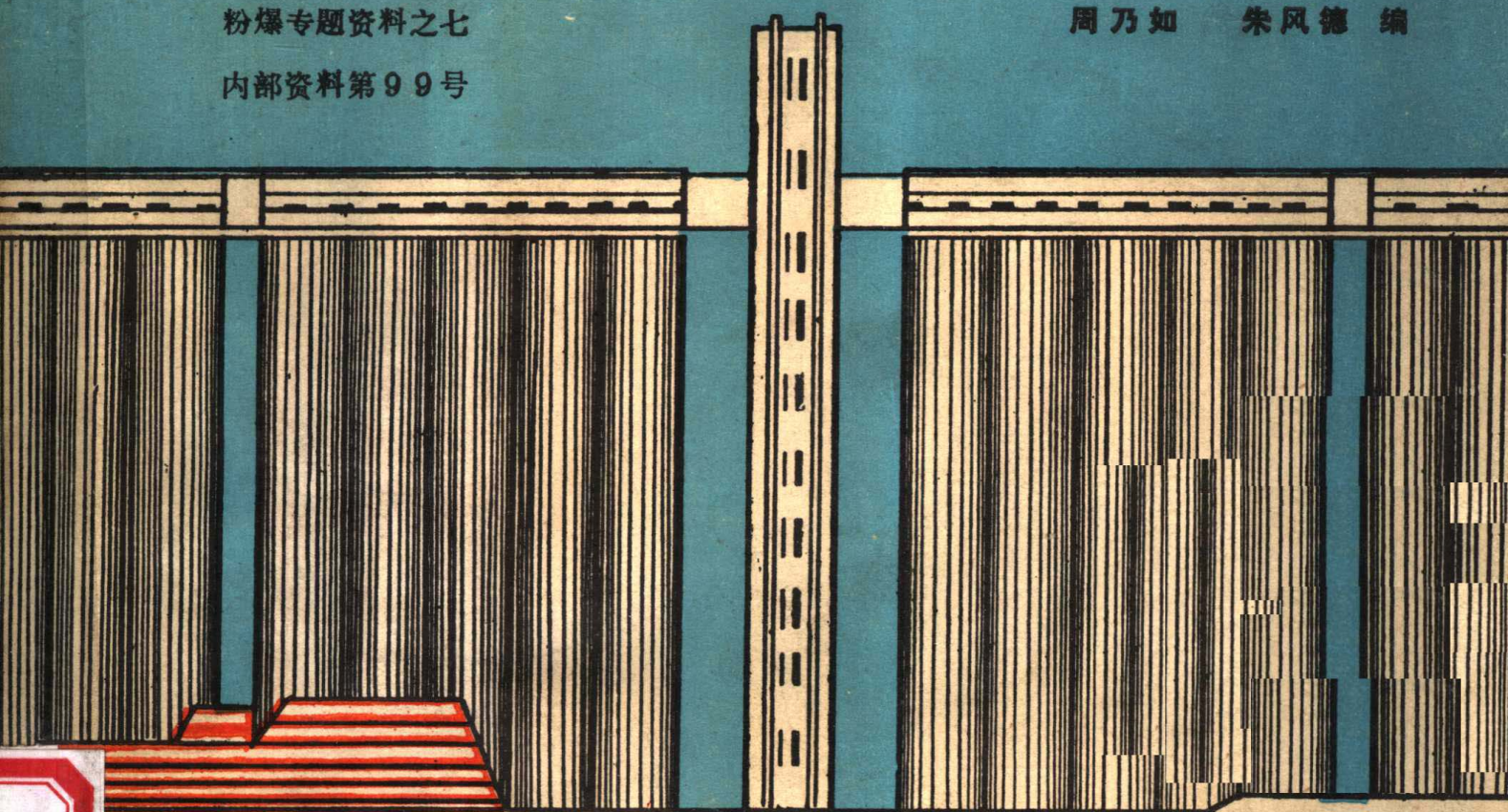


粮仓防爆通风

粉爆专题资料之七

内部资料第99号

周乃如 朱风德 编



交通部黄埔港务局

交通部湛江港务局

商业部郑州粮食科研设计所

LIANG CANG FANG BAO TONG FENG

目 录

第一章	绪 论.....	(1)
第二章	流体力学基本概念.....	(4)
第三章	阻力计算.....	(32)
第四章	流体机械简介.....	(49)
第五章	除 尘.....	(83)
第六章	防止粉尘爆炸.....	(11)
第七章	除尘风网的设计和计算.....	(58)
第八章	气力输送原理.....	(188)
第九章	粮仓积灰清扫、除灰系统.....	(223)
附 录	(1 —27)	(240)

江苏工业学院图书馆
藏书章

第一章 绪 论

§ 1 — 1 粮仓防爆通风的意义

粮仓中的通风意义重大，它对安全储粮、环境保护、粮食处理和安全防爆都具有特别重要的作用。

粮仓中为了实现安全储粮的目的，常常要对粮堆进行通风。粮堆通风是低温储粮中的一种重要的技术措施，它是利用通风机产生的压力将符合要求的外界空气压入粮堆，或将粮堆中的湿热空气吸出来，从而改变粮堆内的空气状态参数，降低粮食的温度和水份，以增进粮食储藏的稳定性。为了防止储粮品质变化需进行预防性通风。对已发热粮食排除余热、降低粮温需进行消除发热通风。对水分高的粮食降低水分需进行干燥通风。将 -10°C 以下的空气通入粮堆，抑制粮食生理过程、害虫、微生物的滋长，需进行冷冻通风。将有毒或窒息性气体通入粮堆消灭害虫，需进行熏蒸通风等。

