

高等学校教材

过程流体力学

宋鹏云 焦 凤 朱孝钦 等编著



化学工业出版社

高等学校教材

过程流体力学

宋鹏云 焦 凤 朱孝钦 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书结合过程工业中的流体流动规律介绍流体力学。全书共 9 章, 包括绪论、流体运动学、理想流体力学、黏性流体力学、射流与撞击流、多相流、流体通过多孔介质的流动、非牛顿流体的流变性与流动、计算流体力学。

本书力图用较小的篇幅介绍过程流体力学的主要内容, 注重物理概念和基本规律的阐述。

本书可作为过程工业相关专业研究生和高年级本科生的教学参考书, 也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程流体力学/宋鹏云等编著. —北京: 化学工业出版社, 2016. 2

高等学校教材

ISBN 978-7-122-25776-5

I. ①过… II. ①宋… III. 流体力学-高等学校-教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 285749 号

责任编辑: 程树珍

文字编辑: 项 激

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 张 辉

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 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 15¼ 字数 391 千字 2016 年 2 月北京第 1 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: 40.00 元

版权所有 违者必究

前 言

“过程”的概念随着“过程工业”“过程工程”“过程装备”“过程控制”以及“过程装备与控制工程”本科专业的发展,引起了越来越多的关注。研究生教育学科(专业)“化工过程机械”也涉及“过程”。

过程工业,也称为流程工业,是涉及物质转化过程的工业部门的总称。它是加工制造流程性物料(指以气体、液体和粉粒体等形态为主的材料)的产业,是现代制造业的重要组成部分。研究过程工业流体流动规律及其应用的学科,称为过程流体力学。过程流体力学与一般的工程流体力学相比,有其特殊性,过程流体力学更关注过程工业中特有的流动现象,如流动介质特殊,它不仅仅是水和空气等简单流体;流动形式复杂,除常见的管道流动外,还包括薄膜流动、射流与撞击流、多相流、流体在多孔介质的流动、非牛顿流体的流动等。化工流体力学是涉及化学工业的流体力学,其概念已得到了普遍接受。过程流体力学是在化工流体力学的基础上发展起来的,是化工流体力学更一般的拓展。过程流体力学的概念,早在1980年就已提出。Denn, Morton M于1980年出版了《Process Fluid Mechanics》(过程流体力学)一书,除介绍一般的流体力学内容外,还介绍了许多特殊内容,如薄膜流动、润滑近似、边界层近似、气液两相流、黏弹性流体等。

本书结合过程工业中的流体流动规律介绍流体力学。全书共9章,包括绪论、流体运动学、理想流体力学、黏性流体力学、射流与撞击流、多相流、流体通过多孔介质的流动、非牛顿流体的流变性与流动、计算流体力学。

本书是昆明理工大学研究生教育百门核心课程——“过程流体力学”建设的一个重要内容,得到了昆明理工大学的大力支持。

本书由宋鹏云主持编著,并编写第1章、第2章;朱孝钦编写第3章、焦凤编写第4章、栗志编写第5章,栗志、许恒杰编写第6章,常静华编写了第7章,别玉编写了第8章,毛文元、许恒杰编写了第9章。全书由宋鹏云进行统稿、调配和补充。

由于编著者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编著者

2015年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 过程流体力学的内容和范围	1
1.1.1 过程的基本概念	1
1.1.2 过程流体力学的范围	1
1.2 流体的物理属性	2
1.2.1 流动性	2
1.2.2 密度	2
1.2.3 可压缩性	3
1.2.4 热膨胀性	5
1.2.5 黏性	7
1.2.6 表面张力特性	10
1.3 流体流动的基本模型	15
1.3.1 连续介质模型、自由分子流、滑移流	15
1.3.2 理想流体模型	16
1.3.3 牛顿流体与非牛顿流体	16
1.4 过程流体力学研究的基本方法	19
1.4.1 理论研究方法	19
1.4.2 实验研究方法	20
1.4.3 数值计算研究方法	20
习题	20
参考文献	22
第 2 章 流体运动学	23
2.1 流体运动的描述	23
2.1.1 运动描述的拉格朗日法和欧拉法	23
2.1.2 迹线、流线和色线	25
2.1.3 加速度	28
2.1.4 流体微团运动分析	30
2.1.5 涡量、有旋流动与无旋流动	33
2.2 流动问题的分类	35
2.2.1 定常流动和非定常流动	35
2.2.2 一维流动、二维流动、三维流动	36
2.2.3 内流和外流	36

