

中等专业学校交流讲义

工业化学

下 册

上海市化学工业学校等编



中国工业出版社

PDC

第十八章 化工机械基础

前 言

一般化学工程可分两部份：即互相配合的单元操作和单元作业。单元作业是研究化学变化的关系，如燃烧、氧化、中和、电解、缩合反应、芳构化、异构化等；单元操作是研究物理变化的关系，包括化学工程的全部工业操作。各种化学工业生产过程，不可缺少地是由一些基本的单元操作或实现这些操作的机械串联而成，正如一切机械终不外乎由齿轮、曲轴、钢板、T形铁、螺絲、螺母等等组成一样。我们若对这些基本的组成及运动机构研究清楚后，即可了解各种复杂的机器。对于各种化工厂亦是如此，我们对各厂的复杂生产过程，可概括出它们组成的基本操作，我们更容易理解由这些基本操作组成的各种各样的化工生产。

实验室的任何制备实验，不外乎由研磨、过滤、蒸馏、蒸发、结晶……等单元的基本操作组成。化工厂生产过程所应用的操作亦是相似的，一般可列成几个大类，而各类之中则由各种化工机械进行具体操作，茲将其重要者列表如下：

- 一、液体及气体物料的输送 泵、管等。
- 二、固体输送 皮带、斗式运输机等。
- 三、固体物料的粉碎 粉碎机、压碎机等。
- 四、液体非均一系的分离 过滤、沉析、离心机等。
- 五、物料的搅拌 搅拌机等。
- 六、气体非均一系的分离 沉降、旋风分离器、电沉器等。
- 七、加热及冷却 热交换器、加热器。
- 八、蒸发及结晶 蒸发器、结晶器。
- 九、干燥操作 干燥器。
- 十、蒸馏 蒸馏塔。

十一、吸收 吸收塔。

十二、萃取 浸取。

十三、特种操作 如压缩,冷冻等。

这些单元操作在实验室中我们是很熟悉的,但在化工厂中如何进行,择其重要者分别讨论之,在未叙述之前,下面三点必须注意的:

1. 各种工业生产过程虽均由一些单元操作组成,但不同工业所包括的单元操作有多有少,某工厂是这几种,另一工厂可能是另几种。

2. 每一工业所有的单元操作亦有其特殊性,例如水泥工业与颜料工业虽都包含“磨碎”这项单元操作,但两厂中决不是一样的。

3. 各种单元操作组合的次序在各种工业生产中是不同的。

第一节 气体和液体的输送

流体输送在化工厂中占有极重要的地位,例如加热用蒸汽,压缩空气,冷却用水,流体的原料与成品的输送等均直接影响各车间的生产,如连续的生产必须有连续的输送。下面为用于输送流体的主要机械和机件。

一、管及管件

管子是原料成品及蒸汽等流体输送工具的重要组成部分,它在化学工厂中地位的重要,不亚于人体的脉络。工厂中的压缩空气、低压空气(真空)、以及一切液体和气体的输送,都有赖于管子及其他辅助机件,所以管子是任何化学工厂中不可缺少的基本机件。

管子的种类就其构造而言,可分为有缝管与无缝管两大类。常用的管,由金属长条卷成筒形,再将其焊接(或用其他方法)而成者称为有缝管;但输送高压流体时,则须用无缝管。无缝管系直接铸

成,或于金属受热时拉成。

若从管子所用材料来分类,则可分为铸铁管、钢管、铜管、铅管、硅铁管、玻璃管、橡皮管、石英管、洋灰管等,可就所输送的物料的化学性质及物理性质等选用。用途最广的铸铁管和钢管它们的特点和规格如下。

(一)铸铁管 铸铁管常用作埋于地下的给水总管、煤气管及污水管等,其优点为价廉而耐蚀性较钢为强,但由于其笨重而强度低,故不可用在有压力下输送有害的或爆炸性的气体,亦不宜用于高温如输送蒸汽管路。

铸铁管有三种形式:承插式、单端法兰式及双端法兰式。其中承插铸铁管规格如表 18-1 所示。

表 18-1 承 插 式 铸 铁 管 规 格

内径(毫米)	管厚(毫米)	有效长(毫米)	每根重量(公斤)
75	9	3,000	58
100	9	3,000	75.5
150	9.5	3,000 (4,000)	— (149)
200	10	4,000 (5,000)	207 (254)
250	10.8	4,000 (5,000)	277 (340)
300	11.4	4,000 (6,000)	348 (509)
350	12	6,000	623
400	12.8	6,000	760
450	13.4	6,000	889
500	14	6,000	1,033
600	15.4	6,000	1,355
700	16.5	6,000	1,691
800	18	6,000	2,100
900	19.5	4,000	1,760
1 000	20.5	4,000	2,060