粮仓中为了达到环境保护的要求，需要设置必要的进、排气通风系统，以确保工作区不受污染，环境清洁，工人身体健康，实现文明生产。

粮仓通风特别需要引起重视的应该是有相应的措施防止粉尘爆炸，近年来我国立筒库的数量逐年增加，而控制粉尘、安全防爆的有关规范没有跟上，防爆技术措施还没有可遵循的国标可查，特别缺少这方面的资料、数据，更少见有关的研究成果或专刊，处于初步摸索阶段，这就给我们提出严肃的任务，如何处理粮仓防爆，如何经济、合理地解决好粮仓防爆的一系列问题，如何实现现代化文明生产，采用何种通风形式可以较彻底地解决粉尘爆炸事故。

以上三方面，都足以表明在粮仓中设置有效的通风装置的重大意义，没有较完善的粮仓通风，对发展粮食工业影响很大，粮仓中通风设备是否完善，也是实现现代化粮仓管理的一项重要标志。

§ 1 — 2 粮仓防爆通风的形式

粮食工业通风的任务是控制生产过程所产生的粉尘，排出余热、余湿，创造良好的粮食加工、储藏、运输过程的生产环境，保护大气不受污染。

为了给人们以舒适、合乎卫生要求的工作条件和达到生产工艺过程的产品质量标准，粮食工业通风工作者要合理地组织工作区内的通风换气，以保证工作区域内的气象条件及清洁度即空气的温度、速度及粉尘浓度。

为满足上述要求而设置的通风系统按下述方法分类。

按通风系统是否使用动力，可分为自然通风和机械通风。

自然通风是由于室内外空气流动速度的不同造成的风压和室内外空气温度差造成的热压使室内外空气得到交换。自然通风可分为无组织的自然通风和有组织的自然通风两种。无组织的自然通风是通过建筑物的围护结构门、窗及其缝隙进行通风换气。而有组织的自然通风是利用建筑物的侧窗、天窗或装设管道进行通风换气。

机械通风是依靠通风机、通风管道来强迫室内空气和室外空气进行交换。以上是第一种分类方法。

第二种分类方法是按通风系统的特征进行分类，可分为进气系统、排气系统和进、排气系统。向室内送入新鲜空气的通风系统称为进气系统。

将室内污浊空气排到室外的通风系统称为排气系统。

工程中常将这两种通风方式联合起来使用，这就构成了进排气通风系统。

第三种分类方法是按通风系统的作用范围分类，可分为全面通风和局部通风。

全面通风是室内全面的进行空气交换，它可以利用自然通风或机械通风来进行。这种方法是向室内送入大量的新鲜空气，来冲淡原室内空气中的有害物，使工作区内有害物浓度不超过卫生标准规定的极限值，从而使室内的空气环境得到改善。

局部通风可分为局部进气和局部排气两大类，它是将新鲜、符合卫生要求的空气直接送到固定区域或工人工作地点，或者将工作地点产生的有害物利用通风装置排出室外，从而保证某个区域的空气环境达到卫生标准所规定的要求。

粮仓工业主要采用的是机械进、排气系统。

粮仓中的通风形式基本可分为环境通风、粮堆通风和防爆通风。

环境通风以进、排气系统特别是某些设备的局部除尘排气为常见，以保证工作区空气合乎卫生标准。

粮堆通风以单管式通风装置、多管式通风装置和地槽通风为主要形式。

防爆通风所耗用的动力较高，要求设施较为完善的通风除尘系统和事故通风装置，并附设多种防爆、泄爆装置等。

§ 1 — 3 粮仓防爆通风展望

八十年代国外粮食仓库的总发展趋势是房式仓库向立筒仓库方向转移，进粮及储粮均以散装散运为主，仅有少量的包装房式仓。在设备的台时产量方面要求高产量、快速度以提高立筒库的利用率。

粮仓现代化要求技术先进，经济效益显著。因此作为现代化粮仓，必须符合下列四点基本要求：

- 1、安全储粮。
- 2、装卸、运输、称重、清理、干燥等主要作业环节实施机械化。
- 3、符合环保要求，实现安全、文明生产。
- 4、经营费用比较低，有明显的经济效益。

现代化粮仓的一个重要标准是符合环保要求、实现安全、文明生产。然而近几十年来国外筒仓爆炸事故日益增多，特别是美国，从设备和技术上采取了多种措施解决防爆、泄

爆问题，加强了对粉尘的控制、提高了监测技术水平，制定了各种防爆规范。即便如此也并没有控制住筒仓的粉爆事故，就世界范围来讲立筒库的粉尘爆炸屡见不鲜，已被人类视为公害。

