

编写说明

本书是国家医药管理局首批组织编写的四本医药中专教材之一，供化学制药、抗生素、药物制剂、中药制药、制药机械等有关专业教学使用，还可作为医药技工学校或药厂岗位培训的参考用书。

全书分为流体动力过程、传热过程、传质过程和其它过程四篇共十五章，阐述了药厂中各种单元过程的基本原理、工艺设计、相应设备和选用方法。按照国家医药管理局教材编写工作会议的精神，编写组在选材和写作上力求简明易懂，注重理论联系实际，以适合中专学校的教学要求，并在保证基础知识教学的前提下，适当介绍了新技术、新设备以及各单元过程在医药工业生产中的发展动向。

本教材的编写大纲(初稿)曾征求了各省、市医药中专学校以及一些高等院校、设计院和药厂的教师、工程师的意见。全书由安徽省医药学校高级讲师俞子行主编并编写第Ⅲ篇，天津市制药学校讲师路振山编写第Ⅰ篇，湖北省制药工业学校讲师石少均编写第Ⅱ、Ⅳ篇，天津大学化工系王绍亭教授担任本书主审。在编写过程中，国家医药管理局、各参编学校及所在省、市医药管理局的领导和有关部门都给予了大力支持和帮助，国家医药管理局高级工程师张修淑同志对编写工作作了具体指导，谨在此一并致谢！

由于编者水平及编写时间所限，缺点错误在所难免，欢迎大家批评指正，以便今后修改。

编者

1991年元月

3-1 离心式通风机	88
3-2 离心式鼓风机与压缩机	93
第二节 往复式压缩机	94
3-3 往复式压缩机的工作原理	94
3-4 往复式压缩机的性能	97
3-5 多级压缩	98
3-6 往复压缩机的类型及选用	100
第三节 其它类型压缩输送机械	102
3-7 旋转式鼓风机和压缩机	102
3-8 真空泵	103
思考题	104
习题	104
第四章 非均一系的分离	105
第一节 重力沉降	105
4-1 自由沉降和沉降速度	105
4-2 降尘室	108
4-3 沉降槽	109
第二节 离心沉降	111
4-4 离心沉降速度	111
4-5 旋风分离器	112
4-6 其它离心沉降设备	116
第三节 过滤	118
4-7 基本概念	118
4-8 过滤基本方程式	119
4-9 过滤设备	124
思考题	129
习题	130

第II篇 传热过程

第五章 传热基本原理、间壁式换热器	131
第一节 概述	131
5-1 工业传热的目的和方式	131
5-2 稳定传热和不稳定传热	132
5-3 三种传热机理	133
第二节 导热	133
5-4 傅立叶定律	133
5-5 导热系数	133
5-6 单层和多层平壁导热	135
5-7 圆筒壁导热	137

第IV篇 其他过程

第十五章 粉碎、筛分、混合和造粒	484
第一节 粉粒体的基本性质.....	484
15-1 粉粒体的粒径与粒径分布.....	484
15-2 微粉的其他特性.....	488
第二节 粉碎.....	490
15-3 概述.....	490
15-4 粉碎的机理与方法.....	491
15-5 粉碎的能量.....	492
15-6 粉碎产物的粒度分布.....	493
15-7 被粉碎物料的性质及粉碎规程.....	493
15-8 粉碎设备.....	494
第三节 筛分.....	503
15-9 概述.....	503
15-10 药筛及粉粒体的分等.....	503
15-11 影响筛分效率的因素.....	504
15-12 筛分机械.....	505
第四节 粉粒体的混合.....	507
15-13 混合机理与方法.....	507
15-14 混合度.....	507
15-15 混合机械.....	508
第五节 造粒.....	510
15-16 概述.....	510
15-17 造粒方法与作用.....	510
15-18 造粒机械简介.....	511
思考题.....	512
附录	513
1. 常遇到的几个非SI单位与SI单位的换算.....	513
2. 空气的重要物理性质.....	513
3. 水的重要物理性质.....	514
4. 水的饱和蒸汽压(-20° 至 100°C).....	515
5. 饱和水蒸汽表(按温度排列).....	515
6. 饱和水蒸汽表(按压力排列).....	516
7. 水的粘度(0°C 至 100°C).....	517
8. 液体粘度共线图 and 密度.....	518
9. 气体的粘度共线图.....	519
10. 气体的比热容 ($P=101.3\text{kN/m}^2$).....	520
11. 液体的比热容.....	521

表 3 国际单位制(SI)的部分导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其它表示式例
力	牛顿	N	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{J} \cdot \text{m}^{-1}$
压力、应力	帕斯卡	Pa	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{J} \cdot \text{m}^{-3}$
能量、功、热	焦耳	J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{Pa} \cdot \text{m}^3$
功率、传热	瓦特	W	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} = \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$
速度		$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
加速度		$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	
面积		m^2	
密度		$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
比热容		$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
导热系数		$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} = \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
动力粘度		$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$
体积		m^3	
传热系数		$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} = \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
热流量		$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

表 4 用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	词头符号
10^{18}	艾〔可萨〕	E
10^{15}	拍〔它〕	P
10^{12}	太〔拉〕	T
10^9	吉〔咖〕	G
10^6	兆	M
10^3	千	k
10^2	百	h
10^1	十	da
10^{-1}	分	d
10^{-2}	厘	c
10^{-3}	毫	m
10^{-6}	微	μ
10^{-9}	纳〔诺〕	n
10^{-12}	皮〔可〕	p
10^{-15}	飞〔母托〕	f
10^{-18}	阿〔托〕	a

