



煤炭技工学校通用教材



选煤厂流体机械

煤炭工业出版社

煤炭技工学校通用教材

选煤厂流体机械

全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会 编

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书概述了流体力学基本理论, 油泵泵和离心清水泵及杂质泵的工作原理、结构、性能和使用, 对离心式通风机、鼓风机和水环式真空泵及空气压缩机的工作原理、结构、使用等内容也进行了较为详细的论述。

本教材适于煤炭技工学校选矿专业师生阅读, 亦可作选煤厂在职培训、就业前培训之用。

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

北京密云春雷印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 8³/₄

字数 201 千字 印数 1—4,000

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 7 - 5020 - 2371 - 2/TD463

社内编号 5142 定价 15.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

全国职业培训教学工作指导委员会 煤炭专业委员会

主任委员	刘 富					
副主任委员	仵自连	刘同良	张贵金	韩文东	范洪春	刘荣林
	雷家鹏	曾宪周	夏金平	张瑞清		
委 员	(按姓氏笔画为序)					
	于锡昌	牛麦屯	牛宪民	王亚平	王自学	王朗辉
	甘志国	石丕应	仵自连	任秀志	刘同良	刘荣林
	刘振涛	刘 富	刘 鉴	刘鹤鸣	吕军昌	孙东翔
	孙兆鹏	邢树生	齐福全	严世杰	吴庆丰	张久援
	张 君	张祖文	张贵金	张瑞清	李 玉	李庆柱
	李祖益	李家新	杨 华	辛洪波	陈家林	周锡祥
	范洪春	赵国富	赵建平	赵新社	夏金平	高志华
	樊立谦	储可奎	曾宪周	程光玲	程建业	程彦涛
	韩文东	雷家鹏	樊玉亭			

前 言

为了加快煤炭技工学校的教学改革步伐，不断适应社会主义市场经济发展和劳动者就业的需要，加速煤炭工业技能型人才的培养，促进煤炭工业现代化建设和科学技术的进步，在全国职业培训教学工作指导委员会的指导下，全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会，以全国煤炭技工学校“八五”教材建设规划为基础，研究制定了全国煤炭技工学校新时期教材建设规划，并列入了国家劳动和社会保障部制定的全国技工学校教材建设规划，劳动和社会保障部以《关于印发 1999 年度全国职业培训教材修订开发计划的通知》（劳社培就司函（1999）第 15 号）下发全国。这套教材 59 种，其中技术基础课教材 43 种，实习课教材 16 种。目前正在陆续出版发行当中。

这套教材主要适用于煤炭技工学校教学，工人在职培训、就业前培训，也适合具有初中文化程度的工人自学和工程技术人员参考。

《选煤厂流体机械》是这套教材中的一种，该教材由淮北矿业集团职教中心李含胜同志编写，1993 年由煤炭工业出版社出版发行。2000 年，全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会根据煤炭生产和煤炭技工学校的教学要求，依据劳动和社会保障部批准的全国煤炭技工学校统一教学计划、教学大纲，组织有关专家对该教材进行了全面审查，并对教材中的部分内容进行了修改和更新。使该教材内容更加丰富，更具针对性、科学性、适用性，能更好地满足煤炭技工学校的教学要求。在本教材的编写过程中，得到了煤炭企事业单位有关专家和工程技术人员的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，书中难免有不当之处，恳请广大读者批评指正。

全国职业培训教学工作指导委员会
煤 炭 专 业 委 员 会
2004 年 2 月

目 录

第一章 流体力学基础	1
第一节 流体力学及学习流体力学的目的	1
第二节 流体的主要物理性质	1
第二章 流体静力学	6
第一节 流体静压力及其特性	6
第二节 流体静压力基本方程式	7
第三节 等压面	10
第四节 压力的测量	11
第三章 流体动力学基础	18
第一节 流体动力学的基本概念	18
第二节 流体流动的连续性方程式	21
第三节 伯努利方程式	23
第四节 实际流体总流的伯努利方程式	27
第五节 总流伯努利方程式的应用	28
第四章 流体在管路中的流动状态和水头损失	34
第一节 雷诺实验和流体的两种运动状态	34
第二节 流体流动的水头损失	36
第五章 离心式清水泵和杂质泵	42
第一节 离心式水泵的工作原理和基本参数	42
第二节 水泵的吸水高度和汽蚀现象	47
第三节 离心式清水泵和杂质泵的主要结构型式	50
第四节 离心式水泵的工作性能	63
第五节 离心式水泵的使用	70
第六节 油压泵	73
第六章 通风机	78
第一节 概 述	78
第二节 通风机的性能	79
第三节 通风机的结构型式	82
第四节 通风机的使用	84
第七章 空气压缩设备	88
第一节 概 述	88
第二节 空压机的结构、主要部件及附属装置	91
第三节 活塞式空压机的使用	100