2.2.4	黏性流动和无黏性流动、理想流体流动和实际流体流动	37
2.2.5	层流和湍流	37
	习题	37
	参考文献	38
第3章	理想流体力学	39
3.1	理想流体运动基本定律	39
3.1.1	基本概念	39
3.1.2	系统、控制体和雷诺输运方程	42
3.1.3	理想流体的连续性方程	44
3.1.4	理想流体的运动微分方程	46
3.1.5	理想流体的伯努利方程及其应用	48
3.1.6	动量方程和动量矩方程	51
3.2	理想流体的涡旋运动	56
3.2.1	涡线、涡管、涡通量	56
3.2.2	速度环量和斯托克斯定理	58
3.2.3	开尔文环量守恒定理	59
3.2.4	含有涡量的理想流体运动微分方程	60
3.3	不可压缩流体平面势流	63
3.3.1	平面势流基本理论	63
3.3.2	几种基本的平面势流	66
3.3.3	几种由简单平面势流叠加形成的复合流	68
3.3.4	理想流体绕圆柱体的流动	71
	习题	75
	参考文献	78
第4章	黏性流体力学	79
4.1	引言	79
4.2	黏性流体中的应力	80
4.2.1	黏性流体中的应力	80
4.2.2	广义牛顿摩擦定律	80
4.3	不可压缩黏性流体运动的基本方程	82
4.3.1	连续性方程	82
4.3.2	动量方程(以应力表示的运动微分方程)	83
4.3.3	纳维-斯托克斯方程	84
4.3.4	纳维-斯托克斯方程边界条件和初始条件	85
4.3.5	湍流流动时的连续方程和运动方程	86
4.4	N-S方程的典型解	87
4.4.1	平行流动	87

4.4.2	运动平板引起的非定常流动	92
4.4.3	重力作用下的平行流动	94
4.4.4	低雷诺数流动	96
4.4.5	雷诺润滑理论	101
4.5	边界层的基本概念及基本方程	103
4.5.1	边界层的基本概念	103
4.5.2	边界层厚度	104
4.5.3	二维平面边界层微分方程式	105
4.5.4	边界层的分离现象	107
	习题	108
	参考文献	112
第5章	射流与撞击流	113
5.1	射流	113
5.1.1	射流的类型	113
5.1.2	紊动射流的分区结构及一般特性	113
5.1.3	紊动射流的分析方法简介	116
5.2	撞击流	119
5.2.1	撞击流的基本原理及特性	119
5.2.2	撞击流的分类	120
5.2.3	撞击流研究进展	120
5.2.4	撞击流接触器简介	121
5.2.5	撞击流的工业应用	122
	习题	123
	参考文献	124
第6章	多相流动	126
6.1	概论	126
6.1.1	相的概念	126
6.1.2	多相流的概念	126
6.2	多相流流型及其判别方法	127
6.2.1	垂直上升管内的气液两相流的流型	127
6.2.2	水平管内的气液两相流流型	128
6.2.3	两相流流型的判别	128
6.3	颗粒(固体颗粒、气泡、液滴) 受力及运动分析	130
6.3.1	颗粒受力分析	130
6.3.2	气泡的形成和受力分析	132
6.4	气液两相流	133
6.4.1	气液两相流的特性参数	133

6.4.2	气液两相流动的均相流模型	135
6.4.3	气液两相流动的分相流模型	137
6.4.4	气液两相流动中压力降及截面含气率的计算	139
6.5	段塞流	145
6.5.1	段塞流的分类	145
6.5.2	段塞流特性参数计算	145
6.6	气固两相流	148
6.6.1	气固两相流的基本概念和特性参数	148
6.6.2	固定床气固两相流的特性	149
6.6.3	流化床气固两相流的特性	151
6.7	液固两相流	153
6.7.1	液固两相流的分类	153
6.7.2	液固两相流的基本参数	154
6.7.3	滞留效应	156
6.8	液液两相流	156
6.8.1	液液两相流的基本参数	157
6.8.2	液液两相流的检测技术	158
6.9	气液固三相流	158
6.10	气液液三相流	160
6.10.1	流型	160
6.10.2	压降	160
6.11	多相流新技术	161
6.11.1	试验技术	161
6.11.2	数值模拟技术	162
6.12	多相流的工业应用	162
6.12.1	在动力工业中的应用	162
6.12.2	在石油工业中的应用	163
6.12.3	在其他工业中的应用	163
	习题	164
	参考文献	164