注： 10^4 称为万； 10^8 称为亿， 10^{12} 称为万亿，这类数词的使用不受词头名称的影响，但不应与词头混淆。

单位与单位相除所得的导出单位可表示成 N/m^2 或 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 等，后者表示焦耳每千克开尔文，写成 $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$ 容易引起混乱。

数字与单位之间可留半个阿拉伯数字的间隙，自小数点起不论向左或向右，每三位数字也留同样的间隙，如 $g = 9.806\ 65\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

国际单位制具有统一（通用）性、科学性、精确性等优越性，特别是避免了因各种单位制的同时并存，同一物理量出现多种不同的单位以及它们之间相互换算的复杂性，因此具有简明性和合理性。例如压力的单位有 atm 、 kgf/cm^2 、 N/m^2 、 mmHg 、 mmH_2O 、磅/英尺² 等，采用国际单位制后可以统一成 Pa (N/m^2)，因此十分方便。

(2) 确定基准 对于间歇操作可以规定以 1 批物料作为衡算基准；对于连续操作一般以 1 小时作为基准，必要时也可以用 1 天、1 月、1 年作为基准。

(3) 列出方程 可以列全物料衡算方程，也可列某组分的衡算方程。所列方程应包含已知条件和所求的量，对于有 n 个未知量的衡算问题需要列出 n 条互相独立的衡算方程。

(4) 求解方程 从联立方程组解出未知量。

例 1 配制 75% 乙醇水溶液 1200kg，需用 92% 乙醇和 35% 乙醇各多少千克？(以上浓度均为质量百分率)

解 划定混合配制罐为衡算范围 (例 1 附图)，有两股物流进入和一股物流离开衡算范围。

以 1 批 1200kg 75% 乙醇作为衡算基准。

由于无化学反应，间歇操作，可用式 (2) 进行衡算。

$$\text{总量的衡算} \quad x + y = 1200 \quad (\text{例 1-1})$$

$$\text{乙醇的衡算} \quad 0.92x + 0.35y = 0.75 \times 1200 \quad (\text{例 1-2})$$

将式 (例 1)、(例 2) 联立求解，得

$$x = 842.1(\text{kg})$$

$$y = 357.9(\text{kg})$$

验算：

$$x + y = 842.1 + 357.9 = 1200(\text{kg})$$

若列出水的衡算式：

$$0.08x + 0.65y = 0.25 \times 1200 \quad (\text{例 1-3})$$

则由于式 (例 1-3) 可用式 (例 1-1) 减式 (例 1-2) 得到，三个方程中只有两个是独立的，因此只能求出两个未知量。

五、热量、能量守恒定律与热量、能量衡算

能量是物体作功的能力，通过作功，能量能从一物体传递至另一物体。包括热量在内的能量有机械能、电能、热能、光能、声能、化学能、原子能等等，这些能量时刻发生着相互转换，自然现象的发生、体系状态的变化，都伴随着能量的变化与能量的转换。

国际单位制中，功、能的单位都是焦耳 (J)，过去常用的非国际单位制热量单位是卡 (cal)，

$$1\text{cal} = 4.187\text{J}$$

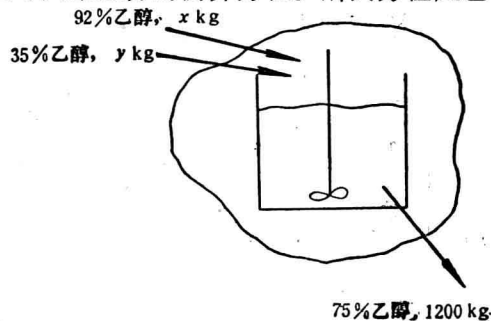
能量守恒定律也是基本定律之一。当物系中不存在能量的相互转换时，还有其它各种形式的能量守恒定律，如机械能守恒、热量守恒等等。

以能量守恒定律 (或机械能守恒、热量守恒等) 为依据的能量 (或机械能、热量等) 衡算也是基础工程计算方法之一。在化工单元操作中，能量、热量衡算也是推导过程基本方程的出发点；在化工、制药生产中，同样是生产、技术分析管理、查找问题提出对策的基本手段。

1. 能量、热量衡算的基本方程

与式 (1) 相似，体系的能量衡算基本方程可写成：

$$\text{输入量} + \text{生成量} = \text{积累量} + \text{输出量} \quad (3)$$

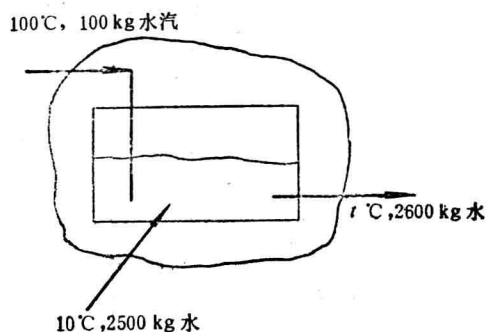


例 1 附图

式 (3) 可以理解为包含多种能量形式总和的总能量衡算方程, 在体系没有各种能量的相互转换时, 可理解为某一种能量的衡算方程, 例如机械能守恒和热量守恒等。

2. 能量、热量衡算的方法和步骤

与物料衡算一样, 仍可概括为划定范围、确定基准、列出方程和求解方程四个步骤, 不同的是在确定基准时, 除了像物料衡算那样以 1 批或 1 小时为计算基准外, 对具有数值相对性的能量形式, 如位能、热量还需要人为规定一个能量值为 0 的状态作为基准, 例如规定某水平面处液体的位能值为 0, 规定 273K 液态物质的热焓量为 0 等等。