第八章 离心式鼓风机	106
第一节 离心式鼓风机的结构及其特点.....	106
第二节 离心式鼓风机的性能.....	107
第三节 离心式鼓风机的使用.....	108
第四节 罗茨鼓风机.....	112
第九章 水环式真空泵及压风机	118
第一节 单作用水环式真空泵.....	118
第二节 双作用水环式真空泵.....	120
第三节 真空泵的使用和维护.....	128

第一章 流体力学基础

第一节 流体力学及学习流体力学的目的

流体力学是力学的重要组成部分。流体力学主要是研究流体的平衡和运动规律以及运用这些规律来分析和解决工程技术中的应用与计算的一门学科，是工程应用力学的组成部分之一，它采用理论分析与实验相结合的方法研究并建立起流体中的作用力、运动速度和压力之间的关系。流体力学分流体静力学和流体动力学等几大部分。研究流体平衡规律的一门学科叫流体静力学；研究流体运动规律的一门学科叫流体动力学。

在理论研究方面，流体力学广泛采用物理学和理论力学的基本定律。但是流体在平衡和运动状态中的许多问题相当复杂，难以都能得到严密的理论验证。除了理论分析外，它还广泛地借助于实验的方法，才建立起自己的科学体系。因此，流体力学不仅理论性较强，而且实践性也较强。

流体力学是一门应用较广的学科，如工业上和生活中的城市给水和排水、排水灌溉、海港水运以及输油等方面都离不开流体力学。在煤矿生产和选煤厂生产中的排水、通风、鼓风、水力采煤和重力选煤等的理论基础都是流体力学。

流体力学所研究的运动，仅限于由于外部原因而引起的运动，对于流体内部的分子运动不予考虑，即把流体看作是由无穷多个连续分布的流体质点所组成的连续介质，并假想在连续介质中，质点与质点之间没有空隙，质点是均匀地分布在连续介质之中的。

本篇重点介绍流体力学中最基本的概念及应用，如流体静力学基本方程式、连续性方程式、伯努利方程式以及液流在管路中的压头损失计算公式等，为学习和掌握选煤厂各种流体机械的性能，为分析和计算流体力学问题提供必要的理论基础。

第二节 流体的主要物理性质

在工程技术中，我们往往把流体分子之间的吸引力称为内聚力（也称相互聚集力），而把流体分子与固体分子之间的吸引力称附着力。流体的物理性质与上述两种力有关，这些物理性质是决定流体平衡和运动规律的内在原因。主要有：

一、流动性

液体和气体统称为流体。流体不同于固体的明显之处，在于各流体质点之间的内聚力极小，即流体（特别是液体）能承受较大的压应力，却几乎不能承受拉应力，对剪切应力的抵抗极弱，易于流动，不能保持固定的形状，其形状只能随容器形状的改变而改变，这个特性叫流体的流动性。

液体和气体的主要区别在于液体分子间的距离较气体小，在压力作用下体积改变很小；气体分子间距离较大，在压力作用下体积改变较大。

二、密度和重度（容重）

我们知道，对于各种不同的流体，即使体积相同，质量也是不同的。如 1 m^3 的水、油、水银、空气等，其质量显然不同，为了表明流体的这种性质，我们采用密度即单位体积的流体所具有的质量来表示。

