

目 录

緒論	1
第 一 章 流体力学	4
第 二 章 液体的輸送	25
第 三 章 气体的压縮与輸送	30
第 四 章 气相非均一系的分离	37
第 五 章 液相非均一系的分离	42
第 六 章 物料的攪拌	47
第 七 章 傳热	50
第 八 章 加热冷却与冷凝	62
第 九 章 蒸发	66
第 十 章 結晶	78
第十一章 物質傳遞原理	81
第十二章 干燥	84
第十三章 蒸餾	93
第十四章 吸收与吸附	102
第十五章 萃取	114
第十六章 冷冻	119
第十七章 深度冷冻	120
第十八章 固体粉碎与篩析	121

緒 論

例 題

1. 当压强为 5[大气压,表压]、温度为 20[°C]时,求氫的重度(以[千克/米³]計)与密度(以[$\frac{\text{克(質量)}}{\text{厘米}^3}$]計)。

[解] 根据理想气体定律,任何气体的重度在压强 p 和温度 T [°K]时可用下式求得:

$$\gamma = \gamma_0 \left(\frac{T_0}{T} \right) \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

式中 γ_0 为标准状况时氫的重度,其值等于 $\frac{M}{22.4}$; M 为气体的分子量。

故

$$\gamma = \frac{11.8Mp}{T}$$

現在已知 $M_{H_2}=2$; $p=6 \times 1.033$ [千克/厘米²]; $T=273+20=293$ [°K], 故重度为:

$$\gamma = \frac{11.8 \times 2 \times 6 \times 1.033}{293} = 0.498 \text{ [千克/米}^3\text{]};$$

因为

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{0.498}{9.81} = 0.0508 \text{ [千克-秒}^2\text{/米}^4\text{]}$$

$$\rho \left[\frac{\text{克質量}}{\text{厘米}^3} \right] = \gamma \left[\frac{\text{克}}{\text{厘米}^3} \right]$$

所以

$$\rho = 0.498 \times \frac{1000}{10^6} = 0.498 \times 10^{-3} \text{ [克質量/厘米}^3\text{]}。$$

2. 如果已知石油的比重 $S=0.89$, 試求出工程制和 CGS 制中石油的重度与密度。

[解] 工程制中: $\gamma_{\text{水}}=1000$ [千克/米³], 因此石油的重度应为:

$$\gamma_{\text{石油}} = 1000 \times S = 890 \text{ [千克/米}^3\text{]};$$

而密度为

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{890}{9.81} = 90.6 \text{ [千克-秒}^2\text{/米}^4\text{]}$$

CGS 制中: 密度

$$\rho = S = 0.89 \text{ [克·質量/厘米}^3\text{]}$$

而重度为

$$\gamma = \rho g = 0.89 \times 981 = 873 [\text{克} \cdot \text{质量} / \text{厘米}^2 \cdot \text{秒}^2]。$$

3. 某溶液的重度为 1.81 [千克/立升], 試求以工程制表示的密度。

[解]

$$\gamma = 1.81 [\text{千克} / \text{立升}] = 1810 [\text{千克} / \text{米}^3]。$$

故密度为:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1810}{9.81} = 184 [\text{千克} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^3]。$$

4. 将 9.5 [吨] 盐水自 20% (溶质) 濃縮到 65%, 估計生产損耗为 0.2%。試作此濃縮过程的物料衡算。

[解] 由于生产損耗的原因, 实际被濃縮的盐水量为:

$$9,500 \times (1 - 0.2\%) = 9,481 [\text{千克}]$$

計算基准: 100 [千克] 盐

$$\text{濃縮前含水量} \quad 100 \times \frac{80}{20} = 400 [\text{千克}];$$

$$\text{濃縮后含水量} \quad 100 \times \frac{35}{65} = 53.8 [\text{千克}]。$$

由此可知, 每 100 [千克] 盐除去的水量应为

$$400 - 53.8 = 346.2 [\text{千克}]$$

$$\text{原料中含盐量} \quad 9,481 \times 20\% = 1,896 [\text{千克}];$$

$$\text{故除去的总水量为} \quad 1,896 \times \frac{346.2}{100} = 6,564 [\text{千克}]。$$

将所得結果, 列成下表:

濃縮鹽水的物料衡算表

收 入		支 出	
收 入 項	数 量 [千克]	支 出 項	数 量 [千克]
濃縮前:		濃縮后:	
溶质量 $9,500 \times 0.2 = 1,900$		盐重 1,896	
溶剂量 $9,500 \times 0.8 = 7,600$		水重 $1,896 \times \frac{35}{65} = 1,021$	
盐水共重 (20%)	9,500	盐水共重 (65%)	2,917
		生产損耗	19
		蒸发掉的水量	6,564
总 計	9,500	总 計	9,500

5. 在夹套蒸发鍋中濃縮某溶液, 由 10% 固体到 50% 固体。料液温度为 20[°C], 每小时加入料液 24,000[千克]。加热蒸汽为 1 [大气压、絕对压力], 鍋内蒸汽压强为 610

[毫米,汞柱]真空,二次蒸汽温度为 $60[^\circ\text{C}]$,濃縮液放出时的温度为 $60[^\circ\text{C}]$ 。加热蒸汽冷凝液的温度为 $100[^\circ\text{C}]$ 。若无热量损失,試求加热蒸汽的消耗量[千克/小时]。設固体物料与料液的比热均取为 1。