第7章	流体通过多孔介质的流动	166
7.1	多孔介质的定义和性质	166
7.1.1	多孔介质的定义	166
7.1.2	多孔介质的性能	167
7.2	渗流基本定律——达西 (Darcy) 定律	170
7.2.1	达西定律	170
7.2.2	渗透率	171
7.2.3	达西定律的适用范围	172

7.3	流体通过颗粒床（固定床）的流动	173
7.3.1	流体通过固定床的压降计算	173
7.3.2	过滤速率计算	174
	习题	176
	参考文献	176
第8章	非牛顿流体的流变性与流动	178
8.1	非牛顿流体的流变性	178
8.1.1	材料（物体）的流变性	178
8.1.2	非牛顿流体的奇异流变现象	179
8.2	非牛顿流体的本构方程	180
8.2.1	假塑性流体的流变模型	181
8.2.2	黏塑性流体的流变模型	184
8.2.3	触变流体的本构模型（方程）	185
8.2.4	黏弹性流体本构模型（方程）	187
8.3	非牛顿流体的层流流动	192
8.3.1	层流流动基本方程	192
8.3.2	假塑性（幂律）流体在圆管中的层流流动	194
8.3.3	Bingham 流体在圆管中的层流流动	196
8.4	非牛顿流体的湍流流动	199
8.4.1	流动状态及其判别准则	199
8.4.2	压力降	201
8.4.3	速度分布	204
	习题	206
	参考文献	208
第9章	计算流体力学	209
9.1	引言	209
9.1.1	计算流体力学的概念	209
9.1.2	计算流体力学的作用	210
9.1.3	计算流体力学的应用举例	210
9.1.4	计算流体力学的基本内容和步骤（CFD 总体步骤）	212
9.2	适用于 CFD 的流体力学主要方程和模型	214
9.2.1	流体力学基本方程	214
9.2.2	流体流动控制方程的统一形式	214
9.2.3	流体湍流的数值模拟方法	215
9.2.4	湍流模型	216
9.3	CFD 常用的计算方法	218
9.3.1	有限差分法	219

9.3.2	有限体积法	221
9.3.3	有限元法	224
9.3.4	其他方法	225
9.4	常用的 CFD 商品软件介绍	227
9.4.1	CFD 软件结构	227
9.4.2	ANSYS Fluent	229
9.4.3	ANSYS CFX	229
9.4.4	PHOENICS	229
9.4.5	FIDAP	230
9.4.6	其他专用软件	230
	习题	231
	参考文献	232

第 1 章 绪 论

1.1 过程流体力学的内容和范围

1.1.1 过程的基本概念

“过程”(process)与“状态”相对。过程指事物状态的变化在时间上的持续和空间上的延伸。这里所指的“过程”，是指一种或多种原料经一系列加工、转换和处理而生产出最终产品或中间体的全过程。实现这一过程的工业称为“过程工业”或“流程工业”。过程工业的原料和产品或中间体可分为固体性材料和流体性材料。流体性材料包括气体、液体、粉粒体及其组合。

过程工业中的“过程”根据物料转换过程的特点可分为“物理过程”“化学过程”和“生物过程”。在物理过程中，物料的转换只发生物理变化(可以改变组分及性质)，例如吸附、吸收、萃取、蒸馏、蒸发、浓缩、结晶、干燥、冷冻等。在化学过程中，物料的转换发生了化学变化，即通过化学反应来改变物料的种类及性质，例如合成、裂解、催化、聚合、氧化、水解、燃烧等。在生物过程中，物料的转换发生了生物变化，即通过生物作用(生物反应)、生物催化剂(酶或活细胞)来改变物料的种类和性质，例如发酵、生物合成、生物净化等^[1~3]。