若用 ρ 来表示流体的密度，则：

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

式中 ρ ——流体密度， kg/m^3 ；

M ——均质流体的质量， kg ；

V ——均质流体的体积， m^3 。

实验证明，流体的密度 ρ 与压力 p 和温度有关，但在通常状态下流体是处在大气压力之下，并且温度的变化不大，所以流体的密度可以看成是不变的。

地球表面的一切流体，都处在地球引力的作用之下。因此，具有质量的流体也一定具有重量。由于重量易于称量，故在流体力学中又多用单位体积的流体所具有的重量即重度（或容重）来表示上述的特征。

若用 γ 表示流体的重度，则：

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中 γ ——流体的重度， N/m^3 ；

G ——流体的重量， N ；

V ——流体的体积， m^3 。

流体的重度也和密度一样与压力及温度有关，但因变化很小，所以也可以看成是不变的。

在工程应用中，有时已知均质流体的密度求其重度，或已知均质流体的重度求其密度。此时，直接应用上述两个公式比较繁琐，因此，我们设法导出另外的公式。

由式 (1-1) 和式 (1-2)，并考虑 $G = Mg$ ，可以得到重度与密度的关系式如下：

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1-3)$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-3')$$

式中 g ——重力加速度， m/s^2 ；

其他符号的意义同上。

在工程技术中，常见的几种流体的密度、重度如表 1-1 所示。

例 1-1 已知水在 4°C 时的密度为 $0.001\text{kg}/\text{cm}^3$ ，求此温度时水的重度？

解： $\rho = 0.001\text{kg}/\text{cm}^3 = 1000\text{kg}/\text{m}^3$

$$\gamma = \rho g = 1000\text{kg}/\text{m}^3 \times 9.810\text{m}/\text{s}^2 = 9810\text{N}/\text{m}^3$$

注意：题中的已知数单位与公式中量的符号的单位不同时，应先划成统一的单位，然后再代入公式计算。

三、压缩性、膨胀性

1. 压缩性

由于流体各分子之间有一定的间隙，当作用在流体上的压力增加时，其分子间的距离

缩小，因而流体的体积减少，密度增加。概括地讲，就是在温度不变的条件下，流体的体积随外压力的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或压缩率 β_p 表示，其单位为 m^2/N 。

表 1-1 几种流体的重度与密度

流 体 名 称	温 度/ $^{\circ}\text{C}$	密 度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	重 度/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$
水	4	1000	9810
水	10	999.7	9807.23
水	15	999.1	9801.37
水	20	998.2	9794.54
水 银	20	13600	133420
汽 油	20	678	6651
煤 油	20	808	7926
润滑油 (矿)	20	900~930	8830~9120
酒 精	20	789	7740
空 气	20	1.205	11.821
空 气	0	1.293	12.684

实验测定，液体的体积压缩系数是非常小的，例如水在 20°C ，压力为 $101300\sim 2500000\text{Pa}$ 时，其体积压缩系数 β_p 仅为 $4.844\times 10^{-10}\text{m}^2/\text{N}$ 。常用液压油的压缩率为 $(5.1\sim 7.1)\times 10^{-10}\text{m}^2/\text{N}$ ，因此在工程上的许多问题中，可以把液体当作是不可压缩的，但在某些特殊情况下，例如研究液体的振动、冲击时，仍必须考虑。否则由于压缩性引起的影 响将会造成很大的偏差。

由于气体的压缩性很大，故称为可压缩流体。但对于流速低于 $50\sim 70\text{m/s}$ ，压力低于 $9.81\times 10^3\text{Pa}$ 的气体，也可以当作不可压缩的流体对待，以便于分析研究。

2. 膨胀性

在压力不变的情况下，流体随温度的升高而体积增大的性质称为流体的热膨胀性，简称膨胀性，流体膨胀性的大小可用体积膨胀系数 β_t 表示，其单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ 。

实验证明，液体的 β_t 值是很小的，当压力及温度变化不大时，可以认为液体的体积不发生变化，是既不可压缩又不膨胀的流体，压力及温度的变化很大时，需考虑其压缩性及膨胀性，否则会产生较大的误差。

四、粘 性

流体运动时，在其内部产生内摩擦力的性质称为流体的粘性。

当流体以某一速度流动时，其内部分子之间存在吸引力，此力称为流体的内聚力。而把流体分子和固体分子之间的吸引力叫附着力。流体的内聚力和附着力都是抵抗流体运动的阻力，而且是以内摩擦力的形式表现出来的，这就是流体粘性的实质。