[解] 計算基准:100[千克]固体物。

$$\text{濃縮前含水量} \quad 100 \times \frac{90}{10} = 900[\text{千克}],$$

$$\text{濃縮后含水量} \quad 100 \times \frac{50}{50} = 100[\text{千克}].$$

每 100[千克]固体物蒸发掉的水量为 800[千克]。

故蒸去的总水量为

$$24,000 \times \frac{10}{100} \times \frac{800}{100} = 19,200[\text{千克}]$$

$$\text{濃縮液总量为} \quad 24,000 - 19,200 = 4,800[\text{千克}]$$

如以 $0[^\circ\text{C}]$ 为計算基准,則可得上述过程的热量衡算式如下:

料液带入的热量为:

$$24,000 \times 20 = 480,000[\text{千卡}]$$

加热蒸汽带入的热量为: $639x$

式中 639 为 $100[^\circ\text{C}]$ 时的热含量; x 为蒸汽消耗量[千克]。

濃縮液带出之热量为:

$$4,800 \times 60 = 288,000[\text{千卡}]$$

二次蒸汽带走的热量为:

$$19,200 \times 628 = 11,940,000[\text{千卡}]$$

式中 628 为 $60[^\circ\text{C}]$ 时的热含量。

冷凝液带出的热量为: $100x$ [千卡]

根据热量衡算,可得下式:

$$480,000 + 639x = 288,000 + 11,940,000 + 100x$$

解之,得蒸汽消耗量

$$x = \frac{11,748,000}{539} = 21,600[\text{千克}]$$

习 題

1. CS_2 比水重 1.29 倍。試計算 CS_2 以[吨/米³]为单位的重度,并求其在工程制与 CGS 制中的密度。
2. 試計算在 $t=85[^\circ\text{C}]$; $p=42$ [大气压,表压]时, CO_2 在工程制中的重度与密度。
3. 混合(甲)12.25[吨]混合酸,其成份为: 66% H_2SO_4 与 34% HNO_3 ; (乙)5.63[吨]硫酸(含 98% H_2SO_4); (丙)2.24[吨]濃硫酸,其成份为 93% H_2SO_4 。試求所得到的混合酸成份。

第一章 流体力学

例 題

1. 在敞开的容器中, 装有比重 $S=1.23$ 的液体。容器壁上装有压强計, 其讀数为 0.81 [大气压, 表压]。試求液面到压强計的距离为若干?

[解]

$$p - p_0 = \gamma H$$

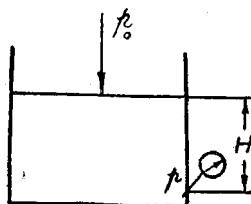
現在 $p - p_0 = 0.81$ [千克/厘米²]

$$= 8100 \text{ [千克/米}^2\text{];}$$

$$\gamma = 1000S = 1230 \text{ [千克/米}^3\text{];}$$

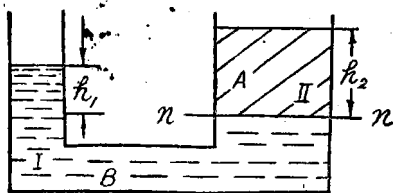
故

$$H = \frac{p - p_0}{\gamma} = \frac{8100}{1230} = 2.52 \text{ [米]}。$$



例 1 附图

2. 有連通器 I 和 II, 如图所示。在容器 I 中傾入水銀, 得 $h_1=0.1$ [米]; 而在容器 II 中傾入水, 試求在容器 II 中的水柱高度 h_2 为若干 [米]?



例 2 附图

[解]

$$\text{水銀重量 } \gamma_1 = 13,600 \text{ [千克/米}^3\text{];}$$

$$\text{水的重量 } \gamma_2 = 1,000 \text{ [千克/米}^3\text{]。}$$

$$\therefore h_1 \gamma_1 = h_2 \gamma_2$$

$$\therefore h_2 = \frac{h_1 \gamma_1}{\gamma_2} = \frac{0.1 \times 13,600}{1,000} = 1.36 \text{ [米]}。$$

3. 求混合物的粘度。已知其成份如下:

液体氫 70%; 液体氮 30% (以上均为分子百分数)。其温度为 80°K , 压强为 $p=1$ 大气压, 表压]。已知 80°K 时氫的粘度为 0.22 [厘泊]。氮的粘度为 0.1181 [厘泊]。

[解] 混合液的粘度可按式計算:

$$\lg \mu_m = X_1 \lg \mu_1 + X_2 \lg \mu_2 + X_3 \lg \mu_3 + \dots$$

將已知数据代入上式, 即得:

$$\lg \mu_m = 0.7 \lg 0.22 + 0.3 \lg 0.118 = -1.272,$$

即

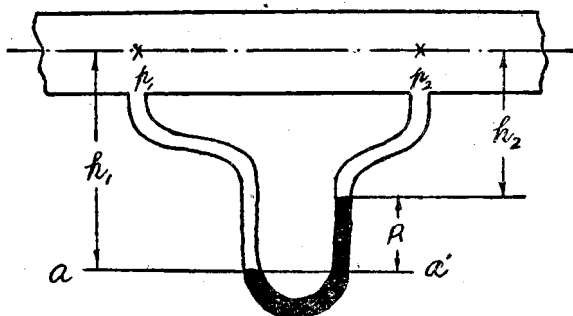
$$\mu_m = 0.183 \text{ [厘泊]}。$$

4. 水平导管上的两点, 接一盛水銀的 U 形玻璃压强計, 压强計两水銀面差 $R=26$

[毫米]。如果在导管中流经的为 (1) 水; (2) 在 $20[^\circ\text{C}]$ 和大气压下的空气 ($\gamma=1.2$ [千克/米³]), 试计算此压强计所指示的压强差。

