_i	组分 i 的质量, kg	c_{Ab}	组分 A 的主体平均浓度, kmol/m^3
H	单位质量流体的焓, J/kg	c_{As}	组分 A 在界面处的浓度, kmol/m^3
I	湍动强度, 无量纲	c_{A0}	组分 A 在边界层外的均匀浓度, kmol/m^3
J_A	相对于摩尔平均速度 u_M 的组分 A 的摩尔通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	c_p, c_v	定压比热容和定容比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
K	稠度指数, 无量纲	d	管径、孔径, m
L	长度, 流动距离, m	d_e	当量直径, m
L_e, L_t, L_D	管内流动、传热、传质的进口段长度, m	e	绝对粗糙度, mm
M	质量, kg	f	范宁摩擦因数, 无量纲
M_A, M_B, M_i	组分 A、B、 i 的摩尔质量, kg/kmol	f_B	单位质量流体的质量力 (或重力), N/kg
M_i	组分 i 的质量, kg	g, g	重力加速度, m/s^2
\bar{M}	平均摩尔质量, kg/kmol	h	对流传热系数 (膜系数), $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
N	相对于静止坐标的总摩尔通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	h_x, h_m	局部 (x 处) 和平均对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
N_A, N_B	相对于静止坐标的组分 A、B 的摩尔通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	h_x^0	喷出参数为零时的局部对流传热系数,
P	垂直作用于流体表面上的力, N		
Q	吸热速率, J/s		
\dot{Q}	单位质量流体所吸收的热量, J/kg		

$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$	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	St'	传质斯坦顿数, $\frac{k_c^0}{u_b}$
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	St_x	局部斯坦顿数, $\frac{h_x}{c_p \rho u_0}$
ϕ	单位体积流体的摩擦热速率, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$	St'_x	局部传质斯坦顿数, $\frac{k_c^0}{u_0}$
φ	速度势函数, m^2/s	Sh	舍伍德数, $\frac{k_c^0 d}{D_{AB}}$
ψ	流函数, m^2/s	Sh_x	局部舍伍德数, $\frac{k_{c,x}^0 x}{D_{AB}}$
无量纲数群		Sh_m	平均舍伍德数, $\frac{k_{cm}^0 L}{D_{AB}}$
Bi	皮渥数, $\frac{hl}{k}$	Kn	纽特逊数, $\frac{\lambda}{2r}$
Eu	欧拉数, $\frac{p}{\rho u^2}$	j_H	传热 j 因数, $St Pr^{2/3}$
Fr	弗鲁德数, $\frac{u^2}{gL}$	j_D	传质 j 因数, $St' Sc^{2/3}$
Gr	格拉晓夫数, $\frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta t}{\mu^2}$	L^*	无量纲长度, $\frac{x}{l}$
Nu	努塞尔数, $\frac{hd}{k}$	m	相对热阻, $\frac{k}{hx_i} = \frac{1}{Bi}$
Nu_x	局部努塞尔数, $\frac{hx}{k}$	n	相对位置, $\frac{x}{x_1}$
Nu_m	平均努塞尔数, $\frac{hL}{k}$	c_A^*	无量纲浓度差, $\frac{c_{A0} - c_{As}}{c_{A0} - c_{As}}$
Pr	普朗特数, $\frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k}$	T^*	无量纲温度差, $\frac{t - t_s}{t_0 - t_s}$
Re	雷诺数 (管内流动), $\frac{\rho u_b d}{\mu}$	T_b^*	无量纲温度差, $\frac{t - t_b}{t_0 - t_b}$
Re_L	雷诺数 (平板壁面上的流动), $\frac{\rho u_0 L}{\mu}$	U^*	无量纲速度, $\frac{u_x}{u_0}$
Re_x	局部 (x 处) 雷诺数, $\frac{\rho u_0 x}{\mu}$	u^+	无量纲速度, $\frac{u}{u^*}$
Re_{x_c}	临界雷诺数, $\frac{\rho u_0 x_c}{\mu}$	y^+	无量纲距离, $\frac{yu^*}{\nu}$
Sc	施米特数, $\frac{\nu}{D_{AB}} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$	η	无量纲位置, $y \sqrt{\frac{u_0}{\nu x}}$
St	斯坦顿数, $\frac{h}{c_p \rho u_b}$	$f(\eta)$	无量纲流函数, $\frac{\psi}{\sqrt{u_0 \nu x}}$