因此要发展立筒库就必须解决粉爆问题。固然从土建、结构、设备、工艺入手可以解决一些问题，但不能全部解决，因此设置完善的通风除尘和集尘清扫系统是十分必要的。

在技术和设备上应使以下方面得到发展：

制定有关失火和爆炸的标准及其实施办法；建立有关的标准组织，研究机构，建立资料中心和建立资料传输制度。

发展描述和预计失火和爆炸的分析能力；建立对谷物装卸设施和谷物加工工业失火和爆炸有关的、现在和将来的需要作出估价的机构。

围绕增加安全、减少失火和爆炸、减少损失和减少污染而发展粉尘控制计划、技术和设备；发展在紧急状态时使作业停止的监测设施和发展爆炸释压技术和粉尘的处理技术。

建造快速立筒库，改变立筒库的总体布置和尽可能采用效率高、动耗小、耐用、作业安全和操作方便的新设备。

粉尘控制技术基本措施是采取抑阻、封闭和吸风以及相结合的方法。

吸粮机采用布袋式除尘器可解决粉尘大的问题。

火车和汽车在卸料时，应把卸料门开足，控制流量使谷物流动慢而稳定，粉尘散发少。

封闭卸粮棚，把开敞面积减到最小，以减少吸粉尘风量和保证吸尘效果。

吸粮坑的捕获速度应在 $1 \sim 1.27$ 米/秒范围内，才能保证充足的吸风量。

高速汽车卸粮时需用 3 万米³/时以上的吸风量。

全封闭的螺旋输送机和链式刮板输送机必须吸去进料所置换的空气，吸口的位置应使机内空气与料流顺向。

皮带输送机采用可调节的柱塞喂料器一般无尘，可不吸风。

一般可对皮带输送机部分封闭加吸风管，在喂料处加 $3 \sim 6$ 米长的吸风罩效果良好。若多点喂料时，可安装连续吸风罩。卸料端封闭罩下部吸风管处安装一个能自清的收集斗收集粉尘。也可将皮带输送机全封闭。

皮带输送机卸料小车可装拉链式吸风管或L式行走通风排气系统。

斗式提升机可在机头出料口一侧和机座进料口一侧吸风或者采用慢速大斗提升可以减少粉尘。

谷物装载用溜管端装置如收缩管或装载喷管，粉尘抑制器、料垫式装卸器、缓冲箱溜管等。

对于铁路斗车和棚车最经济的粉尘控制系统是使用软管吸风。也可将吸罩加在车顶部或侧部。

秤斗和秤的上、下仓的粉尘必须加以控制。现在广泛采用交叉吸风方法，使被谷物置换的空气可以回流到谷物进来的区域（从下仓回到上仓），因此吸风速度可降低到 $5.1 \sim 7.6$ 米/秒而不产生背压足以吹动密尘装置。在某种情况下，上仓和秤、秤和下仓共同使用一根大的垂直排气管，供空气在秤和上、下两仓之间自由流动，控制粉尘散发而不

使秤斗中有任何压力。在垂直排气管上面有吸风罩，罩离管端有100~200毫米的空隙；这样，排气管中就不会产生负压，但能吸走任何可能散发出来的粉尘。秤和垂直管连接的排气管上可安装一个自动插板阀，和上仓向喂料秤的出料阀联锁，当上仓出料阀关闭时，秤的排气阀也关闭，这就可以防止秤失灵。

为了防止粉尘堆积应尽量采取封闭结构的机械设备，防止粉尘散发又必须使机内保持一定的负压。最根本的防止粉尘堆积的办法是严格的定时清扫，要采用真空式清扫装置。

粉尘应作合理的处理，谷物粉尘不返回到谷物中去时必须送到粉尘仓储存起来，在粉尘仓下面要考虑能安装制粒设备，制粒后可储存90天没问题。按卸运次数考虑仓容，仓出口必须设有卸料器（多螺旋卸料器、活化器和流态化仓底）防粉尘结拱，有时还需要加辅助式空气垫。粉尘输送可采用螺旋输送机、气力输送和车辆散运或包装运输。

立筒库粉尘控制的能耗占总能耗的20—25%，除尘器和风机最好放在立筒库外面。

增加安全和减少爆炸损失的设施必须齐全。监测系统可以灵敏地予报险情，迅速排除危险，完成上述任务可装料位监测、速率监测、位置监测、荷载监测、温度监测、流动和阻塞监测、压力监测、时间监测和机械设备的危险动作监测。采用微型计算机可以在连续的基础上监测全部安全装置以控制紧急情况。

展望粮仓现代化前景，粮仓防爆通风是必须解决的技术问题，而且是一个复杂而细致的问题，必须充分调动有关方面力量，协力攻关，较好的控制粉尘爆炸，实现粮仓的现代化管理。

第二章 流体力学基本概念

粮仓的通风除尘和气力输送是利用空气运动来实现的，因此，我们在学习粮库防爆通风这门课程时，将经常用到有关空气运动的一些基本概念。

气体和液体统称为流体，它们的物理性质和运动规律有很多相同之处，液体运动的基本规律在一定的条件下对空气也是适用的，本章内容除了介绍有关气体的一些物理性质外还将介绍有关流体力学方面的一些基本概念和主要定律。

§ 2—1 流体的物理性质

为了了解流体运动的一些基本特性，现在我们先介绍有关流体运动的几个基本参量。

一、重度、密度和比容

1、流体单位体积（例如1立方米）的重量称为流体的重度。我们用符号 γ 表示，它

的单位为公斤/米³ (工程单位制)

若流体的重量为G公斤, 体积为V立方米, 则

$$\text{流体的重度 } \gamma = \frac{\text{气体的重量 (G)}}{\text{气体的体积 (V)}} \quad (\text{公斤/米}^3) \quad (2-1)$$

2、流体单位体积的质量称为密度。我们用符号用 ρ 表示。它的单位为公斤·秒²/米⁴。(工程单位制)

若流体的质量为M公斤·秒²/米, 体积为V米³, 则流体的密度

$$\text{流体的密度 } \rho = \frac{\text{流体的质量 (M)}}{\text{流体的体积 (V)}} \quad (\text{公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4) \quad (2-2)$$

