

流体力学 风机及泵

华 南 工 学 院 编
上 海 化 工 学 院



高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

流体力学 风机及泵

华南工学院 编
上海化工学院

中国建筑工业出版社

本书主要介绍流体力学、风机及泵的原理和应用。包括流体力学基础、管道计算、流速流量测量原理、相似理论及因次分析法、通风机、鼓风机、压缩机、真空泵、离心泵及其它类型泵等内容。书中使用国际单位制，并附有例题、习题及实验。

本书可供大学硅酸盐工业各专业作教材使用，也可供有关工程技术人员参考。

高等学校试用教材
流体力学 风机及泵
华南工学院 编
上海化工学院

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 10 字数: 242 千字
1980年12月第一版 1980年12月第一次印刷
印数: 1—11,160册 定价: 1.05元
统一书号: 15040·3856

前 言

现代化工业生产的特征是高度的机械化和自动化。硅酸盐工业也不例外，工厂中广泛地使用着各式各样的机械设备和自动化装置。

风机和泵是通用机械，在国民经济各个领域中都得到广泛的应用。在硅酸盐工业中使用各种风机来输送、排放气体（例如空气、废气等）以及制取压缩空气，以供各个生产部门使用（例如供料浆搅拌用，供风力输送用，供气动执行器用等）。使用各种泵来输送、排放各种液体（例如水、料浆、润滑油、液压油等）。风机和泵的工作对象都是流体（气体和液体），因此，它们的工作原理和工作情况等无不与流体的平衡规律、运动规律有关，也就是说，要牵涉到流体力学的问题。

流体在管道里的流动，气体在窑炉内、收尘器内的运动当然也与流体力学有关。

液压、气动装置的设计需要流体力学知识。

某些计量仪器（例如液压计、流量计等）是根据流体力学的原理来制作的。

生产中的某些过程，例如对流传热、颗粒分级、尘粒的离析、料浆的过滤、粉体的风力输送等，也都关联到流体力学原理。

因此，《流体力学 风机及泵》是一门技术基础理论课程。这本教材是为硅酸盐工业各专业而编写的，书中深入浅出地叙述了流体力学及其应用，风机、泵的工作原理、性能和选型。

本书由华南工学院魏诗榴主编，上海化工学院郑达德参加编写。参加本书审稿的有重庆建工学院周谟仁（主审）、哈尔滨建工学院屠大燕（主审）及王慕贤、北京化工学院开国藩、武汉建材学院张运琪。

编 者

1979.9

DAA/14/02

目 录

第一章 流体力学	1	§ 5-5 靶式流量计	80
第一节 概述	1	第六节 相似理论及因次分析法	81
§ 1-1 单位制度和物理量的因次	1	§ 6-1 为什么要应用相似理论	81
§ 1-2 流体的主要物理性质及表征这些性质的物理量	3	§ 6-2 相似的概念	84
§ 1-3 流体中作用力的分类	12	§ 6-3 相似准数	85
第二节 流体静力学	13	§ 6-4 相似三定理	86
§ 2-1 流体静压强	13	§ 6-5 因次分析方法	87
§ 2-2 流体静压强的特性	13	§ 6-6 流体动力相似	90
§ 2-3 流体静力学基本方程式	14	第二章 风机	93
§ 2-4 流体静压强的测量	16	第七节 通风机	93
§ 2-5 液体对平面壁的压力	22	§ 7-1 离心式通风机的分类和工作原理	93
§ 2-6 液位测量	25	§ 7-2 离心通风机的基本方程式	93
第三节 流体动力学	26	§ 7-3 离心通风机的压头、功率和效率	95
§ 3-1 恒定流和非恒定流	26	§ 7-4 离心通风机的性能曲线及其换算	96
§ 3-2 流量和流速	26	§ 7-5 离心通风机的特性曲线和选择曲线	98
§ 3-3 流态	28	§ 7-6 比转数	99
§ 3-4 在管道截面上流体速度的分布	30	§ 7-7 几种通风机的型号及结构	101
§ 3-5 流体流动的连续性方程式	31	§ 7-8 离心通风机基本结构尺寸的确定	104
§ 3-6 理想流体运动的微分方程式	31	§ 7-9 离心通风机的工况点及流量调节	107
§ 3-7 柏努利方程式	33	§ 7-10 离心通风机的并联和串联	109
§ 3-8 流体动量变化定律	41	§ 7-11 轴流式通风机	110
§ 3-9 流体流动的阻力	44	第八节 空气压缩机及真空泵	110
§ 3-10 水力半径和当量直径	54	§ 8-1 活塞式空气压缩机的工作原理	110
第四节 管道计算	55	§ 8-2 活塞式空气压缩机的理论工作循环	110
§ 4-1 简单管道的计算	55	§ 8-3 活塞式空气压缩机的实际工作循环	112
§ 4-2 复杂管道的计算	59	§ 8-4 多级压缩	114
§ 4-3 输送受压缩气体的管道的计算	65	§ 8-5 活塞式压缩机的功率和效率	115
§ 4-4 管道直径的选择	67		
第五节 流速和流量的测量	70		
§ 5-1 测速管(皮托管)	70		
§ 5-2 孔板流量计	72		
§ 5-3 喷嘴流量计和文氏流量计	75		
§ 5-4 转子流量计	78		