(二)钢管 钢管种类甚多,以钢种分,可分为普通钢管与合金钢管两种。以制造方法分,可分为焊接钢管和无缝钢管。

1. 水煤气管 水煤气管多为用低碳钢制的焊接钢管。常用作水管、暖气管、煤气管、压缩空气管和真空管路。当压力在 6 大气压表压以下时,可用作蒸汽支管及凝液管路。也可用于输送无

侵蚀性和非易燃、易爆的介质。水煤气管分为普通(工作压力为 10 大气压表压)与加强(工作压力为 16 大气压表压)两级,其供应长度为 4~7 米。由于此种管常采用螺纹连接,因此外径有一定标准。其规格见表 18-2。水煤气管中镀锌的称为白铁管,不镀锌的则称为黑铁管。水煤气管的规格均以其公称直径为准。

表 18-2 水煤气管的规格

公称直径		外 径 (毫米)	壁 厚 (毫 米)		每吋螺絲數
(吋)	(毫米)		普 通 級	加 强 級	
$\frac{1}{2}$ "	8	13.50	2.25	2.75	—
$\frac{3}{4}$ "	10	17.00	2.25	2.75	—
$\frac{1}{2}$ "	15	21.25	2.75	3.25	14
$\frac{3}{4}$ "	20	26.75	2.75	3.50	14
1"	25	33.50	3.25	4.00	11
1 $\frac{1}{4}$ "	32	42.25	3.25	4.00	11
1 $\frac{1}{2}$ "	40	48.00	3.50	4.25	11
2"	50	60.00	3.50	4.50	11
2 $\frac{1}{2}$ "	70	75.50	3.75	4.50	11
3"	80	88.50	4.00	4.75	11
4"	100	114.00	4.00	5.00	11
5"	125	140.00	4.50	5.50	11
6"	150	165.00	4.50	5.50	11

2. 无缝钢管 无缝钢管的特点是质地均匀、强度高,因而壁厚可以较薄。普通无缝钢管又分为冷拔管与热轧管两类;此外,尚有特殊用途的厚壁无缝钢管、锅炉无缝钢管以及石油工业专用的各种无缝钢管等。

目前生产上常用的碳钢普通无缝钢管规格见表 18-3。

无缝钢管广泛用于各种压力下输送物料,如:蒸汽、高压水、气体的管路;可耐高温达 435°C。逾此温度则用合金钢管。合金钢管主要用在输送腐蚀介质及高温(可达 900~950°C)的物料,如镍铬钢能耐硝酸与 H_3PO_4 等腐蚀性物料(但其有还原性的介质不宜采用)。无缝钢管亦常用于制造热交换器、蒸发器等化工设备。

表 18-3 无缝钢管规格

类别	外径 (毫米)	壁厚(毫米)	类别	外径 (毫米)	壁厚(毫米)
冷拔管	25	2.5, 3	热轧管	108	4, 4.5, 6, 8
	38	3, 3.5		114	4, 4.5, 6, 8
	42	3, 3.5		127	4, 4.5, 6, 8
	50	3.5, 4, 4.5, 5		146	6, 8, 10, 12
	51	3.5, 4, 4.5, 5		159	6, 8, 10, 12
热轧管	57	3.5, 4, 4.5, 6, 8		168	6, 9, 10, 12
	60	4, 4.5, 6, 8		194	6, 8, 10, 12
	63.5	4, 4.5, 6, 8		219	6, 8, 10, 12
	73	3.5, 4, 4.5, 6, 8		245	8, 10, 12
	76	3.5, 4, 4.5, 6, 8		273	8, 10, 12
	89	3.5, 4, 4.5, 6, 8		325	8, 10, 12
	102	4, 4.5, 6, 8		377	10, 12
				426	12