[解] 因为水平面上 $a-a'$ 两点的压强相等, 故

$$p_1 + h_1\gamma = p_2 + h_2\gamma + \gamma R$$



例 3 附图

又因 $(h_1 - R) = h_2$, 故可得:

$$p_1 - p_2 = R(\gamma_{\text{水银}} - \gamma)$$

$$\therefore (p_1 - p_2) = 26 \times 10^{-3} \times (13,600 - 1000) = 328 \text{ [千克/米}^2\text{]}$$

(1) 当流经水时:

$$R = \frac{328}{1000} = 0.328 \text{ [米, 水柱];}$$

(2) 当流经空气时:

$$R = \frac{328}{1.2} = 273.3 \text{ [米, 气柱]。}$$

5. $20[^\circ\text{C}]$ 的浓硫酸, 比重为 1.84, 经一内径为 50 [毫米] 的铁管, 输送至某用酸部分。若其流速为 1 [米/秒], 试求硫酸的容积流率 [米³/小时] 及重量流率 [千克/小时]。

[解]

已知: $\gamma_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 1.84 \times 1000 = 1,840 \text{ [千克/米}^3\text{];}$

$$d = 50 \text{ [毫米]} = 0.05 \text{ [米];}$$

$$w = 1 \text{ [米/秒];}$$

(1) 容积流率

$$V = wF \times 60^2 = 1 \times \frac{\pi}{4} (0.05)^2 \times 3,600 = 0.785 \times 0.0025 \times 3600 = 7 \left[\frac{\text{米}^3}{\text{小时}} \right];$$

(2) 重量流率

$$G = wF\gamma \times 60^2 = 7 \times 1840 = 12,880 \text{ [千克/小时]。}$$

6. 试计算二氧化碳在 $t=30[^\circ\text{C}]$ 和 $p=5.25$ [绝对大气压] 时的运动粘度系数, 以工程单位制和 CGS 制表示。

[解] 由气体粘度表查得在 $30[^\circ\text{C}]$ 时, (压力影响不计) 二氧化碳的粘度为 0.015

[厘泊]。

当 $t=30[^\circ\text{C}]$, $p=5.28$ [绝对大气压]

$$\gamma_{00} = \frac{44 \times 273 \times 5.28}{22.4 \times 303 \times 1} = 9[\text{千克/米}^3];$$

因为

$$\nu = \frac{\mu g}{\gamma} = \frac{0.015 \times 9.81}{9810 \times 9} = 0.00166 \times 10^{-3}[\text{米}^2/\text{秒}^2]$$

$$= 0.0166[\text{厘米}^2/\text{秒}].$$

7. 求下列两种液体在 $\phi 51 \times 2.5$ [毫米] ① 的直管中的临界速度。

(1) 在 $20[^\circ\text{C}]$ 和 $p=1$ [绝对大气压] 时的空气, 其粘度为 0.018 [厘泊], 重度为 1.2 [千克/米³];

(2) 粘度为 35 [厘泊], 比重为 0.963 的石油。

[解]

$$\text{Re}_{\text{临界}} = 2320 = \frac{dw_{\text{临界}}\rho}{\mu} = \frac{dw_{\text{临界}}\gamma}{\mu g},$$

即

$$w_{\text{临界}} = \frac{2320\mu g}{d\gamma}$$

(1) 空气的:

$$w_{\text{临界}} = \frac{2320 \times 0.018 \times 9.81}{9810 \times 1.2 \times 0.046} = 0.76[\text{米/秒}];$$

(2) 石油的:

$$w_{\text{临界}} = \frac{2320 \times 35 \times 9.81}{9810 \times 0.046 \times 963} = 1.83[\text{米/秒}].$$

8. 今有一套管换热器, 内管为 $\phi 25 \times 1.5$ [毫米], 外管为 $\phi 51 \times 2.5$ [毫米] 套管环隙間通以冷却用的盐水, 其流率为 3.725 [吨/小时]。盐水的重度为 1150 [千克/米³] 粘度为 1.2 [厘泊], 试决定盐水的流动方式(滞流或湍流)。

[解]

(1) 环隙内盐水的流速:

$$w = \frac{W}{F\gamma} = \frac{3.725 \times 1000}{1150 \times 3600 \times 0.785 \times (0.046^2 - 0.025^2)} = 0.77[\text{米/秒}]$$

(2) 环隙的当量直径:

设 D = 外管内径, d = 内管外径, d_e = 当量直径

$$\text{则 } d_e = 4 \times \frac{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)}{\pi(D + d)} = D - d = 0.046 - 0.025 = 0.021[\text{米}].$$

① $\phi 51 \times 2.5$ [毫米]系指外径为 51 [毫米], 厚度为 2.5 [毫米]的管子。

$$(3) \quad Re = \frac{dw\gamma}{\mu g} = \frac{0.021 \times 0.77 \times 1150}{\frac{1.2}{9810} \times 9.81} = 15,500$$

計算結果, $Re > 10,000$, 故为湍流。

9. 某用水系統, 每小时供給的水量为 80 [吨], 若該輸送系統为 100 [毫米] 和 50 [毫米] 的导管所組成, 試求水通过上列两种导管中的流速 [米/秒]。