§ 8-6 活塞式空气压缩机的构造.....	117	§ 10-6 离心泵的类型和构造.....	128
§ 8-7 刮板式空气压缩机.....	118	§ 10-7 轴流泵.....	133
§ 8-8 真空泵.....	119	第十一节 容积泵.....	133
第九节 鼓风机.....	120	§ 11-1 往复泵.....	133
§ 9-1 离心鼓风机.....	120	§ 11-2 隔膜泵.....	136
§ 9-2 罗茨鼓风机.....	121	§ 11-3 齿轮泵.....	136
§ 9-3 叶氏鼓风机.....	123	第四章 实验.....	138
第三章 泵.....	124	实验一 管件及管子的认识 管子的 切割及装拆.....	138
第十节 叶轮泵.....	124	实验二 流态及临界雷诺准数值的测 定.....	141
§ 10-1 离心泵的工作原理.....	124	实验三 管道流体阻力的测定.....	143
§ 10-2 离心泵的压头、功率、效率 和性能曲线.....	124	实验四 流量计的校核.....	146
§ 10-3 离心泵的比转数.....	125	实验五 离心泵性能的测定.....	148
§ 10-4 离心泵的汲程.....	126	实验六 离心通风机性能的测定.....	150
§ 10-5 离心泵的调节.....	128		

第一章 流 体 力 学

第一节 概 述

流体力学是研究流体的平衡和运动规律，以及流体与固体之间相互作用问题的一门科学。它是现代许多工程领域的理论基础。

流体力学是以严格的数学分析来研究流体平衡和运动的一般规律。在研究中要求高度的严格性和精确性，但是由于流动现象比较复杂，在解决实际工程问题时，会遇到较大的困难，甚至是目前还难以克服的困难。为此，便采用了将现象简化的方法，在研究问题以前，提出一系列的假定，将问题限在一定的前提下，以期能得出最终的解答。但是，这种简化却往往不完全符合实际情况。于是，人们在实际工程精度允许的范围内，放弃一部分过高的严格性和精确性，而利用实验的方法提供一些用数学分析方法难以得出的数据和公式，来解决工程实际问题。

流体力学包括两个基本部分：研究流体平衡规律的称为流体静力学；研究流体运动规律的称为流体动力学。

§ 1-1 单位制度和物理量的因次

一、物理量的单位和单位制度

为了描述流体的物理性质以及流动过程的特性，使用了一系列的物理量，例如质量、密度、粘度、压强、流速等。使用这些物理量时，不能只列出数目的大小，还要列出这个数目的计量单位。例如流体的质量是2，而没有注明它的单位，这究竟是2克呢，还是2千克？还不能给出一个明确的概念。由此可见，物理量的大小是用数目与单位两者共同来表示的。

物理量有很多，如果每一个物理量都给它一个独立的，同其它物理量没有任何联系的单位，那不仅不容易记忆，而且也很不必要。事实上，只要我们根据需要，指定几个彼此独立的基本物理量，并给出其单位，则其余的物理量的单位都可以通过基本物理量的单位去把它表达出来。前者叫基本单位，后者叫导出单位。在力学中，我们可以选长度、质量和时间作基本物理量，分别用厘米（cm）、克（g）和秒（s）作它们的单位。因此，厘米、克、秒就是基本单位。规定了基本单位，其余的物理量单位，都是根据基本单位引伸出来的。例如：速度的单位是厘米/秒，加速度的单位是厘米/秒²。

采用厘米（长度）、克（质量）、秒（时间）作基本单位的制度叫CGS制。

在CGS制中，因为长度、质量和时间的单位是基本单位，所以力的单位就不是基本单位，而是导出单位。因为在这种情况下，力的单位可以通过力学基本定律用基本单位表达出来。由于

$$\text{力} = (\text{质量}) \times (\text{加速度})$$

或者

$$P = ma$$

所以 $[\text{力的单位}] = [\text{质量单位}] \times [\text{加速度单位}] = [\text{克}] \times [\text{厘米/秒}^2]$

$$= \left[\frac{\text{克} \cdot \text{厘米}}{\text{秒}^2} \right] = [\text{达因}]$$

亦即，使 1 克质量的物体产生 1 厘米/秒² 的加速度时的力叫 1 单位的力，亦即 1 克·厘米/秒² 的力或 1 达因的力。

采用米 (m) (长度)、千克 (kg) (质量)、秒 (s) (时间) 作基本单位的制度叫 MKS 制。在 MKS 制中，力的单位当然也是导出单位。使 1 千克质量的物体产生 1 米/秒² 的加速度时的力叫做 1 单位的力，亦即 1 千克·米/秒² 的力或 1 牛顿的力。

另一种单位制度，叫工程单位制，即选长度、力和时间作基本物理量，分别用米、千克力和秒作它们的单位。既然“力”在这里已被选作基本物理量，所以不同于 CGS 制和 MKS 制，质量的单位便不是基本单位，而是可以根据力学定律引伸出来的导出单位了。由于

$$P = m a$$

或者

$$m = \frac{P}{a}$$

故 $[\text{质量单位}] = \frac{[\text{力的单位}]}{[\text{加速度单位}]} = \frac{[\text{千克力}]}{[\text{米/秒}^2]} = \left[\frac{\text{千克力} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}} \right]$