管件是附属于各种管子的零件,常用的管件如图 18-1 所示。

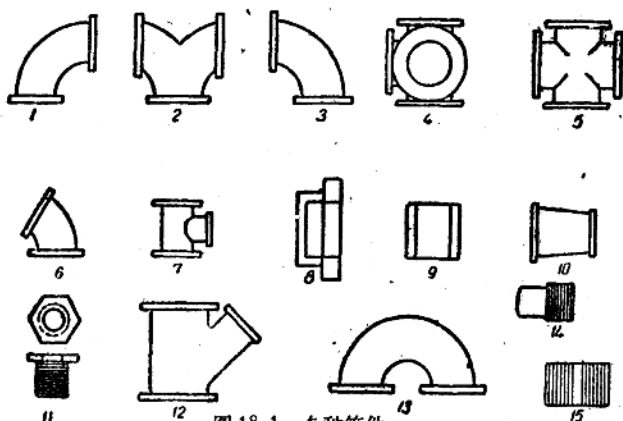


图 18-1 各种管件

- 1—90度肘管; 2—双曲肘管; 3—长半径肘管; 4—偏面四通管; 5—十字管, 亦为四通管之一; 6—45度肘管; 7—T形管, 为三通管之一; 8—管帽; 9—轴节; 10—缩小通接管; 11—管帽; 12—Y形管, 为三通管之另一种; 13—回流管弯; 14—管塞; 15—外联通接管

各种不同管件可应用于各种不同目的。例如图中的1、3、6、13等管件可改变管流的方向；2、4、5、7、12等管件用于分散管路；管件10则用于改变管径；管件14用于终止管流，管件15用于连接二管等。

二、阀

阀为调节管流的装置，可使管中流体暂时停止流动或限制其流量以符合需要，阀的种类很多，常用者有下列四种。

(一) 栓塞阀 调节流量最简单的装置，构造原理和实验室中的玻璃活塞相似，其主要部分为一转动的圆锥形栓塞1(图18-2)，中有通道，当转到栓塞的通道与管子2平行时，流体即可通过，再转90°，管流与通道正交，则完全不通。这种阀适用于全开或全闭的管道中，如实验室中的煤气管、水管等。这种阀的缺点是转动较困难和调节管流不准确。

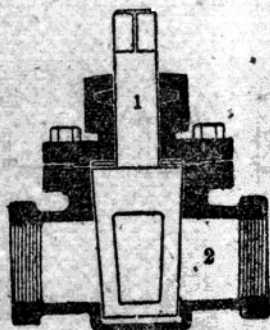


图 18-2 栓塞阀

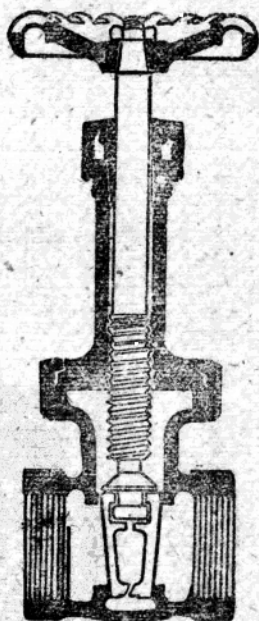


图 18-3 闸板阀

(二) 闸板阀 是利用闸门的形式调节流量的，多用于较大的管子，如图18-3所示，中有一直道，道中有闸，闸上有杆，杆上有活

螺旋,可使杆升降而达启闭的目的。在直径较大的上下水道管中,时常应用闸板阀。此类阀较前式为安全,且易于调节流量,但遇液体压力小时,则不易开动。

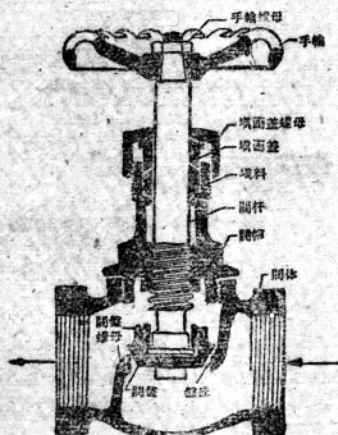


图 18-4(I) 标准型球心阀

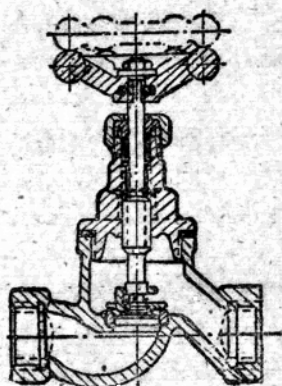


图 18-4(II) 流綫型球心閥

(三)球心閥 如图18-4(I)所示,在閥的腹腔部分有一圓环(盤座),將腹腔隔成上下两部。圓环的中央圓孔,为上下两部流通的口,此孔盖以閥盤盤上有杆通到閥之外,可借杆边螺旋升降而控制管流的启闭。这种閥的阻力甚大,所以不能用于大管,但不易受流体压力的影响,故可用于流体压力较大之处。近年將閥体制成流綫型如图 18-4(II)所示,流体阻力约可减少二分之一。

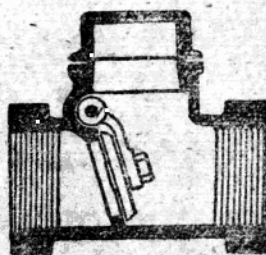


图 18-5 单向閥(搖板式)

(四)单向閥 这种閥只令流体向一定方向流动,遇有回流时即能自动关闭。故高压锅中的蒸汽入口,汽锅中的给水管多用之。

三、泵

在输送液体时，可用泵来加大管中的压力，以达到输送的目的，根据输送液体时所利用物理作用可将泵分成下列数种。

(一)往复泵 是利用活塞的泵，一般化工厂中使用很普遍，能升举液体高达50~60米，泵之作用如图 18-6 所示。

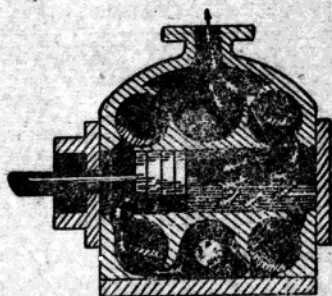


图 18-6 往复泵

主要部分系一水缸及一活塞，水缸之上下方各有单向活门二，今设活塞自左至右推动，则水缸中的液体如图中箭头所示方向流动，此种泵设计的种类很多，但原理都相同(装设单向活门为其特点)。活塞系连接于蒸汽机传动部份，用以产生往复运动。往复泵广泛用于不带粘性、无腐蚀性及不含腐蚀性固体的液体输送，其主要缺点为流量不均匀。

(二)转动泵 转动泵是利用旋转的转子以压出液体的原理来进行操作的。形式很多，常用者为齿轮泵，主要部分为二齿轮，齿轮的一面互相交错，另一面则紧贴泵的内边。轮齿的数目自二个至十数个不等，图 18-7 所示，为一种七齿的齿轮泵。当回转时，液

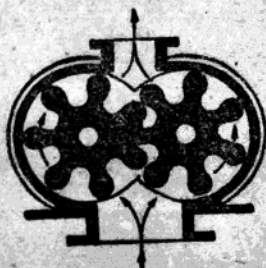


图 18-7 转动泵



图 18-8 涡形离心泵

体或半固体流动方向，沿壳的内边上升，从上口排出，此种泵适用于粘稠液体，排出量均匀。

(三)离心泵 离心泵是利用液体在迅速旋转的翼轮中的离心作用，使液体进行吸入和压出的，其效率很高，构造简单，流量均匀，且能适用于任何抽压目的，故为近代化工厂中广泛采用的一种泵，可输送水，粘稠液体，腐蚀性液体，含有固体的液体等。特别是因泵中仅有一个活动部分，所以易用特殊抗酸及抗蚀性材料做成。

该种泵中，最简单者为涡形泵，涡形壳内有旋转极快的激动轮，壳与轮间的空隙，依液体进行的方向逐渐增加，液体的出口，在泵的一面，与外周圆形正切。当激动轮转动时，利用离心力使液体由轮的中心吸入，由泵的边管排出。

(四)酸蛋 酸蛋是利用压缩空气的液体升举装置，和化学实验室中的洗瓶原理相同。它在化工厂中，尤以硫酸厂中输送硫酸或其他腐蚀性液体输送时所常用的泵。全部机械没有运动部分，所以金属不易被腐蚀。酸蛋的构造简单，制造容易，但容量不大，不能连续操作，

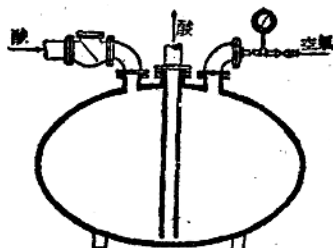


图 18-9 半自动式的酸蛋

但有带自动调节的连续式操作的酸蛋。图 18-9 为一种半自动式的酸蛋，酸的入口处有一单向阀，当酸流入后即自右方送入压缩空气，酸液可由中间一管压出。

四、通 风 机

在压力比较小的条件下输送气体的设备称为通风机，普通常用者有下列数种：

(一)离心式通风机 这种通风机系离心泵的变态，两者的构

造大致相同，但因气体密度甚小，所以激动轮须用较轻的材料及细小的形式，而转动速度则较离心泵为大，一般每分钟为 3,500~5,000 转。因单级产生压力小，故多采用多级。

(二) 摆旋鼓风机 摆旋鼓风机与齿轮泵相似，但齿轮数目仅有二个或三个，如图 18-10

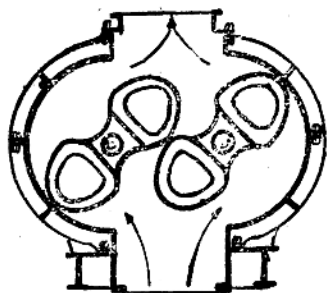


图 18-10 摆旋鼓风机

所示。此种鼓风机适用于表压 0.4 (公斤/厘米²) 以下之压力，它的主要特点是构造简单，输送量大，常用于化铁鼓风机或在需要大量空气而压力非风扇所能胜任时应用。

(三) 风扇 风扇为工厂中常用于在低压下输送气体的装置，凡排出压力在 15 厘米汞柱以下之处，如为通风、干燥、加热、冷却等均适用，风扇的样式很多，大约可分为三类如下：

1. 推进式风扇 这类风扇可以一般办公室用的电风扇为代表，因为效率很低，工厂中不甚重要。

2. 钢板风扇 如图 18-11 所示，为 6~12 钢板片制成的叶子，装在螺形风扇壳中而成。风扇的大小，由直径 20 厘米以至 3 米

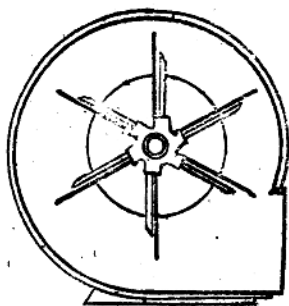


图 18-11 钢板风扇

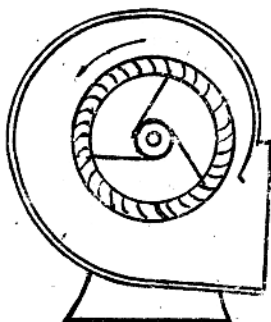


图 18-12 复叶风扇

均可制造,其气体输送量由每分钟 10 米³高至每分钟 5,000 米³,而排出压力通常在 10 厘米水柱以下。若将板叶变形使其弯曲,有如离心泵中的轮叶,则压力可高至 5 厘米汞柱。

3. 复叶风扇 复叶风扇如图 18-12 所示,为多数板叶所制成,其产生的压力与铁片风扇相似,但效率较高,输气能力大。

五、压缩机

在化学工厂中,常需超过常压或在高压下进行操作的,因此就要应用到压缩机。压缩机的种类很多,今以最重要的往复压缩机为例说明之。

往复压缩机为往复装置的一种,其构造亦与往复泵大致相同,但出入之活门所用材料较轻,活塞头与气缸之间余隙容积较小,各处接合较为严密而已。气体体积随压力的增加而缩小,即系对气体作功。同时各处由摩擦力而发热,结果使气体温度渐渐上升,压缩机效率随之降低,所以压缩机必须有冷却装置。

如需用高压气体,则可用多级压缩机,甲机的出口连于乙机的入口,数机相承,则可产生高压。

多段压缩 单段的压缩操作仅能压缩气体到有限的压力(6~8 绝对大气压)。当压缩到超过此压力时,气缸壁的温度升至机件不能容受的高温。此外,在单段压缩时,增大压缩比^①,则使有效容积系数^②降低,因此,要以几个依次连接的压缩段,将气体压缩至高压,段与段间并须装置中间冷却器,成为多段压缩装置。

图 18-13 说明双段压缩机装置简图。压缩机由低压气缸 1 与高压气缸 2 组成,活塞由右向左运动时,经过活门 3 吸入气体,活塞以相反方向运动时,气体被压缩,而经活门 4 推出,推出后,通过

① 例如在减压时,吸入气体为 0.1 大气压排出气体为 10 大气压则压缩比

$$= \frac{1.0}{0.1} = 10.$$

② 容积系数即吸入气体的体积(V_c)与活塞变位体积(V_1)之比, $\lambda = \frac{V_c}{V_1}$ 。

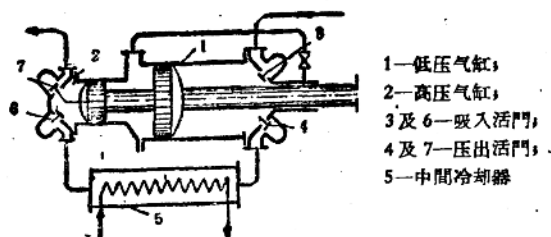


图 13 13 双段压缩机装置简图

中间冷却器 5。经活门 6，而吸入高压气缸 2。活塞再次向左运动时，气缸 1 内吸入一份新的气体，而同时高压气缸进行压缩，将压缩气体经过活门 7 推入压出导管中。

例如，在中压法合成氨工厂中，将氢、氮混合气体经六级压缩后，得到 320 大气压的压缩气体。为什么要用六级呢？设计气体压缩机时，当我们考虑达到规定高压的同时，必得想到高压设备所用钢料的耐高压性质，必得采用适当的压缩比，压缩比是指送入气缸的气体体积（如 6 升）被排出时压缩气体的体积（如 2 升）去除而得的比值（ $\frac{6}{2} = 3.0$ ），由于钢材强度的限制及省电的要求，常常采用的压缩比约为 3.0。常压的气体经六级压缩，得到 320 大气压。

六个活塞的安排，一、三、五级与二、四、六级分别组成两根活塞组，每根活塞组的结构是中间粗两头细，这样的机械结构不容易损耗。

六、气体与液体输送的理驗基础

（一）流体的流量与流速 与流体运动方向垂直的横断截面积 F 叫做有效截面，通常为导管的断面，而单位时间内通过有效截面积的流体量称为流量。流体在单位时间内经过之路程称为流速。

实验证明：导管截面上各点的速度不同，且导管中心处为最大，愈靠近管壁速度愈小。在紧靠管壁处，由于流体粘附于壁上，其速度为零。而其在截面上的速度分布规律与一系列条件有关，

常常十分复杂,因此实际上引用流体平均速度后就比较方便。

平均速度可表示为:

$$w = \frac{V_{\text{体}}}{F} \text{ 米/秒}$$

于是,其体积流量:

$$V_{\text{体}} = wF \text{ 米}^3/\text{秒}$$

如果体积流量 $V_{\text{体}}$ 乘以流体重度 γ , 公斤/米³, 得

$$W = V_{\text{体}} \gamma \text{ 公斤/秒}$$

则 W 称为重量流量。

工业上流体在导管中的流动速度常见者如下:

液体在导管流动速度小于 3 米/秒(粘度较大者 0.5~1 米/秒), 而一般取为 1.5~3 米/秒。

气体流速在压强不大时, 一般为 8~15 米/秒; 在压强较大时, 气体流速为 15~20 米/秒; 饱和蒸汽的速度为 20~30 米/秒, 过热蒸汽为 30~50 米/秒。

当导管为圆形, 其内直径为 d 时, 截面积

$$F = \frac{\pi}{4} d^2$$

于是

$$V_{\text{体}} = wF = \frac{\pi}{4} d^2 w$$

或

$$d = \sqrt{\frac{4V_{\text{体}}}{\pi w}}$$

根据上式, 已知 $V_{\text{体}}$ 及 w 可以计算管子的直径。

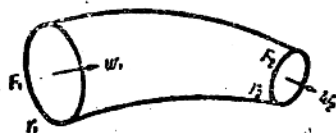
(二) 流体运动的连续性方程式

流体在运动过程中既不能产生也不能消灭, 应该服从质量守恒定律。将这一定律用于讨论流体的运动就得到流体运动的连续性方程式。

我们首先考虑一个比较简单情况来推导这个方程式的数学表示形式。

流体在密闭导管中作稳定流动,既不向其中添加,亦不发生漏损时,经过任一截面的流体重量应该相等。(如果不等则两截面间的重量就要继续增加或减少。这与稳定运动的假设不符。)若有支管存在,总流量应为支管流量之和。

如附图经过截面 F_1 的流体重量应与截面 F_2 的流体重量相等。以 γ_1 及 γ_2 分别表示两截面处流体重度, w_1 及 w_2 表示平均速度,则:



连续性方程式附图

$$W = F_1 \gamma_1 w_1 = F_2 \gamma_2 w_2 = F w \gamma = \text{常数}$$

式中 F, γ, w 分别为任意截面的面积,重度及流速。上式称流体导管流动的连续性方程。

当流体为液体时,重度变化很小 $\gamma_1 = \gamma_2$, 此时

$$F_1 w_1 = F_2 w_2 = F w = \text{常数}$$

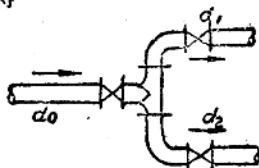
或

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{F_2}{F_1}$$

如导管为圆形 $F_2/F_1 = (d_2/d_1)^2$ 所以又得

$$\frac{w_1}{w_2} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$$

即当液体在密闭导管内作稳定流动时,其流速与截面积成反比或与导管直径的平方成反比



例题 18-1 附图

〔例题 18-1〕在一输水管路中,输水主管路直径为 200 毫米,每小时输水量为 120 米³,在进入两支管后,要求流速比主管中的流速大 50%,两支管中的流量分别为 $V_1 = 40$ 米³/小时, $V_2 = 80$ 米³/小时,试求:

(1) 输水主管中的流速为多大?

(2) 两支管的直径各为多大?

【解】 (1) 输水管中水的流速

$$w_0 = \frac{120}{3600 \times \frac{\pi}{4} (0.2)^2} = 1.07 \text{ 米/秒}$$

(2) 支管中水的流速 $w_1 = w_2 = 1.07(1 + 50\%) = 1.6 \text{ 米/秒}$
所以第一支管的直径:

$$d_1 = \sqrt{\frac{40}{3600 \times \frac{\pi}{4} \times 1.6}} = 0.095 \text{ 米} = 95 \text{ 毫米}$$

第二支管的直径:

$$d_2 = \sqrt{\frac{80}{3600 \times \frac{\pi}{4} \times 1.6}} = 0.134 \text{ 米} = 134 \text{ 毫米}$$

(三) 流体的机械能 流体的机械能一般有三种形式, 即: 位能、压能与动能。

1. 位能与位头 流体的位能由流体体积的重心到选定的某一任意水平面的高度所确定。此水平面称为基准面。

令 G ——流体的重量, 公斤;

Z ——流体体积重心到基准面的高度, 米。

则此流体具有的位能为:

$$\text{位能} = GZ, \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

所以, 位能乃是因为流体高于基准面而具有的能量。基准面不同, 位能的数值也不同。

上式可知, 1 公斤流体的位能为 Z 公斤·米。所以用高度 Z 即可表流体位能的值。高度 Z 称为流体的位头。

2. 静压能与静压头 静压能乃是流体有静压强而具有的能量。

压强可用单位面积所受的力表示, 也可以某种流体的高度表示。如:

$$1 \text{ 物理大气压} = 10.33 \text{ 米水柱} = 760 \text{ 毫米汞柱} = 1.033 \text{ 公斤/}$$

$$\text{厘米}^2 = 10,330 \text{ 公斤/米}^2$$

$$1 \text{ 工程大气压} = 10 \text{ 米水柱} = 735.6 \text{ 毫米汞柱} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10,000 \text{ 公斤/米}^2$$

压强通常以位能的形式表示。

令 P ——流体静压强，公斤/米²；

γ ——流体的重度，公斤/米³；

Z ——其压强等于静压强的流体柱高度。

由

$$P = Z\gamma$$

则

$$Z = \frac{P}{\gamma} \text{ 米}$$

比值 P/γ 的单位为米，表示等于压强的流体柱高，也表示 1 公斤流体静压能以位能表示时的数值。比值 P/γ 表示为 1 公斤流体的静压能，称为静压头。

G 公斤流体的静压能为：

$$\frac{Gp}{\gamma} \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

3. 动能与速度头 流体 G 公斤，其流速为 w 米/秒时，其动能为

$$\text{动能} = \frac{Gw^2}{2g} \text{ 公斤} \cdot \text{米} (g \text{——重力加速度 } 9.81 \text{ 米/秒})$$

则 1 公斤流体具有的动能为 $\frac{w^2}{2g}$ ， $\frac{w^2}{2g}$ 称为速度头。

由上面 1 公斤流动流体具有的总机械能为

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{w^2}{2g} \text{ 公斤} \cdot \text{米/公斤}$$

(四) 液体输送柏努利方程式

当液体作恒温流动时，只有机械能发生变化。在导管中，流体克服各项阻力而损失压能。由泵的工作而得到能量。下面讨论在