1.1.2 过程流体力学的范围

流体力学，是研究流体(液体和气体)的力学运动规律及其应用的学科。主要研究在各种力的作用下，流体本身的状态，以及流体和固体壁面、流体和流体间、流体与其他运动形态之间的相互作用的力学分支，其内容非常丰富。

在流体力学的大家族中，一个应用非常广泛的概念是工程流体力学。工程流体力学侧重于流体力学在工程方面的实际应用，以解决工程中出现的实际问题，但大部分工程流体力学仅涉及流体力学的基础知识，如流体流动基本概念、流体静力学、流体动力学基础、流动阻力及其计算等，并大多以介质“水”作为研究对象。对工业过程中物料转化的“过程”重视程度不够。一般意义上，过程流体力学部分属于工程流体力学，但不完全是工程流体力学。过程流体力学的理论性、介质的复杂性和多样性、与工程结合的紧密性、研究手段的先进性和多样性都比普通工程流体力学要深入和广泛。

过程流体力学的概念在 20 世纪 80 年代就已出现^[4]，但主要内容是针对流体力学在化学工业中的应用，常以化学工程师用流体力学或化工流体力学概念出现，但大部分是基础内容。

过程流体力学是“涉及过程的流体力学”或“流体力学在过程中的应用”，强调“过程”的特殊性。研究的流体对象包括气体、液体、粉粒体及其组合，并常伴有传热、传质、化学反应、生物反应等。过程流体力学的流体对象非常复杂，既包括普通流体，如空气、水等，也包括一些非常特殊的流体，如石油、烃、聚合物等。流体的相态也非常复杂，既包括单相

的气体、液体流动,也包括液-液、液-固、气-液、气-固两相流动,甚至液-液-固、气-液-固三相流动或者液-液-气-固四相流动^[5]。

“过程流体力学”包括“物理过程流体力学”“化学过程流体力学”和“生物过程流体力学”。物理过程流体力学涉及流体流动与传热传质,多相流动、流体在多孔介质中的流动等;化学过程流体力学涉及流动、混合与化学反应、射流与对撞流等;生物过程流体力学重点是生物反应器流体力学,涉及非牛顿流体(如培养液、发酵液等)流变特性、叶轮流体动力学等。

由于工业“过程”处理的物料及其转化过程复杂,过程流体力学内容非常丰富。本书仅介绍过程流体力学的基本内容,除介绍流体力学的经典内容外,重点介绍涉及过程的典型流体流动,包括射流与撞击流、多相流动、多孔介质中的流动、非牛顿流体的流动等。

在各种“过程”中,影响流体流动及其力学行为的因素包括流体的物理属性,例如密度、黏性、表面张力等;流体流动的空间以及引发流体运动的条件,例如,压差、密度差、壁面移动方式等。各种“过程”的流体流动常伴有传热、传质、化学反应、生物反应等,它们对流体流动都会产生一定影响,本书一般不讨论这些影响。

1.2 流体的物理属性

属性即事物本身所固有的性质,是物质必然的、基本的、不可分离的特性,又是事物某个方面质的表现。一定质的事物常表现出多种属性。流体的物理属性是指流体本身所固有的物理方面的性能,在流体力学领域主要指流动性、密度、可压缩性、热膨胀性、黏性、表面张力特性等。

1.2.1 流动性

物质状态一般分为固态、液态和气态,相应称为固体、液体和气体。液体和气体统称为

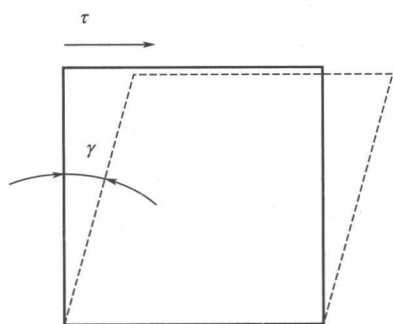


图 1-1 固体剪切弹性变形

流体。流体具有流动性,即具有流动性的物体称为“流体”。固体具有固定的形状,受切应力 τ 作用后其形状会发生改变,产生一个变形角 γ ,如图 1-1 所示。形状变化的程度(γ)与作用力 τ 有确定的关系,在弹性范围内满足剪切胡克定律,即 $\tau = G\gamma$ 。 G 为弹性剪切模量。变形角 γ 只与切应力 τ 有关,即变形过程与力的作用过程同步,无时间上的滞后。切应力 τ 取消后,变形消失($\gamma = 0$),固体又恢复到原来的形状。这是固体物质的剪切弹性。对于流体,物质的剪切弹性模量为零。