今将 CGS 制、MKS 制、工程单位制比较如表 1-1。

几种单位制度的比较

表 1-1

单位制	CGS制			MKS制			工程制		
	长 度	质 量	时 间	长 度	质 量	时 间	长 度	力	时 间
基 本 物理量									
基 本 单 位	厘米(cm)	克(g)	秒(s)	米(m)	千克(公斤)(kg)	秒(s)	米(m)	千克力(公 斤力)(kgf)	秒(s)
导 出 单 位 举 例	速度: 厘米/秒			速度: 米/秒			速度: 米/秒		
	加速度: 厘米/秒 ²			加速度: 米/秒 ²			加速度: 米/秒 ²		
	力: 达因或克·厘米/秒 ²			力: 牛顿或千克·米/秒 ²			质量: 千克力·秒 ² /米		
	功及机械能: 尔格或达因·厘米			功及机械能: 焦耳或千克·米 ² /秒 ²			功及机械能: 千克力·米		

注: 括弧内的名称与它前面的名称是同义词。

目前，各国正在全面普及使用国际单位制 (国际符号为 SI)。国际单位制是在 MKS 制的基础上发展起来的，但与 MKS 并非完全一样。SI 一共采用了七个基本单位，除了 MKS 制力学单位原有的米、千克、秒之外，还加上电流强度单位安培 (A)、热力学温度单位开尔文 (K)、物质的量单位摩尔 (mol)、发光强度单位坎德拉 (cd)。

国际单位制的优点主要有两点：

1. 自然科学和工程技术领域里的一切单位都可以从上述七个基本单位和两个辅助单位 (弧度和球面度) 导出，亦即所有科学部门都可以采用一套共同的单位，因而通用性强。
2. 任何一个导出单位是由基本单位相乘、相除而导出，导出时都不引入比例常数，或者说，比例常数都等于 1。例如，力的单位采用牛顿：

$$1 \text{ 牛顿} = 1 \text{ 千克} \times 1 \text{ 米/秒}^2 = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}^2。$$

又如能量、热、功三者的单位都采用焦耳：

$$1 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 牛顿} \times 1 \text{ 米} = 1 \text{ 牛顿} \cdot \text{米} = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米}^2 / \text{秒}^2.$$

在别的单位制里，采用卡或千卡作为热的单位，功和机械能的单位则采用焦耳或千克力·米。从热的单位换算为功的单位，便要通过“热功当量”这个比例常数：

$$1 \text{ 千卡} = 4.187 \text{ 千焦耳} = 427 \text{ 千克力} \cdot \text{米}$$

$$1 \text{ 千瓦} = 1.36 \text{ 马力} = 102 \text{ 千克力} \cdot \text{米} / \text{秒}$$

$$= 0.239 \text{ 千卡} / \text{秒} = 860 \text{ 千卡} / \text{小时}$$

而国际单位制里，各单位之间的换算无需通过比例常数，使运算简便而不致发生错漏。

国际单位制还规定一套词冠来表示倍数，例如词冠符号 m 表示 10^{-3} ，所以 mm 就是 $10^{-3}m$ 即毫米；词冠符号 M 表示 10^6 ，所以 MN 就是 10^6N 即兆牛。

本书各章均采用国际单位制。为了便于对照比较，特相应地介绍一些国际单位制与工程单位制的换算关系。

二、物理量的因次和因次一致性原则

根据前述，选定几个必须而且足够的物理量作为基本物理量之后，任何物理量都可以根据物理定义或物理定律，用这几个基本物理量来表示。用基本物理量去表示某一物理量的式子叫该物理量的因次。若用 L 、 M 、 F 、 T 、 θ 依次代表长度、质量、力、时间、温度，那末别的物理量的因次便是这些符号依照一定规律的组合。例如，面积的因次是 L^2 ，速度的因次是 LT^{-1} 。复杂一点的物理量的因次，可以根据一定的物理定律导出。例如，力的因次由牛顿第二运动定律

$$P = ma$$

导出。国际单位制、CGS制及MKS制中力的因次均是 MLT^{-2} ；在工程单位制里，力的因次是 F 。因此，单位制不同，则同一物理量的因次也不相同。

一些物理量的单位和因次见表1-2。

根据物理规律建立起来的方程式，称为物理量方程式。在物理量方程式中的单位必须一致，因而它的因次也必然是一致的。更具体说，一个物理量方程式等号两侧各项的因次必然相同。这称为因次一致性原则。导出一个方程式如果怀疑其是否正确，首先可以用这个原则来检验。检查因次比检查单位更为方便。另外，也可以运用因次一致性原则找出一个整理实验数据用的关系式。这种方法称为因次分析。以后将详细介绍这种方法。

§ 1-2 流体的主要物理性质及表征这些性质的物理量

一、作为连续介质看待的流体

流体是液体和气体的统称。

液体和气体都有很复杂的内部结构。它们都由大量分子组成，这些分子不断地作不规则的热运动。每个分子又包含一个或两个以上的原子。分子与分子之间以及分子内部的原子与原子之间可以保留相应的空隙。所以，流体的内部结构是不连续的，中间存在着许多空隙。流体力学不研究个别分子的运动，也不过问个别原子的运动。流体力学只研究大量分子的集体运动。我们将整个流体分成许许多多的分子集团，称每个分子集团为质点，研究这些质点的平衡和运动规律以及它们相互之间或者与周围物体之间的作用力。这样的质点在流体内部一个紧靠着另一个，它们之间不再有任何的空隙。所以称这样的分子集团为质点，是因为流体力学所研究的运动是大范围的运动，与流体之间有力相互作用着的固体也是较大的物体。因此，每个质点可以足够精确地被认为是一个点而不必考虑它的大