绪 论

化学工业是指对原料进行化学加工，以改变物质的结构或组成或合成新物质，从而获得有用产品的制造业。由于原料、产品的多样性以及生产过程的复杂性，形成了数以万计的化工生产工艺。化学工程是研究化学工业及相关过程工业（process industry）生产中所进行的物理过程和化学反应过程共同规律的一门工程学科。它的研究范围包括所有采用化学加工技术的场合，不但覆盖了整个化学与石油化学工业，而且渗透到能源、环境、生物、材料、制药、冶金、轻工、公共卫生、信息等工业及技术领域。

化学工程学科的形成与发展经历了如下几个阶段。在 20 世纪 20 年代以前，人们对于化工过程的研究主要侧重于单一化工过程的工艺特性方面。那时，对于每一类化工过程的工艺，均被视为一门专门的“工艺知识”。化学工程的早期课程，即是以学习各种化工过程的工艺知识为基础。例如，化学肥料制造工业、硫酸工业等均被作为彼此独立的专门知识。20 年代以后，人们逐渐发现，各种化学工艺都可以分解为若干相对独立的操作“单元”，而且不同工艺的相同操作单元遵循着相同的原理。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。于是人们开始由原来专门的工艺知识转为“单元操作”（unit operation）的研究。蒸发是最早被提出的单元操作之一。被称为单元操作的还有流体输送、过滤、加热与冷却、干燥、蒸馏、吸收、萃取、结晶等。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 20 世纪前半期发展阶段的基本情况。

20 世纪 50 年代以后，随着单元操作研究的不断深入，人们又发现若干单元操作之间亦存在着共性。例如，过滤是流体流动的一种特殊情况，蒸发是一种热量传递过程，吸收或萃取都遵循着质量传递的原理，而干燥与蒸馏则为热量和质量传递同时进行的过程。由此可知，对于单元操作原理的深入研究，最终都可以归结为对于动量传递、热量传递和质量传递的研究。1960 年，R. B. Bird、S. E. Stewart 和 E. N. Lightfoot 的著作《传递现象》（Transport Phenomena）首次问世，系统地阐述了动量、热量传递和质量传递的基本原理。嗣后，各种论述动量、热量和质量传递（momentum, heat, and mass transfer）的著作相继出版，从此传递过程原理这一课程成为化学工程学科的主干课程之一。

化学工程学科研究的两个基本问题：一为过程的平衡、限度；二为过程的速率以及实现过程所需要的设备。过程的平衡、限度问题属于化工热力学研究的范畴；过程的速率问题包括化学反应过程的速率和物理过程的速率。化学反应过程的速率及实现过程的设备是化学反应动力学和化学反应工程研究的内容；物理过程的速率以及实现过程的设备是本课程和化工单元操作研究的内容。化工传递过程侧重于物理过程的速率及传递机理的探讨；单元操作则注重解决过程的设备及工程方面的问题。

因此，传递过程原理是化工单元操作的基础，它注重从理论上揭示各种单元操作过程和设备的基本原理。结合特定的单元操作过程和设备深入研究其动量、热量和质量传递的机理，不但可以为所研究的过程提供基础数学模型，而且可以从理论上计算过程的速率，这对于化工过程和设备的开发、设计与优化起着十分重要的作用。另一方面，将动量、热量和质量传递现象归结为速率问题进行综合探讨，还可以发现 3 类传递过程之间存在着基本的类似性。