液体和气体都具有粘性，但粘性的大小不一样，在相同条件下，液体的粘性比气体大。

设有两块平行板 I 和 II（图 1-1），其间充满静止流

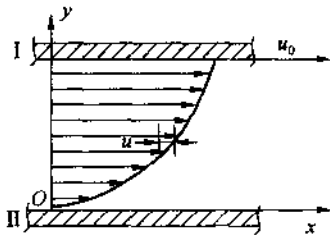


图 1-1 流体内部速度分布与粘性

体，若Ⅱ板固定不动，而Ⅰ板以速度 u_0 向右移动。两板间的流体在垂直断面中出现不同速度的运动状态，即可看作很多层流体的流动，与Ⅰ板接触的流体层同样以速度 u 运动，愈往下流体层运动的速度愈小，紧靠Ⅱ板的流体层速度几乎为零。

上述实验表明：每一层速度较慢的流体，都是在速度较快的流体层的带动下运动的，即快层对慢层产生一个拖力。根据作用与反作用原理，慢层对快层有一个阻止运动的阻力。拖力和阻力分别作用在两个流体层的接触面上，并且这一对力是在流体内部产生的，故称这对力叫内摩擦力或粘性阻力。

流体的粘性通常用粘度表示。粘度的表示有釉下几种方法：

1. 动力粘度

动力粘度又称动力粘性系数，简称粘度，以 μ 表示。

μ 的单位是牛·秒/米² (N·s/m²) 或帕·秒 (Pa·s)，1Pa·s 是指某一种均质流体在层状流动时的动力粘度，在该流体两个相距 1m 的平面以 1m/s 的速度作相对运动时产生的切应力 1Pa。

动力粘度的工程单位是公斤力·秒/米² (kgf·s/m²)，绝对单位制是达因·秒/厘米² (dyn·s/cm²)，叫做“泊”。它们与国际单位制单位的换算关系如下：

$$1\text{Pa}\cdot\text{s} = 1\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = 10\text{P} = 1000\text{cP} = 0.102\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$$

$$1\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = 9810\text{cP} = 9.81\text{Pa}\cdot\text{s}$$

2. 运动粘度

运动粘度又称运动粘性系数，用符号 ν 表示。它是流体的动力粘度与密度在一个标准大气压下温度相同时的比值，即：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-4}$$

运动粘度的工程制单位和国际单位制相同，都是 m²/s。1m²/s 是指某一均质流体的动力粘度为 1Pa·s，密度是 1kg/m³ 时的运动粘度。运动粘度的绝对制单位为斯托克斯 (St)，它与国际单位制单位的换算关系：

$$1\text{m}^2/\text{s} = 10000\text{cm}^2/\text{s} = 10^6\text{cSt}$$

$$1\text{cSt} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s} = 10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$$

常用机械油的号数，就是表示这种油在温度为 5℃ 时，其运动粘度 ν 的平均值，表 1-2、表 1-3 分别给出了水和空气的 ν 。

表 1-2 水在不同温度时的重度和粘度

温度 $t/^\circ\text{C}$	重度 $\gamma/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	运动粘度 $\nu/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$
0	9808.63	0.0179
10	9807.23	0.01306
15	9801.37	0.0114
20	9794.54	0.0100
30	9764.58	0.0080
40	9733.87	0.0066
60	9645.58	0.0047
80	9532.05	0.0036
100	9401.71	0.0029

表 1-3 空气在不同温度时的重度 and 粘度

温度 $t/^\circ\text{C}$	重度 $\gamma/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	运动粘度 $\nu/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$
0	12.684	0.137
10	12.232	0.147
15	12.027	0.152
20	11.821	0.157
30	11.449	0.166
40	10.066	0.176
60	9.810	0.196

3. 恩氏粘度

恩氏粘度是以恩氏粘度计测出来的, 即在一定的温度下使 200cm^3 的被测液体在自重作用下从圆筒中经直径 2.8mm 的小管流出所需的时间与 20°C 的同体积蒸馏水流过上述小管所需的时间的比值就是这种流体的恩氏粘度, 用符号 $^\circ\text{E}$ 表示, 即:

$$^\circ\text{E} = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-5)$$

式中 t_1 —— 200cm^3 的被测流体流过恩氏粘度计的小孔所需的时间, s;

t_2 —— 200cm^3 的蒸馏水在 20°C 时流过恩氏粘度计小孔所需的时间, s; 一般 t_2 为 $50\sim 53\text{s}$ 。

工业上常用 20°C 、 50°C 和 100°C 作为测定恩氏粘度的标准温度, 其代表符号 $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$ 、 $^\circ\text{E}_{100}$ 。求得 $^\circ\text{E}$ 后, 运动粘性系数可用下式求出:

$$\nu = 0.0731^\circ\text{E} - \frac{0.0631}{^\circ\text{E}}$$

□ 复习思考题

1. 流体的重度和密度有何区别? 它们的关系是什么?
2. 何谓流体的压缩性、膨胀性? 它们对流体的重度和密度有何影响? 在实际计算中, 什么情况下才考虑流体的压缩性?
3. 圆管中充满流动的流体, 是靠管壁的流速大? 还是靠管中心的流速大? 为什么?
4. 某种流体在桶内的体积为 0.06m^3 , 此流体的质量为 816kg , 求此流体的密度、重度和质量?
5. 润滑油的密度 $\rho = 900\text{kg}/\text{m}^3$, 用恩氏粘度计测其 200cm^3 , 在 20°C 时流完的时间 $t_1 = 22\text{min}$, 试求其动力粘度和运动粘度?

第二章 流体静力学

流体静力学是研究流体平衡规律的一门学科。这里所指的平衡不单指一般所谓静止的情况，而应当有广义的理解，凡是流体质点与质点间以及流体质点与固体接触面之间没有相对运动，这种状态就称为平衡。

第一节 流体静压力及其特性

一、流体静压力

在一个静止且装满均质流体的容器中，由于流体的重量而使容器底、壁以及流体内部质点都将受到压力的作用，观察从静止状态的流体中取出的一块分离体，如图 2-1 所示。这块分离体处于平衡状态，为了得出流体内部的应力，则用一平面 AB 把它分成 I、II 两部分，若拿走 I 部分，则必须在平面 AB 上加一个代替 I 部分对 II 部分的作用力 F （力 F 应该是作用在平面 AB 各点上诸力的合力，且此诸力是均匀分布的），才能使 II 部分保持平衡。若用 S_A 代表面 AB 的面积，则其流体静压力 p 为

$$p = \frac{F}{S_A} \quad (2-1)$$

按公式 (2-1) 求得的是面积 S_A 上的平均流体静压力，这只有在水平作用面的情况下，各部分的流体静压力才会是一样的。而在垂直作用面或倾斜作用面的情况下，其不同部位上的平均流体静压力是不一样的。为了计算上述两种情况下的流体静压力，必须引入“点的流体静压力的概念”。

在面积 S_A 上任意处，取一微小面积 ΔS_A ，设作用在其上的总作用力为 ΔF ，当小面积 ΔS_A 趋近于零时， $\frac{\Delta F}{\Delta S_A}$ 的极限，即：

$$p = \lim_{\Delta S_A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S_A} \quad (2-2)$$

称为流体内部一点的流体静压力。

由此我们看出：所谓流体静压力，是指在静止的流体中单位面积上所受的作用力，因而又叫流体静压力强度。

二、流体静压力特性

流体静压力具有下述两个特性：

(1) 流体静压力永远向内并垂直于作用面。

这一特性可以用反证法来验证。如图 2-1 所示，在处于静止状态的流体中，任意取 AB 面下的流体为分离体，并假设作用在 AB 面上的力为 F' ，其方向向外，且不与该面垂

直, 则 F' 可以分解为一个垂直于 AB 面的力 F'_a , 一个相切于 AB 面的力 F'_t 。若此种假设正确, 则 F'_t 必引起流体流动, 这显然与流体处于静止状态的前提条件不符。因此, F'_t 只可能等于零, 即力 F' 只能与 AB 面垂直。另外, 根据流体不能承受拉力的特性, 可以得出结论: F' 的方向只能是向着作用表面的内法线方向, 即图 2-2 中 F 的方向。

(2) 流体任一点, 所受各方向上的流体静压力的大小均相等。

在静止的流体中任意取一点 A, 如图 2-3 所示, 假设此点左边的流体静压力 p_1 大于右边的流体静压力 p_2 , 流体质点 A 必将向右移动, 这与静止流体的前提相矛盾, 因此 $p_1 = p_2$ 。用此方法, 可以证明 A 点处任意方向上的流体静压力相等。如用测压计围绕任意一点, 测其各方向上的流体静压力, 则测压计的读数是一个定值。

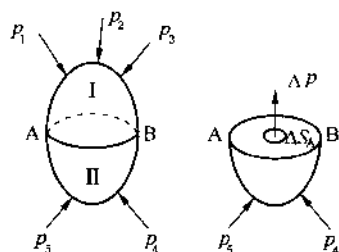


图 2-1 静止流体中的分离体

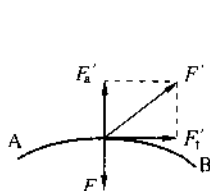


图 2-2 流体静压力特性(I)

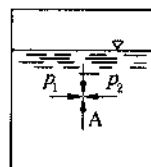


图 2-3 流体静压力特性(II)

第二节 流体静压力基本方程式

流体静压力的基本方程式, 是计算流体内部某处一点静压力的公式。

在盛有流体的静止容器中, 流体的表面为自由面 (即液体和外界气体之间或与真空之间的分界面)。设作用于流体自由面单位面积上的压力为 p_0 (可等于标准大气压, 也可不等于标准大气压), 现在来研究自由面以下深度 h 处 A 点的流体静压力 p 。

在自由面下 h 深度处取一点 A, 假设绕 A 点做一小圆周, 其圆周围成的水平面积为 ΔS , 然后过圆周上各点向上作垂线, 所形成的圆柱面和自由面相交, 如图 2-4 所示, 结果得到一底面积为 ΔS , 高度为 h 的垂直圆柱体, 把这个圆柱体作为一个分离体从周围流体中分离出来, 并放大, 我们来分析它的平衡条件。

作用在其上的力有:

(1) 垂直向上作用于底面上的力为: $F = p \cdot \Delta S$;

(2) 垂直向下作用上顶面的力即自由面上的力为: $F_0 = p_0 \cdot \Delta S$;

ΔS ;

(3) 作用于圆柱体侧面上的压力为 p_1 、 p_2 等等。其方向均为水平方向, 即各力都垂直于圆柱体表面;

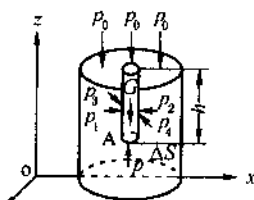


图 2-4 深度为 h 处 A 点的流体静压力

(4) 小流体圆柱所受到的重力, 即自重为:

$$G = \gamma \cdot \Delta S \cdot h$$

做空间直角坐标系如图 2-4, 并将作用于流体圆柱上的各力, 投影在各坐标轴上, 由物理学和理论力学可知: 欲使圆柱体保持平衡, 各力在每一坐标轴上的投影之代数和必等于零。由于流体是静止的, 根据流体静压力特性 (II) 可知, 圆柱体侧面上的力 F_1 、 F_2 等是相互平衡的, 所以它们在各坐标轴上的投影之代数和都等于零。

分析垂直方向上的作用力, F_0 、 F 、 G 三力在 OX 和 OY 两轴上的投影也必然等于零。因为它们是垂直于这两个坐标轴的。因此, 欲使分离出来的流体圆柱保持平衡, 只要 F_0 、 F 、 G 三力在 OZ 轴上的投影之和等于零即可。若规定向上的作用力为正 (反之亦可), 则得到下列平衡方程式:

$$p \cdot \Delta S - p_0 \cdot \Delta S - \gamma \cdot \Delta S \cdot h = 0$$

$$\text{即} \quad p = p_0 + \gamma h \quad (\text{N/m}^2) \quad (2-3)$$

式中 p ——深度 h 处的流体静压力, N/m^2 ;

p_0 ——作用在自由面上的外压力, N/m^2 ;