一些物理量的单位和因次

表 1-2

物理量 名称	国际单位制		MKS制	CGS制	因次式	工程单位制	
	单位	代号	单位			单位	因次式
长度	米	m	米	厘米	L	米	L
质量	千克	kg	千克	克	M	千克力·秒 ² /米	FT ² L ⁻¹
力	牛顿	N	牛顿	达因	MLT ⁻²	千克力	F
时间	秒	s	秒	秒	T	秒	T
速度	米/秒	m/s	米/秒	厘米/秒	LT ⁻¹	米/秒	LT ⁻¹
加速度	米/秒 ²	m/s ²	米/秒 ²	厘米/秒 ²	LT ⁻²	米/秒 ²	LT ⁻²
功, 能量	焦耳	J	焦耳	尔格	L ² MT ⁻²	千克力·米	LF
功率	瓦特	W	瓦特	尔格/秒	L ² MT ⁻³	千克力·米/秒	LFT ⁻¹
压强	帕斯卡	Pa	千克/(米·秒 ²)	巴	L ⁻¹ MT ⁻²	千克力/米 ²	L ⁻² F
密度	千克/米 ³	kg/m ³	千克/米 ³	克/厘米 ³	L ⁻³ M	千克力·秒 ² /米 ⁴	L ⁻⁴ FT ²
粘度	帕斯卡·秒	Pa·s	千克/(米·秒)	泊	L ⁻¹ MT ⁻¹	千克力·秒/米 ²	L ⁻² FT
表面张力	牛顿/米	N/m	牛顿/米	达因/厘米	MT ⁻²	千克力/米	FL ⁻¹
扩散系数	米 ² /秒	m ² /s	米 ² /秒	厘米 ² /秒	L ² T ⁻¹	米 ² /秒	L ² T ⁻¹
温度	开尔文	K	°C	°C	θ	°C	θ
热	焦耳	J	千卡	卡	L ² MT ⁻²	千卡	LF
比热	焦耳/ (千克·开尔文)	J/(kg·k)	千卡/ (千克·°C)	卡/(克·°C)	L ² T ⁻² θ ⁻¹	千卡/ (千克力·°C)	Lθ ⁻¹
导热系数	瓦特/ (米·开尔文)	W/(m·k)	千卡/ (米·秒·°C)	卡/(厘米· 秒·°C)	LMT ⁻³ θ ⁻¹	千卡/ (米·秒·°C)	FT ⁻¹ θ ⁻¹
传热系数	瓦特/ (米 ² ·开尔文)	W/(m ² ·k)	千卡/ (米 ² ·秒·°C)	卡/(厘米 ² · 秒·°C)	MT ⁻³ θ ⁻¹	千卡/ (米 ² ·秒·°C)	FL ⁻¹ θ ⁻¹ T ⁻¹

小。它们不同于几何上的点，它们具有质量。从流体的运动范围和周围物体的大小来看这些分子团——质点，它们显得非常小。但是另一方面，从分子之间的平均间隔来看，它们却是很大的。每一分子团中的各个分子虽然不断地作不规则的热运动，但是它们不会越出这个分子团——质点的范围。因此，将流体看成质点组之后，我们便不必去考虑分子的热运动和分子间复杂的相互作用力，只将质点作为一个最小单位来研究它的运动。也就是说，流体力学所研究的不是具有不连续的内部结构的实际流体，而是上面所说的由质点组成而具有连续结构的实际流体的模型，将流体作为连续介质看待。

当然，采用这样的模型来代替真实的流体是有条件的，即只在与分子运动没有直接关系的情况下才是被容许的。对于那些与分子运动直接相关联的物理现象，如传热、扩散等，单纯用质点的运动还不能完全说明问题。

二、流体的流动性

流体同固体间的根本差别在于流体具有流动性，而固体没有流动性。所谓流动性并不是指物体能否变形而言，因为所有固体在外力作用下都能发生变形。不过，在变形时，流体与固体所表现出的性质是截然不同的。固体受力作用发生变形时，产生一种和变形大小成正比的弹性力来阻止变形。当这个阻力增大到足以与外力相抵销时，变形便不再增大。所以，固体变形的大小与外加作用力有关，外加力愈大，变形愈大。反过来说，要得到较大的变形，就要用较大的力。对于固体，所需的力的大小完全决定于对变形的要求，而与发生变形的快慢无关。对于流体，却不是这样。流体变形（剪切变形）也产生阻力，但这种阻力与变形的快慢有关。要使流体很迅速地变形，需要用很大的力，而在用力的时间充

