

化工計算

顧毓珍編

中國科學圖書儀器公司

出版

化 工 計 算

顧 毓 珍 編

江苏工业学院图书馆
藏 书 章

中 國 科 學 圖 書 儀 器 公 司

出 版

目 錄

導 言	i
第一章 流體的輸送	1
第二章 熱的傳遞	24
第三章 空氣的調節與處理	59
第四章 乾燥	73
第五章 蒸餾	84
第六章 氣體的吸收	111
第七章 蒸發	130
第八章 過濾	151
第九章 壓碎及研磨	158
第十章 機械離析	162
附 表 (計二十二項)	167

第一章

流體的輸送

1-1 柏努利氏定理(Bernoulli's Theorem) 此定理是根據一單位重量的流體由 A 點輸送到 B 點能量(Energy)不減的原理。[§] 這重量的流體,在 A 點時含有能量,必等於這重量的流體,在 B 點時含有的能量,減去從 A 到 B 間損失的能量或加上其間得到的能量。能量清算公式為:(圖 1-1)

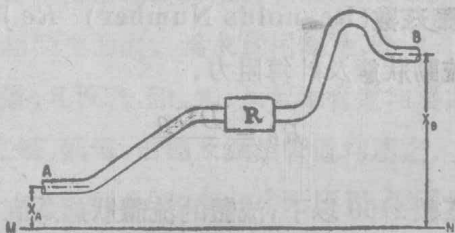


圖 1-1 柏努利氏定理

$$X_a + \frac{U_a^2}{2g} + p_a v_a + \int_a^b p dv + R = X_b + \frac{U_b^2}{2g} + p_b v_b + F \quad (1)^*$$

$\int p dv$ 為流體膨脹後獲得的能量。液體不因壓力的變更而膨脹,故此項能量即等於零。氣體則不同,可應用一般氣體定律(Gas Laws)以解得之。如氣體的溫度不變,

* 符號說明詳本章末頁

$$\int p dv = bT \ln \frac{V_b}{V_a} = bT \ln \frac{p_a}{p_b} \quad (2)$$

R = 用唧筒後獲得的能量

F = 流體流動時與管道接觸的摩擦阻力

b = 氣體定律中常數 = 1544/ 分子量(英單位)

公式(1)爲能量清算(Energy Balance),故若質量的單位爲磅,長度的單位爲呎,則其單位應爲(磅 × 呎)。若以一磅爲根據,式(1)中的各項單位,都應以“呎”表示,故每項單位又稱“壓頭”或“高差”(Fluid Head)。

1-2 雷諾爾茲數(Reynolds Number) Re 用以代表此數,決定流體的流動狀態及計算阻力。

$$Re = \frac{DU\rho}{\mu}$$

在雷諾爾茲數 2100 以下,流體的流動狀態爲直流,或滯流,在 4000 以上,則爲激流或湍流。在 2100 至 4000 中間,則爲臨界段(Critical Region)可能爲直流或激流,須視各種條件而定。

1-3 摩擦阻力(F)的計算方法 式(1)中 F 的計算,可從方寧氏公式(Fanning Equation)與雷諾氏數由圖 1-2 中得之。方寧氏公式如下:

$$F = \frac{2fLU^2}{gD} \quad (3)$$

其中 f 乃摩擦力係數，可從圖中求得之（不論在滯流或湍流狀態）。

(1) 滯流時計算公式及珀賽氏定律(Poiseuille's Law) 在滯流時不論其為何種管道可應用下列公式。

$$f = \frac{16}{Re} \quad (4)$$

若以式(4)代入式(3)，即成式(5)是為珀賽氏定律。

$$F = \frac{32\mu LU}{gD^2\rho} \quad (5)$$

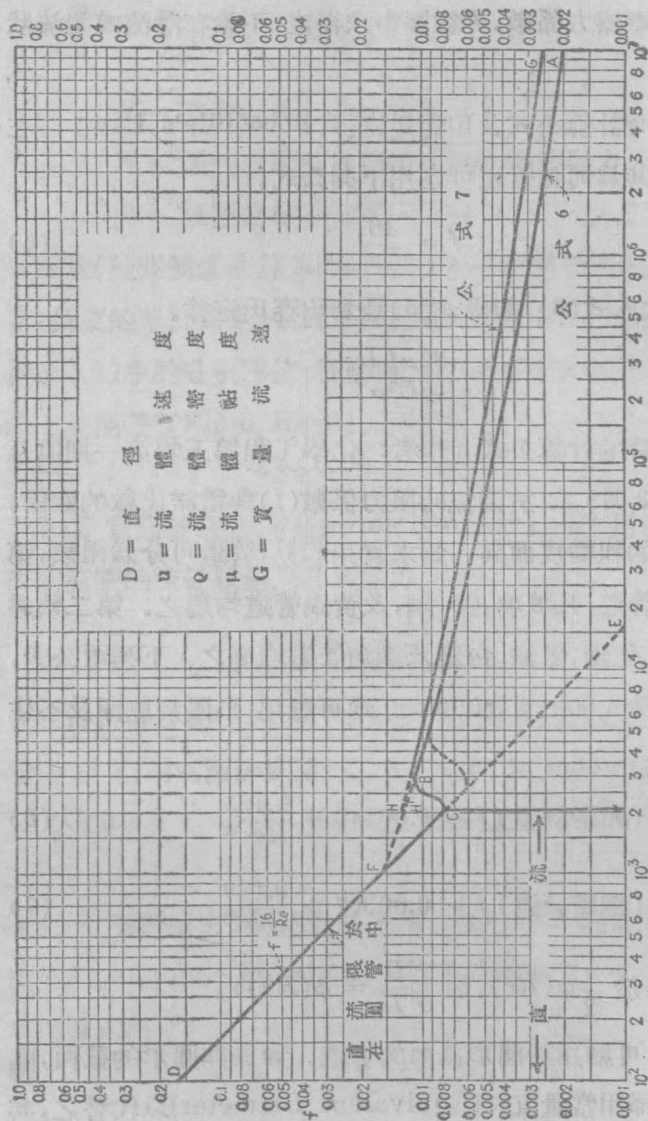
(2) 湍流時的計算公式（作者：化學工程第三卷第一期第三頁，1936年3月）於湍流時阻力係數(f)與雷諾氏數的關係，因管道材料的粗糙度而異。為求實用起見，管道可分為兩類，第一類為光滑管道，凡玻璃，鉛，銅，及黃銅管道均屬之。第二類為鋼鐵管道，凡生鐵，熟鐵，白鐵及鋼類管道均屬之。下列兩公式，凡自雷諾氏數 4,000 到 3,000,000 均可應用，惟限於乾淨及不生銹的情形下。

$$(\text{光滑管道}) f = 0.00140 + \frac{0.125}{Re^{0.32}} \quad (6)$$

$$(\text{鋼鐵管道}) f = 0.00307 + \frac{0.189}{Re^{0.38}} \quad (7)$$

(其中 f 即等於 $\frac{g}{2}\phi(Re)$ ，因 $\frac{FD}{U^2L} = \phi(Re)$)

以上公式，可應用於圓形截面的管道。如係非圓形的截面，直徑在習慣上都用當量直徑(Equivalent Diameter)以代替之，其



定義為四倍形狀因素，形狀因數的定義如下：

$$\text{形狀因數(Shape Factor)} = \frac{\text{截面積}}{\text{浸潤週邊}}$$

若係直徑 D_1 和 D_2 的環隙，其當量直徑為 $(D_1 - D_2)$ 。

1-4 擴大損失 若管道截面驟然擴大，則發生比在直管中較多旋渦因而引起擴大損失。計算突然擴大的損失，可用下式

$$\Delta H_e = \frac{(U_1 - U_2)^2}{2g} \quad (8)$$

其中，

ΔH_e = 因擴大而引起的壓頭損失，單位“呎”

U_1 = 在較小截面上的速度，單位“呎/秒”

U_2 = 在較大截面上的速度單位“呎/秒”

1-5 縮小損失 若管道截面突然縮小，則由於縮小而增旋渦因而引起的損失為：

$$\Delta H_e = \frac{KU_2^2}{2g} \quad (9)$$

其中，

ΔH_e = 因縮小而引起的壓頭損失，單位“呎”

U_2 = 在較小截面上的速度，單位“呎/秒”

K = 常數，須視小管與大管截面面積比例而定，見

圖 1-3。

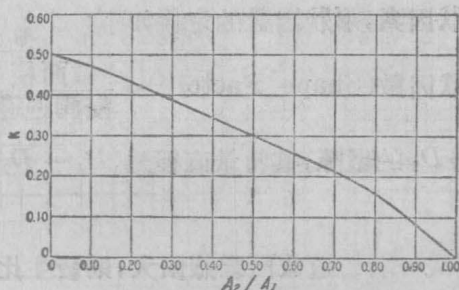


圖 1-3 縮小常數與面積比例

1-6 管道零件中的損失 管路方向的改變,以及閥頭(Valve)或其他零件的添增,在流體流動中,都會引起騷擾,發生旋渦,而引起損失。這種管道零件中所引起的損失與管件大小成正比例,在化工書籍中,均以等量長度(Equivalent Length)表示之。在實際應用上,任何管路,無不有零件存在,故在用方寧氏公式以計算阻力高差時,其中管道長度,實係指直管長度加上零件的等量長度而論。(附表 1-1)

1-7 孔流速計測定流體速度的計算 孔流速計 (Orifice Meter) 及下列數種流速計,係測定流體速度之儀器。孔流速計可直接裝入管路中其計算公式如下:(圖 1-4)

$$\sqrt{U_0^2 - U_a^2} = C_0 \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\rho}} = C_0 \sqrt{2g\Delta H} \quad (10)$$

其中, U_0 = 通過孔中的流速(孔的面積為已知數)

U_a = 通過管道的流速

ΔH = 小孔前後的高差

一般孔流速計中的直徑，與管道中的內徑相比，恆小於 $1/5$ ，故 u_a^2 與 u_0^2 ，相比極小。如 u_a^2 可以省去，則式(10)可以簡化為：

$$U_0 = C_0 \sqrt{2g\Delta H} \quad (10a)$$

壓力計之一端裝在小孔的上游，應於 $0.8D$ 的位置，另一端在下游，應裝在 $0.4D$ 的位置，如附圖所示。倘小孔係銳邊形(Sharp-Edged) 式中 $C_0 = 0.60 - 0.61$ 。倘小孔係圓邊形(Round-Edged)，則 $C_0 = 0.98$ 。在實際應用上， C_0 與雷諾氏數及流孔與管道的面積比例等等均有關係，故此項常數可因不同條件而增減。(可參閱參攷書⁽⁶⁾或⁽⁷⁾)

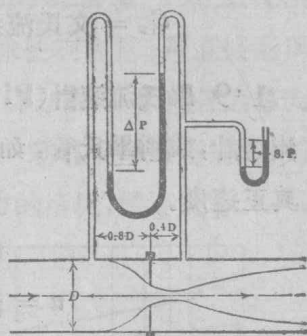


圖 1-4 孔流速計

1-8 文氏流速計 (Venturi-Meter) 測定流體速度的計算

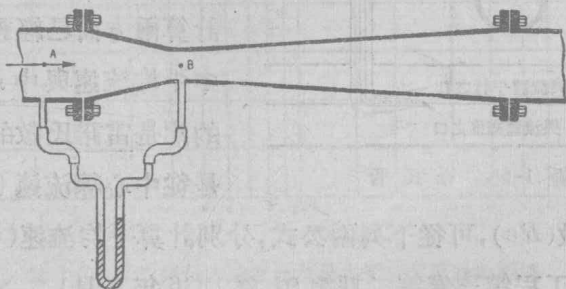


圖 1-5 文氏流速計

文氏流速計與流孔計的原理相仿，但管道由大縮小是逐漸的，而成圓錐形，再由小放大，也是逐漸的。所以流體經過流孔計後，壓力的損失較大，可是經過文氏流速計，壓力的損失極小。壓力損失的大小，就影響動力消耗的多寡(圖 1-5)。

$$\sqrt{U_B^2 - U_A^2} = C_v \sqrt{2g\Delta H} \quad (11)$$

C_v = 文氏流速計常數，自 0.98 至 0.99

1-9 畢氏流速計(Pitot Tube)測定流體速度的計算 畢氏流速計，或稱畢氏管，如圖 1-6 所示，用以測定管道中那一點的真正速度。

$$u = \sqrt{2g\Delta H} \quad (12)$$

u = 流體在那一點的速度

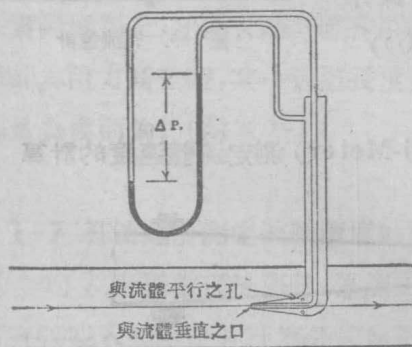


圖 1-6 畢氏管

在應用上，吾人用畢氏管來測定管道中中心線的速度，因為這個速度，是管道中最大的速度。從實驗及計算兩方面已經證明管道中平均流速與中心線流速的比是雷諾氏數的函數，於是從中心線流速(U_{max})及

雷諾氏數(Re)，可從下列兩公式，分別計算平均流速(U_{ave})。(作者：化學工程第三卷第二期第 91 頁 1936 年 6 月)

$$(\text{鋼鐵管道}) \frac{U_{ave}}{U_{max}} = \frac{1 + 0.0163 Re^{0.38}}{1.38 + 0.0163 Re^{0.38}} \quad (13)$$

$$(\text{光滑管道}) \frac{U_{ave}}{U_{max}} = \frac{1 + 0.0112 Re^{0.32}}{1.32 + 0.0112 Re^{0.32}} \quad (14)$$

雷諾氏數內的速度一項，是流體的平均速度，所以從畢氏管測定所得的中心流速度，用式 (13) 或 (14) 來計算，要用試探法 (Trial and Error Method)。爲更求便利起見，可直接應用圖 1-7，這是應用畢氏管時最簡單的計算方法。畢氏管的最大用處，即在對於已經裝就的管道，可開一新孔將畢氏管插入，用以求得在中心線的最高速度。同時壓力的消耗，幾等於零。

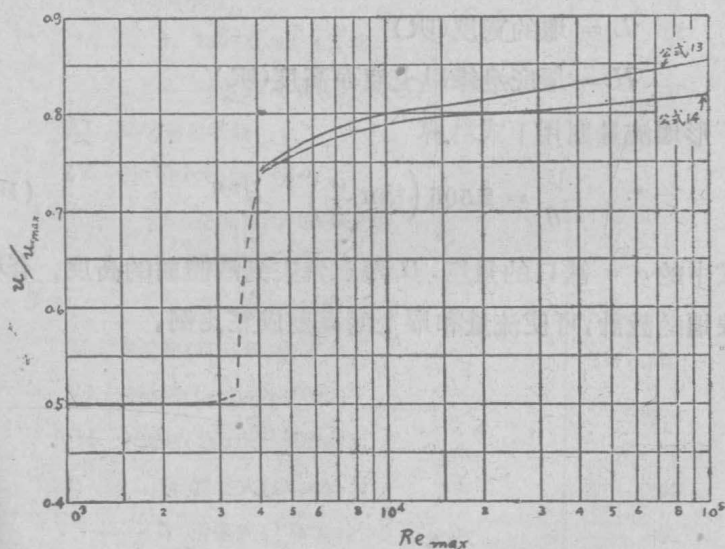


圖 1-7 平均與最大速度比及最大雷諾爾茲數的關係

1-10 適用於敞槽中測定流量的堰(Weir) 堰或堤僅適用於敞槽中流動的液體(如紙漿廠)。堰的構造是一堰板,上有缺口,插入敞槽(Open Channel)時液體以流動面積縮小而增加高差(H)。以缺口形式的不同,可製成爲長方形堰, V 形堰及曲線堰。流量的計算由測量堰的缺口上的液面高度而引用公式。如長方形堰流量的測定,可用弗蘭雪史(Francis)公式。

$$\frac{V}{\theta} = 3.33(L - 0.2H)H^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

式中, V = 流量(立方呎)

θ = 時間(秒)

L = 堰的寬度(呎)

H = 堰底邊緣以上液面高度(呎)

V 形堰流量則用下式計算

$$\frac{V}{\theta} = 2.505 \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right)^{0.966} H^{2.47} \quad (16)$$

式中的 α = 缺口的角度, H 乃三角尖到液體面的高度。有種曲線堰的設計,可使流量和堰上的高差成正比例。

表 1-1 管道零件及水表引起的損失

零 件 或 水 表 種 類	等長度 L_e , (以管道直徑計)
I. 肘管類	
1. 45° 肘管	15
2. 90° 肘管(標準半徑)	32
3. 90° 肘管(適中半徑)	26
4. 90° 肘管(特長半徑)	20
5. 90° 肘管(方形兩圓筒接住)	60
II. 回灣管類	
1. 180° 回灣管(緊接)	55
2. 180° 回灣管(適中半徑)	50
III. T 字形肘管類	60
IV. 閥(Valve)類	
1. 全開閘門(Gate)閥	7
2. 全開球心(Globe)閥	300
3. 全開直角(Angle)閥	170
V. 聯管節(Union)類	(可不計)
VI. 聯軸節(Coupling)類	(可不計)
VII. 水表類(Water Meter)	
1. 圓盤式(Disc)	400
2. 活塞式(Piston)	600
3. 衝動水輪式(Impulse Wheel)	300