因为流体的质量和重量之间有如下关系:

$$M = \frac{G}{g}$$

式中 g ——重力加速度 $g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$

因此得流体的重度 γ 和密度 ρ 的关系

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma}{g} \quad (2-3)$$

在工程上, 一般经常用重度。如在4℃时的水, 1米³的重量为1000公斤, 所以它的重度为1000公斤/米³。在标准状态下的空气(20℃ 736毫米水银柱), 1米³空气的重量为1.2公斤, 则空气在标准状态时的重度为1.2公斤/米³。

3、流体每单位重量(例如1公斤)所占有的体积(米³)称为比容。用符号U表示。它的单位为米³/公斤(工程单位制)

流体的比容可用下式表示

$$U = \frac{V}{G} \quad (\text{米}^3 / \text{公斤}) \quad (2-4)$$

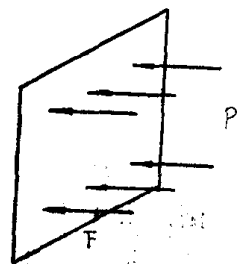
显然, 它与重度的关系为

$$U = \frac{1}{\gamma} \quad (2-5)$$

二、压强

单位面积上受到的压力叫做压强。如果用P表示作用在F面上的压力, 则在F面所受到的平均压强p为(图2-1)

$$p = \frac{P}{F} \quad (2-6)$$



(图2-1) 压强的计算

它的单位用公斤/米²，或毫米水柱来表示。

1 (标准大气压) = 10336 (毫米水柱)

1 (工程大气压) = 10000 (毫米水柱)

1 (毫米水柱) = 1 (公斤/米²)

在粮仓防爆通风中所遇到的压强并不大，故常用的压强单位为公斤/米² (或毫米水柱)。

压强有两种计算方法：当计算压强以完全真空为基准算起，即完全真空的压强为零，用这种方法计算的压强称为绝对压强。如果计算压强以当地大气压为基准算起，则这种压强称为相对压强。相对压强的数值低于大气压强用负值表示；高于大气压强用正值表示，绝对压强总是正值。

绝对压强和相对压强的关系可用图 (2-2) 表示

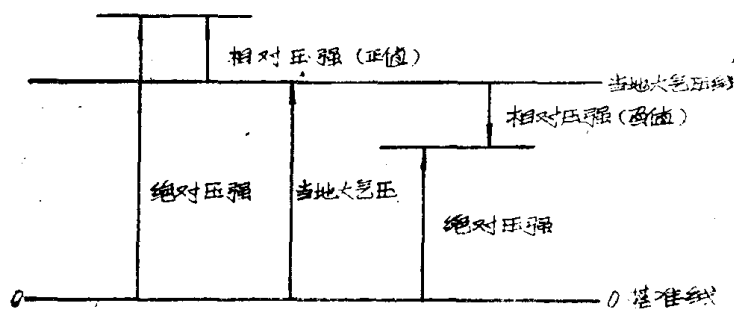


图 (2-2) 绝对压强和相对压强的关系

在通风工程上，空气压强计算一般都是指相对压强。

三、温度

在工业上，通常采用摄氏温标，以字母 $t^{\circ}\text{C}$ 表示。还有一种绝对温度，以 $T(\text{K})$ 表示。两者数量的关系。

$$T(\text{K}) = 273 + t^{\circ}\text{C} \quad (2-7)$$

对理想气体三个基本参量之间的关系可用一个方程式表示。称为理想气体状态方程式。

$$PV = GRT \quad (2-8)$$

式中：G：空气的重量。(公斤)

V：G公斤气体所占的体积。(米³)

P：气体的绝对压强。(公斤/米²)

T：气体温度，以绝对温标表示。(K)

R：气体常数，对于干燥空气 $R = 29.3$ 公斤·米/公斤·度

例：求 1 个标准大气压，在 20°C 时空气的重量。

根据气体状态方程式

$$PV = GRT$$

$$\text{可写为 } p = \frac{G}{V} RT = \gamma RT$$

$$\gamma = \frac{p}{RT}$$

$$= \frac{10336}{29.3(273 + 20)} = 1.205 \text{ 公斤/米}^3$$

从上式可见，空气的重度是随着压强和温度的变化而变化的。但是，粮仓防爆通风中除尘和气力输送管道内空气压强和温度的变化只在一个比较小的范围内变化。为计算简化起见，我们常把空气的重度看作常数。在通风工程上，常取 $\gamma = 1.2$ 公斤/米³。

四、流体的粘性

粘性是流体质点发生相对运动时所显示出来的内摩擦力。粘滞性只有当流体发生运动时才表现出来。流体在管道中运动时的阻力正是由于流体具有粘性所引起的。

当气体在管道中流动时，通常紧贴在管壁上气体质点的速度为零，愈近管中心，速度越大。如果把管道中靠近管壁的气流分成若干层，分别以 I II III 表示，如图（2—3）并假设他们都是平行的，则第二层的速度比第 I 层大而比第 III 层小。

我们以 n 线表示气体某一断面，它垂直于气体的流动方向。因为气体各点的流速不同，在流体断面上每点的流动方向上取一线段表示该点的速度 u ，在它们的末端连接起来的曲线图（2—3）就是速度分布曲线。运动较快的流体层可带动相邻的运动较慢的流体层。而运动较慢的流体层又阻滞了相邻的运动较快的流体层，在层与层接触面之间，便产生了摩擦力。