分长，或者说，变形的过程相当慢时，任何细小的力（切向力）也能够使流体产生非常大的变形，产生流动。这种性质便称为流动性。流动性是所有流体所具有的共同特性。

正因为流体具有流动性，所以流体没有固定的形状。液体和气体都随着容器形状的不同而改变自身的形状。不过，液体和气体的流动性也还是有差别的。当装有流体的容器形状和大小改变时，对于液体，虽然形状随着容器而改变，但是体积不变；对于气体则不然，它在流动中改变自身形状的同时，它的体积也随着容器的容积的改变而变化，扩散到整个容器中。

三、流体的压缩性和膨胀性

流体在外力作用下改变自身体积大小的特性称为压缩性。流体的压缩性通常以压缩系数 β_p 来表示。它表示压强每增加1帕时，流体体积的相对变化。它的数学表达式可写成：

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \times \frac{dV}{dp} \quad (1-1)$$

式中 V ——流体的体积，米³；

$\frac{dV}{dp}$ ——流体的体积相对于压强的变化，米³/帕。

压缩系数 β_p 的单位是米²/牛。水的压缩系数见表1-3。

0°C时水的压缩系数 β_p

表 1-3

压强，大气压	5	10	20	40	80
压缩系数 $\beta_p \times 10^{10}$ ，米 ² /牛	5.41	5.37	5.31	5.23	5.16

从表1-3可知，在上述压强范围内，例如在10大气压下，压强每升高1标准大气压（相当于101325帕）时，水的体积变化为：

$$5.37 \times 10^{-10} \times 101325 = 5.44 \times 10^{-5}$$

亦即水的体积只改变万分之零点五左右，显然这是可以忽略不计的。正因为水的压缩系数非常小，在解决工程实际问题时，除了压强变化极大的情况以外，一般都把水当作不可压缩的。其它液体的情况也是如此。

与此相反，气体的情况要比液体复杂得多。它的压缩性是很大的，而且压缩性随气体的热力学过程而定，随压强升高而增大。空气在标准大气压和温度0°C下，它的压缩性是水的20000倍。

流体受热（当然也可能是冷却）时，会改变自身体积的特性称为流体的膨胀性，它用温度膨胀系数 β_T 来表示。 β_T 表示温度升高1K时，流体体积的相对变化。它的数学表达式可以写成：

$$\beta_T = \frac{1}{V} \times \frac{dV}{dT} \text{ 1/K} \quad (1-2)$$

式中 V ——流体的体积，米³；

$\frac{dV}{dT}$ ——流体体积相对于温度的变化。

液体的膨胀性也是很小的。例如水在较低温度（0~20°C）情况下，温度每升高1K，水的体积大致只改变0.015%。即使在较高温度情况下（90~100°C），温度每升高

1 K, 水的体积只改变0.07%左右。在工程实际上, 一般对这种变化是可以不考虑的。其它液体的情况也是如此。

气体的膨胀性比液体大得多。因此, 在压强和温度变化时, 气体体积的变化比较显著, 其变化规律服从热力学定律。如果此时气体的压强不太高而温度又不太低时, 则气体近似地遵守理想气体定律, 亦即气体的压强、温度、体积三者之间的关系为:

$$pV = nRT \quad (1-3)$$

式中 n ——气体的量, 以千摩尔数表示;

p ——气体的压强, 帕;

V ——气体的体积, 米³;

T ——气体的温度, K;

R ——通用气体常数, “通用”是指对任何理想气体都适用, 它的数值是8314.3焦/(千摩·K)。

若把式(1-3)稍加改变, 可以绕开 R , 应用理想气体定律来解决气体状态计算问题就会更为方便一些。例如, 某一种气体在标准状态下(压强1大气压, 即101325帕, 温度0°C, 即273.15K), 其 V_0 、 p_0 、 T_0 为已知, 经历一定变化过程而达到另一新的状态。新状态下, 三个变数 V 、 p 、 T 已知其中两个, 要算出其余一个。对于这类问题, 没有必要算出气体的摩尔分子或质量等于多少, 利用气体定律所引出的比例关系就可以解决, 因为在两种状态下, n 都是一样的。利用式(1-3)可列出:

$$p_1 V_1 = nRT_1$$

$$p_2 V_2 = nRT_2$$

从这两个式子中消去 nR , 即得:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (1-4)$$

从式(1-4)可知:

(1) 当温度不变时, 气体的体积与压强的关系为:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{常数} \quad (1-5)$$

即气体的体积随气体所受压强增大而减小, 随气体所受压强的减小而增大。

(2) 当气体的体积不变时, 气体的压强与温度的关系为:

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1}$$

或者
$$p = p_0 \left(\frac{273.15 + t}{273.15} \right) = p_0 \left(1 + \frac{t}{273.15} \right) = p_0 (1 + \beta_T t) \quad (1-6)$$

式中 T ——气体温度, K;

t ——以摄氏温度°C表示的气体温度;

p ——气体温度为 t °C时的压强, 帕;

p_0 ——气体温度为0°C时的压强, 帕;

β_T ——气体温度膨胀系数, 等于 $1/273.15$ 。

(3) 当压强不变时, 气体的体积与温度的关系为:

$$V_2 = \frac{V_1}{T_1} T_2$$

$$\text{或者} \quad V = \frac{V_0(273.15+t)}{273.15} = V_0(1+\beta_T t) \quad (1-7)$$

式中 V ——气体在 $t^\circ\text{C}$ 时的体积, 米³;