γ ——流体的重度, N/m^3 ;

h ——所研究的点与自由面之间的距离, m 。

公式 (2-3) 是流体静压力的基本方式, 说明如下:

(1) 在静止的流体中, 某点流体静压力 p 的大小等于作用在自由面上的外压力 p_0 与由流体自重所形成的余压力 γh 之和;

(2) 如果自由面上所受的外压力 p_0 为一定值时, 则流体内部某一点的流体静压力 p 与其所在的深度 h 成正比;

(3) 当自由面上所受的外压力等于 1 标准大气压时, 即 $p_0 = p_a$ (p_a 为标准大气压), 则:

$$p = p_a + \gamma h \quad (\text{N/m}^2) \quad (2-4)$$

(4) 公式 (2-3) 适用于不可压缩的静止流体 (流体重度 γ 为常数)。

如果我们在静止的流体中任意取两点如图 2-5 所示, 1 点至自由面的垂直高度为 h_1 , 2 点至自由面的垂直高度为 h_2 , 1、2 两点至选定的基准面 0—0 的垂直高度为 Z_1 和 Z_2 , 由公式 (2-3) 知, 1、2 两点的流体静压力分别为:

$$p_1 = p_0 + \gamma h_1$$

$$p_2 = p_0 + \gamma h_2$$

式中 p_1 ——1 点的静压力, N/m^2 ;

p_2 ——2 点的静压力, N/m^2 ;

p_0 ——流体自由面上的压力, N/m^2 (此处 $p_0 = p_a$)。

由上述两式得 1、2 两点静压力差为:

$$p_1 - p_2 = \gamma (h_1 - h_2)$$

或

$$p_1 - p_2 = \gamma h$$

因

$$h = Z_2 - Z_1$$

所以

$$p_1 - p_2 = \gamma (Z_2 - Z_1)$$

$$\text{即} \quad Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad (2-5)$$

公式 (2-5) 是流体静压力基本方程式的另一种表示形式。

例 2-1 如图 2-6 在盛有同种流体的静止容器中, 若 $h_1 > h_2$, 那么 1、2 两点哪点的静压力大。

解: 根据公式 (2-3) 得:

$$p_1 = p_a + \gamma h_1, \quad p_2 = p_a + \gamma h_2$$

$$\text{因为} \quad p_1 - p_2 = (p_a + \gamma h_1) - (p_a + \gamma h_2) = \gamma (h_1 - h_2) > 0$$

$$\text{所以} \quad p_1 > p_2$$

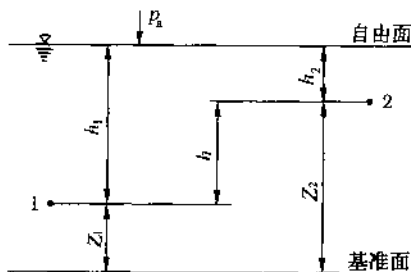


图 2-5 流体中两点的压力

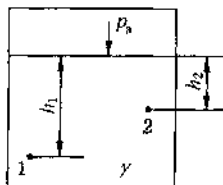


图 2-6 例 2-1 图

即 1 点的流体静压力较 2 点大。

注: 本题也可根据式 (2-3) 说明 (2) 来分析判断。

例 2-2 有一具有水平底面的容器, 试求距容器底 1m 和 5m 高处两点的流体静压力差 (流体为水)。

解: 设以容器底面为基准面:

$$Z_1 = 1\text{m}, \quad Z_2 = 5\text{m}, \quad \gamma = 9810\text{N/m}^3$$

根据式 (2-5) $Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$ 得:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \gamma (Z_2 - Z_1) = 9810 \times (5 - 1) = 39240 \text{ (Pa)}$$

注意:

1. 此例涉及到应用流体静力学基本方程式计算时选基准面的问题, 一般基准面都是选在容器或所求点下面而且是水平的, 至于在容器中或所求点下面什么位置, 要视具体问题而定。

2. 解题前, 要先统一单位后, 才可各有关数值代入公式计算。

例 2-3 求水池中距水面 1m、10m、20m 处的流体静压力, 并绘出侧壁上的流体静压力分布图 (按 $p_0 = 0$ 和 $p_0 = 98100\text{Pa}$ 两种情况计算和绘图)。