综上所述，本课程的目的有二：其一是研究各种物理过程的速率问题。具体地说，对于各种与流体流动相关的过程，如流体的输送、过滤、混合等，研究其动量传递的速率或流动的阻力；对于热量与质量传递过程，如物料的加热与冷却、吸收、萃取等，研究热量与质量传递的

速率。其二是探讨动量、热量和质量传递之间的类似性。这是因为 3 种传递过程之间，无论是传递机理还是数学描述以及结果方面，都有着惊人的类似。因此，研究它们之间的类似性，可以将一个传递过程的研究成果应用于另外的传递过程，这样可以取得事半功倍的效果。

本书与化工单元操作（化工原理）一起，是以研究化工中物理过程的速率以及实现过程的设备为主要内容的化学工程专业的基础课教材。在教学安排上，本教材既适于本科生学完化工原理后开设本课程之用，也适用于化工原理与本课程平行开设以及未学化工原理单独开设本课程的学生使用。

第一章 传递过程概论

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。物理量朝向平衡状态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。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。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。

在化学工程领域中，传递过程大多是在流体流动的状态下进行的。因此，流体流动与动量、热量和质量传递有非常密切的关系。

动量、热量和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 3 类传递过程的问题得以简化。

传递过程规律的研究常采用衡算方法，即依据质量守恒、能量守恒（热力学第一定律）和动量守恒（牛顿第二运动定律）原理，在运动的流体中选择一特定的空间范围进行质量、能量和动量衡算，导出有关的衡算方程来解决传递过程规律问题。

本章作为研究动量、热量和质量传递的基础，主要论述流体流动的基本概念，动量、热量和质量传递的类似性及衡算方法等内容。

第一节 流体流动导论

流体是气体和液体的统称。流体由大量的彼此之间有一定间隙的分子组成，各个分子都做着无序的随机运动。因此流体的物理量在空间和时间上的分布是不连续的。

对流体任意微元体积考察可知，由于流体分子随机运动跃入与跃出此体积的分子数并不时时平衡，而是随机波动，从而导致质量的变化，流体表现分子的个性。但当考察的微元体积增加至相对于分子几何尺寸足够大而相对于容器尺寸充分小的某一特征体积时，便可不计由分子随机运动进出此特征体积分子数变化所导致的质量变化，这时流体的宏观特性即为分子统计平均特性。此一特征体积中所有流体分子的集合称为流体质点。利用质点这一宏观概念，可将流体视为由无数质点组成的连续介质，流体所占的空间全部为这个连续介质充满。工程实际中，主要研究流体的宏观运动规律，而不探讨流体分子的运动，便可将流体作为连续介质处理。在传递过程中，可方便地运用数学上的连续函数理论研究流体运动问题。

一、静止流体的特性

流体静止状态是流体运动的特定状态，即流体在外力作用下处于相对静止或平衡状态。静止流体的特性如密度、静压力和流体平衡规律等与流体流动有密切关系。

(一) 流体的密度

密度是流体的重要物理性质。单位体积流体所具有的质量称为流体的密度。

对于质量分布均匀的流体（均质流体），设在体积 V 内包含的质量为 M ，则密度的定义式为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度；

V ——流体的体积；

M ——流体的质量。

对于非均质流体，由于空间各点单位体积所包含的流体质量数值不同，流体的密度可用某一点处的值（点密度）表示。设流体某点周围的微元体积 dV 中包含质量 dM ，点密度的定义式为

$$\rho = \frac{dM}{dV} \quad (1-2)$$

由于假定流体为连续介质，在同一时刻流体点密度是空间的连续函数。流体的其他物理量，如压力、浓度、速度、温度等，在给定时刻均为空间的连续函数。

流体的密度都随着温度和压力变化。对于液体，温度改变时其密度略有改变，而压力对其密度的影响很微小，工程应用中可忽略压力的改变对液体密度的影响（极高压力除外）。气体密度受温度和压力改变的影响较明显，低压气体密度可按理想气体状态方程计算，高压气体密度可用实际气体的状态方程计算。

