

高等学校试用教材

工程流体力学

东北工学院李诗久 主编



机械工业出版社

工程流体力学

东北工学院李诗久 主编

*

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)

广西民族印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787\times 1092^{1/16}$ ·印张 $19^{1/2}$ ·字数 473 千字

1980年3月北京第一版·1982年4月广西第三次印刷

印数 31,001—39,000·定价1.80元

*

统一书号: 15033·4854

编 者 的 话

《工程流体力学》一书,是根据1978年6月一机部在长沙召开的高等学校“铸造工艺与设备”专业教材编审会议所制订的教学大纲进行编写的。

本书共八章内容:第一章绪论主要阐述流体的物理性质和概念;第二、三、四、五章(流体静力学、流体动力学基础、流动阻力及能量损失、压缩性流体一元运动基本理论),是讲述流体平衡与运动的基本规律,是本课程的中心内容。第三、四章是本课程的重点;第六章讲述流速流量测试技术;第七章讲述运动物体阻力及悬浮速度;第八章讲述泵与风机的主要构造、原理和性能参数及其选择。

本书编写中力求反映如下几点:

1. 体现高等工业学校《工程流体力学》学科体系的理论水平。如对流体平衡与运动的三元分析法和压缩性流体的全能方程等,加强了编写;
2. 注意反映专业新技术发展中涉及的流体力学理论。如吹砂过程的气体动力学分析和气力输送有关的悬浮速度理论等,作了分析介绍;
3. 加强理论,注意应用。书中附有必要的图表数据、例题、各章末附有思考题及习题(有答案),借助例题启发和习题求解,引导学以致用,用而后促进理论深化,从而培养学生分析问题和解决问题的能力。

本书可供高等工业学校“铸造工艺与设备”及其相近专业《工程流体力学》课程的教材之用,适合50学时讲授;也可供从事铸造业的技术人员参考。

本书由东北工学院李诗久同志主编;合肥工业大学郑传宁同志及东北工学院刘五秀同志协编;湖南大学李纪臣同志和彭剑辉同志主审。本书初稿执笔:第一、四、五、七章及第三章后两节(李诗久);第二、三、六章(郑传宁);第八章(刘五秀)。

在本书编写和审稿过程中,一机部教编室、华中工学院、湖南大学、清华大学、山东工学院、洛阳农机学院、合肥工业大学及东北工学院等单位,给予大力支持和帮助;北方十六院校合编的《工程流体力学》终审稿,为本书编写提供了参考材料。在此一并致以衷心谢意。

由于编者水平有限,实践基础不够,书中有不当和错误之处,殷切希望各院校师生和读者,广泛提出批评和指正。

编者 1979年3月

目 录

编者的话

本书采用符号表

第一章 绪论	1
§ 1-1 工程流体力学及其在铸造专业中的应用	1
§ 1-2 流体的概念及连续介质模型	2
§ 1-3 流体的密度、重度和单位换算	3
§ 1-4 流体的压缩性和膨胀性	6
§ 1-5 流体的粘性及内摩擦定律	12
§ 1-6 作用在流体上的力	21
思考题及习题	23
第二章 流体静力学	25
§ 2-1 流体静压力及其特性	25
§ 2-2 流体平衡微分方程及等压面	28
§ 2-3 流体静压力基本方程	31
§ 2-4 液柱式压力计	37
§ 2-5 平面上的液体总压力	42
§ 2-6 曲面上的液体总压力、浮力原理	47
§ 2-7 旋转容器中液体的相对平衡	55
思考题及习题	62
第三章 流体动力学基础	66
§ 3-1 流体动力学有关基本概念	66
§ 3-2 连续性方程	73
§ 3-3 理想流体的运动微分方程	77
§ 3-4 不可压缩流体的伯努利方程	79
§ 3-5 伯努利方程的应用	91
§ 3-6 稳定流的动量方程	96
§ 3-7 旋流、势流及涡的概念	102
§ 3-8 点涡速度场的规律及其应用	106
思考题及习题	112
第四章 流动阻力及能量损失	117
§ 4-1 能量损失的工程意义及其两种形式	117
§ 4-2 层流、紊流及雷诺实验	119
§ 4-3 管中层流运动规律、达西公式	123
§ 4-4 管中紊流概述	129
§ 4-5 紊流沿程损失的基本关系式	134
§ 4-6 尼古拉茨实验及系数 λ 公式	136
§ 4-7 局部损失	144

§ 4-8 枝状管网及除尘系统计算	157
§ 4-9 孔口、管嘴的水力计算及平均计算静压头	166
思考题及习题	174
第五章 压缩性流体一元运动基本理论	176
§ 5-1 绝热流动的全能方程及其应用	176
§ 5-2 音速、气流按不可压缩处理的限度	181
§ 5-3 速度与断面关系、临界参数	185
§ 5-4 高压气体经管嘴与拉伐尔喷管的流动	188
§ 5-5 气体管流的基本理论及其应用	197
思考题及习题	202
第六章 流速和流量的测试	204
§ 6-1 流速的测量	204
§ 6-2 流量的测量	210
§ 6-3 测试断面及测点的选择	220
思考题及习题	222
第七章 运动物体的阻力及悬浮速度	224
§ 7-1 附面层的概念	224
§ 7-2 运动物体的阻力及阻力系数	227
§ 7-3 球形物体的自由悬浮速度	230
§ 7-4 非球体及颗粒群悬浮速度概述	239
思考题及习题	247
第八章 泵与风机	248
§ 8-1 概述	248
§ 8-2 离心式通风机的构造、工作原理及其型式	250
§ 8-3 离心式通风机的压力、风量(流量)、功率、效率和性能	255
§ 8-4 离心式通风机的工况确定、调节和选择	261
§ 8-5 离心式鼓风机	266
§ 8-6 回转式鼓风机(或定容式鼓风机)	272
§ 8-7 水环式真空泵	279
§ 8-8 活塞式压缩机	284
§ 8-9 离心式泵	287
§ 8-10 活塞水泵和柱塞水泵	300