解: 取 $\gamma = 9810\text{N/m}^3$, 根据式 (2-3)

(1) 在 $h = 1\text{m}$ 处

$$p_0 = 0 \text{ 时}$$

$$p_1 = p_0 + \gamma h = 9810 \times 1 = 9810 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$p_0 = 98100 \text{ Pa}$ 时

$$p'_1 = p_0 + \gamma h = 98100 + 9810 \times 1 = 107910 \text{ (Pa)}$$

(2) 在 $h = 10 \text{ m}$ 处

$p_0 = 0$ 时

$$p_{10} = p_0 + \gamma h = 9810 \times 10 = 98100 \text{ (Pa)}$$

$p_0 = 98100 \text{ Pa}$ 时

$$\begin{aligned} p'_{10} &= p_0 + \gamma h = 98100 + 9810 \times 10 \\ &= 196200 \text{ (Pa)} \end{aligned}$$

(3) 在 $h = 20 \text{ m}$ 处

$p_0 = 0$ 时

$$p_{20} = p_0 + \gamma h = 9810 \times 20 = 196200 \text{ (Pa)}$$

$p_0 = 98100 \text{ Pa}$ 时

$$p'_{20} = p_0 + \gamma h = 98100 + 9810 \times 20 = 294300 \text{ (Pa)}$$

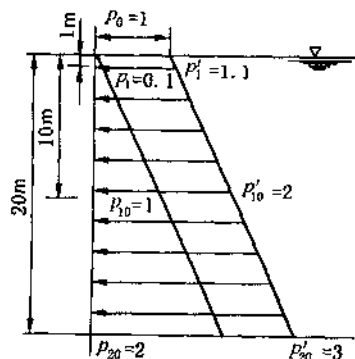


图 2-7 例 2-3 图

将上述计算结果按一定的比例绘出压力分布图如图 2-7 所示。由图可以看出，当池内为均质流体时，作用在水池侧壁上的流体静压力按倾斜直线分布。

第三节 等压面

在静止的流体中，各点的流体静压力并不完全相同，但其中某些点的流体静压力是相等的。若将流体静压力相等的点连成一个面，则这个面叫等压面，即在这个面上各点的流体静压力都相等。由流体静力学基本方程式 $p = p_0 + \gamma h$ 知，若 p_0 、 γ 均为常数时，则流体静压力的大小决定于流体的深度 h 。因此在均质且仅受重力作用的静止流体中，对于同一深度 h 的平面均为等压面。等压面的方程为：

$$p = \text{常数}$$

应用流体静力学基本方程式，结合对等压面这一概念的理解，得出以下几个结论：

(1) 由 $p_0 = p_0 + \gamma h$ 知，若 $h = 0$ ，则 $p = p_0$ ，这就是说流体的自由面是等压面，即自由面上一切点都受到同一个外压力作用。

(2) 由于 $p = p_0 + \gamma h$ 中的 h 可以在 $[0, H]$ 中任意取值 (H 代表流体自由面到容器底的深)，所以在均质且仅受重力作用的静止流体中，各水平面都是等压面。

(3) 容器中的流体如果不是同一种 (或不是均质的)，同一水平面并不一定是等压面，如图 2-8a 所示，图玻璃管中的水与容器中的水是连通的，因此任何一水平面都是等压面。而图 2-8b 中的 A—A 平面虽是水平面，但由于此面通过两种流体 (玻璃管中是水，容器中是油)，因而不是等压面，只是 B—B 及其以下的水平面才是等压面。

例 2-4 有一两端开口的连通器 (两个或两个以上互相连通的容器) 如图 2-9 大直径端装有汞，小直径端装有水，处于平衡状态，已知分界面至小直径端水面的高 $h_1 = 200 \text{ mm}$ ，试求分界面至大直径端水银液面的高 h_2 ($h_2 = h_0$)。

解：通过两种液体的分界面 1—1 延线到大端直径 2—2 面都是等压面。设表面压力为 p_0 (这里 $p_0 = p_a$)，则两侧液体的流体静力学基本方程式为：