[解] 根据流体連續性方程式:

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

因液体是不可压缩的, 所以 $\gamma_1 = \gamma_2$,

即

$$F_1 w_1 = F_2 w_2 = \text{常数}$$

(1) 在內徑为 100 [毫米] 的导管內流动时, 其流速为:

$$w_1 = \frac{W}{\gamma_1 F_1} = \frac{80 \times 1000}{9800 \times 0.785 (0.1)^2 \times 1000} = 1.06 [\text{米/秒}]$$

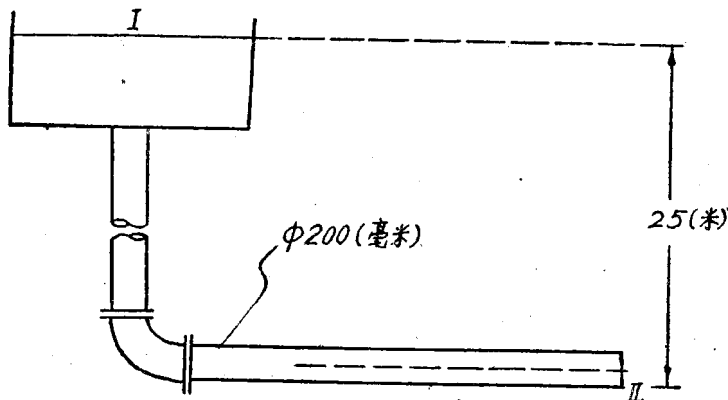
(2) 在內徑为 50 [毫米] 导管內的流速为:

$$F_1 w_1 = F_2 w_2; \quad \frac{\pi}{4} d_1^2 w_1 = \frac{\pi}{4} d_2^2 w_2; \quad d_1^2 w_1 = d_2^2 w_2$$

$$\therefore w_2 = w_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = 1.06 \left(\frac{100}{50} \right)^2 = 4.24 [\text{米/秒}]。$$

10. 15 [°C] 的水由水塔經內徑为 200 [毫米] 的导管流出, 水塔內水面高于排出端 25 [米], 若因摩擦而損失的能量为 24 [米, 水柱], 試求导管中水的流速 [米/秒]。

[解]



例 10 附图

取通过点 II 的中心綫为基准水平面, 应用柏努利定律列出水塔水面 I 及排出端 II 間的能量衡算方程式:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{w_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{w_2^2}{2g} + \sum h_n$$

$$Z_2 = 0, \quad Z_1 = 25 [\text{米}]$$

$$p_1 = p_2 [\text{皆为 1 大气压}] \quad \gamma_1 = \gamma_2$$

，即

$$\frac{p_1}{\gamma_1} = \frac{p_2}{\gamma_2}$$

設 $w_1=0$ ，因为水塔的截面积較排出端要大得多，所以每秒鐘在水塔内水面的降低，可以忽略不計。

$$\bullet \quad \Sigma h_n = 24[\text{米}]$$

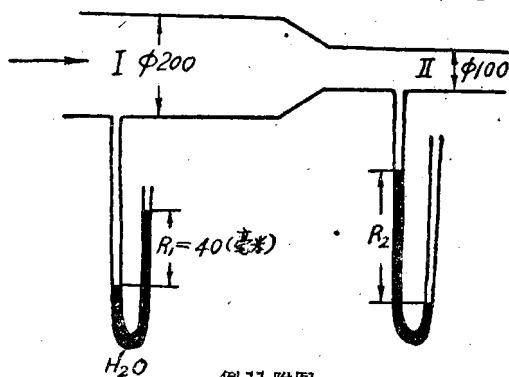
則

$$25 = 24 + \frac{w_2^2}{2g}$$

即

$$w_2 = \sqrt{(25-24) \times 2 \times 9.81} = 4.4[\text{米/秒}]$$

11. 如图所示，导管中輸送空气 ($20[^\circ\text{C}]$)，其容积流率为 $1800[\text{米}^3/\text{小时}]$ ，若在 $\phi 200$ [毫米] 处的 U 形管讀数为 $40[\text{毫米水柱}]$ ，試求在 $\phi 100$ [毫米] 处的 U 形管讀数为若干 [毫米水柱]？(假定在两 U 形管間，空气的重度不变，摩擦損失不計)



例 11 附图

[解] 在 $\phi 200$ [毫米] 导管中空气的流速 w_1 为：

$$w_1 = \frac{1800}{3600 \times 0.785 (0.2)^2} = 16[\text{米/秒}]$$

同样，在 $\phi 100$ [毫米] 导管中的流速 w_2 为：

$$w_2 = w_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = 16 \left(\frac{200}{100} \right)^2 = 64[\text{米/秒}]$$

$$\gamma_{\text{空气}} = \frac{29}{22.4} \times \frac{273(10,380)}{293(10,340)} = 1.2[\text{千克/米}^3]$$

因为空气的重度比水的重度要小得多，所以若将压强計上的讀数来代表导管中空气的压强，其誤差可以忽略不計。所以 $\phi 200$ [毫米] 导管中空气的压强为：

$$p_1 = 1[\text{大气压}] + 40[\text{毫米水柱}] = 10,340 + 40 = 10,380[\text{毫米水柱}] \sim 10,380[\text{千克/米}^2]$$