例 2 附图

例 2 向一绝热容器中的 2500 kg、10°C 的水通入 100kg、100°C 的饱和水蒸汽, 试问混合后的温度 t 为若干? 已知水的平均比热容为 $4.187 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 100°C 水的汽化热为 2677 kJ/kg 。

解 确定绝热容器为物料、热量衡算的范围。确定衡算基准为 1 批物料 (2500 kg、10°C 水和 100kg、100°C 的饱和水蒸汽), 见例 2 附图, 规定 0°C 的液体水的热焓量为 0。

首先进行物料衡算, 由式 (2) 混合后的水量为

$$2500 + 100 = 2600 (\text{kg})$$

下面进行热量衡算。

(例2-1) 10°C 水带入的热焓量 h_1 :

$$h_1 = 2500 \times 4.187(10 - 0) = 104670 (\text{kJ})$$

(例2-2) 100°C 饱和水蒸汽带入的热焓量 h_2 :

$$h_2 = 100 \times 2677 = 267700 (\text{kJ})$$

(例2-3) 水带出的热焓量 h_3 :

$$h_3 = 2600 \times 4.187(t - 0) = 10886.2t (\text{kJ})$$

列热量衡算方程, 其中生成量、积累量为 0, 由式 (3):

输入量 = 输出量

$$h_1 + h_2 = h_3$$

$$104670 + 267700 = 10886.2t$$

解得

$$t = 34.2^\circ \text{C}$$

六、过程的平衡

平衡问题是热力学问题, 研究一个过程能否发生, 若能发生又进行到什么程度。例如连通器两边容器中的水能否流动取决于有无水的位差, 高水位的水可以自发流向低水位, 当两侧水位差等于 0 时, 水的流动便不再发生。再如一杯水能否将热量传递至周围空气, 取决于水与空气间的温度差, 若水温高于空气温度, 则有热量自水传递至空气, 一旦水温下降到与空气温度相同, 传热即行停止。溶液中溶质的浓度超过饱和溶解度时会有溶质析出, 结晶过程得以发生, 当析出的结晶量使溶液刚好饱和时, 结晶过程

$$\rho_0 = \frac{M}{22.4} \quad (1-7)$$

将式 (1-7) 代入式 (1-6), 并将表示标准状态的下标“0”代替上标“'”, 则有:

$$\rho = \frac{MT_0P}{22.4TP_0} \quad (1-8)$$

因

$$\frac{P_0V_0}{T_0} = R$$

所以

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (1-9)$$

式中 V_0 ——1 千摩尔气体在标准状态下所具有的体积, $V_0=22.4\text{m}^3$;

R ——气体常数, $R=8.315\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 。

例 1-2 求乙炔在 40°C 和 $0.3\text{MN}/\text{m}^2$ 时的密度。

解 $P=0.3\text{MN}/\text{m}^2=300\text{kN}/\text{m}^2$

$$T=40^\circ\text{C}=313\text{K}$$

$$M=26\text{kg}/\text{kmol}$$

$$R=8.315\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$$

$$\therefore \rho = \frac{PM}{RT} = \frac{300 \times 26}{8.315 \times 313} = 3(\text{kg}/\text{m}^3)$$

对于气体混合物, 工业上可用气体密度 ρ_m 近似地表示其密度值。 ρ_m 的求法有两种, 其一是:

$$\rho_m = \rho_A x_A + \rho_B x_B + \cdots + \rho_N x_N \quad (1-10)$$

式中 x_A 、 x_B 、 $\cdots$ 、 x_N ——气体混合物中各组分的体积分率, 即摩尔分率。

ρ_m 的另一种求法是计算出气体混合物的平均分子量 M_m , 再将 M_m 代入式 (1-9) 中, 即可求得 ρ_m , 而 M_m 可由下式求得:

$$M_m = M_A x_A + M_B x_B + \cdots + M_N x_N \quad (1-11)$$

式中 M_A 、 M_B 、 $\cdots$ 、 M_N ——气体混合物中各组分的分子量, kg/kmol 。

例 1-3 求压力为 $0.4\text{MN}/\text{m}^2$ 、温度为 30°C 的空气的密度。空气组成可按 79% 的 N_2 和 21% 的 O_2 计。

$$\text{解 } M_{\text{O}_2} = 32$$

$$M_{\text{N}_2} = 28$$

$$x_{\text{O}_2} = 21\%$$

$$x_{\text{N}_2} = 79\%$$

$$M_m = M_{\text{O}_2} x_{\text{O}_2} + M_{\text{N}_2} x_{\text{N}_2}$$

$$= 32 \times 21\% + 28 \times 79\%$$

$$= 28.84(\text{kg}/\text{kmol})$$

$$P = 0.4\text{MN}/\text{m}^2 = 400\text{kN}/\text{m}^2$$

$$T = 30^\circ\text{C} = 303\text{K}$$

$$R = 8.315\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$$

$$\rho = \frac{PM_m}{RT}$$

力为 0.2MPa，而该设备所在地区的大气压为 0.1MPa，那末设备内流体的绝对压力为 0.3MPa。如压力表指示出的压力值为 0，则设备内流体的压力等于大气压，也就是常说的设备内流体“没有”压力。表压与绝对压的关系为：

$$\text{绝对压力} = \text{大气压} + \text{表压}$$

真空度是指真空表上的读数，它表示被测流体的绝对压力低于大气压的压力值。用于度量低于大气压的流体压力。例如真空表上示出被测流体的真空度为 300mmHg，而该地区的大气压为 750mmHg，那末被测流体的绝对压力为：

$$750 - 300 = 450 \text{ (mmHg)}$$

显然，真空度与绝对压力的关系为

$$\text{绝对压力} = \text{大气压} - \text{真空度}$$

应予指出，外界大气压随大气的温度、湿度和所在地区的地理位置而改变。因此，真空度和表压不仅是流体绝对压力的函数，而且也是大气压的函数。计算时，可参阅有关设计资料，需查出全国各地平均大气压的数值，作为计算依据。

例 1-4 兰州某药厂一真空干燥器的真空表读数为 560mmHg，同一工艺过程若在天津操作，要求器内维持相同的绝对压力，其操作条件的真空度应为多少？兰州地区平均大气压为 640mmHg，天津地区平均大气压约为 760mmHg。

解 在兰州操作时，器内的绝对压力为

$$\begin{aligned} \text{绝对压力} &= \text{大气压} - \text{真空度} \\ &= 640 - 560 \\ &= 80 \text{ (mmHg)} \end{aligned}$$

在天津操作需维持相同的绝对压力，但大气压与兰州的不同，故其真空度也不同，其值为

$$\begin{aligned} \text{真空度(天津)} &= \text{大气压(天津)} - \text{绝对压力} \\ &= 760 - 80 = 680 \text{ (mmHg)} \end{aligned}$$

绝对压力、表压和真空度通过大气压可以建立起彼此之间的关系，如图 1-1 所示。在计算时需将不同的压力表示方法和单位统一起来后，再进行运算。

例 1-5 装在某设备进口处的真空表读数为 $P_1 = 30 \text{ mmHg}$ ，装在设备出口处的压力表读数为 $P_2 = 1 \text{ kgf/cm}^2$ ，求设备进出口的压力差。

解 出口压力为表压，进口为真空度，需统一为绝对压力，再计算压力差。

$$P_2 = P_{\text{大气}} + 98.1 \text{ (kPa)}$$

$$P_1 = P_{\text{大气}} - 4 \text{ (kPa)}$$

则

$$\begin{aligned} P_2 - P_1 &= (P_{\text{大气}} + 98.1) - (P_{\text{大气}} - 4) \\ &= 102 \text{ (kPa)} \end{aligned}$$

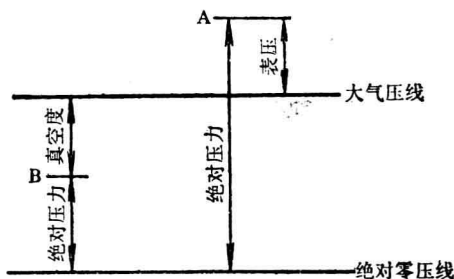


图 1-1 绝对压力、表压和真空度的关系

第二节 流体静力学基本方程

1-3 流体静力学基本方程

在连续静止的流体内,任何一个单元体在所有方向上受到的外力都是平衡的。在水平方向上,因只受到内部的压力,故在相对方向上的压力均相等,否则就不平衡,流体也就不能保持静止状态。在铅直方向上,除受内部压力外,尚有单元体自身的重力,导致不同高度的水平面的流体所受压力不同,下面讨论这一变化规律。

在液体内任取一段液柱,如图 1-2 所示。其上、下底面积为 A ,液柱重力为 F ,选液体表面为 $Z=0$,液柱上、下底与液面的垂直距离分别为 Z_1 和 Z_2 ,上、下底面所受到的静压力分别为 P_1 和 P_2 ,液体的密度为 ρ 。

在液柱的铅直方向上作力的平衡:上底面所受总压力为 P_1A ,方向向下;下底面所受总压力为 P_2A ,方向向上;液柱的重力为 $F=A\rho g(Z_2-Z_1)$ 则有

$$P_1A + F = P_2A$$

将 F 值代入上式,则

$$P_1A + (Z_2 - Z_1)A\rho g = P_2A$$

$$P_2 = P_1 + (Z_2 - Z_1)\rho g \quad (1-14)$$

为讨论方便,将液柱的上表面取在容器的液面上,此时液柱上表面的压力为 P_0 ,下底面取在距液面任意距离 Z 处,作用于下底面的压力为 P ,对照式 (1-14),则有

$$P_2 = P, \quad P_1 = P_0, \quad Z_2 - Z_1 = Z,$$

式 (1-14) 可改写为

$$P = P_0 + \rho g Z \quad (1-15)$$

式 (1-14) 和式 (1-15) 均称流体静力学方程式,它表明了静止流体内部压力变化的下述规律。

(1) 在静止液体上方的压力 P_0 一定时,液体内任一点的压力 P 仅与液体本身的密度 ρ 和该点的深度 Z 有关, ρ 愈大、 Z 愈大,压力则愈大。在 Z 相等的某水平面上,各处的压力相同。

(2) 当液体上方的压力 P_0 变化时,必将引起液体内部各点的压力发生同样大小的变化。

(3) 式 (1-15) 可改写为 $Z = \frac{P - P_0}{\rho g}$, 此式表明 ρ 值确定后,压力差的大小可以

用一定高度的液柱来表示。若是 ρ 有变化, Z 就不为 P 的单值函数,也就不能简单地表示压力。因此用液柱高度表示压力时,要注明液柱的性质。如 mmH_2O 和 mmHg 等。

另外需要强调:

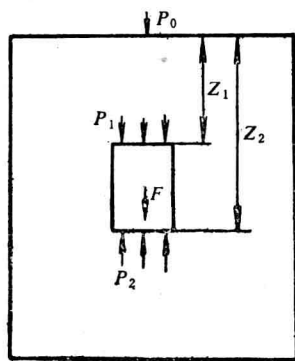


图 1-2 流体静力学基本方程的推导

(1) 静力学基本方程式是以液体为例推导出来的, 但同样适用于气体, 故称其为流体静力学方程式;

(2) 流体静力学基本方程式只能用于静止的、连通着的同一种流体内部, 因为它是根据静止的同一种连续流体导出的。

例 1-6 将车间蒸汽采暖改为水采暖, 水管路为封闭的 (视为连通的同一流体), 安装好后做水压试漏时, 管路最低处的压力表读数为 120kPa, 求距最低处 10m 高度处的压力。管路最高点排空阀打开, 当地大气压为 100kPa。

解 最低点压力表处的绝对压力为

$$P_2 = 120 + 100 = 220(\text{kPa})$$

取最高放空阀处为基准水平面, 所求压力处的深度为 Z_1 , 最低点的深度为 Z_2 , 显然有 $Z_2 = Z_1 + 10$, 取水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, 若 10m 高处和最低点的压力分别为 P_1 和 P_2 , 根据静力学基本方程式有:

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 + (Z_2 - Z_1)\rho g \\ P_1 &= P_2 - [(Z_1 + 10) - Z_1]\rho g \\ &= 220 \times 1000 - 10 \times 1000 \times 9.81 \\ &= 121.9(\text{kPa}) \text{ (绝压)} \\ &= 21.9(\text{kPa}) \text{ (表压)} \end{aligned}$$

1-4 流体静力学基本方程的应用

一、液柱压力计

在生产车间和实验室常用的液柱测压计就是根据静力学方程的原理制造的。

液柱式压力计的形式很多, 比较简单的是 U 形管压力计, 结构如图 1-3 所示。在玻璃制的 U 形管中, 装有密度大于被测流体的指示液, 并要求指示液与流体不发生化学反应且不互溶。

当 U 形管上方两端分别与测压点 1、2 相连时, 能测出 1、2 两点的压力差。对于 $P_1 \neq P_2$ (如 $P_1 > P_2$) 的场合, U 形管两侧产生液面高度差 R , 且低压侧的液面比高压侧要高。如图 1-3, 3、4 两点处的压力是相等的, 这是因为两点均在连续静止的流体内的同一水平面上。若指示液的密度为 $\rho_{\text{示}}$, 流体的密度为 ρ , 根据静力学基本方程式, 由左侧可得 P_3 的压力为

$$P_3 = P_1 + (m + R)\rho g$$

由右侧可得 P_4 的压力为

$$P_4 = P_2 + m\rho g + R\rho_{\text{示}}g$$

因为

$$P_3 = P_4$$

代入得

$$P_1 + (m + R)\rho g = P_2 + m\rho g + R\rho_{\text{示}}g$$

整理得

$$P_1 - P_2 = Rg(\rho_{\text{示}} - \rho) \quad (1-16)$$

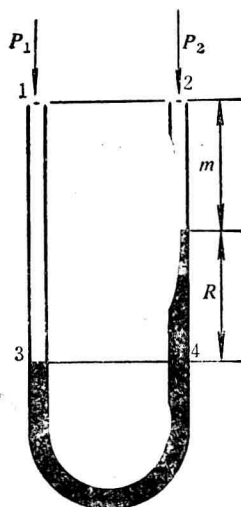


图 1-3 U 形管液柱压力计

式 (1-16) 中, $(\rho_{\text{示}} - \rho)g$ 在选好液柱压力计后已为定值, $(P_1 - P_2)$ 仅为 R 的单值函数, 所以根据液面高度差就能测出对应的压力差值。式 (1-16) 还说明, 压力差与 U 形管的粗细、长短无关; $(\rho_{\text{示}} - \rho)$ 数值越小, 读数 R 越大, 测压范围越小, 精确度越高。反之, $(\rho_{\text{示}} - \rho)$ 数值越大, R 则越小, 测压范围越大, 精确度越低。因此, 在使用 U 形管液柱压力计时, 应根据工艺要求选用适当的指示液。常用的指示液有水银、水、煤油和四氯化碳等。

测量气体时, 由于气体密度比指示液的密度小得多, 可将 $(\rho_{\text{示}} - \rho)$ 近似看成 $\rho_{\text{示}}$, 这样, 式 (1-16) 就变成:

$$P_1 - P_2 = R \rho_{\text{示}} g \quad (1-17)$$

若将 U 形管的一侧与大气相通, 另一侧连通流体的某一点, 所测得的压力差就是流体在该点的压力与大气压的差值, 即流体在该点的表压或真空度。

例 1-7 用 U 形管液柱压力计测量设备上 A、B 两点压力差, 已知流体为水, 指示液为 CCl_4 , 液柱压力计读数 $R = 50\text{cm}$ 。(1) 求 A、B 两点的压力差; (2) 压力差不变, 指示液改为水银, 求读数 R 。

解 (1) 按式 $P_A - P_B = R_1 g (\rho_{\text{示}} - \rho)$ 计算

$$R_1 = 40\text{cm} = 0.4\text{m}$$

查有关手册 $\rho_{\text{示}} = 1595\text{ kg/m}^3$

$$\rho = 1000\text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{代入得 } P_A - P_B &= 0.4 \times 9.81 \times (1595 - 1000) \\ &= 2440(\text{Pa}) = 2.44\text{kPa} \end{aligned}$$

(2) 指示液改为水银

$$\rho_{\text{示}} = 13600\text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} R &= \frac{P_A - P_B}{(\rho_{\text{示}} - \rho)g} = \frac{2440}{(13600 - 1000) \times 9.81} \\ &= 0.0197(\text{m}) = 19.7\text{mm} \end{aligned}$$

二、液柱压力液面计

工厂为维持正常生产、保证安全, 对锅炉内的水面位置和反应罐或一些设备内的液面位置进行监测是非常重要的。某些测定液面的仪表, 其工作原理就是依据静力学基本方程, 液柱压力液面计就是其中之一。

图 1-4 为液面测定装置, 即液柱压力液面计。结构与 U 形管液柱压力计相同, U 形管的两端分别与设备上上方气体和底部液体, 即图中的 1、2 两点连通, 由于 1、2 两点有压力差, U 形管内指示液必有液面高度差 R , 此时, R 的大小与液面高度成正比, 按照流体静力学基本方程, 由 R 值就可求得液面高度。

例 1-8 如图 1-4 的容器中存有水, U 形管指示液为水银, R 读数为 100mm , 求容器内水的高

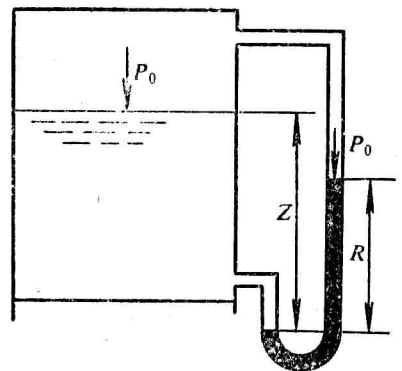


图 1-4 液柱压力液面计

对不可压缩的液体的稳定流动, 其密度 ρ 为定值, 式 (1-22) 则可写为

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = uA = \text{常数} \quad (1-23)$$

对圆形截面的管道, $A = \pi d^2/4$ (d 为管道内径), 式 (1-23) 则可写成

$$u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2 = u d^2 = \text{常数} \quad (1-24)$$

或

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \quad (1-24a)$$

即流速与管径的平方成反比。

如果管路有分支, 根据质量守恒定律可知, 总管路的质量流量为各分支管路质量流量之和。

例 1-9 水泵的吸入导管为 $\phi 108 \times 4$, 出水管为 $\phi 76 \times 2.5$, 若水在出水管的流速为 3 m/s , 求水在吸入管中的流速。

解 根据

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$$

已知 $u_2 = 3 \text{ m/s}$

$$d_1 = 108 - 4 \times 2 = 100 (\text{mm})$$

$$d_2 = 76 - 2.5 \times 2 = 71 (\text{mm})$$

$$\text{所以 } u_1 = u_2 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 = 3 \times \left(\frac{71}{100} \right)^2$$

$$= 1.51 (\text{m/s})$$

1-8 流体流动的总能量衡算——柏努利方程

根据能量守恒定律, 能量既不会自行产生, 也不会自行消失, 只能从一种形式转换成另一种形式, 柏努利方程是说明流体在管道中作稳定流时, 流体具有的机械能、外加能量和因摩擦损失的能量之间进行转换的规律。

一、流体流动时具有的机械能

流体流动时具有的机械能有三种形式, 即位能、动能和静压能。

1. 位能

流体在重力作用下, 因相对位置的高低不同而具有的能量称位能。较高处流体的位能大, 较低处流体的位能相对较小。也就是说: 流体从较高处流至较低处时, 要减少一部分位能, 转换成其它形式的能量; 而流体从较低处流至较高处时, 需要一部分其它形式的能量转换成位能。这部分能量在数值上等于把流体从低处升至较高处所需的功。为了计算方便, 通常选一基准水平面, 处在该面上的流体其位能为零, 高于该面的流体位能大于零, 低于该面的流体其位能小于零。

有 $m \text{ kg}$ 流体, 其质量中心距基准面高度为 Z , 其位能应为:

$$\text{位能} = mgZ = GZ (\text{J}) \quad (1-25)$$

式中 G ——流体重量, N。

2. 动能

流体流动时, 由于有一定的速度而具有的能量称动能。当流体的流速为 u 时, m kg 流体的动能为:

$$\text{动能} = \frac{1}{2} mu^2 = \frac{Gu^2}{2g} \text{ (J)} \quad (1-26)$$

3. 静压能

流体流动时, 因其内部具有一定的静压力而具有的能量称静压能。静止的流体内有静压力, 而流动的流体内部同样有静压力, 这一点可由图 1-7 所示的实验证实。在流动着液体的管壁上垂直安装一细玻璃管, 立刻可以看到细管内升起一定高度的液体, 使这部分液体升起的能量即是静压能。在数值上等于在此静压力作用下, 推动流体所作的功。

设体积为 $V(\text{m}^3)$ 、质量为 $m(\text{kg})$ 的流体, 在静压力 $P(\text{Pa})$ 的作用下, 于截面积为 $A(\text{m}^2)$ 的管路中, 通过了 $L(\text{m})$ 距离, 则流体的

$$\text{静压能} = P \cdot A \cdot L = PA \frac{V}{A} = PV = P \frac{m}{\rho} = \frac{PG}{\rho g} \quad (1-27)$$

因为 总机械能 = 位能 + 动能 + 静压能

$$\text{即} \quad E = mgZ + \frac{mu^2}{2} + \frac{mP}{\rho} \quad (1-28)$$

$$\text{或} \quad E = GZ + \frac{Gu^2}{2g} + \frac{GP}{\rho g} \quad (1-28a)$$

若以单位质量的流体为计算基准, 即 $m=1\text{kg}$, 那么单位质量流体所具有的总机械能为

$$e = gZ + \frac{u^2}{2} + \frac{P}{\rho} \quad (1-29)$$

式中各项的单位是 J/kg, 含意是每千克质量的流体具有的总机械能、位能、动能和静压能。

二、柏努利方程式

流体在管路中流动时, 除内部各种机械能在不同条件下互相转换外, 尚需考虑驱动流体的输送设备 (如泵、压缩机等) 对流体所做的功和由于流动的流体有摩擦力而消耗的能量, 这部分能量转换成热能损耗掉了。

实际输送流体的过程, 需要流体输送机械对流体做功才能实现。所做的功除部分损

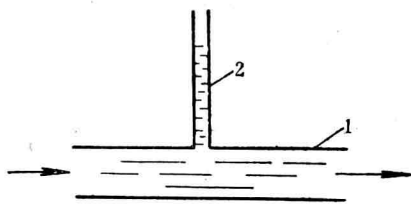


图 1-7 流动流体静压力的表现

1—导管; 2—细玻璃管

截面时应注意:

- a. 两截面应与流动方向垂直;
- b. 两截面间的流体应是连续的;
- c. 所求量应在截面上或两截面间 (后者多指 w_s 和 h_f)。

(3) 选取基准水平面 目的在于确定流体位能的大小。柏努利方程用的是位能差的数值, 即 $\Delta Z = Z_2 - Z_1$, 基准水平面可任取, 显然, 选择较低截面与基准水平面重合, 计算起来更为方便。

(4) 单位的统一 在把各物理量代入柏努利方程之前, 应将单位统一换算成 SI 单位, 然后进行计算。在前面所举例题中, 压力有用表压的, 另一些用的则是绝压, 这不是单位不统一的问题, 因为柏努利方程反映的是静压能差值, 即 $\Delta P/\rho$, 用表压值或绝压值计算的数值是相等的, 所以对压力来说在同一方程中, 或者都用表压, 或者都用绝压, 千万不要相混。

若以单位重量的流体为计算基准, 即 $G=1\text{N}$, 式 (1-28a) 可写成

$$e' = Z + \frac{u^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} \quad (1-29a)$$

式中 Z ——距基准面 Z 米高度处单位重量流体具有的位能, m;

$\frac{u^2}{2g}$ ——单位重量流体具有的动能, m;

$\frac{P}{\rho g}$ ——单位重量流体具有的静压能, m。

工程中把单位重量流体所具有的能量称作压头。式 (1-29a) 中各项分别称为总压头 (e')、位压头 (Z)、动压头 ($\frac{u^2}{2g}$) 和静压头 ($\frac{P}{\rho g}$), 此外还有与 w_s 、 h_f 相应的流体输送机械的压头 (H_s) 和因流动阻力引起的压头损失 (H_f)。

所有这些压头的单位都是:

$$\text{J/N 流体} = \text{N} \cdot \text{m/N 流体} = \text{m}$$

因此压头的单位“m”的含义要理解为每 1 牛顿流体相应的能量 (J 即 $\text{N} \cdot \text{m}$)。采用压头的概念后, 自式 (1-30) 至式 (1-33) 都要相应改写成:

$$Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho_1 g} + H_s = Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho_2 g} + H_f \quad (1-30a)$$

$$Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + H_s = Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + H_f \quad (1-31a)$$

$$Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} = e' \quad (1-32a)$$

$$H_s = (Z_2 - Z_1) + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + H_f \quad (1-33a)$$

$$N_T = H_s V_s \rho g \quad (1-34a)$$

四、在圆管中两种状态下的流体流速分布

流体在圆管中任一截面不同位置上的质点流速是不同的，靠管中心处流速最大，越靠近管壁其流速愈小，附管壁流体流速为零。从流量和截面积算得的流速以及 Re 数中的 u ，都是指管道截面各点的平均流速。流体呈不同流动状态时，流速的分布情况不同。

(1) 层流时的流速分布 流体呈层流状态时，用实验方法可测得在圆管径向上的不同位置的质点流速，并做出曲线，得到一抛物线形状的速度曲线，如图 1-14(a) 所示。此时流体各质点的平均流速 $u_{\text{均}}$ 为导管中心线上的最大流速 u_{max} 的二分之一，即

$$u_{\text{均}} = 1/2 u_{\text{max}} \quad (1-43)$$

(2) 湍流时的流速分布 用同样的实验方法，可做出流体在湍流状态下，管道截面不同位置上各质点的流速分布曲线，如图 1-14(b) 所示。与层流的速度曲线相比，在导

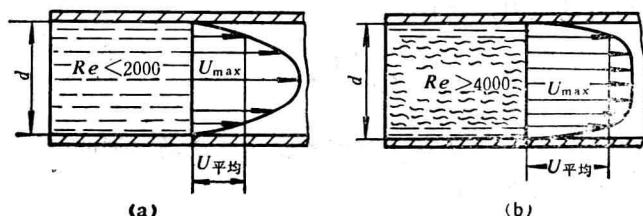


图 1-14 速度分布曲线

(a)层流; (b)湍流

管中心线处湍流速度变化不大，这是因为流体呈湍流状态时，流体质点运动激烈，运动方向杂乱无章，靠中心的质点不再像层流那样，总是沿导管中心运动，而是在径向上与处在其它位置的质点混合，导致中心处的速度降低，而接近中心处的速度升高，故曲线变化相对较平缓。根据实验测定，湍流时导管截面处流体平均流速与中心线上流体最大流速的关系为

$$u_{\text{均}} = 0.8 u_{\text{max}} \quad (1-44)$$

无论是层流还是湍流，流体在管壁处的速度均等于零。接近管壁处的速度也很小，此处的 Re 值也会很小。显而易见，流体呈湍流状态时，靠近管壁处仍会有一层流体呈层流状态，我们称这层流体为层流内层或层流边界层。

以上讨论的速度分布曲线只适用于圆管内的稳定流动，如流道截面不是圆形，或流体流动方向、流速发生变化而未达到稳定时，则不适用于以上规律。

1-11 流体的流动阻力

流体静止时，无流动阻力而言。流体以一定速度流动时才产生阻力。显然，流动阻力的大小与流速有直接关系。实验证明，流动阻力产生的能量损失与动能有如下关系：

$$h_f = \xi \frac{u^2}{2} \quad (1-45)$$

式中的 ξ 称为阻力系数。该式为计算流动阻力所产生的流动阻力损失的通式，针对不同情况，求出相应的阻力系数，即求得相应的流动阻力。

流体在非圆形直管中流动时, 实验证明其阻力计算也可用圆管的式 (1-46) 计算, 只是 λ 的计算要做如下修正:

a. 流体呈湍流时, 以当量直径 d_e 代替阻力计算中, 相对粗糙度和 Re 数中的 d , 其产生的误差是工程计算所允许的。

b. 流体呈层流时, 用当量直径求出 Re 后, 按下式计算 λ , 即

$$\lambda = \frac{A}{Re} \quad (1-49)$$

式中的 A 为与截面有关的系数, 其值由表 1-2 查出。

表 1-2 一些非圆形直管的当量直径 d_e 与常数 A

截 面 形 状	d_e	A
正方形(边长 a)	a	57
等边三角形(边长 a)	$0.58a$	53
环隙(外管内径 D_1 内管外径 d_o)	$D_1 - d_o$	96
长方形($\frac{2a \times a}{4a \times a}$)	$1.33a$	62
	$1.6a$	73

例 1-15 计算 20°C 水以 1m/s 的速度, 通过 100m 长、直径为 $\phi 60 \times 3.5$ 钢管的流动阻力。

解: 已知

$$d = 60 - 3.5 \times 2 = 53\text{mm}$$

$$u = 1\text{m/s}$$

$$\mu = 1\text{cP}$$

$$\rho = 1000\text{kg/m}^3$$

$$l = 100\text{m}$$

$$\varepsilon = 0.20\text{mm}$$

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{\frac{53}{1000} \times 1 \times 1000}{\frac{1}{9810} \times 9.81} = 53000$$

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{0.20}{53} = 0.004$$

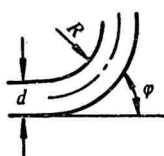
在图 1-15 中右边纵坐标 $\frac{\varepsilon}{d}$ 上, 找出 0.004 的一条线与横坐标 Re 为 $53\ 000$ 的一条线相交, 得一交点, 此点对应的左侧纵坐标为摩擦系数 $\lambda = 0.03$, 流动阻力为

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$$

表 1-4 导管突然扩大与突然缩小时的 ζ 值

突然扩大	截面积比 $\frac{S_1}{S_2}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
	阻力系数 ζ	1	0.81	0.64	0.49	0.36	0.25	0.16	0.09	0.04	0.01	0
突然缩小	截面积比 $\frac{S_2}{S_1}$	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
	阻力系数 ζ	0.5	0.47	0.45	0.38	0.34	0.3	0.25	0.2	0.15	0.09	0

表 1-5 管件和阀件的 ζ 值

管件和阀件名称	ξ 值									
标准弯头	45°, $\xi=0.35$				90°, $\xi=0.75$					
90°方形弯头	1.3									
180°回弯头	1.5									
活管接	0.4									
 弯管	$R/d \quad \varphi$	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°		
	1.5	0.08	0.01	0.14	0.16	0.175	0.19	0.20		
	2.0	0.07	0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	0.17		
标准三通管	 $\xi=0.4$  $\xi=1.5$ 当弯头用 $\xi=1.3$ 当弯头用  $\xi=1$									
闸 阀	全开		3/4开		1/2开		1/4开			
	0.17		0.9		4.5		24			
标准截止阀(球阀)	全开 $\xi=6.4$				1/2开 $\xi=9.5$					
 碟 阀	α	5°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°
	ξ	0.24	0.52	1.54	3.91	10.8	18.7	30.6	118	751
旋 塞	Q	5°		10°	20°	40°	60°			
	ξ	0.05		0.29	1.56	17.3	206			
角阀90°	5									
单向阀(止逆阀)	摇板式 $\xi=2$				球形式 $\xi=70$					