气体混合物或液体混合物的密度一般通过纯态物质的密度及各组分的质量分数进行计算。

单位流体质量的体积称为流体的比体积（或质量体积），其定义式为

$$v = \frac{V}{M} \quad (1-3)$$

式中 v ——流体的比体积。

流体的密度 ρ 与比体积 v 互为倒数，即

$$\rho v = 1 \quad (1-4)$$

(二) 可压缩流体与不可压缩流体

流体在外力的作用下，其体积发生变化而引起密度变化。作用在流体上的外力增加时，其体积减小。流体的这种特性称为可压缩性。

一般情况下，液体的压缩性很小，甚至无压缩性；气体体积受压力和温度影响较大，可压缩性较为明显。

密度不随空间位置和时间变化的流体称为不可压缩流体。通常液体可视为不可压缩流体。

密度随空间位置或时间变化的流体称为可压缩流体。气体为可压缩流体，但在某些情况下，如气体等温流动且压力改变不大时，也可近似按不可压缩流体处理。

(三) 流体的压力

静止流体受各种外力的作用而处于平衡状态，其中一种外力垂直作用于流体的表面。垂直作用于流体单位面积上的力称为流体的压力或称静压力。若均匀地垂直作用于流体表面积 A 上的力为 P ，则压力的定义为

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-5)$$

式中 p ——流体的压力；

P ——垂直作用于流体表面上的力；

A ——作用面的表面积。

当垂直作用在流体表面积上的力不均匀时，流体的压力可应用某一点处的压力（点压力）表

示。在流体中任取一微元面积 dA ，设垂直作用在该微元面积上的力为 dP ，则点压力的定义式为

$$p = \frac{dP}{dA} \quad (1-6)$$

流体任意点处压力的方向总是垂直于作用面并指向流体内部，在同一点处不同方向的流体静压力数值相等。

压力的单位，在 SI 制中为 N/m^2 或 Pa。工程上还可用其他单位表示压力，诸如 atm（标准大气压）、mmHg 或 mH₂O（毫米汞柱或米水柱高度）、bar（巴）和 kgf/cm²（工程大气压）等。各种压力单位的换算关系，可参阅本书附录 A 查出。

流体静压力常采用两种不同基准表示：一是以绝对真空状态的压力为零作为基准计量，这种压力称为绝对压力，是流体的真实压力；另一种是以当时当地的大气压力为零作为基准计量，这种压力称为相对压力。

相对压力又分为表压力和真空度两种。

表压力是指高于当时当地大气压的压力，即

$$\text{表压力} = \text{绝对压力} - \text{大气压力}$$

真空度是指低于当时当地大气压的压力，即

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

显然，真空度越高，表示绝对压力越低。真空度可表示为表压力的负值。

由于压力采用多种方法表示，在书写时应加标注。习惯上，用绝对压力表示时不加标注，例如 $p=2\text{atm}$ 表明绝对压力为 2 标准大气压；对于表压力和真空度需加标注，例如 $p=3 \times 10^5 N/m^2$ （表压）或 $p=500\text{mmHg}$ （真空度）等。

（四）流体平衡微分方程

上已提及，静止流体受各种外力的作用而处于平衡状态。任取一流体微元分析可知，作用在其上的外力分为两类：一类是作用在流体每一质点上的外力，称为体积力；另一类是作用在流体微元表面上的力，称为表面力。

1. 体积力

体积力也称质量力，流体的每一质点均受这种力的作用，例如受地球吸引的重力、带电流体所受的静电力和电流通过流体产生的电磁力等。在化学工程中，通常只考虑重力的作用，故本书中涉及的质量力是指重力，用 F_B 表示。单位流体质量所受的质量力用 f_B （N/kg）表示， f_B 在直角坐标 x 、 y 、 z 3 个轴上的投影分量分别以 X 、 Y 、 Z 表示。

2. 表面力

表面力是流体微元的表面与其相邻流体作用所产生的。流体在静止状态时，表面力表现为静压力。流体在运动时，微元表面与其相邻流体的表面产生摩擦，故表面力除压力外还有摩擦产生的黏性力。表面力以 F_s 表示。

在静止流体中，所受外力为重力和静压力，这两种力互相平衡，利用平衡条件可导出流体平衡微分方程。

图 1-1 所示为静止流体中的任一流体微元，边长为 dx 、 dy 、 dz ，它在质量力（重力）和静压力产生的表面力两者的作用下处于平衡状态。

首先分析 x 方向的作用力，其质量力为

$$dF_{Bx} = \rho X dx dy dz$$

由静压力产生的表面力为

$$dF_{sx} = p dy dz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy dz$$

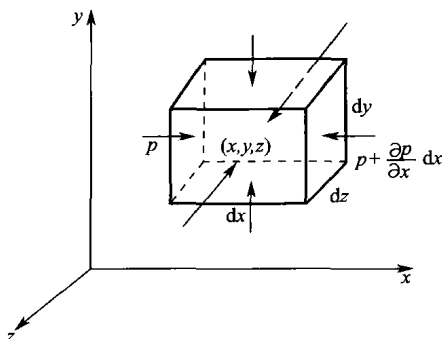


图 1-1 静止流体微元受力分析

故 x 方向的平衡条件为

$$dF_{Bx} + dF_{sx} = 0$$

即

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho X \quad (1-7a)$$

同理可得

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \rho Y \quad (1-7b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho Z \quad (1-7c)$$

或写成向量形式

$$\rho \mathbf{f}_B = \nabla p \quad (1-7d)$$

式(1-7)即为流体平衡微分方程,又称为欧拉(Euler)平衡微分方程。该方程描述静止流体中静压力与质量力之间的关系,表示静压力梯度等于单位体积流体的质量力。将式(1-7)积分,即可得到流体内部静压力分布规律。

(五) 流体静力学方程

流体静力学方程可由流体平衡微分方程导出。设图 1-2 所示的容器中为静止液体,其密度均匀为 ρ ,液面上的压力为 p_0 ,在液面之下深度为 h 的水平面某点 A 处的静压力为 p 。坐标原点 O 为液面上任一点, z 轴垂直向上, x 、 y 轴为水平方向(图中未标出)。

将式(1-7a)、式(1-7b)和式(1-7c)依次乘以 dx 、 dy 、 dz ,然后将 3 式相加,得

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = \rho(Xdx + Ydy + Zdz)$$

由于 p 是坐标 x 、 y 、 z 的连续函数, dp 为全微分,即

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz$$

可得

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz) \quad (1-8)$$

由于质量力视为重力,在水平方向上 $X=0$ 和 $Y=0$,而 $Z=-g$,式(1-8)可写为

$$dp = -\rho g dz$$

积分上式

$$\int_{p_0}^p dp = -\rho g \int_0^{-h} dz$$

得

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-9)$$

式(1-9)称为流体静力学方程,表明密度均匀的静止流体内部在重力作用下静压力随深度的变化规律(静压力分布)。

将式(1-9)写成下式

$$h = \frac{p - p_0}{\rho g} \quad (1-9a)$$

式(1-9a)表明,对于一定密度的液体,压力差大小与深度 h 成正比。故液柱高度 h 可用来表示压力差的大小,这就是用 mmHg 或 mH₂O 柱表示压力单位的依据。

二、流体流动的基本概念

(一) 流速与流率

1. 流速

流速即流体流动的速度。对于任意流动状态,速度为一空间向量,以 \mathbf{u} 表示。设 \mathbf{u} 在直角

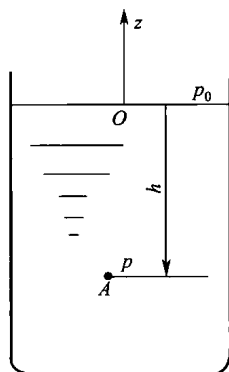


图 1-2 静止流体内部的压力分布