今依 I、II 两截面来列出能量衡算方程式，可得：

因为水平导管，故 $Z_1 = Z_2$

$$\frac{w_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma_{\text{空气}}} = \frac{w_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_{\text{空气}}}$$

$$\text{故} \quad p_1 - p_2 = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \gamma_{\text{空气}} = \frac{64^2 - 16^2}{2 \times 9.81} \times 1.2 = 235[\text{千克/米}^2]$$

$$p_2 = p_1 - 235 = 10,380 - 235 = 10,145[\text{千克/米}^2] = 10,145[\text{毫米水柱}]$$

所以，在 $\phi 100$ [毫米] 导管处 U 形管中所指示的讀数应为

$$p_2 - p_a = 10,145 - 10,340 = -195[\text{毫米水柱}]。$$

式中負数表示管中空气压力低于大气压力。

12. 直徑 1 [米]、高 2.5 [米] 的圓筒，裝滿 2 [米] 高的液体，液体从底部小孔流出，孔徑为 3 [厘米]。

試計算液体流完所需的時間。

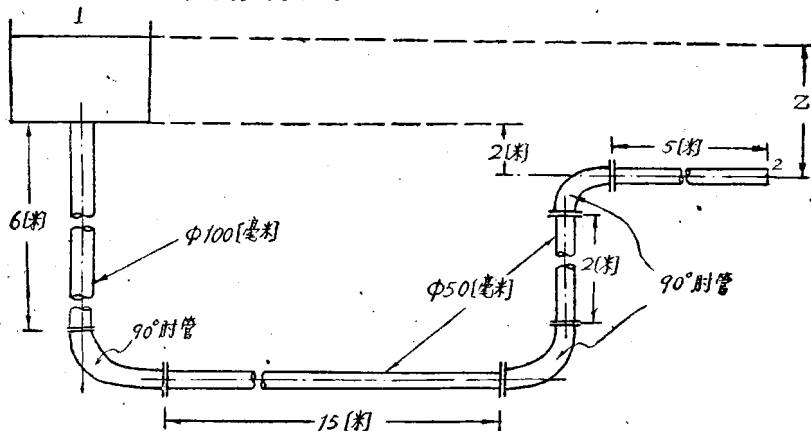
[解] 应用公式：
$$\tau = \frac{2F_1\sqrt{H_1}}{CF_2\sqrt{2g}} [\text{秒}]$$

今 $F_1 = \frac{\pi}{4} D^2 = 0.785 (1)^2$; $F_2 = \frac{\pi}{4} d^2 = 0.785 (0.03)^2$;

$H_1 = 2$; $C = 0.61$; $g = 9.81$ 。

$\therefore \tau = \frac{2 \times 0.785 \times 1^2 \times \sqrt{2}}{0.61 \times 0.785 (0.03)^2 \sqrt{2 \times 9.81}} = 1180 [\text{秒}] = 20 [\text{分鐘}]$ 。

13. 图示一高架貯槽与管路相連的系統，槽內貯 80 [°C] 的水，如欲得 每小时 22.7 [米³] 的排量，則槽內水平面高度为若干？



例 13 附图

[解] 將 (1)、(2) 兩點間列出柏努利方程式：

$$Z_1 + \frac{w_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma_1} = Z_2 + \frac{w_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_2} + \sum h_n$$

設通过 (2) 点的水平面为基准面，則

$$Z_2 = 0; Z_1 = Z。 p_1 = p_2 = 1 [\text{大气压}];$$

$$\gamma_1 = \gamma_2 = 970 [\text{仟克/米}^3]; w_1 = 0。$$

因此，上式可簡化为：

$$Z = \frac{w_2^2}{2g} + \sum h_n$$

$\sum h_n$ 为整个管路系統中摩擦損失之和，包括：

- (1) 从槽出口处的收縮損失 h_1 ;
- (2) 在 100 [毫米] 直管中及一个 90° 肘管的摩擦損失 h_2 ;
- (3) 从 100 [毫米] 管至 50 [毫米] 管的收縮損失 h_3 ;
- (4) 在 50 [毫米] 直管中及 2 个 90° 肘管的摩擦損失 h_4 ;

若水的排量为 22.7[米³/小时], 则水在 100[毫米]管及 50[毫米]管中的流速应为:

$$w_{100} = \frac{V}{F_{100}} = \frac{22.7}{60 \times 60} \times \frac{1}{\frac{\pi}{4}(0.1)^2} = 0.8[\text{米/秒}]$$

$$w_{50} = \frac{V}{F_{50}} = \frac{22.7}{60 \times 60} \times \frac{1}{\frac{\pi}{4}(0.05)^2} = 3.2[\text{米/秒}]$$

(1) 从槽出口处的收缩损失:

$$\frac{F_{100}}{F_{\text{槽}}} = 0,$$

由表查得 $\zeta = 0.5$ 。

$$\therefore h_1 = \zeta \frac{w_{100}^2}{2g} = 0.5 \times \frac{(0.8)^2}{2 \times 9.81} = 0.0167[\text{米}]$$

(2) 在 100[毫米]直管中及一个 90° 肘管的摩擦损失:

$$d = 0.1[\text{米}]; w = 0.8[\text{米/秒}]; \gamma = 970[\text{千克/米}^3];$$

$$\mu = 0.347[\text{厘泊}] = \frac{0.347}{9810}[\text{千克秒/米}^2]$$

$$l = 6[\text{米}]$$

$$\therefore \text{Re} = \frac{dw\rho}{\mu} = \frac{dw\gamma}{\mu g} = \frac{0.1 \times 0.8 \times 970 \times 9810}{0.347 \times 9.81} = 224,000$$