只要有切应力作用于流体,无论切应力多么小,流体都会持续不断地发生角变形,即流体各部分之间持续发生相对运动,这一特性称为流体的流动性,即流体受到切应力作用会发生连续变形的特性。流体受切应力作用,则流体流动;不受切应力作用,则流体静止。同样地,流体静止时,无切应力的作用。流体的流动性是区别于固体的主要特征。

1.2.2 密度

密度是表征流体最基本的物理量,定义为单位体积的质量,单位为 kg/m^3 。液体与气

体的密度可以相差几个数量级,例如 4℃ 水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$,而相同温度下干空气的密度 $\rho = 1.275 \text{ kg/m}^3$ ($p = 101.33 \text{ kPa}$)。流体的密度与流体的种类有关,还与流体的温度、压力和物系组成有关。

流体的密度随温度而变化,一般随温度升高,流体体积增加,密度降低,称为流体的热膨胀性。流体的密度随压力而变化,一般随压力的增加,体积缩小,密度增加,称为流体的可压缩性。温度或组分的差异会引发流体的密度差,可导致自然对流。在多相流中密度差对流型等有重大影响。

对于理想气体或完善气体,压力 p , 密度 ρ 和温度 T 满足理想气体状态方程

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1.2-1)$$

式中 R ——气体常数, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

$$R = \frac{Ru}{M} \quad (1.2-2)$$

式中 Ru ——普适气体常数, $Ru = 8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

M ——摩尔质量, g/mol 或 kg/kmol , 它等于气体的相对分子质量。

对于实际气体,压力 p , 密度 ρ 和温度 T 满足实际气体状态方程。

对于所有流体,当压力恒定时,密度随温度的变化为

$$\rho_T = \rho_0 (1 - \beta \Delta T) = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (1.2-3)$$

式中 ρ_T ——温度 T 时的密度;

ρ_0 ——温度 T_0 时的密度;

β ——流体温度从 T_0 升高到 T 时热膨胀的体积膨胀系数。

对于所有流体,当温度恒定,密度随压力的变化为

$$\rho_p = \rho_0 (1 + \kappa \Delta p) = \rho_0 [1 + \kappa(p - p_0)] \quad (1.2-4)$$

式中 ρ_p ——压力 p 时的密度;

ρ_0 ——压力 p_0 时的密度;

κ ——压力从 p_0 增加至 p 时的体积压缩系数, m^2/N 。

1.2.3 可压缩性

所有物质包含固体、液体和气体都是可压缩的,只是其压缩性大小有所不同。压缩性是指物质的体积在外部压力的作用下可以改变的特性,物体体积的改变将导致物质密度的改变。作用在单位流体表面上的正应力称为流体压力,物理上称为压强 (pressure), 这里仍按习惯称为流体压力,实质上是单位流体表面上的压力,单位为 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。流体压力增加,将导致流体体积减小,密度增加。在一定温度下,当流体压力从 p 增加到 $p + \Delta p$, 则流体的体积将从原来的体积 V 减小到 $V - \Delta V$, 密度增加为 $\rho + \Delta \rho$ 。流体的压缩性一般用体积压缩系数 κ 来表示,即

$$\kappa = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (1.2-5)$$

由于流体的质量一定,在受力压缩过程中质量不会变化,即

$$V\rho = (V - \Delta V)(\rho + \Delta \rho) = \text{const}$$

忽略二阶小量 $\Delta V \Delta \rho$, 得到 $V \Delta \rho - \rho \Delta V = 0$, 即

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1.2-6)$$

将式 (1.2-6) 代入式 (1.2-5) 可得到

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta p} \quad (1.2-7)$$

体积压缩系数 κ 的倒数为流体的体积弹性模量 E_V ，其单位与压力的单位相同。它表示单位体积变化或密度变化所需要的压力的增量，即

$$E_V = \frac{1}{\kappa} = \frac{\Delta p}{\frac{\Delta \rho}{\rho}} = \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (1.2-8)$$