V_0 ——气体在 0°C 时的体积, 米³。

【例 1-1】储气柜内储有100米³煤气, 温度为293K, 压强为106400 帕(1.05大气压)。现在要把它压缩装罐。装罐的压强为1013250帕(10大气压), 温度为313K。若每罐的容积为0.1米³, 问可装几罐。

【解】煤气原来的状态: $p_1=106400$ 帕, $T_1=293\text{K}$, $V_1=100$ 米³。装罐后的状态: $p_2=1013250$ 帕, $T_2=313\text{K}$ 。利用式(1-4), 得

$$V_2 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = 100 \left(\frac{106400}{1013250} \right) \left(\frac{313}{293} \right) = 11.2 \text{米}^3$$

所以可装罐数为

$$\frac{11.2}{0.1} = 112 \text{罐}$$

【例 1-2】已知灭火器的气罐体积为1米³, 内充满二氧化碳10千克。问 30°C 时灭火器内气体压强为多少?

【解】10千克的 CO_2 在标准状态下的体积为:

$$V_1 = \left(\frac{10}{44} \right) (22.4) = 5.09 \text{米}^3$$

现在 $T_2=273.15+30=303.15\text{K}$, 压强为 p_2 时, 这10千克 CO_2 的体积 $V_2=1$ 米³, 于是

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = 101325 \left(\frac{5.09}{1} \right) \left(\frac{303.15}{273.15} \right) = 515100 \text{帕}$$

或者等于5.08大气压。

四、流体的密度和重度

凡物体都占有一定的空间, 且具有一定的质量, 流体也不例外。单位体积的流体的质量反映出质量的密集程度, 是流体的重要性质之一, 称为流体的密度。若以 V 表示流体的体积, 米³; m 表示流体的质量, 千克; 对于均质流体, 密度

$$\rho = \frac{m}{V} \text{千克/米}^3 \quad (1-8)$$

密度的CGS制单位为克/厘米³, MKS制单位为千克/米³, 而工程制单位为千克力·秒/米⁴。换算关系如下:

$$1 \text{克/厘米}^3 = 1000 \text{千克/米}^3 = 102 \text{千克力} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$$

对液体密度的研究表明: 对液体加热和加压只能引起其密度作极微小的变化。在一般情况下, 这种微小的变化可以不予考虑。但气体则不然, 它的密度随温度、压强的改变而起较大的变化。若将气体定律式(1-3)写成:

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

$$\text{或者} \quad p = \left(\frac{m}{V} \right) \left(\frac{R}{M} \right) T = \rho \left(\frac{R}{M} \right) T$$

式中 m ——气体的质量, 千克;

M ——气体的分子量。

于是可以求得密度随压强、温度而变化的关系:

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \text{ 千克/米}^3 \quad (1-9)$$

常见液体的密度及标准状态下常见气体的密度见表1-4。

几种常见流体的密度

表 1-4

流 体 名 称	密 度 (千克/米 ³)	测定条件 (°C)	流 体 名 称	密 度 (千克/米 ³)	测定条件 (°C)
水	1000	4	空气	1.293	1 大气压, 0 °C
海水	1020	15	氧 O ₂	1.429	
汞 Hg	13600	15	氮 N ₂	1.251	
蓖麻油	970	15	氢 H ₂	0.0898	
松节油	873	15	一氧化碳 CO	1.250	
汽油	680~790	15	二氧化碳 CO ₂	1.977	
煤油	790~820	15	二氧化硫 SO ₂	2.927	
重油	900~950	15	乙炔 C ₂ H ₂	1.171	
矿物类润滑油	900~930	15	甲烷 CH ₄	0.717	
苯 C ₆ H ₆	900	0	乙烯 C ₂ H ₄	1.260	
丙酮 CH ₃ COCH ₃	790	20	氦 He	0.1785	
甲醇 CH ₃ OH	800	0	氨 NH ₃	0.771	
无水酒精 CH ₃ CH ₂ OH	790	15	乙烷 C ₂ H ₆	1.341	
无水甘油(CH ₂ OH) ₂ CH(OH)	1260	0	烟气	1.30~1.34	

除了单组分的流体外, 人们还经常遇到多组分的混合流体, 例如空气、烟气(含 CO₂、N₂、O₂ 及水蒸汽等)。对于气体混合物, 由于总体积是各组分的分体积之和, 故气体混合物在标准状态下的密度:

$$\rho_{0m} = \rho_{01}a_1 + \rho_{02}a_2 + \rho_{03}a_3 + \dots + \rho_{0n}a_n \text{ 千克/标米}^3 \quad (1-10)$$

液体混合物的密度 ρ_m 可用下式估算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} + \frac{x_3}{\rho_3} + \dots + \frac{x_n}{\rho_n} \text{ 米}^3/\text{千克} \quad (1-11)$$

式中 ρ_{01} 、 ρ_{02} 、 ρ_{03} …… ρ_{0n} ——气体混合物中每个组分在标准状态下的密度, 千克/标米³;

ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 …… ρ_n ——液体混合物中每个组分的密度, 千克/米³;

a_1 、 a_2 、 a_3 …… a_n ——混合物每个组分的体积分数;

x_1 、 x_2 、 x_3 …… x_n ——混合物每个组分的质量分数。

在这里, 我们还要应用比容这一物理量。所谓比容就是指单位质量流体的体积, 用符号 v 表示, 即

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \text{ 米}^3/\text{千克} \quad (1-12)$$