第一章 绪 论

本章的中心内容是阐述流体力学的基本知识和基本概念；首先阐明工程流体力学的定义及其在铸造专业中的作用；其次阐述流体的概念和流体的主要物理性质；最后分析作用在流体上的力。连续介质模型和流体的粘性是本章的重点。

§ 1-1 工程流体力学及其在铸造专业中的应用

一、工程流体力学的定义

工程流体力学是应用力学的一个分科，是属于一门技术科学。工程流体力学是以理论分析和实验研究相结合的方法，来研究流体处于平衡、运动和流体与固体相互作用的力学规律，以及这些规律在实际工程中的应用。

流体包括液体和气体两部分，因而流体力学就包括液体力学及气体力学两部分。液体力学中通常以水做为液体的代表，故称为水力学。

水力学在研究液体运动过程中，认为流场上各点的密度不变，这种等密度流动就是水力学的特点，也是低速气流的特点。因此，水力学是在等密度流动前提下，来研究液体或低速气流的运动规律，以及确定表征运动状态的参数值。

气体力学在研究气体运动过程中，密度在流场上各点为变数，并且气体在改变密度的同时，还伴随有扰动波的形成，这两个特性就是气体力学的特点。变密度流动与等密度流动规律，是有原则性区别的，其实质就在于气体的可压缩性与液体的不可压缩性。

古典流体力学在研究流体平衡及运动规律时，是从严密的数学推理出发，追求问题的严密性和精确性。但是实际的流体运动现象十分复杂，有时很难用数学方法来表达和解决。而水力学则是从简化的工程角度出发，着重于解决实际问题，因此除了理论分析外，又广泛采用实验数据和经验公式。

现在的工程流体力学的内容和研究方法，是体现着古典流体力学与水力学两者的结合，也就是以理论分析与实验研究相结合的方法，来研究流体的力学规律。

二、工程流体力学在铸造专业中的应用

工程流体力学在工程技术中占有重要地位。铸造工业与流体力学的关系，同样是十分密切的：例如在铸造原理方面，浇注系统的水力计算、表面张力及其附加压头、抬箱力的计算等；在合金熔化方面，冲天炉供风量及风压的测定、管道、局部装置、炉胆以及炉料层的阻力计算等；在造型工艺方面，震实机构的耗气量，吹砂机紧实过程的气体动力学分析等；在铸造车间设备方面，造型材料气力输送有关悬浮速度的计算，水力清砂的高压水枪和水力提升机原理，以及通风除尘的计算等；在液压和气压传动方面，油缸和气缸的工作流量，气垫缓冲的气体力学基础以及贮压罐容积的确定等。都分别涉及到流体静力学，流体动力学，能量损失和气体动力学等基本理论。特别是经常用到伯努利 (Bernoulli) 方程、连续性方程和动量方程这三个流体力学的基本方程。可见，流体力学在铸造生产中是有重要作用的。

生产中输送流体的动力,主要是来源于流体机械的机械能,例如水力输送的动力靠水泵;化铁炉的送风和气力输送的动力靠鼓风机或高压通风机等。为了掌握定型设备的选择,学习和了解专业生产常用的泵与风机的构造、工作原理及其主要性能参数,也是很重要的。

工程流体力学是铸造专业的一门主要技术基础课。学习工程流体力学要基本掌握流体平衡和运动的主要理论规律和具有一定的实验及计算基本技能,并具有选择风机和水泵的初步能力。为“铸件形成理论基础”、“铸造车间设备”及“液压及气压传动”等后继课,打下必要的理论基础。

流体的物理性质,是决定流体平衡和运动规律的内部原因。因此,在没有讨论流体的力学规律之前,应首先了解流体的概念和流体的主要物理性质。

§ 1-2 流体的概念及连续介质模型

一、流体的概念

液体和气体同固体相比较,分子间引力较小,分子运动较强烈,因而分子排列松散,这就决定了液体和气体具有的共同特性是,不能保持一定的形状,而具有很大的流动性。因此,液体和气体统称为流体。本书所论流体,均指服从牛顿内摩擦定律(§ 1-5)的“牛顿流体”。

从力学性质来说,固体具有抵抗压力、拉力和切力三种能力。因而在外力作用下,通常发生较小变形,而且是到一定程度后变形就停止。流体由于不能保持一定形状,所以它仅能抵抗压力,而不能抵抗拉力和切力。当它受到切力作用时,就要发生连续不断的变形(即流动),而不能停止变形。由于流体对缓慢变形不显示阻力,所以流体不存在静摩擦力。以上所述,就是流体同固体在力学性质上的显著区别。

正因为流体具有流动性,才能实现在外力作用下,通过管道或孔道连续地将流体输送到指定地点。例如熔融金属在静压头作用下,经浇注系统流入铸型中。

液体和气体除了具有前述的共同特性外,还有如下的不同特性:

液体的分子距跟分子的有效直径差不多是相等的,当对液体加压时,由于分子距稍有缩小,而出现强大的分子斥力来抵抗外压力。这就是说,液体的分子距很难缩小,而可以认为液体具有一定的体积,因此通常称液体为不可压缩流体。又由于分子引力的作用,液体有力求自身表面积收缩到最小的特性,所以一定量液体在大容器内只能占据其一定的体积,而在上部形成自由分界面。

一般说来,气体分子距很大,例如常温常压下空气的分子距为 3×10^{-7} 厘米,其分子有效直径的数量级为 10^{-8} 厘米。可见分子距比分子有效直径大得很多。这样,当分子距缩小很多时,才会出现分子斥力。因此,通常称气体为可压缩流体。又因分子距很大,分子引力很小,而分子热运动起决定性作用,这就规定了气体既没有一定形状也没有一定体积。因而某一定量气体使其进入较大的容器内,由于分子频繁不息的运动,结果使气体均匀充满容器,而不能形成自由表面。

这里指出,当所研究的问题并没有涉及到压缩性时,所建立的流体力学规律,既适用于液体也适用于气体。当计及压缩性时,气体和液体就必须分别处理。气体虽然是可压缩的,但在许多工程中,气体的压力和温度变化不大(如低压、低真空气力输送),气流速度远小于音速(如通风除尘管道中风速小于 50 米/秒,参见第五章 § 5-2)时,可以忽略气体的压缩

性, 这时气流与液流的规律, 在质的方面是相同的, 只是在量的方面有区别。因此, 液体运动的基本理论, 对于上述气流来说是完全适用的。

二、连续介质模型

从物理学的观点来看, 流体和一切物体都是由分子组成的, 显然分子之间是有空隙的。但是流体力学所研究的, 并不是个别分子的微观运动, 而是研究由大量分子组成的宏观流体, 在外力 (如重力, 压力差等) 的作用下而引起的机械运动。宏观流体的物理量 (如压力、速度和密度等), 都是大量分子的行为和作用的平均效果, 而且这些宏观物理量, 都是可以从实验中直接观测的。

因此, 在流体力学中, 是用宏观流体模型来代替微观有空隙的分子结构。1753 年欧拉 (Euler) 首先采用了“连续介质”作为宏观流体模型: 就是将真正的流体看成是, 由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质, 也叫做流体连续性或稠密性的基本假设。这就是说, 将流体质点看成是流体的基元体积, 它的定义是质点的体积相对于流动空间和流体中固体的尺寸来说, 是充分小而可忽略不计; 同时它相对于分子和分子距的尺寸来说, 却又是足够大。例如在标准状态下, 一立方毫米的气体中有 2.7×10^{18} 个分子, 一立方毫米的液体中有 3×10^{21} 个分子, 可见分子本身和分子距是极其微小的, 因而质点 (或称为微团) 中是含有大量分子而足够大。所以, 忽略分子间隙是有根据的, 而且是可行的。

流体既被看成是连续介质, 则反映宏观流体的各种物理量, 就都是空间座标的连续函数。因此, 在以后的讨论中都可以引用连续函数的解析方法, 来研究流体处于平衡和运动状态下的有关物理参数之间的数量关系。

当然, 流体连续性的基本假设, 只是相对的, 例如在高真空的真空泵中, 温度为 293 开的空气, 当压力为 133.336×10^{-3} 帕 (即 10^{-3} 毫米水银柱) 时, 其分子距约为 4.5 毫米, 这个数值与真空泵的尺寸就可以比拟了, 这时的流动便是稀薄气体的“分子流”问题, 就不能把气体看成是连续介质了。本书只研究连续介质的力学规律。

下面我们来研究与力学有关的流体的主要物理性质。

§ 1-3 流体的密度、重度和单位换算

一、密度

任何物体都有质量。质量的度量是用单位体积内所具有的质量——即密度来表示的。对于均质流体, 密度等于流体的质量与其体积的比值, 即

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

式中 ρ ——流体的密度 (公斤/米³);

M ——流体的质量 (公斤);

V ——流体的体积 (米³)。

在热力学和气体动力学中, 气体体积的度量, 是用单位质量流体所具有的体积——即比容 v 来表示的。对于均质流体, 比容等于流体体积与其质量的比值, 即

$$v = \frac{V}{M} = \frac{1}{\rho} \quad (1-2)$$

可见, 比容与密度互为倒数, 故知 v 的单位为 $\text{米}^3/\text{公斤}$ 。

二、重度

任何物体在地心引力作用下, 都具有重力或重量。重量的度量是用单位体积流体所具有重量——即重度来表示的。对于均质流体, 重度等于流体重量与其体积的比值, 即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

式中 γ ——流体的重度 ($\text{牛}/\text{米}^3$);

G ——流体的重量 (牛)。

三、密度、重度和比容之间的关系

根据牛顿第二定律可知, 重量等于质量与重力加速度之积, 即 $G = M \cdot g$ 。对此式两边均以体积除之, 则得

$$\gamma = \rho \cdot g = \frac{g}{v} \quad (1-4)$$

式中 g ——重力加速度, 其值为 $g = 9.81 \text{米}/\text{秒}^2$ 。

工程上认为水和一般液体是不可压缩的。因此, 在流体力学计算中, 对于水的密度, 通常均以 4°C 蒸馏水的密度来代替, 即

$$\rho = 1000 \text{公斤}/\text{米}^3, \quad \gamma = \rho \cdot g = 1000 \times 9.81 = 9810 \text{牛}/\text{米}^3$$

对于温度为 0°C , 压力为一个大气压的标准状态下空气的密度为

$$\rho_0 = 1.293 \text{公斤}/\text{米}^3, \quad v_0 = \frac{1}{\rho_0} = \frac{1}{1.293} = 0.773 \text{米}^3/\text{公斤}$$

$$\gamma_0 = \rho_0 \cdot g = 1.293 \times 9.81 = 12.66 \text{牛}/\text{米}^3$$

对于温度为 20°C , 压力为一个大气压的技术标准状态下空气的密度为

$$\rho = 1.2 \text{公斤}/\text{米}^3, \quad v = \frac{1}{1.2} = 0.834 \text{米}^3/\text{公斤}, \quad \gamma = 1.2 \times 9.81 = 11.75 \text{牛}/\text{米}^3$$

有关常见几种流体的密度, 如表 1-1 所示。

表1-1 几种常见流体的密度 (一个大气压下)

液 体	ρ (公斤/米 ³)	t ($^\circ\text{C}$)	气 体	ρ (公斤/米 ³)	t ($^\circ\text{C}$)
水	1000	4	空气	1.293	0
铜合金	8200	1000	氧	1.429	0
水银	13600	0	氢	0.0899	0
钢	7200	1550	一氧化碳	1.250	0
酒精	789	20	二氧化碳	1.976	0
熔化生铁	6800~7000	1200~1280	氯	3.217	0
润滑油(矿)	900~930	15	氮	0.179	0
重油	890~940	15	氮	2.927	0
铝合金	2600	720~810	二氧化硫	1.251	0