表 1-2 標 準 鐵 管

管 號 (吋)	外口直徑 (吋)	內口直徑 (吋)	壁 厚 (吋)	重 量 (每呎磅)	管端之螺旋 數目(每吋)
$\frac{1}{8}$	0.405	0.269	0.068	0.244	27
$\frac{1}{4}$	0.540	0.364	0.088	0.424	18
$\frac{3}{8}$	0.675	0.493	0.091	0.567	18
$\frac{1}{2}$	0.840	0.622	0.109	0.850	14
$\frac{3}{4}$	1.050	0.824	0.113	1.130	14
1—	1.315	1.049	0.133	1.678	11— $\frac{1}{2}$
1— $\frac{1}{4}$	1.660	1.380	0.140	2.272	11— $\frac{1}{2}$
1— $\frac{1}{2}$	1.900	1.610	0.145	2.717	11— $\frac{1}{2}$
2—	2.375	2.067	0.154	3.652	11— $\frac{1}{2}$
2— $\frac{1}{2}$	2.875	2.469	0.203	5.793	8
3—	3.500	3.068	0.216	7.575	8
4—	4.500	4.026	0.237	10.790	8
6—	6.625	6.065	0.280	18.974	8
8—	8.625	7.981	0.322	28.554	8
10—	10.750	10.020	0.365	40.483	8
12—	12.750	12.000	0.375	49.562	8

表 1-3 標準銅凝汽管(Condenser Tube)

外口直徑 (吋)	B.W.G. 號 數	管壁厚度 (吋)	內口直徑 (吋)	內口面積 (平方吋)	每秒 1 呎速 度流量 (每 小時磅, 水)
$\frac{1}{2}$	12	0.109	0.282	0.0624	97.25
	14	0.083	0.334	0.0876	136.5
	16	0.065	0.370	0.1076	167.5
	18	0.049	0.402	0.1269	197.6
	20	0.035	0.430	0.1452	226.4
$\frac{3}{8}$	16	0.065	0.495	0.1925	300.7
	17	0.058	0.509	0.204	316.4
	18	0.049	0.527	0.2181	338.9
	20	0.035	0.555	0.2420	377.1
	22	0.028	0.569	0.254	—
$\frac{3}{4}$	16	0.065	0.620	0.3019	471.3
	17	0.058	0.634	0.3155	491.5
	18	0.049	0.652	0.3339	520.5
	20	0.035	0.680	0.364	—
1	16	0.065	0.870	0.5945	927.0
	17	0.058	0.884	0.6135	956.0
	18	0.049	0.902	0.6390	996.5
	20	0.035	0.930	0.679	—
1— $\frac{1}{4}$	16	0.065	1.120	0.9852	1535
	17	0.058	1.134	1.011	1573
	18	0.049	1.152	1.043	1625
	20	0.035	1.180	1.096	—
1— $\frac{1}{2}$	10	0.134	1.232	1.193	1860
	12	0.109	1.282	1.292	2015
	14	0.083	1.334	1.398	2181
	16	0.065	1.370	1.473	2294
2	10	0.134	1.730	2.355	3671
	12	0.109	1.782	2.494	3885
	14	0.083	1.834	2.643	4122
	16	0.065	1.870	2.747	4281

表 1-4 水的密度黏度及導熱係數

溫 度 (F°)	密 度 (磅/立方呎)	黏 度		導熱係數 (k)
		磅/(呎)(秒) $\times 10^3$	厘 泊 ⁽¹⁾	
32	62.42	1.205	1.794	0.325
40	62.43	1.040	1.546	0.329
50	62.42	0.880	1.310	0.334
60	62.37	0.758	1.129	0.339
70	62.30	0.660	0.982	0.344
80	62.22	0.579	0.862	0.348
90	62.11	0.513	0.764	0.353
100	62.00	0.458	0.682	0.358
110	61.86	0.414	0.616	0.363
120	61.71	0.376	0.559	0.368
130	61.55	0.343	0.511	0.372
140	61.38	0.316	0.470	0.377
150	61.20	0.291	0.433	0.382
160	61.00	0.269	0.401	0.387
170	60.80	0.250	0.372	0.392
180	60.58	0.233	0.347	0.396
190	60.36	0.218	0.325	0.401
200	60.12	0.205	0.305	0.406
210	59.88	0.193	0.287	0.411
212	59.83	0.191	0.284	—

(1)厘泊=Centipoise