实验证明，流体内摩擦力与

- 1、压强的大小无关。
- 2、这些层间的接触面的大小成正比。
- 3、层间相对速度的大小成正比。
- 4、流体的性质有关。

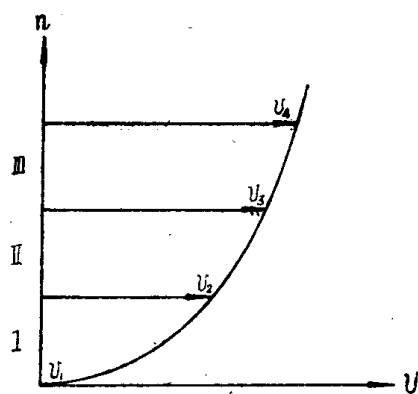
它的数字表达式如下：

$$T = \mu f \left| \frac{\Delta u}{\Delta n} \right|$$

（2—9）

式中：T：两层流体接触面上的内摩擦力。

f：两层流体之间的接触面的面积。



图（2—3）速度分布曲线

$\frac{\Delta u}{\Delta n}$: 速度梯度, 法线方向上, 单位长度上的速度变化值。

μ : 动力粘性系数。与流体的性质有关。

标准空气的动力粘滞系数

$$\mu = 1.83 \times 10^{-6} \text{ 公斤} \cdot \text{秒} / \text{米}^2$$

为了在工程上计算方便, 往往用 μ 和流体密度 ρ 的比值, 用符号 ν 表示这个比值, 称为运动粘滞系数。

$$\nu = \mu / \rho \quad (\text{厘米}^2 / \text{秒}) \quad (2-10)$$

标准空气的运动粘滞系数

$$\nu = \frac{1.83 \times 10^{-6}}{0.12} = 15 \times 10^{-6} \text{ 米}^2 / \text{秒} \quad (2-11)$$

粘滞系数是随着温度的变化而改变的。

§ 2—2 流体静力学基本方程式

从本节开始, 我们将介绍有关流体的几个基本方程式。下面先讲流体静力学基本方程式。

流体在所受各力的作用下处于平衡状态时称为平衡流体。

处于平衡状态时的流体内部压强有两个重要性质。

1、流体内部静压强永远垂直于流体的受压面, 并指向流体内部。即沿作用面的内法线方向。

2、流体内部任何方向上都有压强, 并且在同一深度处, 各个方向上压强的大小都是相同的。

如图 (2—4) 为一盛水槽, 现考虑在其中取出一个高度为 $(z_2 - z_1)$ 底面积为 A 的圆柱体。

则所取出的圆柱体的重量为 $\gamma (z_2 - z_1) A$

在圆柱体顶面上所受的压强为 p_2 , 整个

顶面 A 上所受的总压力为 $p_2 A$, 方向向下。

在圆柱体底面上所受的压强为 p_1 , 整个底面 A 上所受的总压力为 $p_1 A$, 方向向上。

流体在平衡条件下, 流体上所受各力的关系应满足下式

$$p_2 A + \gamma (z_2 - z_1) A = p_1 A$$

$$\text{或 } p_1 - p_2 = \gamma (z_2 - z_1)$$

$$(2-12)$$

上式称为流体的平衡方程式, 它表明在流体内部任何两个面上的压强差的大小等于这两个液面的高度差和液体重度的乘积。这就是我们下面要讲到 U 形管压力计测量压强的原理。

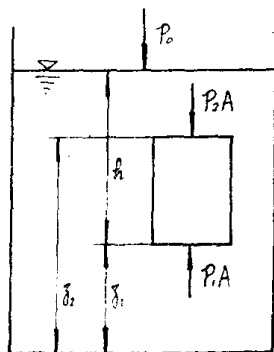


图 (2—4) 流体内部的压强

如果取 z_2 在流体的自由表面上, 则 $z_2 - z_1 = h$, 则 $P_2 = P_0$ 。(液体表面上的大气压)
(1—12)式可写成

$$P_1 - P_0 = \gamma h$$

$$P_1 = P_0 + \gamma h$$

(2—13)

因为自由表面上的大气压强 P_0 , 一般看作常数。因此式(1—13)说明在重力作用下处于静止状态的流体内部某一水平面上的压强的大小只同流体的重度和所在位置的高度有关。

§ 2—3 流体的连续方程式

我们在研究连续方程式以前, 先介绍一下流量的概念。流量是单位时间内流过风管某一横截面的空气数量。它可以用单位时间内通过风管某一横截面的流体体积来表示, 称为体积流量, 用 Q 来表示, 单位用米³/时或米³/秒。也可以用通过流体重量来表示, 称为重量流量, 用 Q_v 来表示, 单位用公斤/秒, 显然体积流量 Q_v 和重量流量 Q 的关系为

$$Q_v = \gamma Q \quad (2—14)$$

式中 γ : 空气的重度。

假设风管的横截面的面积为 f 米², 如图

(2—5)空气通过该截面的平均速度的 $\bar{u}$ 。

经 t 秒后, 位于截面1—1上的空气质点将移至相隔为 S 距离的2—2截面处, 在 t 秒内, 通过1—1截面的空气体积

$$V = f \cdot S$$

风管内的体积流量 Q_v 为

$$Q_v = \frac{V}{t} = f \frac{S}{t}$$

$$Q_v = f \bar{u}$$

(2—15)

式中: Q_v 的单位为米³/秒。

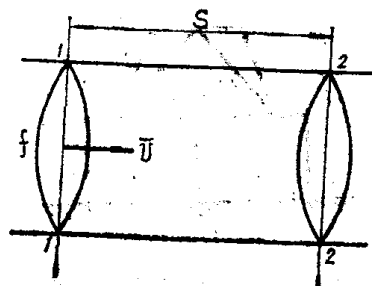
可见, 通过风管某一横截面上的体积流量等于风管的横截面面积和空气平均速度的乘积。

在一截面面积不相等的风管中, 空气在作稳定流动时(即在某一截面处空气的速度压力等物理量不随时间而变化)我们在其垂直于管轴方向上任取两截面1—1和2—2。该两截面面积分别为 f_1 及 f_2 ,

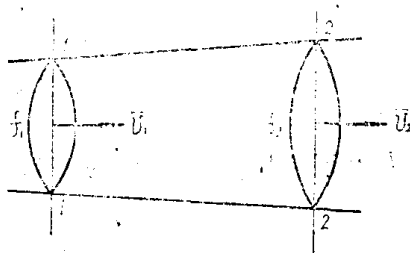
空气流经该处的平均速度为 $\bar{u}_1$ 及 $\bar{u}_2$ 。见

图(2—6)。

则可知通过1—1及2—2处的体积流量分别为



图(2—5)空气的体积流量



图(2—6)流量连续原理

$$Q_{v1} = f_1 \bar{u}_1$$

$$Q_{v2} = f_2 \bar{u}_2$$

如果不考虑因压强而引起的体积变化, 根据物质不灭定律, 可得到

$$Q_1 = Q_2$$

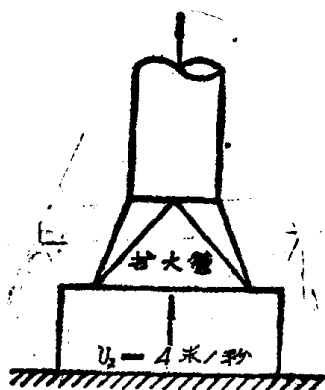
$$\text{即 } f_1 \bar{u}_1 = f_2 \bar{u}_2 \quad (2-16)$$

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\bar{u}_2}{\bar{u}_1} \quad (2-17)$$

上式称为流量连续方程式。它说明在同一管路中, 任何截面处流体的流速与该处风管的截面面积成反比。

$$Q = 360 \text{ 米}^3/\text{时}$$

$$\bar{u}_1 = 12 \text{ 米/秒}$$



例: 设有一设备, 在其顶部准备装一圆形吸风管, 见图(2-7), 要求的吸风量 $Q = 360 \text{ 米}^3/\text{时}$, 风管中风速规定 $\bar{u}_1 = 12 \text{ 米/秒}$, 为了防止机器中物料被吸出, 吸风管和机器联接处的风速不得超过 $\bar{u}_2 = 4 \text{ 米/秒}$, 为此必须做一节扩大管, 使其小头与风管连接, 大头为正方形与设备相联, 试确定此扩大管的小头直径和大头的边长?

解: 根据

$$Q = f \cdot \bar{u} = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \bar{u}$$

图(2-7)连续方程的应用

$$\text{已知 } Q_v = 360 \text{ 米}^3/\text{时} = 0.1 \text{ 米}^3/\text{秒}$$

$$\bar{u}_1 = 12 \text{ 米/秒}$$

小头直径D根据上式可写成如下形式, 并把已知数代入

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_v}{\bar{u}_1}} = 0.103 \text{ 米}$$

由于风管中的风量亦即为机器中吸出的风量根据流量公式(2-15), 扩大管大头的面积应为

$$f_2 = \frac{Q_v}{\bar{u}_2} = \frac{0.1}{4} = 0.025 \text{ 米}^2$$

因为大头为正方形, 所以它的边长

$$a = \sqrt{f_2} = 0.158 \text{ 米}$$

§ 2-4 流体伯努利方程式

流体能量守恒方程式又叫伯努利方程式, 它揭示出流体具有的机械能沿管道各断面的

变化规律，应用它可以解决工程上许多问题。

推导能量守恒方程式时，须作两点假设：

1、将空气近似看作为不可压缩流体，它的能量主要表现为机械能，其它形式的能量忽略不计。

空气运动完全服从连续方程，即有1米³空气进入系统，也必有1米³空气从系统排出。所以，先以1米³空气做为计算的基准。

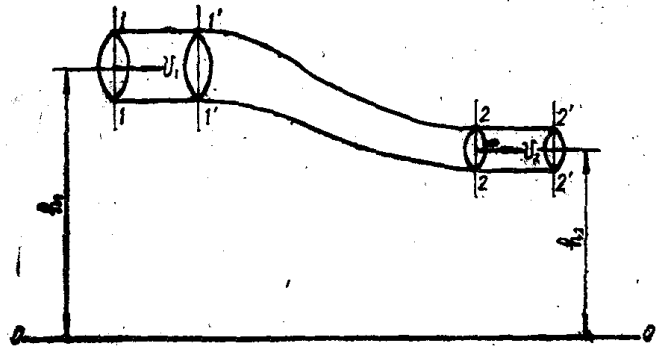


图 2—8 伯努利方程式示意图

2、然后，再考虑将V米³空气由断面1—1进入，由断面2—2排出。这时空气带进、带出的机械能有下面几项：势能、动能、静压能。具体详见表2—1。

表 2—1

名 称	含 义	公 式	
		对V米 ³ 空气	对1米 ³ 空气
势 能	空气受重力作用，在不同高度具有不同的位能按规定的基准面确定。	进入 $Gh_1 = \gamma \cdot V \cdot h_1 = V \cdot Z_1$ 带出 $Gh_2 = \gamma \cdot V \cdot h_2 = V \cdot Z_2$	$Z_1 = \gamma \cdot h_1$ $Z_2 = \gamma \cdot h_2$
动 能	空气以一定速度作定向运动时所具有的动能。	$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \frac{G}{g} v^2$ $= \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma \cdot V}{g} \cdot v^2$	进入 $H_{动1} = \frac{\gamma \cdot v_1^2}{2g}$ 带出 $H_{动2} = \frac{\gamma \cdot v_2^2}{2g}$
静 压 能	流体具有静压能。它是分子热运动的结果。风机对空气做功则转变为静压能。	$W = F \cdot S = H_{静} \cdot f_1 \cdot \frac{V}{f_1}$ $= H_{静} \cdot V$	进入 $H_{静1} = \frac{V}{V} \cdot H_{静1}$ 带出 $H_{静2} = \frac{V}{V} \cdot H_{静2}$

如果忽略管道阻力损失，且空气不与外界交换能量，则根据能量守恒定律得出：空气流经管道时输入与输出的机械能相等。即：

$$Z_1 + H_{动1} + H_{静1} = Z_2 + H_{动2} + H_{静2} \quad (2-18)$$

公式(2—18)为伯努利方程式。

根据动能定理也可以推导出伯努利方程式。在图(2—8)中，断面1—1和2—2间的流体段经过t秒钟后，移动了一段距离，达到了新的位置1'—1'和2'—2'之间，

这时流体所具有的动能发生了变化,变化的数量 $\Delta H_{\text{动}(1-2)}$ 应等于作用在流体段上的外力在同一时间 t 内所作的功 $W_{\text{外}}$ 。即:

$$\Delta H_{\text{动}(1-2)} = W_{\text{外}}$$

因为断面1—1和2—2之间流体段动能没有变化,所以断面1—1和2—2之间流体移至断面1'—1'和2'—2'间的动能变化与断面1—1和1'—1'之间流体段移至2—2和2'—2'之间的动能变化是相等的。故:

$$\Delta H_{\text{动}(1-2)} = \frac{1}{2} m_2 u_2^2 - \frac{1}{2} m_1 u_1^2$$

$$\text{又 } \because m_1 = m_2 = \frac{Gt}{g}$$

$$\therefore \Delta H_{\text{动}(1-2)} = \frac{1}{2g} G \cdot t \cdot u_2^2 - \frac{1}{2g} G \cdot t \cdot u_1^2$$

综合外力所做的功有以下三种:

1、重力所作的功等于流体段重量乘以重心沿垂直方向的位移:

$$W_1 = Gt(h_1 - h_2)$$

2、作用在流体段侧面的静压强,由于其作用方向与流体段运动方向垂直,所作之功等于零。即: $W_2 = 0$

3、作用在流体段两端的静压强所作的功:

$$W_3 = H_{\text{静}1} \cdot f \cdot u_1 \cdot t - H_{\text{静}2} \cdot f_2 \cdot u_2 \cdot t$$

$$\because u_1 \cdot f_1 = u_2 \cdot f_2 = Q = \frac{G}{\gamma}$$

$$\therefore W_3 = H_{\text{静}1} \times \frac{G}{\gamma} t - H_{\text{静}2} \frac{G}{\gamma} t$$

合并所有外力所做的功:

$$W_{\text{外}} = Gt(h_1 - h_2) + 0 + H_{\text{静}1} \frac{G}{\gamma} t - H_{\text{静}2} \frac{G}{\gamma} t$$

如前所述, $\Delta H_{\text{动}(1-2)} = W_{\text{外}}$

$$\therefore \frac{1}{2g} Gt u_2^2 - \frac{1}{2g} Gt u_1^2 = Gt(h_1 - h_2) + H_{\text{静}1} \frac{Gt}{\gamma} - H_{\text{静}2} \frac{Gt}{\gamma}$$

经移项整理后得:

$$\frac{H_{\text{静}1}}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} + h_1 = \frac{H_{\text{静}2}}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h_2$$

又 $\because Z = \gamma \cdot h$

$$\therefore H_{\text{静}1} + \frac{\gamma \cdot u_1^2}{2g} + Z_1 = H_{\text{静}2} + \frac{\gamma \cdot u_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2-19)$$

由于断面1—1和2—2是任选的,故上式又可写成:

$$H_{\text{静}} + \frac{\gamma \cdot u^2}{2g} + Z = \text{常数}$$

公式(2-19)也为伯努利方程式。由于空气位能很小,可以忽略不计,公式

(2-18) 可简化为:

$$\frac{\gamma \cdot u_1^2}{2g} + H_{\text{静}1} = \frac{\gamma \cdot u_2^2}{2g} + H_{\text{静}2} \quad (2-20)$$

动压强与静压强之和称为全压强 $H_{\text{全}}$ ，习惯上又称全压力，公式(2-20)式可写成为:

$$H_{\text{全}1} = H_{\text{全}2} \quad (2-21)$$

然而，对实际空气而言，它在流经管道时是具有损失的，所以实际空气的伯努利方程式可写成:

$$\frac{\gamma \cdot u_1^2}{2g} + H_{\text{静}1} = \frac{\gamma \cdot u_2^2}{2g} + H_{\text{静}2} + H_{\text{损}1-2} \quad (2-22)$$

如果，风机对系统空气做功，且空气流经管道又具有损失时，则公式(2-22)为:

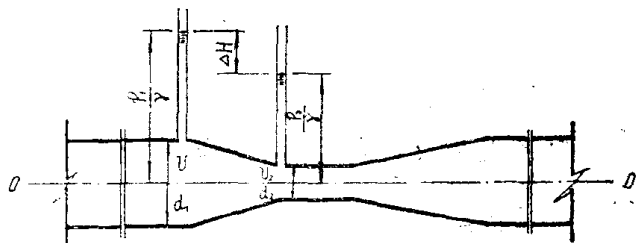
$$H_{\text{全}1} + H_{\text{风机}} = H_{\text{全}2} + H_{\text{损}1-2} \quad (2-23)$$

§ 2—5 伯努利方程的应用

应用伯努利方程，能够解决很多工程问题，比如流量和流速的测量，就是伯努利方程典型的应用实例。

一、文丘里流量计

文丘里流量计(图2-9)是由两个圆锥形管段，用一个圆柱形管段连接而成，圆锥形的管段的两端与欲测量的管段连接，而圆柱形管段(又称喉管)的直径较测量管段小得多，在1—1断面与2—2喉部断面设置测压管，通过读出测压管的数值即可换算成通过的流量而达到测流量的目的。



图(2-9)文丘里流量计示意图

首先列出1—1和2—2两断面的伯努利方程式:

$$h_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = h_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h_w$$

式中:

$$h_1 = h_2 = 0$$

$$\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} = \Delta H$$

$$h_0 \approx 0$$

故:
$$\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

$$\Delta H = \frac{1}{2g} (v_2^2 - v_1^2) \quad (2-24)$$

再根据连续方程式可建立下式:

$$v_1 \frac{\pi}{4} d_1^2 = v_2 \frac{\pi}{4} d_2^2$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

则: $v_2 = \frac{d_1^2}{d_2^2} v_1$ 代入 (2-24) 式得:

$$\Delta H = \frac{1}{2g} v_1^2 \left(\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1 \right)$$

故:

$$v_1 = \frac{\sqrt{\frac{2g\Delta H}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}}}{1}$$

$$Q = \frac{\pi d_1^2}{4} \sqrt{\frac{2g\Delta H}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}}$$

式中: 令

$$K = \frac{\pi d_1^2}{4} \sqrt{\frac{2g}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}} = \text{常数。}$$

所以

$$Q = K \sqrt{\Delta H}$$

考虑到流量计内的摩擦阻力及其它因素, 实际的流量与上式计算结果略有出入, 即:

$$Q = \mu K \sqrt{\Delta H} \quad (2-25)$$

式中: μ ——流量系数, 该系数因流量计结构而异。对新的流量计 $\mu = 0.985$, 对旧的流量计 $\mu = 0.98$ 。

二、毕托管测速仪

毕托管是测量流速用的一种仪器。将毕托管头对准气流方向, 当气流前进至毕托管咀时, 气流受阻形成停滞, 此处气流速度降为零, 迫使气流沿管咀绕行, 在图(2-10)中假设停滞点的压强为 P_2 , 而距 2—2 断面较近的 1—1 断面压强为 P_1 , 且未经扰动的气流速

度为 u_1 ，根据伯努利方程式得：

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + 0$$

$$P_2 = P_1 + \frac{u_1^2}{2g} \gamma$$

$$\text{故： } u_1^2 = \frac{2g(P_2 - P_1)}{\gamma}$$

$$u_1 = \sqrt{\frac{2g(P_2 - P_1)}{\gamma}}$$

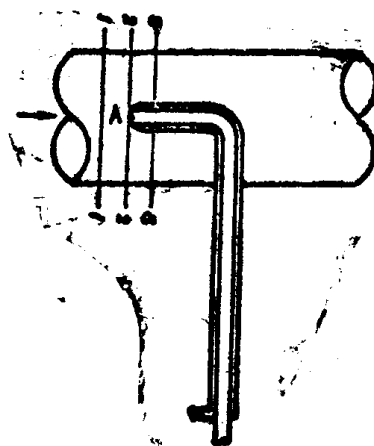


图 (2—10) 毕托管测试原理图

由此可见只要能测出 P_1 与 P_2 的值即可得速度值。将毕托管头开约 1~3 毫米的小孔并以铜管与尾部相通，则可将 P_2 的压强传递至尾部反映在测压计上，所得的数值可近似认为是 1—1 断面的全压，若在毕托管外套的铜管侧壁均匀开 4~8 个小孔或两道狭缝，可以将其静压能由内、外铜管构成的环形空间传递出来并反映在测压计上，若将全压、静压同时显示在一个测压计上，则所得读数即为 $(P_2 - P_1)$ ，可由此换算出管中流速。以上即为毕托管的工作原理，它是伯努利方程的典型应用实例。因为测全压是由毕托首先发现，测静压由普朗特发现，所以这种测速管又叫毕托—普朗特管。

§ 2—6 直长管流中的压强分布

管流的形式是多种多样的，首先以最简单的直长空气管道为对象，运用伯努利方程式分析压强沿管道长度的分布，见图 (2—11)。

一、压强分布

1、吸气管中的压强分布

在 1—1 与 0—0 断面间以相对压强表示：

因为 $0 = -H_{\text{静}0} + H_{\text{动}0}$

所以 $H_{\text{静}0} = +H_{\text{动}0}$

该式表明吸气口静压为负值，它的大小与动压值相等，并使空气被连续吸入（忽略进口损失）。

在 1—1 与 2—2 断面间，以相对压强表示：

$$0 = -H_{\text{静}2} + H_{\text{动}2} + H_{\text{损}1-2}$$

故： $H_{\text{静}2} = H_{\text{动}2} - H_{\text{损}1-2}$

由此可见，吸气段静压将完成克服管道阻力损失并维持管道内具有一定风速两任任务。据上式可得：

$$H_{\text{损}1-2} = H_{\text{静}2} - H_{\text{动}2} = -(-H_{\text{静}2} + H_{\text{动}2}) = -(-H_{\text{全}2})$$