四、单位制换算

鉴于国际单位制刚刚开始采用, 许多物理参数和有关技术数据、图表, 有绝对单位制的也有工程单位制的。为了正确使用和计算, 现将上述三种单位制中, 有关物理量的单位及相互换算关系, 介绍如下, 见表 1-2。

表1-2 不同单位制的单位及相互换算关系

物理量	国际单位制			绝对单位制	工程单位制	三种单位制换算关系 1(国际单位) = x(绝对单位) = y(工程单位)
	中文代号	国际代号	用基本单位表示			
长度 L	米	m	m	厘米 cm	毫米 mm	1 米 = 100 厘米 = 1000 毫米
质量 M	公斤	kg	kg	克 g	公斤力·秒 ² /米	1 公斤 = 10 ³ 克 = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·秒 ² /米
时间 T	秒	s	s	秒 s	秒 s	1 秒 = 1 秒 = 1 秒
力 F	牛	N	m·kg·s ⁻²	达因	公斤力 kgf	1 牛 = 10 ⁵ 达因 = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力
密度 ρ	公斤/米 ³	kg/m ³	m ⁻³ ·kg	克/厘米 ³	公斤力·秒 ² /米 ⁴	1 $\frac{\text{公斤}}{\text{米}^3} = 10^{-3} \frac{\text{克}}{\text{厘米}^3}$ = $\frac{1}{9.81} \frac{\text{公斤力} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4}$
比容 v	米 ³ /公斤	m ³ /kg	m ³ ·kg ⁻¹	厘米 ³ /克	米 ³ /公斤力	1 $\frac{\text{米}^3}{\text{公斤}} = 10^3 \frac{\text{厘米}^3}{\text{克}}$ = $\frac{9.81}{1} \frac{\text{米}^3}{\text{公斤力}}$
重度 γ	牛/米 ³	N/m ³	m ⁻² ·kg·s ⁻²	达因/厘米 ³	公斤力/米 ³	1 $\frac{\text{牛}}{\text{米}^3} = 10^{-1} \frac{\text{达因}}{\text{厘米}^3}$ = $\frac{1}{9.81} \frac{\text{公斤力}}{\text{米}^3}$
压力 p	帕 = $\frac{\text{牛}}{\text{米}^2}$	P _a = N/m ²	m ⁻¹ ·kg·s ⁻²	达因/厘米 ²	公斤力/米 ²	1 帕 = 10 $\frac{\text{达因}}{\text{厘米}^2}$ = $\frac{1}{9.81} \frac{\text{公斤力}}{\text{米}^2}$
动力粘性系数 μ	帕·秒 = $\frac{\text{牛} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$	$\frac{P_a \cdot s}{m^2} = \frac{N \cdot s}{m^2}$	m ⁻¹ ·kg·s ⁻¹	泊 = $\frac{\text{达因}}{\text{厘米}^2} \cdot \text{秒}$	$\frac{\text{公斤力}}{\text{米}^2} \cdot \text{秒}$	1 帕·秒 = 10 泊 = $\frac{1}{9.81} \frac{\text{公斤力}}{\text{米}^2} \cdot \text{秒}$
运动粘性系数 ν	米 ² /秒	m ² /s	m ² ·s ⁻¹	斯 = 厘米 ² /秒	米 ² /秒	1 米 ² /秒 = 10 ⁴ 斯 = 1 米 ² /秒
功 w	焦 = 牛·米	J = N·m	m ² ·kg·s ⁻²	尔格 = 达因·厘米	公斤力·米	1 焦 = 1 牛·米 = 10 ⁷ 达因·厘米 = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·米
功率 N	瓦 = 焦/秒	W = J/s	m ² ·kg·s ⁻³	$\frac{\text{尔格}}{\text{秒}} = \frac{\text{达因} \cdot \text{厘米}}{\text{秒}}$	公斤力·米/秒	1 瓦 = 1 $\frac{\text{焦}}{\text{秒}} = 10^7 \frac{\text{达因} \cdot \text{厘米}}{\text{秒}}$ = $\frac{1}{9.81} \frac{\text{公斤力} \cdot \text{米}}{\text{秒}}$

注 1. 国际制和绝对制的基本单位, 均为长度、质量和时间。其它量均为导出单位, 例如力的单位为 $m \cdot kg \cdot s^{-2}$, 其量纲为 $L \cdot M \cdot T^{-2} = M \cdot \frac{L}{T^2}$ 即质量与加速度的量纲之积;

2. 工程制的基本单位为长度、力(重力)和时间。其它量为导出单位;

3. 作量纲(因次)分析时, 长度量纲为 L 、质量量纲为 M 、时间量纲为 T , 此三者为国际制基本量纲, 其它量为导出量纲, 例如重度的量纲为

$$[\gamma] = [\rho \cdot g] = \frac{M}{L^3} \cdot \frac{L}{T^2} = L^{-2} \cdot M \cdot T^{-2} = M \cdot \frac{L}{T^2} / L^3$$

依此量纲可知:

(1) 在国际制中 γ 的单位应为 $m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-2} = N/m^3$;

(2) 在绝对制中 γ 的单位应为 $cm^{-2} \cdot g \cdot s^{-2} = \text{达因}/cm^3$;

(3) 在工程制中 γ 的单位应为 $m^{-2} \cdot \frac{\text{公斤力} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}} \cdot s^{-2} = \text{公斤力}/m^3$ 。

例1-1 某燃料油, 用量杯测出体积为 492 厘米³, 在天秤上称得质量为 0.446 公斤。

(1) 试求以国际单位制表示的密度和重度各为若干? 并换算出绝对单位制及工程单位制的密度和重度。(2) 最后导出一般换算关系: $1 \text{ 牛/米}^3 = 10^{-1} \text{ 达因/厘米}^3 = \frac{1}{9.81} \text{ 公斤力/米}^3$ 。

解 (1) 依质量 $M = 0.446$ 公斤, 体积 $V = 492 \times 10^{-6} \text{ 米}^3$, 则国际单位制的:

$$\text{密度} \quad \rho = \frac{M}{V} = \frac{0.446}{492 \times 10^{-6}} = 908 \text{ 公斤/米}^3$$

$$\text{重度} \quad \gamma = \rho \cdot g = 908 \times 9.81 = 8900 \text{ 牛/米}^3$$

依表 1-2 换算关系, 可换算出:

$$\text{绝对单位制密度} \quad \rho_{\text{绝}} = 10^{-3} \rho = 0.908 \text{ 克/厘米}^3$$

$$\text{重度} \quad \gamma_{\text{绝}} = 10^{-1} \gamma = 890 \text{ 达因/厘米}^3$$

$$\text{工程单位制密度} \quad \rho_{\text{工}} = \frac{1}{9.81} \rho = 92.3 \text{ 公斤力/秒}^2/\text{米}^3$$

$$\text{重度} \quad \gamma_{\text{工}} = \frac{1}{9.81} \gamma = 908 \text{ 公斤力/米}^3$$

(2) 因为 $1 \text{ 牛} = 10^5 \text{ 达因}$, $1 \text{ 米}^3 = 10^6 \text{ 厘米}^3$, 所以 $1 \text{ 牛/米}^3 = 10^{-1} \text{ 达因/厘米}^3$
因为 $1 \text{ 公斤力} = 9.81 \text{ 牛}$, 所以

$$1 \text{ 牛/米}^3 = \frac{1}{9.81} \text{ 公斤力/米}^3$$

$$\text{结果} \quad 1 \text{ 牛/米}^3 = 10^{-1} \text{ 达因/厘米}^3 = \frac{1}{9.81} \text{ 公斤力/米}^3。$$

注意, 密度和比重是两个不同的概念。比重的定义是物体的质量(或重量)与温度为 4°C 时同体积蒸馏水的质量(或重量)之比。可见比重是没有量纲的, 而密度则是有量纲的。在国际单位制中两者在数值上一般是不相同的, 例如水的比重为 1, 但以公斤每立方米为单位的密度则是 1000 公斤/米^3 。只有当密度采用吨/米³、公斤/升、克/厘米³等单位时, 两者的数值才相等, 因为上述三种单位中, 4°C 蒸馏水的密度的数值都是 1。

§ 1-4 流体的压缩性和膨胀性

流体在压力作用下, 能改变自身体积的特性, 称为流体的压缩性。当温度改变时, 能引起流体体积变化的特性, 称为流体的膨胀性。在这两种性质上, 液体和气体差别很大, 因此必须分别讨论。

一、液体的压缩性和膨胀性

(一) 压缩性

在温度不变的条件下, 压缩性的大小, 用体积压缩系数 β_p 表示, 其定义为增加一个单位压力时所发生的体积相对变化量, 即

$$\beta_p = - \frac{dV/V}{dp} \quad (1-5)$$

式中 V ——原有的体积 (米³);

dV ——体积的改变量 (米³);

dp ——压力的改变量(大气压), 1工程大气压 = 9.81 牛/厘米^2 ;

β_p ——体积压缩系数(大气压) $^{-1}$ 。

因 dp 与 dV 的变化方向相反, 即压力增加时体积减小, 故上式中加一负号, 以使系数 β_p 永为正值。水的 β_p 值如下表 1-3 所示。

表1-3 0°C 水在不同压力下的 β_p 值

大 气 压	5	10	20	40	80
$\beta_p \times 10^4 (\text{大气压})^{-1}$	0.529	0.527	0.521	0.513	0.505

从上表可以看出, 压力为 5 大气压情况下, 每增加 1 大气压时, 水的体积 (即 β_p) 只改变万分之 0.529; 随着压力的增高, β_p 还在减小。可见, 水的压缩性是很小的, 其它液体的压缩性也是很小的。因此, 在工程上认为液体是不可压缩的。但在特殊情况下, 如水击作用和高压液压传动系统中, 就必须考虑液体的压缩性。

(二) 膨胀性

当温度升高时液体体积膨胀。膨胀性的大小用体积膨胀系数 β_t 来表示, 其定义为增加一单位温度时, 所发生的体积相对变化量, 即

$$\beta_t = \frac{dV/V}{dt} \quad (1-6)$$

式中 dt ——温度的改变量 ($^{\circ}\text{C}$);

β_t ——体积膨胀系数 ($^{\circ}\text{C}$) $^{-1}$ 。

实验指出, 在 1 大气压下, 在温度较低时 ($10 \sim 20^{\circ}\text{C}$), 温度每增高 1°C , 水的体积相对改变量仅为万分之 1.5。温度较高时 ($90 \sim 100^{\circ}\text{C}$), 也只改变万分之 7。其他液体的膨胀系数也是很小的。因此, 在实际计算中, 除特殊需要外, 一般是不考虑液体的膨胀性。

例1-2 图 1-1 为一鉴定压力表的校正器, 器内充满油液, 其 $\beta_p = 4.75 \times 10^{-6} (\text{大气压})^{-1}$ 。由密封良好的活塞旋进压缩油液, 造成鉴定压力表所需的压力。活塞直径 $D = 1$ 厘米, 螺距 $t = 2$ 毫米, 在一大气压下器内充油体积 $V = 200$ 厘米 3 。当校正器须造成 200 大气压的压力时, 求手轮须旋进多少转?

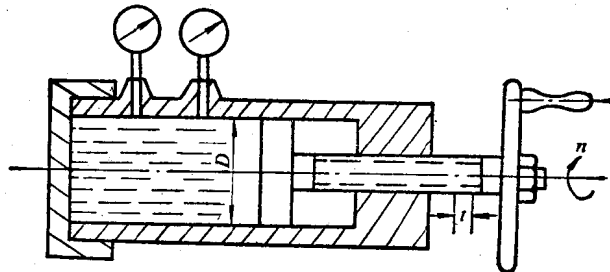


图1-1 压力表校正器

解 依 (1-5) 式求出油液需要减少的体积为

$$dV = -\beta_p V dp$$

再依手轮旋进 n 转时, 使油液减少的体积为

$$dV_1 = V_1 - V = -\frac{\pi}{4} D^2 t n$$

当 $dV_1 = dV$ 时, 即能造成 dp 压力。故得

$$\frac{\pi}{4} D^2 t n = \beta_p V dp$$

于是所需旋进转数为

$$n = \frac{4\beta_p V dp}{\pi D^2 t} = \frac{4 \times 4.75 \times 10^{-6} \times 200}{3.14 \times 1^2 \times 0.2} = 12.1 \text{ 转}$$

二、气体的压缩性

(一) 理想气体状态方程

从物理学中已知, 当气体的压力或温度改变时, 都将引起气体比容、密度 (或重度) 的显著变化。而这些物理量之间的关系, 是服从理想气体状态方程的, 即

$$pv = RT \quad \text{或} \quad \frac{p}{\rho} = RT, \quad \frac{p}{\gamma} = \frac{RT}{g} \quad (1-7)$$

式中 p ——绝对压力 ($\text{牛}/\text{米}^2$); v ——比容 ($\text{米}^3/\text{公斤}$),

T ——热力学温度, 即开尔文温度 (开), $T = T_0 + t^\circ\text{C}$, $T_0 = 273$ 开是标准状态下 ($t = 0^\circ\text{C}$) 的热力学温度; R ——气体常数 ($\text{牛}\cdot\text{米}/\text{公斤}\cdot\text{开}$)。

气体常数 R 可由标准状态下的参数 $R = p_0 v_0 / T_0$ 来确定。对于空气, 标准大气压 $p_0 = 101325 \text{ 牛}/\text{米}^2$, 比容 $v_0 = 0.773 \text{ 米}^3/\text{公斤}$, $T_0 = 273$ 开, 代入得

$$R = \frac{p_0 v_0}{T_0} = \frac{101325 \times 0.773}{273} = 287.33 \text{ 牛}\cdot\text{米}/\text{公斤}\cdot\text{开}$$

R 的物理意义是, 1 公斤质量的气体在定压下, 加热升高 1 度时所做的膨胀功。对于空气来说, 此膨胀功数值为 $287.33 \text{ 牛}\cdot\text{米}/\text{公斤}\cdot\text{开}$, 为简便起见, 一般忽略小数而取为 $R = 287 \text{ 牛}\cdot\text{米}/\text{公斤}\cdot\text{开}$, 本书以后就采用此值。

(二) 等温过程

即当气体状态变化过程中, 温度保持不变时, 称为等温过程。由理想气体状态方程, 当温度为常数时, 可得

$$\left. \begin{aligned} pv &= p_0 v_0 = \frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho_0} = C \text{ (常数)} \\ \frac{p}{\gamma} &= \frac{p_0}{\gamma_0} = C' \text{ (常数)} \\ \text{或} \quad \rho &= \rho_0 \frac{p}{p_0}, \quad \gamma = \gamma_0 \frac{p}{p_0} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

上式表明, 比容与压力成反比 (或密度、重度与压力成正比) 关系变化。此即波义耳 (Boyle) 定律。

凡是气体状态变化缓慢, 或气流速度较低时, 气体与外界能进行充分的热交换, 而视为与外界温度相等, 即可按等温过程处理。例如, 缓慢充气或排气时, 贮气罐中的气体就是缓慢压缩或缓慢膨胀过程, 可视为等温过程。

1. 贮气罐容积的确定: 在工业生产中, 对于间歇式工作的风动工具或气动设备, 为了保证在工作周期内, 压缩空气的压力波动较小, 并能供给足够的空气量, 而单独设置贮气罐。

如图 1-2 所示, 贮气罐 1 容积的大小, 与风动工具或气动设备 2 在工作周期中所消耗的空气量有关。设贮气罐容积为 V , 贮气的绝对压力为 p_1 ; 若气动设备在工作周期中所消耗的自由 (即标准状态) 空气量为 V_0 , 根据气动设备的工作要求, 罐内气体压力允许下降的最低绝对压力为 p_2 ; 如果在工作周期 t 过程中, 压气机或外部管网 3 供给的自由空气流量为 Q , 根据质量守恒定律, 则有

$$V(\rho_1 - \rho_2) + \frac{Q \cdot t}{60} \rho_0 = V_0 \rho_0$$

由于贮气罐中气体状态变化缓慢, 接近于等温膨胀过程, 则密度与压力的关系为:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{C}, \quad \rho_1 = \frac{p_1}{C}, \quad \rho_2 = \frac{p_2}{C}$$

并注意到压力以大气压表示时, p_0 为 1 大气压, 其数值为 1。将以上关系代入前式, 可得

$$\left. \begin{aligned} \text{贮气罐的最小容积: } V &= \frac{V_0 - \frac{Q \cdot t}{60}}{p_1 - p_2} \\ \text{消耗的自由空气量: } V_0 &= V(p_1 - p_2) + \frac{Q \cdot t}{60} \\ \text{消耗的自由空气流量: } Q_0 &= \frac{60V_0}{t} = \frac{60V(p_1 - p_2)}{t} + Q \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

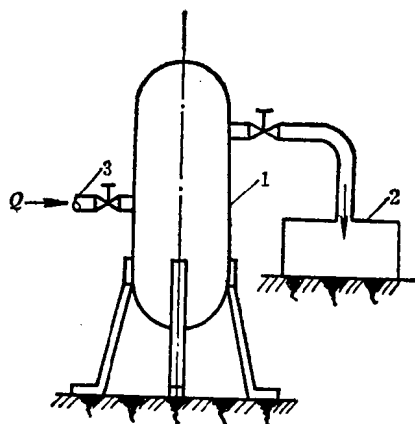


图1-2 贮气罐容积确定

1—贮气罐 2—气动设备 3—外部管网

式中 V ——贮气罐的最小容积 (米^3), 因为是按允许下降的最低压力 p_2 来确定的;

V_0 ——气动设备消耗的自由空气量 (米^3);

Q_0 ——气动设备消耗的自由空气流量 ($\text{米}^3/\text{分}$);

Q ——压气机或外部管网供给的自由空气流量 ($\text{米}^3/\text{分}$);

t ——气动设备工作周期 (秒);

p_1 ——贮气罐内贮气压力 (大气压);

p_2 ——贮气罐内气体允许下降的最低压力 (大气压)。

例1-3 某一间歇式气动设备, 在工作周期 $t = 10$ 秒的过程中消耗的空气质量为 $M_0 = 3.62$ 公斤, 外部管网供给的自由空气流量 $Q = 1.8 \text{ 米}^3/\text{分}$, 贮气罐贮气的绝对压力为 6 大气压, 工作结束时允许压力降到绝对压力为 5.5 大气压。(1) 试求所需贮气罐的最小容积 $V = ?$ (2) 如果是在关闭进气阀门下工作的, 贮气罐为所求出的容积, 若其它有关条件与上述相同, 试问此气动设备消耗的自由空气流量 Q_0 , 容积 V_0 , 质量 M_0 各为若干?

解 (1) 消耗的自由空气量为

$$V_0 = \frac{M_0}{\rho_0} = \frac{3.62}{1.293} = 2.8 \text{ 米}^3$$

将有关已知值代入, 则得所需贮气罐容积为

$$V = \frac{V_0 - \frac{Q \cdot t}{60}}{p_1 - p_2} = \frac{2.8 - \frac{1.8 \times 10}{60}}{6 - 5.5} = 5 \text{ 米}^3$$

解 (2) 根据题给 $V = 5 \text{ 米}^3$, $t = 10$ 秒, $p = 6$ 大气压, $p_2 = 5.5$ 大气压, 因工作期间关闭了进气阀门, 则外部管网供给的流量 $Q = 0$ 。将已知数值代入则得此气动设备消耗的自由空气流量为

$$Q_0 = \frac{60V(p_1 - p_2)}{t} + Q = \frac{60 \times 5 (6 - 5.5)}{10} + 0 = 15 \text{ 米}^3/\text{分}$$

而消耗的空气量为

$$V_0 = V(p_1 - p_2) + \frac{Q \cdot t}{60} = 5(6 - 5.5) + 0 = 2.5 (\text{米}^3)$$

消耗的空气质量为

$$M_0 = V_0 \rho_0 = 2.5 \times 1.293 = 3.24 \text{ 公斤}$$

这里指出,上面计算的流量值,只是个平均值,因为随着罐内气体压力的下降,其排气量是越来越小的。另外,设计时一般不计 Q ,这样有利于压力稳定。

2. 气缸工作耗气量的确定:在气动设备耗气量的计算中,气缸本身在工作时耗气量是较大的。因此,常要计算气缸工作的耗气量。如图1-3所示,若缸内径 D 、行程 L 、工作压力 p 及行程所需时间 t 已知时,则每一行程消耗的气体质量为

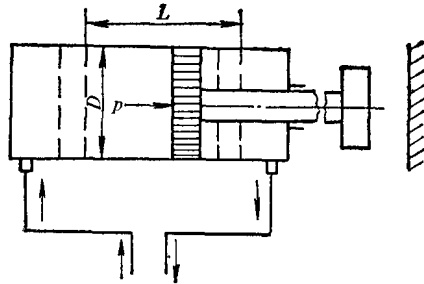


图1-3 气缸耗气量计算

$$M = \frac{\pi}{4} D^2 L \cdot \rho$$

所消耗的标准状态空气体积为

$$V = \frac{M}{\rho_0} = \frac{\pi}{4} D^2 L \frac{\rho}{\rho_0}$$

考虑活塞运动较缓慢,则可按等温处理,即有 $\rho/\rho_0 = p/p_0$,若流量以升/分计,则有标准状态空气流量为

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi}{4} \times 60 \times 10^{-3} \frac{D^2 L}{t} \frac{p}{p_0} = 0.047 \frac{D^2 L}{t} \frac{p}{p_0} \quad (1-10)$$

式中 Q ——气缸工作用气体积流量(升/分);

D ——气缸内径(厘米);

L ——行程(厘米);

t ——行程时间(分);

p ——工作气体的绝对压力(大气压);

p_0 ——标准大气压。

(三) 等压过程

即当气体状态变化过程中,压力保持不变时,称为等压过程。由理想气体状态方程,可得

$$\frac{T}{v} = \frac{T_0}{v_0} = \text{常数} \quad \left. \vphantom{\frac{T}{v} = \frac{T_0}{v_0} = \text{常数}} \right\} \quad (1-11)$$

或

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T_0 + t} = \frac{\rho_0}{1 + \beta t}, \quad \gamma = \frac{\gamma_0}{1 + \beta t}$$

式中 $\beta = \frac{1}{273} \text{ 开}^{-1}$, 是气体的体积膨胀系数。

上式表明,在等压过程中,比容与温度成正比(或密度、重度与温度成反比)关系变化,此即盖·吕萨克(Gaylussac)定律。如热气流烘砂的气力输送系统中,压力变化较小而温度变化较大(一般由 200°C 降至 50°C),这类情况即可按等压过程处理。

(四) 绝热过程

即当气体状态变化过程中, 与外界没有热交换, 称为绝热过程。由热力学可知, 绝热方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{p}{\rho^\kappa} &= \frac{p_0}{\rho_0^\kappa} = C \quad (\text{常数}) \\ p v^\kappa &= p_0 v_0^\kappa = C \quad (\text{常数}) \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

或

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/\kappa}, \quad \gamma = \gamma_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/\kappa}$$

式中 κ ——绝热指数, 是定压比热 C_p 与定容比热 C_v 的比值。对于空气 $\kappa = 1.4$ 。

例如气动震实造型机的震击缸 (图1-4) 其进、排气过程进行得很快, 气体来不及与外界进行热交换, 这类问题即可按绝热过程处理。图1-4 a) 为断进气膨胀震实机构的下位状态, 此时震击活塞1与震击缸2之间的空间容积为 V , 当给气时, 在气体压力作用下推动震击活塞上升, 其进气行程为 S_e , 上升 S_e 后便切断进气。这样, 进气终了时其中压缩空气容积为 $(V + A \cdot S_e)$, 其压力为 p_2 。断气后由于气体膨胀和震击活塞的惯性, 仍继续上升, 直至露出排气孔, 即图1-4 b) 为上位, 而后排气降落, 这时压力降为大气压 p_0 。所以, 在重力作用下震击活塞迅速下落, 使型板3与震击缸进行碰撞震击而紧实型板上砂箱中的型砂。但在活塞下降时便切断排气, 而使其中残留气体被压缩直至回到下位, 压力为 p_1 容积为 V , 实际上在达原位稍前已接通进气孔而进气, 便开始下一次震击循环。因震击频率较高, 则其中气体状态变化很快, 接近于绝热过程。

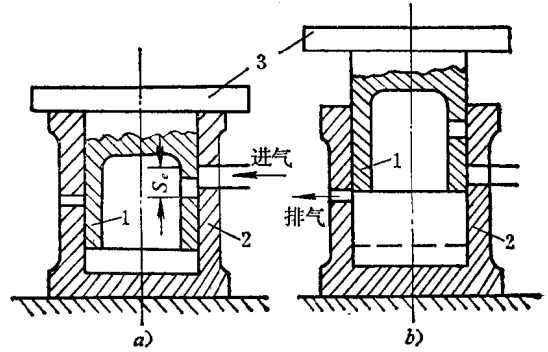


图1-4 断进气膨胀的震击机构
a) 工作的下位状态 b) 工作的上位状态

每震击一次消耗的空气质量, 为进气终了时的质量与排气终了时的质量差; 即

$$M = (V + A \cdot S_e) \rho_2 - V \rho_1$$

根据绝热过程, 有如下关系:

$$\rho_1 = \rho_0 \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{1/\kappa}, \quad \rho_2 = \rho_0 \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{1/\kappa}$$

代入后, 可得震击一次消耗的自由空气量为

$$V_0 = \frac{M}{\rho_0} = (V + A \cdot S_e) \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{1/\kappa} - V \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{1/\kappa} \quad (1-13)$$

若震击频率以 f 表示, 气动震击机构消耗的自由空气流量为

$$Q_0 = V_0 \cdot f = f \left[(V + A \cdot S_e) \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{1/\kappa} - V \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (1-14)$$

上二式中

V_0 ——震击一次消耗的自由空气量 ($\text{米}^3/\text{次}$);

Q_0 ——震击机构消耗的自由空气流量 ($\text{米}^3/\text{分}$);

V ——震击机构下位空间容积 (米^3);

A ——震击缸断面积 (米²);
 S_e ——进气行程 (米);
 p_2 ——进气气体绝对压力 (大气压);
 p_1 ——回原位时其中气体的绝对压力 (大气压);
 p_0 ——大气压;
 f ——震击频率 (次/分)。

例1-4 已知气动造型机震击缸断面积 $A = 320$ 厘米², $V = 1920$ 厘米³, 进气行程 $S_e = 10$ 毫米, $p_1 = 4.5$ 大气压 (绝压), $p_2 = 6$ 大气压 (绝压)。若消耗自由空气流量 $Q_0 = 1.944$ 米³/分。试求震击频率 f 为若干?

$$\text{解 } f = \frac{Q_0}{V_0} = \frac{1.944}{(1920 + 320 \times 1) \times 10^{-6} \times 6^{1/1.4} - 1920 \times 10^{-6} \times 4.5^{1/1.4}} = 800 \text{ 次/分。}$$

(五) 多变过程

多变过程方程为
$$\frac{p}{\rho^n} = C \text{ (常数)} \quad (1-15)$$

其中 n 称为多变指数。当 $1 < n < \kappa$ 时, 气体是属于不完全冷却下的压缩, 或不完全加热下的膨胀; 当 $n > \kappa$ 时, 相当于气体被加热压缩或被冷却膨胀。如水冷式压气机所压缩的气体, 属于 $n < \kappa$ 的多变过程; 其它小型鼓风机, 则属于 $n > \kappa$ 的多变过程。

§ 1-5 流体的粘性及内摩擦定律

一、粘性的概念

现在观察一种现象: 设有两块平行的平板, 其间充满静止流体。下板固定不动, 上板以匀速 u_0 平行下板运动 (图1-5) 时, 两板间的流体便发生不同速度的运动状态, 即呈现出: 从附着在动板下面的流体层, 具有与动板等速的 u_0 开始, 愈往下速度愈小, 直到附着在定板上的流体层的速度为零这样的速度分布规律。

这一事实说明: 每一运动较慢的流体层, 都是在运动较快的流体层带动下才运动的。同时每一运动较快的流体层 (快层), 也受到运动较慢的流体层 (慢层) 的阻碍, 而不能运动得更快。这就表明, 相邻流体层发生相对运动或相对滑动时, 快层对慢层产生一个拖力, 使慢层加速。根据作用与反作用的原理, 慢层对快层有一个反向作用力, 使快层减速, 即它是一个阻止运动的力称为阻力。拖力和阻力是大小相等方向相反的一对力, 分别作用在两个流体层的接触面上。因为这一对力是在流体的内部产生的, 所以把这一对力叫做内摩擦力或粘性阻力。

因此, 概括地说, 当流体层间发生相对运动时, 在流体内部两个流体层的接触面上, 便产生粘性阻力或内摩擦力以阻止相对运动。流体具有的这一性质, 叫做流体的粘性。

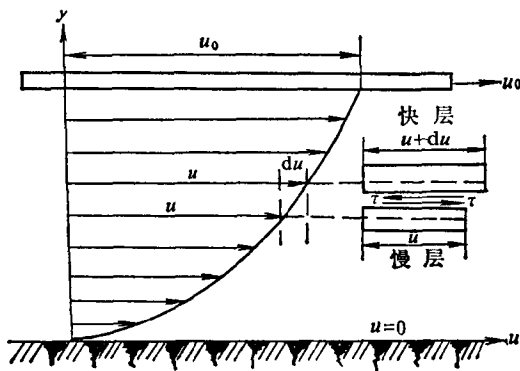


图1-5 相对运动与粘性