由图查得, 当 $\text{Re} = 224,000$; $\lambda = 0.0192$ 时

在 100[毫米]直管中的摩擦损失

$$= \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g} = 0.0192 \times \frac{6}{0.1} \times \frac{(0.8)^2}{2 \times 9.81} = 0.036[\text{米}]$$

90° 肘管(粗糙)的阻力系数 $\zeta = 1.26$

通过一个 90° 肘管的摩擦损失

$$= \zeta \frac{w_{100}^2}{2g} = 1.26 \times \frac{(0.8)^2}{2 \times 9.81} = 0.042[\text{米}],$$

$$\therefore h_2 = 0.036 + 0.042 = 0.078[\text{米}].$$

(3) 从 100[毫米]管至 50[毫米]管的收缩损失:

$$\therefore \frac{F_{50}}{F_{100}} = \frac{(50)^2}{(100)^2} = 0.25; \zeta = 0.42;$$

$$\therefore h_3 = \zeta \frac{w_{50}^2}{2g} = 0.42 \times \frac{(3.2)^2}{2 \times 9.81} = 0.22[\text{米}]$$

(4) 在 50[毫米]直管中及 2 个 90° 肘管的摩擦损失:

$$\therefore d = 0.05[\text{米}]; w_{50} = 3.2[\text{米/秒}];$$

$$\gamma = 970[\text{千克/米}^3]; \mu = 0.347/9810[\text{千克/秒/米}^2];$$

$$\therefore \text{Re} = \frac{dw\gamma}{\mu g} = \frac{0.05 \times 3.2 \times 970 \times 9810}{0.347 \times 9.81} = 451,000$$

由图查得(教本 1—12 图), 当 $Re=451,000$ 时; $\lambda=0.0173$ 。

∴ 在 50[毫米]直管中的摩擦损失

$$= \lambda \frac{l}{d} \frac{w_{50}^2}{2g} = 0.0173 \times \frac{(15+2+5)}{0.05} \times \frac{(8.2)^2}{2 \times 9.81} = 4.1[\text{米}]$$

通过 2 个肘管之损失

$$= \zeta \frac{w_{50}^2}{2g} = 1.26 \times 2 \times \frac{(8.2)^2}{2 \times 9.81} = 1.84[\text{米}]$$

$$\therefore h_4 = 4.1 + 1.84 = 5.44[\text{米}],$$

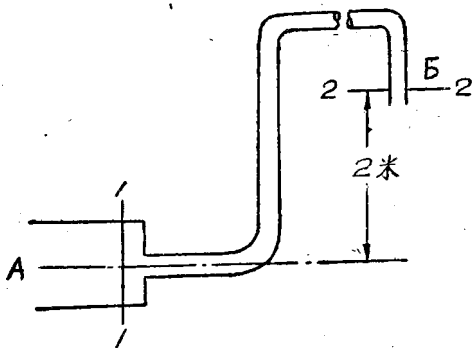
$$\text{故 } \Sigma h_n = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 0.0167 + 0.078 + 0.22 + 5.44 = 5.76[\text{米}]$$

$$\text{因为 } Z = \frac{w_2^2}{2g} + \Sigma h_n = \frac{(8.2)^2}{2 \times 9.81} + 5.76 = 6.28[\text{米}]$$

由此可得, 槽内水面高度 $= 6.98 - 2 = 4.28[\text{米}]$ 。

14. 下图所示, 为一内径为 150[毫米]的水管, 其中水的压力为 2.5[绝对大气压], 温度为 20[°C]。经一支管 $\phi 18 \times 1.5$ [毫米], 其长度为 15[米]。管路中包括 3 个 90° 肘管, 一个标准阀。水出口端与 A 管的中心线距离为 2[米]。试计算当标准阀全开时水的流量[升/分]。

[解] 先列出柏努利方程式, 选择 $Z_1 = 0$,



例 14 附图

则 $Z=2$ 。 $p_2=1$ [大气压], $p_1=2.5$ [大气压] $w_1=0$, $w_2=?$

代入上式, 可得:

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = Z_2 + \frac{w_2^2}{2g} + \Sigma h_n$$

即

$$\frac{1.5 \times 10,340}{1000} = 2 + \frac{w_2^2}{2g} + \Sigma h_n, \quad (1)$$

其中 Σh_n 包括导管中的摩擦阻力

$$\lambda \frac{l}{d} \frac{w_2^2}{2g} \text{ 及局部阻力 } (0.5 + 3 + 1.26 \times 3) \times \frac{w_2^2}{2g} = 7.3 \frac{w_2^2}{2g}$$

$$\text{代入(1)式, 则得 } 15.5 = 2 + \left(1 + \lambda \frac{15}{0.015} + 7.3\right) \frac{w_2^2}{2g}$$

$$\text{或} \quad (8.8+1000\lambda) \frac{w_2^2}{2g} = 13.5 \quad (2)$$

(2) 式中有 λ 及 w_2 两未知数, 因 λ 是 Re 的函数, 而 $Re = \frac{dw_2\rho}{\mu}$ 中除 w_2 外均为已知数。

$$\text{即:} \quad Re = \frac{dw_2\rho}{\mu} = \frac{0.015 \times w_2 \times 1000}{\frac{1}{9810} \times 9.81} = 15,000w_2 \quad (3)$$

但是从上列(2)、(3)式的关系, 还不可能直接求得 w_2 , 只能用“尝试误差法”解决。

依照上列的情况可以有二种方法:

(1) 假设一 w_2 值, 由(3)式解得 Re , 查教本 1—12 图得对应的 λ 值, 将 λ 及 w_2 值代入(2)式左端, 计算结果如不等于 13.5, 则另行假设一 w_2 值, 重新计算。直至右端的结果很接近于或等于 13.5 为止, 那么该 w_2 值即为所求之值。

(2) 假设一 λ 值, 代入(2)式解出 w_2 , 将 w_2 值代入(3)式计算查 Re , 查图得到一对应的 λ 值, 看其是否与原假设的 λ 值相符合。

这两种方法中, 以第二方法为佳。因为水(粘度较小)在管中流动时, 一般都是湍流方式。 λ 值大概在 0.03 附近, 当 Re 数相差数倍时, λ 值变化极少, 所以易于校正。

现设 $\lambda = 0.03$ 代入(2)式, 得:

$$(8.8+1000 \times 0.03) \frac{w_2^2}{2g} = 13.5$$

$$w_2 = \sqrt{\frac{13.5 \times 19.6}{8.8+30}} = 2.58 [\text{米/秒}]$$

$$\text{代入(3)式得} \quad Re = 38,700$$

$$\text{查图得} \quad \lambda = 0.026。$$

故原设的 λ 值太大, 当 λ 值变小时从(2)式可知 w_2 则变大, 因此, Re 亦增大, 结果使 λ 值要小些, 故第二次假设 $\lambda = 0.025$, 代入(2)式中。

$$w_2 = \sqrt{\frac{13.5 \times 19.6}{8.8+25}} = 2.77 [\text{米/秒}]$$

此时, $Re = 41,500$, 查图得: $\lambda = 0.025$, 与原假设相符合。

当 $w_2 = 2.77 [\text{米/秒}]$ 时, 其每分钟的流量为:

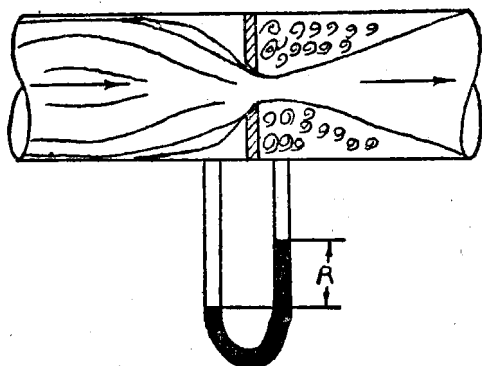
$$V = 60 \times 2.77 \times 0.785 (0.015)^2 = 30 [\text{升/分}]。$$

15. 水在内径 152 [毫米] 的水平导管中, 以平均速度 1.3 [米/秒] 流动。管路中装有孔板, 孔板的孔径为 86.5 [毫米]。如果流量系数 $C_0 = 0.61$, 试求水银在液柱压强计的读数。

[解]

$$\sqrt{w_0^2 - w_1^2} = C_0 \sqrt{2gh}$$

$$\text{因 } w_1 = 1.3 [\text{米/秒}];$$



例 15 附图

$$\therefore w_0 = 1.8 \left(\frac{152}{86.5} \right)^2 = 4.03 [\text{米/秒}].$$

$$C_0 = 0.61, g = 9.81 [\text{米/秒}^2]$$

$$\therefore h = \frac{w_0^2 - w_1^2}{C_0^2 \times 2g} = \frac{(4.03)^2 - (1.8)^2}{(0.61)^2 \times 1916} = 1.99 [\text{米水柱}],$$

$$h = R(S_{\text{Hg}} - S_{\text{H}_2\text{O}})$$

$$\text{即: } R = \frac{h}{S_{\text{Hg}} - S_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{1.99}{13.6 - 1} = 0.158 [\text{米}] = 15.8 [\text{厘米}]$$

由此可知,水銀在液柱压强計內的讀数为 15.8 [厘米]。

16. 在一內徑为 300 [毫米]的管道中,装一皮托管来测定气体的流速。該气体在 40[°C]及 1 [大气压]下,其平均分子量为 60,粘度为 0.02[厘泊]。皮托管插于管道中心綫上,液柱压强計的讀数为 30[毫米,水柱],試求气体在管道內的平均速度[米/秒]。

[解] 已知 $M_{\text{气体}} = 60$; $T = 273 + 40 = 313^\circ \text{K}$; $p = 1$ [绝对大气压],則气体之重度为:

$$\gamma_{\text{气体}} = \frac{60}{22.4} \times \frac{273}{313} = 2.34 [\text{仟克/米}^3];$$

因气体之重度与水相差甚大,故在

$$\Delta p = R(\gamma_{\text{水}} - \gamma_{\text{气体}})$$

式中, $\gamma_{\text{气体}}$ 可以略而不計。于是压强計讀数为:

$$R = \frac{\Delta p}{\gamma_{\text{水}}}$$

$$30 [\text{毫米水柱}] \sim 30 \times \frac{1000}{2.34} = 12,800 [\text{毫米气体柱}] = 12.8 [\text{米气体柱}]$$

代入 $h_{\text{气体}} = \frac{w_0^2}{2g}$ 即可求得 w_0 (中心綫气体速度即最大速度):

$$w_0 = \sqrt{2gh_{\text{气体}}} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 12.8} = 15.8 [\text{米/秒}]$$

因 $w_{\text{平均}} = \varphi w_0$; 設 $\varphi = 0.8$

$$\therefore w_{\text{平均}} = 0.8 \times 15.8 = 12.6 [\text{米/秒}].$$

17. 水以平均流速 $w=0.45$ [米/秒] 在 $t=50$ [°C] 时流过预热器各管间的空隙, 为了求此预热器的流体阻力, 我們曾作了模型試驗。該模型的尺寸为实物尺寸的 $\frac{1}{2}$, 模型中流体为 20 [°C] 的空气。試求 (1) 在模型中空气的流速应为若干 [米/秒]?