所以式(1-11)中, $\frac{1}{\rho_m}$ 就是混合液体的比容。

此外, 我们还经常用单位体积流体的重量来反映流体的轻重。这一物理量叫流体的重度。若以 V 表示流体的体积, 米³; G 表示流体的重量, 牛。对于均质流体的重度

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ 牛/米}^3 \quad (1-13)$$

由于流体的重量 G 与质量 m 的关系为:

$$G = mg$$

式中 g 为重力加速度, 米/秒²。

将上式等号两端同时除以流体的体积 V , 即可得出重度与密度的换算关系:

$$\gamma = \rho g \quad (1-14)$$

另外, 还经常遇到比重这种物理量。比重是流体的密度与 4 °C 的纯水密度之比, 用符号 s 表示, 即

$$s = \frac{\rho}{\rho_{*}} \quad (1-15)$$

由此可知, 比重是没有单位的, 仅仅是一个比值。

【例 1-3】已知焦炉煤气的组成为 (体积 %): CO_2 —1.8%, O_2 —0.7%, CH_4 —24%, N_2 —7%, C_2H_4 —2%, CO —6.5%, H_2 —58%。试求压强为 780 毫米汞柱、温度为 25 °C 的焦炉煤气的密度、比容及重度。

【解】查表 1-4, 得出标准状态下焦炉煤气各组分的密度 (千克/米³) 为:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{CO}_2} &= 1.977, & \rho_{\text{O}_2} &= 1.429, \\ \rho_{\text{CH}_4} &= 0.717, & \rho_{\text{N}_2} &= 1.251, \\ \rho_{\text{C}_2\text{H}_4} &= 1.260, & \rho_{\text{CO}} &= 1.250, \\ \rho_{\text{H}_2} &= 0.0898. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{于是 } \rho_{\text{om}} &= 1.977 \times 1.8\% + 1.429 \times 0.7\% + 0.717 \times 24\% + 1.251 \times 7\% \\ &\quad + 1.260 \times 2\% + 1.250 \times 6.5\% + 0.0898 \times 58\% = 0.464 \text{ 千克/标米}^3 \end{aligned}$$

在压强为 780 毫米汞柱、温度为 25 °C 下焦炉煤气的密度

$$\rho_m = 0.464 \left(\frac{780}{760} \right) \left(\frac{273.15}{298.15} \right) = 0.436 \text{ 千克/米}^3$$

此时煤气的比容

$$v = \frac{1}{\rho_m} = \frac{1}{0.436} = 2.294 \text{ 米}^3/\text{千克}$$

煤气的重度

$$\gamma = \rho_m g = 0.436 \times 9.81 = 4.277 \text{ 牛/米}^3$$

五、流体的粘度

凡流体都具有流动性, 但各种流体的流动性可以有很大的差别。流动性差的流体, 也就是比较粘滞的流体, 尽管在很小的外力 (切向力) 作用之下也能流动, 但流动进行得十分缓慢。所以流体的粘滞性是影响流动的一个重要因素, 必须深入研究, 并准确表达出来。

假设有两块足够大的平行配置的板片 A 及 B (图 1-1), 两块板的距离比较近, 它们之间充满着液体。板片 A 是静止不动的, 板片 B 则以匀速度 u_1 平行于板

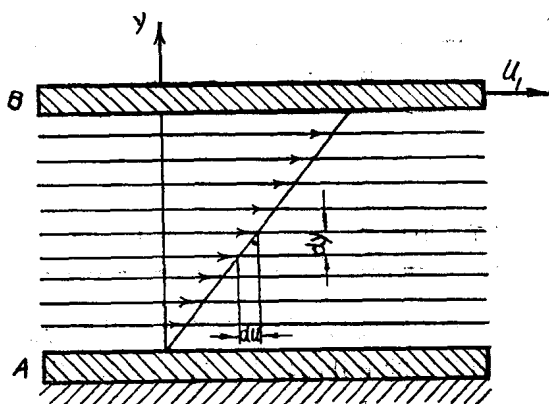


图 1-1 平板间流体速度分布

片A运动。由于直接粘附在板片表面上的一层液体的运动速度必然同板片的运动速度一样，所以，粘附在板片B上的一层液体，也以匀速度 u_1 随同板片运动；粘附在板片A上的一层液体，是静止不动的。在这两者之间的液体，由于受板片的间接拖动和牵连，分别以不同的速度分层运动。亦即如某层液体的速度为 u ，相距为 dy 的相邻的一层液体，速度则为 $u+du$ 。各层液体的运动速度既然不同，产生了滑动，在液体内部必然出现摩擦力。这种内摩擦力通常以每单位接触面积上的力来计算，叫剪应力 τ 。根据实验，剪应力 τ 的大小同速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比。这种关系叫牛顿粘性定律。若写成数学式，则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{帕} \quad (1-16)$$

式中 τ ——剪应力，帕；

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度，1/秒；

μ ——比例系数，称为粘度，或称粘滞系数。

由上式可知，粘度

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1-17)$$

所以，可以把粘度 μ 看成是速度梯度为1时，单位接触面积上的粘滞阻力，它表示出流体的粘滞性，其大小随流体性质而异。

根据式(1-17)，可以定出粘度的单位。在国际单位中，粘度的单位是 $\frac{\text{帕}}{1/\text{秒}} = \text{帕} \cdot \text{秒}$ 。在CGS单位制中，粘度的单位是达因·秒/厘米²，称为泊。由于泊这个单位比较大，用起来不方便，故通常都是用泊的1/100作粘度的单位，叫作厘泊，亦即

$$1 \text{ 泊} = 100 \text{ 厘泊} = 1 \frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2} = 1 \frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}}$$

在工程单位制中，粘度的单位是 $\frac{\text{千克力} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$ 。今将这几种粘度单位的换算关系列在表1-5中。

粘度单位换算表

表 1-5

单 位	泊	(帕·秒)	(千克力·秒/米 ²)
1 泊	1	0.1	10.2×10^{-3}
1 帕·秒	10	1	0.102
1 千克力·秒/米 ²	98.1	9.81	1

流体的粘度与其温度有关。当温度升高时液体的粘度急剧下降。与此相反，气体的粘度则随温度的上升而增大。这是因为液体分子之间的距离较近，对液体的内摩擦力起决定性作用的是分子之间的内聚力。温度升高时分子之间的距离变大，内聚力相应变小，因而粘度下降。对气体的内摩擦力起决定作用的不是内聚力，而是相邻流层之间分子动量的交

换。温度升高时，气体分子的热运动加强，动量的交换增多，从而各层之间的制动作用加大，因而粘度增大。

压强的大小对流体粘度影响很小，实际上可以忽略。

粘度和密度都是来说明流体物理性质的很重要的物理量，在流体力学的计算中，往往要考虑粘度与密度的比值大小，这个比值称为运动粘度 ν ，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ 米}^2/\text{秒} \quad (1-18)$$

在CGS单位制中， ν 的单位是厘米²/秒，这个单位习惯上称为沱。又因为沱这个单位太大，应用不便，故往往改用厘沱，1 厘沱 = $\frac{1}{100}$ 沱。

对于石油产品（例如重油），还使用一种实用粘度，称为恩氏粘度，用符号 $^{\circ}\text{E}$ 表示。它是 200 毫升试液，在测定温度下，从恩氏粘度计流出所需的时间 t 秒与同体积的蒸馏水在 20 $^{\circ}\text{C}$ 时，从恩氏粘度计流出所需的时间 t_0 秒（平均值为 51 秒）的比值，即

$$^{\circ}\text{E} = \frac{t}{t_0} \quad (1-19)$$

恩氏粘度 $^{\circ}\text{E}$ 与运动粘度 ν 之间的换算关系为：

$$\nu = \left(0.0731^{\circ}\text{E} - \frac{0.0631}{^{\circ}\text{E}} \right) \times 10^{-4} \text{ 米}^2/\text{秒} \quad (1-20)$$

当 $^{\circ}\text{E} > 10$ 时，则可用下列简单公式：

$$\nu = (0.0741^{\circ}\text{E}) \times 10^{-4} \text{ 米}^2/\text{秒} \quad (1-21)$$

今将水和空气的粘度及常见气体的粘度分别列在表 1-6 及图 1-2 中。

在 1 大气压下水和空气的密度 ρ 、粘度 μ 及运动粘度 ν 与温度的关系 表 1-6

温度 $t(^{\circ}\text{C})$	水					空 气				
	密 度 ρ		粘 度 $\mu \times 10^6$		运动粘度 $\nu \times 10^6$, (米 ² /秒)	密 度 ρ		粘 度 $\mu \times 10^6$		运动粘度 $\nu \times 10^6$, (米 ² /秒)
	(千克/ 米 ³)	(千克力· 秒 ² /米 ⁴)	(帕·秒)	(千克力· 秒/米 ²)		(千克/ 米 ³)	(千克力· 秒 ² /米 ⁴)	(帕·秒)	(千克力· 秒/米 ²)	
-20	—	—	—	—	—	1.39	0.142	15.6	1.59	11.3
-10	—	—	—	—	—	1.34	0.137	16.2	1.65	12.1
0	999.3	101.9	1795	183	1.80	1.29	0.132	16.8	1.71	13.0
10	999.3	101.9	1304	133	1.30	1.25	0.127	17.4	1.77	13.9
20	997.3	101.7	1005	103	1.01	1.21	0.123	18.2	1.83	14.9
40	991.5	101.1	655	66.8	0.661	1.12	0.114	19.1	1.95	17.0
60	982.6	100.2	474	48.3	0.482	1.06	0.108	20.3	2.07	19.2
80	971.8	99.1	357	36.4	0.368	0.99	0.101	21.5	2.19	21.7
100	959.1	97.8	283	28.9	0.296	0.94	0.096	22.9	2.33	24.5

混合气体的粘度，可用下述近似式来计算：

$$\frac{M_m}{\mu_m} = \frac{a_1 M_1}{\mu_1} + \frac{a_2 M_2}{\mu_2} + \frac{a_3 M_3}{\mu_3} + \dots + \frac{a_n M_n}{\mu_n} \quad (1-22)$$

式中

M_m ——混合气体的分子量；

μ_m ——混合气体的粘度；

$M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ ——混合气体各个组分的分子量；

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ ——混合气体各个组分的体积分数；