流体的体积弹性模量 E_V 按微分形式可定义为

$$E_V = \rho \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_T = -V \left. \frac{\partial p}{\partial V} \right|_T \quad (1.2-9)$$

流体的体积弹性模量 E_V 大，表明流体难压缩；流体的体积弹性模量 E_V 小，表明流体易于压缩。液体和气体的主要差别就在于其体积弹性模量的显著差异。例如，4℃ 水的体积弹性模量 $E_{VW} = 2056 \text{ MPa}$ ，而 0℃ 时，1atm^① 下空气的等温体积弹性模量 $E_{VA} = 0.1013 \text{ MPa}$ 。可见，同温度下，水的体积弹性模量大约是空气的 20000 倍。使 4℃ 水发生 1% 的密度变化，将需要 20.56 MPa 的压力，这一压力是很大的。因此，在一般情况下，液体的可压缩性是可以忽略的，液体可认为是不可压缩流体。但在某些情况下，例如，研究高压液压系统、水中爆炸和水锤现象时，则必须考虑液体的可压缩性。表征液体可压缩性的体积弹性模量可用来计算声音在液体中的传播速度，即

$$c = \sqrt{\left. \frac{\Delta p}{\Delta \rho} \right|_T} = \sqrt{\frac{E_V}{\rho}} \quad (1.2-10)$$

对于 4℃ 水，式 (1.2-10) 的计算值为 1434 m/s，即声音在 4℃ 水中传播的速度大约为 1434 m/s。

对于气体，其压缩性非常显著，而且其压缩性还与压缩过程有关。两个非常典型的压缩过程分别是等温压缩过程和等熵压缩过程。等温压缩过程是气体的压缩在等温条件下进行，其体积弹性模量称为等温体积弹性模量 E_{VT} 。等温压缩过程是传热速率无限大的理想压缩过程，压缩过程中产生的热量迅速传递至环境，使得气体的整个压缩过程均处于等温状态。等熵压缩过程是气体在等熵状态下的压缩过程，即在绝热可逆状态下的压缩过程，其压缩过程不与环境进行任何热量交换，是传热速率为零时的理想压缩过程。等熵压缩过程的体积弹性模量为等熵体积弹性模量 E_{VS} 。

对于理想气体，其压缩过程的压力 p 和体积 V 满足理想气体热力过程方程

$$pV^m = \text{const} \quad (1.2-11)$$

式中 m ——多变过程指数， $m=1$ 为等温过程， $m=k$ 为等熵过程；

k ——绝热指数，也称为质量热容比， $k=c_p/c_v$ ，对于空气， $k=1.4$ ；

c_p ——比定压热容，J/(kg·K)；

c_v ——比定容热容，J/(kg·K)。

对式 (1.2-11) 进行微分运算得

$$mpV^{m-1}dV + V^m dp = 0$$

① 1atm=101325Pa。

或者

$$-V \frac{dp}{dV} = mp \quad (1.2-12)$$

将式 (1.2-12) 代入式 (1.2-9) 得到气体的等温体积弹性模量 E_{VT} 和等熵体积弹性模量 E_{VS} 分别为

$$E_{VT} = -V \left. \frac{dp}{dV} \right|_T = p \quad (1.2-13)$$

$$E_{VS} = -V \left. \frac{dp}{dV} \right|_S = kp \quad (1.2-14)$$

可以看出, 气体的等温体积模量即为气体的压力; 气体的等熵体积模量为气体压力的 k 倍, k 为绝热指数。类似地, 如果气体的压缩过程是一个过程指数为 n 的多变过程 ($m = n$), 其压缩过程的体积弹性模量 $E_{Vn} = np$, 即为气体压力的 n 倍。

对于气体, 一般均作为可压缩流体。但当密度的变化小于 3%, 可作为不可压缩流体。

气体密度的变化与气体的流动速度有关。流动速度 u 与声速 c 的比称为马赫数 Ma 。气体绝热流动过程中, 其密度的变化为

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{k}{2} Ma^2 \quad (1.2-15)$$

对于空气, 绝热指数 $k = 1.4$ 。当密度变化 $d\rho/\rho = 3\%$ 时, 对应的马赫数 $Ma = 0.21$, 空气流速为 71.4 m/s, 即当空气流速低于 71.4 m/s, 可处理为不可压缩流体。在实际工作中, 将气体处理为不可压缩流体的马赫数可达到 0.3, 相应的空气流速可达 100 m/s。过程工业中的许多气体流动过程, 例如换气、通风管道中的气体流动, 低压风机中的气体流动, 采暖、空调过程的气体流动, 喷雾干气器中的气体流动、炉窑中的气体流动等均可处理为不可压缩流体。

1.2.4 热膨胀性

物质大多有热胀冷缩的特性。在一定压力作用下, 流体体积随温度升高而增大的特性称为流体的热膨胀性。流体的热膨胀性用体积膨胀系数 β 表示, 即

$$\beta = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta T} \quad (1.2-16)$$

同样, 由于流体的质量一定, 在受热膨胀过程中质量不会变化, 即

$$V\rho = (V + \Delta V)(\rho + \Delta\rho) = \text{const}$$

忽略二阶小量 $\Delta V \Delta\rho$, 得到 $\rho \Delta V - V \Delta\rho = 0$, 即

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

此表达式与由流体可压缩性得到的式 (1.2-6) 相同。将此式代入式 (1.2-16) 得到

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (1.2-17)$$

流体的体积热膨胀系数按微分形式可定义为

$$\beta = \left. \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \right|_p = - \left. \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_p \quad (1.2-18)$$

流体的体积热膨胀系数 β 的单位为 K^{-1} , 表示流体温度升高 1K 或 $1^\circ C$ 的引起流体体积的相对增加率 ($\Delta V/V$) 或流体密度的相对下降率 ($\Delta\rho/\rho$)。

对于一定量的理想气体, 满足理想气体状态方程

$$pV = nRuT \quad (1.2-19)$$

式中 V ——理想气体的体积;

n ——摩尔数, $n = \text{气体质量} / \text{气体摩尔质量}$, 摩尔质量即为相对分子质量;

Ru ——普适气体常数。

气体受热膨胀时, 压力恒定, 即压力 p 为常数。由式 (1.2-19) 得到

$$V = \frac{nRu}{p}T \quad (1.2-20)$$

两边微分, 得

$$dV = \frac{nRu}{p}dT \quad (1.2-21)$$

将式 (1.2-20)、式 (1.2-21) 代入式 (1.2-16) 得到:

$$\beta = \left(\frac{1}{\frac{nRu}{p}T} \right) \left(\frac{nRu}{p} \right) = \frac{1}{T} \quad (1.2-22)$$

由式 (1.2-22) 可以看出, 对于理想气体, $\beta = 1/T$ 或 $\beta T = 1$ 。对于实际气体, 在饱和线附近, 特别在高压下, β 值可能比 $1/T$ 大很多。在低压和高温下, 水蒸气接近完善气体, $\beta = 1/T$ 。

对于液体, β 通常小于 $1/T$, 如 20°C 的水, $\beta = 1.82 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$, 而 $1/T = 1/(273+20) = 1.77 \times 10^{-3}$ 。在某些情况下, 液体的 β 值甚至可能出现负值, 即液体受热后不是体积膨胀,

而是体积收缩。对于冰点附近的水即是这种情况。 4°C 的水密度最大, 体积最小。 $0 \sim 4^\circ\text{C}$ 的水的体积膨胀系数 β 为负值。对于 0°C 的水, $\beta = -6.3 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ 。

流体的体积膨胀系数 β 可用来估算自然对流过程。

例如, 高度为 L 的竖直平板对液体进行加热, 平板是热源, 热量由平板传递给液体。在加热过程中, 加热面附近的液体温度必定高于远离加热面处的液体温度, 此温差为 ΔT 。

如图 1-2 所示。

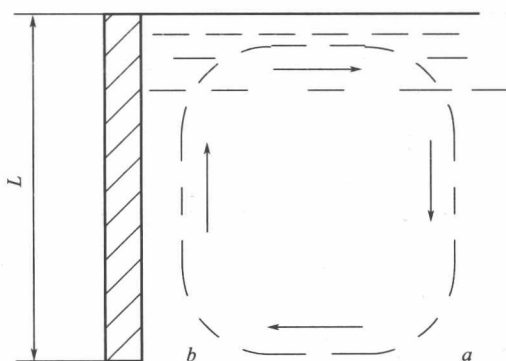


图 1-2 竖直平板自然对流

液体受热后体积膨胀, 密度减小。设远离加热面 a 处的液体密度为 ρ , 加热面附近 b 处的液体密度 ρ' 为

$$\rho' = \rho - \Delta\rho = \rho - \beta\rho\Delta T = (1 - \beta\Delta T)\rho \quad (1.2-23)$$

于是在 a 、 b 两点之间将形成压差

$$\Delta p = \rho g L - \rho' g L = \rho \beta \Delta T g L \quad (1.2-24)$$

或者

$$\frac{\Delta p}{\rho} = g L \beta \Delta T \quad (1.2-25)$$

式中, g 为重力加速度。

在压差 Δp 的推动下, 必造成如图 1-2 所示的液体环流, 但环流速度还与流动阻力有关。

流体的体积热膨胀系数 β 可以用来估计流体焓与压力的依赖关系。根据实际气体热力学, 有关系式

$$dh = c_p dT + (1 - \beta T) \frac{dp}{\rho} \quad (1.2-26)$$

对于理想气体, $\beta T = 1$, 第二项为零。

1.2.5 黏性

黏性是流体固有的重要物理特性。无论流体是处于静止或是运动状态, 均具有黏性。黏性是流体内部的黏附特性。当流体发生相对运动时, 黏性的作用表现为阻碍流体内部的相对运动。实际流体都是有黏性的, 特定情况下可以简化。黏性可以被忽略的流体称为理想流体。理想流体是一种黏性为零的假想流体。值得注意的是, 流体力学中的理想流体概念应与热力学中的理想气体概念严格区分开来。热力学中的理想气体在流体力学中是有黏性的, 它不是流体力学中的理想流体。为避免混淆, 理想气体有时也称为完善气体 (perfect gas) 或完全气体。

考察由外部剪切产生的流动, 如图 1-3 所示。面积为 A 的两块水平放置的平行平板, 间距为 h , 两平板间充满某种流体, 例如水或油。上平板以速度 U 向右匀速运动, 下平板静止。保持上平板匀速运动的拉力为 F 。由于流体的黏性, 流体与平板之间存在黏附力, 依附于平板的流体与平板之间无相对滑动, 即假设流体与边界之间无滑移。

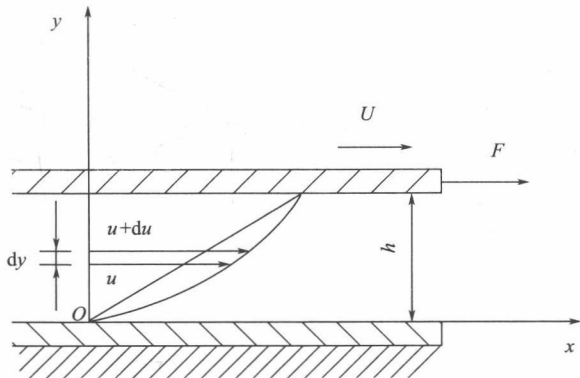


图 1-3 平行平板间流体黏性实验

在无滑移假设条件下, 黏附于上平板的那层流体以速度 U 随上平板一起向右运动; 而紧邻于下平板的那层流体依附于下平板上而静止不动。两平板之间的流体, 可以看成是由非常多的薄层组成的流体, 上一层流体将带动下一层流体向右运动, 而下一层流体将阻止上一层流体向右运动。层与层之间即形成阻力, 即内摩擦力。实验发现, 阻止上平板向右运动的阻力等于拉动上平板向右匀速运动的拉力

$$F = \mu A \frac{U}{h} \quad (1.2-27)$$

或者

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h} \quad (1.2-28)$$

式中 F ——上平板向右运动的拉力, 等于遇到的流体阻力;

A ——平板的面积;

μ ——比例系数, 不同的流体具有不同的数值。

可以认为, τ 即是黏附于上平板上的那层流体与黏附于下平板上的那层流体之间流体的内摩擦力, 这两层流体之间的距离为 h , 速度梯度为 $(U-0)/h = U/h$ 。

对于中间任意位置 y 处的两层流体, 上层流体的速度为 $u(y) + du(y)$, 下层流体的速度为 $u(y)$, 两层流体的距离为 dy 。类似于式 (1.2-28)