(2) 若模型的流体阻力等于 260 [毫米水柱], 則实物中水的阻力损失为若干?

[解]

(1) 水在 50 [°C] 时, 其重度为 988 [千克/米³],

$$\mu_1 = \mu_{\text{水}} = 0.549 \text{ [厘泊]} = \frac{0.549}{9810} \text{ [千克·秒/米}^2\text{]}$$

在 1 [大气压] 及 20 [°C] 时空气的重度为:

$$\gamma_2 = \frac{29}{22.4} \cdot \frac{273}{293} = 1.21 \text{ [千克/米}^3\text{];}$$

$$\mu_2 = \mu_{\text{空气}, 20^\circ\text{C}} = 0.018 \text{ [厘泊]} = \frac{0.018}{9810} \text{ [千克·秒/米}^2\text{]}$$

今假定预热器的管径为 25 [毫米], 如模型与实物中的流体流型相似, 則必須 Re 数相等。

即:

$$Re_1 = Re_2.$$

$$Re_1 = \frac{d_1 w_1 \gamma_1}{\mu_1 g} = \frac{0.025 \times 0.45 \times 988}{\frac{0.549}{9810} \times 9.81} = 22,000$$

$$Re_2 = \frac{d_2 w_2 \gamma_2}{\mu_2 g} = \frac{\frac{0.025}{2} \times w_2 \times 1.21}{\frac{0.018}{9810} \times 9.81} = 22,000$$

$$\therefore w_2 = \frac{22,000 \times 0.018}{12.5 \times 1.21} = 26.4 \text{ [米/秒]}$$

(2) 流体阻力准数在模型中为:

$$Eu_2 = \frac{\Delta p_2}{\rho_2 w_2^2} = \frac{\Delta p_2}{\gamma_2 w_2^2} \times g = \frac{260 \times 9.81}{1.21 \times (26.4)^2} = 3.02$$

所以在实物中流体阻力应为

$$3.02 = \frac{\Delta p_1 \times 9.81}{988 \times (0.45)^2}$$

$$\Delta p_1 = \frac{988 \times (0.45)^2 \times 3.02}{9.81} = 615 \text{ [毫米水柱]}.$$

18. 影响流体流动时的阻力因素为: d (內径); w (速度); ρ (密度); μ (粘度); 及 Δp (压力降)。即:

$$f(d, w, \rho, \mu, \Delta p) = 0.$$

試以因次分析方法求出其关系式 (用 F, L, T 三个基本因次出发)。

[解] 根据 π 定理, 上式应有二个无因次群, 即 $\varphi(\pi_1, \pi_2) = 0$ 。

$$\pi_1 = (d^a w^b \rho^c \mu)$$

$$\pi_2 = (d^e w^f \rho^g \Delta p)$$

$$\pi_1: F^0 L^0 T^0 = (L)^a (L/T)^b (FT/L^4)^c (FT/L^2)$$

$$\Sigma F = 0: C + 1 = 0, \therefore C = -1;$$

$$\Sigma L = 0: a + b - 4C - 2 = 0; a = -1;$$

$$\Sigma T = 0: -b + 2C + 1 = 0; b = -1$$

即:

$$\pi_1 = d^{-1} w^{-1} \rho^{-1} \mu = \mu / dw\rho = \frac{1}{Re};$$

$$\pi_2: F^0 L^0 T^0 = (L)^e (L/T)^f (FT^2/L^4)^g (F/L^2)$$

$$\Sigma F = 0, g + 1 = 0; \therefore g = -1;$$

$$\Sigma L = 0, e + f - 4g - 2 = 0, e = 0,$$

$$\Sigma T = 0, -f - 2g = 0, f = -2。$$

即

$$\pi_2 = d^0 w^{-2} \rho^{-1} \Delta p = \frac{\Delta p}{\rho w^2},$$

故可得关系式如下:

$$\varphi(\pi_1, \pi_2) = \varphi\left(\frac{\mu}{dw\rho}, \frac{\Delta p}{\rho w^2}\right) = 0$$

或

$$\frac{\Delta p}{\rho w^2} = \varphi_1\left(\frac{dw\rho}{\mu}\right)。$$

19. 根据下列实验数据,以普遍计算公式计算管中的摩擦系数。

(1) 输送比重为 0.9 的石油流经钢管,管的内径为 300 [毫米]。长 13 [米]。管的水平的部分,具有下列与石油流速相对应的压力损失。

速度 w [米/秒]	压力损失 [千克/米 ²]
0.85	75.2
1.21	133
1.54	210
1.91	308
2.32	413

(2) 除此以外,还有水流过直径 60 [毫米],长 24 [米]的直钢管,而得到的实验数据如下:

速度 w_1 [米/秒]	压力损失 Δp [千克/米 ²]
0.11	10.7
0.16	20.5
0.22	34.4
0.26	46.4

【解】 利用计算因摩擦而引起的压强损失的公式,求出普遍计算式: