

水泥工業的 壓縮空氣輸送裝置



重工業出版社

目 次

序 言	(1)
第 一 章 壓縮空氣輸送的基本理論與計算	(5)
管道內的流體力學原理	(5)
氣體沿管道流動時的特性	(9)
固體在空氣流裏的運動	(13)
確定壓力損失	(20)
計算壓力損失	(25)
壓縮空氣輸送裝置計算實例	(30)
計算混合物流動時的阻力	(31)
第 二 章 壓縮空氣輸送泵	(33)
固定式螺旋空氣輸送泵	(33)
移動式螺旋空氣輸送泵	(42)
立式螺旋空氣輸送泵	(45)
輸送粉狀物料的倉式空氣輸送泵	(47)
輸送料漿的倉式空氣輸送泵	(56)
第 三 章 管道及其管件	(59)
輸送管道	(59)
人工管理或壓縮空氣遙程管理的兩路開關	(63)
裝料管	(66)
管理複式開關壓縮空氣傳動裝置的壓縮空氣導管	(66)
倉滿球形指示器	(67)
進入空氣輸送泵的空氣的過濾器	(67)
清除空氣中粉塵的壓力式布袋收塵器	(69)
物料倉與物料倉之間的連接管	(70)
第 四 章 壓縮空氣卸料及氣化裝置	(72)
粉狀物料的氣化原理	(72)
M. A. 柏勞哈式的物料倉的空氣卸料法	(74)

藉氧化進行壓縮空氣卸料	(75)
壓縮空氣卸料器	(81)
用真空抽氣機從倉中卸水泥	(85)
用真空壓縮機從倉中卸水泥	(86)
裝有水泥的鐵路貨車的空氣添料及減料裝置	(88)

第五章 壓縮空氣輸送斜槽 (91)

概述	(91)
壓縮空氣輸送斜槽	(93)
多孔板	(96)
離心式送風機	(98)
送風機的吸濾器	(99)
除去空氣中水分的過濾器	(101)
壓縮空氣輸送斜槽的計算資料	(101)

第六章 水泥工業的壓縮空氣輸送裝置的安裝和操作 (104)

螺旋式壓縮空氣輸送泵	(104)
壓縮空氣輸送斜槽	(109)
吹鬆系統	(113)
壓縮空氣卸料器	(115)
壓縮空氣輸送裝置的遙程管理	(117)

序 言

在改建和新建的水泥廠中需要裝備大型並具有高度生產能力的設備，這些設備能改進生產過程，並使所有繁重的操作機械化。

現在蘇聯的水泥工廠是大規模的生產企業，其中車間內和工廠內的運輸問題具有很重大的作用，從而決定生產過程的連續性。

在水泥工廠中，工廠內及車間內的原料、半成品以及其他材料的運輸量是極龐大的。具體說，即是一個中型水泥廠的內部運輸情況，僅車間與車間之間所要輸送的原料，半成品和成品在一晝夜內就有10,000噸以上。又例如年產量為36萬噸的水泥廠，每晝夜的輸送工作計有：

1. 由採石場至碎石機輸送原料1,500噸（大塊物料）；
2. 由碎石機至磨機輸送原料1,500噸（小塊物料）；
3. 由磨機至拌合倉輸送研磨原料1,500噸（料漿或乾生料）；
4. 由拌合倉至迴轉窯輸送料漿或乾生料1,500噸；
5. 由迴轉窯至熟料堆場輸送熟料1,000噸（小塊物料）；
6. 由熟料堆場至水泥磨輸送熟料1,000噸（小塊物料）；
7. 由水泥磨至水泥倉輸送水泥1,000噸（粉狀物料）；
8. 由水泥倉至包裝機輸送水泥1,000噸（粉狀物料）；
9. 由堆場至磨煤裝置輸送燃料300噸（塊狀物料）；
10. 由煤磨至窯前煤倉輸送煤粉300噸。

總計——每晝夜運輸量為10,600噸。

以上輸送物料的數量中，粉狀及流體部分佔5,300噸即佔全數的50%，因此即創造了廣泛採用壓縮空氣輸送設備的先決條件。

現代水泥工業中，輸送粉狀物料有的採用機械設備，有的採用壓縮空氣輸送裝置。

表1 是各種輸送裝置的特性。

第1表

輸送設備的種類	最大供應距離 公尺	最小供應距離 公尺	傾斜角 度	最大輸送能力 立方公尺/小時
螺旋輸送機	40	2	0—10	100
提昇機	28	3	45—90	100
斗式輸送機	100	5	0—90	150
皮帶輸送機	120	3	0—20	300
壓縮空氣輸送斜槽	100	2	2—4	150
壓縮空氣輸送泵	1000	25	任意	100

平面輸送物料，可以採用螺旋輸送機、皮帶輸送機、斗式輸送機、以及壓縮空氣輸送泵和壓縮空氣輸送斜槽（譯者註：國內也有稱空氣滑送機者）。昇高輸送物料，可以採用提升機、皮帶輸送機和斗式輸送機，同時也可採用各種不同結構的壓縮空氣輸送泵。

當確定採用輸送裝備時，應根據技術的合理性和經濟條件來決定。平面輸送粉狀物料，距離在50公尺以內時，其最經濟的裝置應為壓縮空氣輸送斜槽。高度達20公尺的昇高輸送，機械輸送裝置的設備費及經常費較壓縮空氣輸送裝置少。但遠距離的輸送，並包括有昇高輸送時，則壓縮空氣輸送裝置的設備費及經常費就比機械輸送裝置少得多。

壓縮空氣輸送裝置較機械輸送裝置具有下列優點：

a) 壓縮空氣輸送裝置佔據地方很小，並適合於任何地方條件（輸送管坡度不受限制）；

b) 採用壓縮空氣輸送裝置，其生產設備的佈置形式可以選擇最理想的；

b) 輸送距離超過100公尺時，壓縮空氣輸送裝置較機械輸送裝置經濟得多；

r) 壓縮空氣輸送裝置可以減少因輸送物料的磨擦作用所引起的損壞，同時僅需要少數的管理人員。

壓縮空氣輸送既有這些優點，即使在不太遠的距離時採用它，雖然耗電量較大，也是值得的。

圖1表示現代水泥工廠的水泥生產程序圖，其中虛線表示可以使用壓縮空氣輸送裝置。下列運輸過程，利用壓縮空氣輸送裝置完全可以代替機械輸送裝置：

1) 由煤磨輸送煤粉到迴轉窯；

2) 由水泥磨輸送水泥到水泥倉；

3) 水泥倉出料並輸送到包裝機，以及輸送到鐵路貨車內。

壓縮空氣輸送裝置除用於上述運輸過程外，還可應用於乾法生產的水泥工廠中的以下的運輸過程：

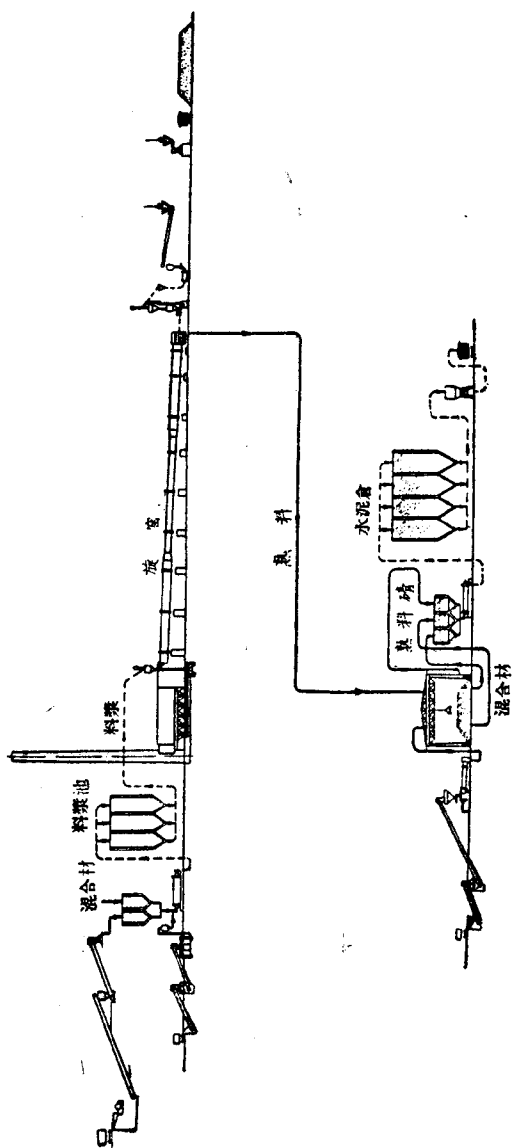
a) 由生料磨輸送生料到生料拌合倉並用壓縮空氣拌合生料；

b) 由生料拌合倉輸送拌合好了的生料到迴轉窯。

以壓縮空氣輸送料漿，在水泥工廠中尚未被廣泛採用，但是採用壓縮空氣輸送料漿在技術上是合理的，因為料漿中常含有細而硬的石粒和砂粒，使普通輸送料漿的離心泵的轉動部分很快地磨損。

壓縮空氣輸送裝置分壓送、抽吸和攪拌三種系統（後者在水泥工業中尚未廣泛採用）。

壓縮空氣輸送裝置的主要程序圖（壓送系統）如圖2所示。



第 1 圖 水泥生產流程圖（虛線表示可以採用壓縮空氣輸送裝置）

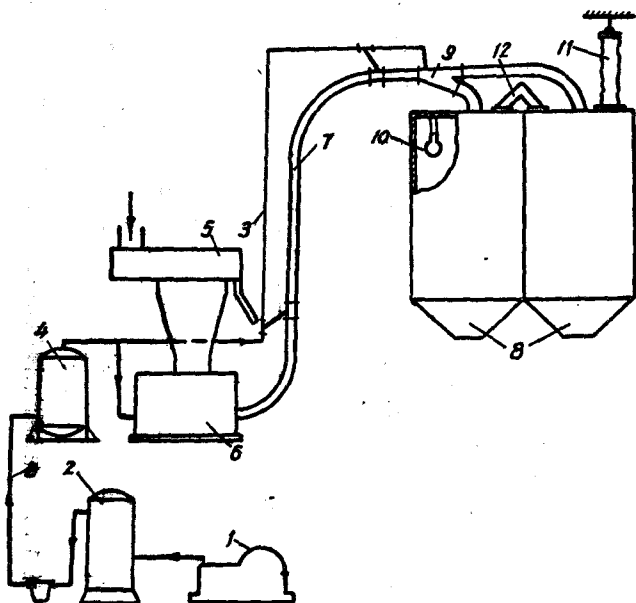
壓縮空氣輸送裝置的主要部分包括空氣壓縮機、螺旋式和倉式空氣輸送泵、輸送管道及其他零件等。

當壓縮空氣輸送時，應避免物料中含有水分；因此由壓縮機出來的壓縮空氣在進入空氣輸送泵以前，必須在空氣輸送泵附近的特製過濾器內清除其中的油和水份。

全部輸送設備可以各別在工作地點管理，也可以在遠方用控制盤管理。

在水泥工廠中採用壓縮空氣輸送裝置又可以儘可能合理的組織排列所有的設備，不僅減少管理人員的數目，同時還可以改善勞動條件。

無疑的，不久的將來，壓縮空氣輸送裝置在水泥工業中將被更廣泛地採用。



第2圖 壓送系統空氣輸送裝置的程序圖

- | | | |
|-----------|---------|----------|
| 1—空氣壓縮機， | 2—貯氣罐， | 3—空氣管道， |
| 4—過濾器， | 5—節， | 6—空氣輸送泵， |
| 7—輸送管道， | 8—物料倉， | 9—Y形三通管， |
| 10—倉滿指示器， | 11—過濾器， | 12—連接管。 |

第一章 壓縮空氣輸送的基本理論與計算*

管道內的流體力學原理

壓縮空氣輸送裝置的作用主要是利用空氣流的力量將物料粒子輸送至相當遠的距離，因此在壓縮空氣輸送裝置的管道中要造成人工的空氣流以輸送物料粒子，其造成空氣流的條件之一是在管道各端造成若干差別的壓力。

我們已知道，空氣中分子彼此之間處於靜止狀態時所顯示出的壓力在流體力學中稱為靜壓力。這種壓力造成了空氣中的位能。空氣中分子彼此之間處於運動狀態時所顯示出的壓力稱為流體壓力。這就是空氣流在直管裏對於管壁作用的可變壓力。

測量流體壓力的地方，就可以決定空氣流的位能。

在不同的直線氣流中流體壓力與空氣速度之間的關係可用下列方程式表示：

$$P + \rho \frac{v^2}{2} = \text{常數。}$$

式中：P——空氣的流體壓力；

ρ ——空氣的密度；

v——空氣的速度。

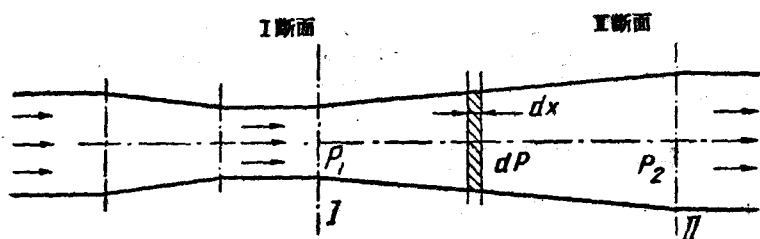
*當敘述壓縮空氣輸送的理論與計算時曾參考 К.И. 斯特拉霍維奇 (Страховича) 教授的著作和中央航空動力研究院的一些材料。

此方程式適用於以下情況：

1. 穩定的氣流，即空氣流在任何一點上其速度和方向在流動的時間內不發生變化。
2. 氣流均勻地充滿管道的整個斷面，因此其氣流速度在所測定之斷面的任何一點上均是相同的，但實際上這種情形是不可能的。因此可以假定其不均勻的氣流作為均勻的氣流，該氣流的速度等於實際氣流的平均速度。
3. 連續氣流，所說的氣流不應有真空或間斷，下個定義說，即是氣體在一定時間內通過管道的任何兩個橫斷面的流量相等（合乎實際情況）。

說明 根據流體壓力與空氣速度的關係的方程式可以假定：

(1) 運動着的空氣不被壓縮，(2) 在一定的時間內管道每一斷面上所通過的空氣，不僅重量相等，且體積也相等，(3) 氣流流動時無摩擦力。



第3圖 空氣沿管道流動的情況

圖3表示空氣沿不同斷面的管道流動的情況。

P_1 和 P_2 表示斷面Ⅰ與斷面Ⅱ中的流體壓力；當氣流從斷面Ⅰ——Ⅰ向斷面Ⅱ——Ⅱ流動時，在所規定的時間內通過該兩斷面的空氣數量 Q 相等，但在此兩斷面中的氣流速度則與各該斷面積成反比。

在該情況下，一些流層經常如同物體一樣，以加速度運動，並且產生慣性力，該慣性力等於運動物體的質量與加速度（ $m \frac{dv}{dt}$ ）的乘積，其慣性力的方向則與加速度的方向相反，即在那時候與氣流流動的方向一致。隨着氣流的膨脹，速度即行下降，引起慣性力的聚積，因而氣流壓力增大。由於慣性力所增加的壓力均勻地分佈在管道的整個斷面上，該增加的壓力決定於最初斷面至所研究的斷面的距離（在該情況下即斷面Ⅰ——Ⅰ）。為了充分的計算所增加的壓力，細分斷面Ⅰ——Ⅰ與斷面Ⅱ——Ⅱ之間的空間為若干個極薄的 dx 基本層，並計算每一層在單位面積上所增加的壓力 dp ，並積分之，即等於該空間上所增加的壓力。

當速度從 v_1 改變到 v_2 時，斷面Ⅰ至斷面Ⅱ之間各基本層所增加的壓力總和的範圍等於：

$$P_2 - P_1 = \rho \frac{v_1^2}{2} - \rho \frac{v_2^2}{2},$$

將方程式兩邊移項，並以 $\frac{\gamma}{g}$ 代替 ρ ，則得：

$$P_1 + \frac{\gamma v_1^2}{2g} = P_2 + \frac{\gamma v_2^2}{2g}. \quad (1)$$

因為此方程式適用於管道的任何兩個斷面，則得：

$$P + \rho \frac{v^2}{2} = \text{常數}.$$

上述方程式也說明管道的兩個斷面間流體壓力與空氣速度在氣流的不同斷面上的關係；並假定氣流沿該管道流過時不遇有任何阻力。當氣流向相反的方向流動時，也可獲得同一結果。

實際上，由於阻力的存在，因而在管道的兩斷面之間的地方發生一些壓力的損失。因此在實際管道的任何兩斷面上，該方程式應發展為：

$$P_1 + \frac{\gamma v_1^2}{2g} = P_2 + \frac{\gamma v_2^2}{2g} + H_f, \quad (2)$$

式中： H_f ——在該斷面上由於氣流阻力所引起的壓力損失，用公厘水柱表示之。

方程式(2)左右兩邊的 $\frac{\gamma v_1^2}{2g}$ 和 $\frac{\gamma v_2^2}{2g}$ 用公斤/平方公尺表示，通稱為速度頭。

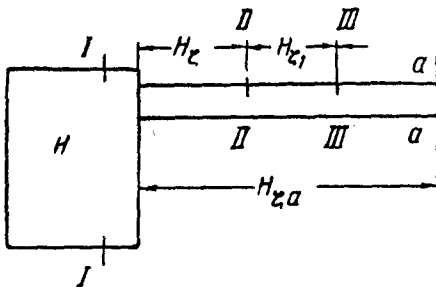
空氣沿管道所通過的數量(立方公尺)與速度頭的乘積可以確定該斷面上氣流的動能。因此可以說在測量壓力的地方，速度頭就是決定該處氣流動能的壓力。

在管道同一斷面上所測定的流體壓力與速度頭之和稱為全壓力。

因此，在測量壓力的地方，所謂全壓力就是決定氣流所具有全部能量的壓力。

我們研究的情況，就是在管道兩端壓力差一定的時候它的影響將使一定數量的空氣通過管道。如以相當大的容器為例，其中保持比大氣壓為高的固定壓力 H ，容器連接着管道的一端，此時管道就會處於固定壓力差 H 的作用之下(圖4)。

$$P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + H_f.$$



第4圖 氣體的流體壓力流程圖

上述方程式左邊的第一項—— P_1 ，即容器中所取的斷面的流體壓力等於容器中的靜壓力，可以假定容器中的空氣是處於靜止狀態，也就是 $P_1 = H$ 。

由於容器很大，斷面I上空氣的速度近似零，因此方程式左邊第二項也即變為零。

此時方程式即變為：

$$H = P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + H_f,$$

式中所有數值均以公厘水柱或公斤/平方公尺表示之。

將 H_f 移至方程式的左邊:

$$H - H_f = P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} \quad (3)$$

方程式左邊就是容器中靜壓力與 H_f 之差, H_f 也就是在克服管道上所研究段落的阻力時的壓力損失。其靜壓力與 H_f 之差好像是未消耗完的靜壓力。方程式右邊為流體壓力和速度頭的代數和, 如前面所確定的不是別的而是斷面 II—II 上氣流的全壓力。方程式 (3) 的左邊部分不決定於斷面 II—II 上的氣流速度, 從而得出結論: 方程式右邊, 即斷面 II—II 上的全壓力也不決定於氣流速度。

所以當穩定流動時, 斷面 II—II 上的全壓力具有固定的數值, 不決定於氣流通過該斷面時的速度 (v_2)。

當 H_f 不變時, 假若斷面 II—II 上的氣流速度增大 (由於斷面的幾何面積的減小), 則該斷面上的流體壓力就要減小, 其減小之值相當於所增大的速度頭, 同時全壓力 (P 和 $\rho \frac{v^2}{2}$ 之和) 的大小不變。反之, 假若氣流速度減小, 則流體壓力就相對地增加。

取管道上另一斷面 III—III, 當 $v_2 = v_3$ 時, 其斷面 II—II 與斷面 III—III 的方程式如下:

$$P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} = P_3 + \rho \frac{v_3^2}{2} + H_f$$

式中: H_f —管道兩斷面之間的壓力損失,

因此: $H_f = P_2 - P_3$ (4)

也就是說: 在管道任何段落的壓力損失除常決定於該處的阻力外, 並等於該段落起點與終點之間全壓力的變化。

如 $v_2 = v_3$, 則 $H_f = P_2 - P_3$, 也就是說, 以該兩斷面間流體壓力之差就可以確定其壓力損失。

斷面 I 與斷面 a—a (假若斷面 a—a 就是通入大氣的開口) 所組成的方程式如下:

$$H = P_a + \rho \frac{v_a^2}{2} + H_{f,a} \quad (5)$$

式中 $H_{f,a}$ —管內阻力所造成的壓力損失, 這個管子是從容器接到終點出口的 (全長)。顯然, 該管道出口斷面上流體壓力即等於大氣壓力。假定大氣壓力等於零 ($P_a = 0$), 因此, 方程式應為:

$$H = \rho \frac{v_a^2}{2} + H_{f,a} \quad (6)$$

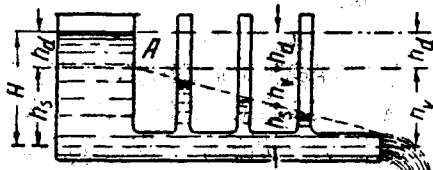
而全壓力:

$$P = \rho \frac{v_a^2}{2} \quad (7)$$

也就是說，該管道出口斷面上的氣流全壓力等於空氣從管道口排出的速度頭，根據從管道口排出的空氣速度計算。意思就是說，氣流在該斷面上僅具有動能，此種以速度頭所確定的含於空氣中的能量，最後在空氣逸入大氣中時，將轉化為熱能並消失於大氣中。所以，由壓力差 H 所確定的氣流全部能量均消耗於 $H\epsilon$ 和 $\rho \frac{v_a^2}{2}$ 的損失上，而轉化這些能量為熱能。

下面再用液體的例子加以說明（圖5）。

假若在一盛滿液體的容器的底部，接上一根斷面積不大的長管，該長管上附有一排垂直的管子，垂直管的距離可以隨意，則水從容器流至長管的出口時，所有垂直管的液體表面將傾斜成一直線。此時， H 為全壓力， h_s 為流體壓力， h_d 為速度頭， h_v 為壓力損失。



第5圖 液體的流體壓力的流程圖

氣體沿管道流動時的特性

前節所述關於流體壓力與空氣速度的關係所總結出的方程式，是假定運動流體為非黏性的，並且空氣分子彼此之間沒有摩擦力，但實際上，所遇到的氣體均是有黏性的，因此必須考慮此情況。

我們知道，黏度就是當氣體兩隣層相對運動時所呈現出的內部摩擦，該摩擦決定於各個分子之間的內聚力。

根據牛頓定律，內部摩擦力，即液體或氣體的一層和另一層相對運動時所呈現的力量，與運動的相對速度及各層表面積的大小成正比，並決定於液體或氣體的性質。

假設：

- q — 內部摩擦力，
- f — 接觸層的表面積，
- $v_{\text{ж}}$ — 液體（流體）的運動速度，
- r — 運動流體層與層之間的距離。

則牛頓定律的方程式表示如下：

$$q = \mu_{\text{BR3}} f \frac{dv_{\text{ж}}}{dr} \quad (8)$$

式中: $\frac{dv_{\text{ж}}}{dr}$ — 兩層之間單位長度上所增加的速度, μ_{BR3} — 比例常數, 決定於流體的性質和黏度係數或僅決定於黏度。

從牛頓定律:

$$\mu_{\text{BR3}} = \frac{q}{f} \cdot \frac{dr}{dv_{\text{ж}}}$$

假定, $f = 1$ 平方公分, $q = 1$ 達因,

$v_{\text{ж}} = 1$ 公分/秒, $r = 1$ 公分;

則得:

$$\mu_{\text{BR3}} = q,$$

從上述公式所得的絕對黏度, 以達因/秒·平方公分表示之。

黏度的絕對單位的定義——在液體內, 其層與層之間的距離為 1 公分, 液體的表面積為 1 平方公分, 層與層之間的相對速度為每秒 1 公分時, 其液體內部的摩擦為 1 達因, 此種黏度稱為黏度的絕對單位。

黏度的絕對單位就稱為泊:

$$1 \text{ 泊} = \left(\frac{\text{達因} \cdot \text{秒}}{\text{平方公分}} \right) = \left(\frac{\text{克} \cdot \text{公分}}{\text{秒}^2} \right) \cdot \left(\frac{\text{秒}}{\text{平方公分}} \right) = \left(\frac{\text{克}}{\text{公分} \cdot \text{秒}} \right).$$

為了將絕對黏度換算成在工程上所表示的單位, 必須將泊的數字除以 98.1, 因為:

$$\text{公斤} \cdot \text{秒} / \text{平方公尺} = \frac{981,000}{10,000} \text{ 達因} \cdot \text{秒} / \text{平方公分} = 98.1 \text{ 達因} / \text{秒} / \text{平方公分}.$$

黏度可以認為是各個分子之間的摩擦的函數, 決定於所有分子的結構及其距離。因此溫度的變化嚴重地影響黏度的數值。

氣體與液體相反, 其黏度隨溫度的升高而增加。

當黏性氣體或液體運動時, 在以不同速度運動着的鄰近微粒之間, 以及在運動的流體與包圍氣流的管壁之間均產生了摩擦力。

在氣流中可能發生兩種流動情況——層(黏)流與湍流。

層流就是流速慢時流體分子按次呈直線前進, 各個分子所走的道路都是平行該毫不紊亂, 在轉彎處形成規則的曲線系。

湍流就是流速快時不斷地形成漩渦。

爲了確定流動的形式，雷諾氏提供了用無名數的數值來表示之：

$$Re = \frac{vD}{\gamma}, \quad (9)$$

式中：v—流動速度，

D—管道直徑，

γ —運動黏度係數。

運動黏度係數， $\gamma = \frac{\mu_{BNS}}{\rho}$ 說明了流動流體的特徵，並決定於絕對黏度係數（公斤/秒/平方公尺）和流體的密度 ρ 。

根據研究證明：當雷諾氏數值 $Re < 2320$ 時只可能是層流，當 $Re > 3000$ 時只可能是湍流。

在上面所指的範圍之間（高於臨界速度和低於臨界速度）屬於轉換階段，此時其運動究竟具有那一種性質要決定於地方條件，特別是管道的粗糙程度。

空氣流動時，管道同一斷面內不同點的速度是不相同的。隨着空氣對管壁的摩擦減少，而流速增大，最後接近於管道中心的流速。

在圓形斷面的柱體管道上取無窮小的體積，根據流體力學原理，因摩擦而損失的壓頭可用下列公式表示：

$$dh_b = \lambda \frac{dl}{D} \cdot \frac{\gamma_b v^2}{2g} \text{ 公斤/平方公尺或公厘水柱,}$$

式中： λ —摩擦係數，

D—管道直徑，

dl—管道長度，

γ_b —空氣比重，

dh_b —壓頭損失，公斤/平方公尺或公厘水柱，

v—氣流的流速，公尺/秒。

摩擦係數 λ ，決定於雷諾氏數值：

$$Re = \frac{vD}{\gamma},$$

式中運動黏度係數 γ （物理黏度係數對密度的比值）決定於空氣溫度和大氣壓力。當大氣壓力爲760公厘水銀柱時，其關係如下：

溫 度	-10°	0°	10°	20°	40°	60°	100°
$\gamma \cdot 10^{-4}$	0.121	0.133	0.139	0.149	0.170	0.192	0.255

當空氣為層流時 ($Re < 2,320$), $\lambda = \frac{64}{Re}$ 。

在壓縮空氣輸送裝置的空氣輸送管道中，空氣的流動常具有湍流的特性。

其他作者（尼古拉德基，米介斯等）爲了確定在湍流時的摩擦係數根據雷諾氏數值提供了一些實驗公式，由於這些公式太複雜不適於利用。

引用 K. И. 斯特拉霍維奇的簡化公式以計算壓縮空氣輸送裝置的鐵管裏的摩擦係數：

$$\lambda = 0.246 Re^{-0.22}$$

茲再介紹伯列斯(Блесс)公式，該公式僅根據直徑D就可確定 λ 的數值：

$$\lambda = 0.0125 + \frac{0.0011}{D}$$

例題：當空氣速度爲20公尺/秒，運動黏度係數爲 0.15×10^{-4} ，及管道長度爲10公尺時，求在直徑爲0.2公尺的管道中的壓頭損失。

a) 先採用 K. И. 斯特拉霍維奇公式，

1) 確定雷諾氏數值：

$$Re = \frac{vD}{\gamma} = \frac{20 \times 0.2}{0.15} \times 10^4 = 26.6 \times 10^4。$$

2) 已知雷諾氏數值，求：

$$\lambda = 0.246 Re^{-0.22} = 0.0158。$$

3) 已知 λ ，求淨空氣的壓頭損失：

$$\begin{aligned} H_B &= \lambda \frac{l}{D} \cdot \frac{\gamma_B v^2}{2g} = 0.0158 \frac{10}{0.2} \cdot \frac{1.2 \times 20^2}{2 \times 9.81} \\ &= \frac{0.0158 \times 50 \times 1.2 \times 400}{2 \times 9.81} = 19.3 \text{ 公厘水柱。} \end{aligned}$$

6) 按照伯列斯公式確定摩擦係數：

$$\lambda = 0.0125 + \frac{0.0011}{0.2} = 0.0175。$$

已知 λ ，求淨空氣在管道中的壓頭損失：

$$\begin{aligned} H_B &= \lambda \frac{l}{D} \cdot \frac{\gamma_B v^2}{2g} = 0.0175 \frac{10}{0.2} \times \frac{1.2 \times 20^2}{2 \times 9.81} \\ &= \frac{0.0175 \times 50 \times 1.2 \times 400}{2 \times 9.81} = 21.4 \text{ 公厘水柱。} \end{aligned}$$

從上述例題可以看出，這些公式只能計算出壓頭損失的近似值。

除了空氣在管道中流動時的摩擦阻力之外，由於空氣流動方向的改變及管道

形狀的變化有時也可能呈現出一種所謂的局部摩擦阻力。

壓頭損失是由於速度頭而發生的，因此可用下列公式表示之：

$$h v_1 = \xi_1 h_d = \xi_1 \frac{\gamma v^2}{2g},$$

$$h v_2 = \xi_2 h_d = \xi_2 \frac{\gamma v^2}{2g},$$

.....

$$h v_n = \xi_n h_d = \xi_n \frac{\gamma v^2}{2g},$$

式中 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 數值代表速度頭部分的阻力係數。

阻力係數 ξ 之值這裏不引用，因為在手冊中已列有關於空氣在輸送管道內流動時其在最重要情況下的局部損失的 ξ 值。

固體在空氣流裏的運動

觀察任意一物體在水平管道裏氣流中流動時的現象。

當輸送粉狀物料時，由於物體微粒的大小較管道的大小要小得多，則假定該微粒位於氣流的中心部分而不考慮管壁對它在氣流中流動時所發生的影響。空氣的分子與物體表面相遇於 A 點，然後沿着物體的表面運動，遂改變其原來運動的方向，因而也影響了不與物體直接接觸的鄰近空氣分子的運動（圖 6）。

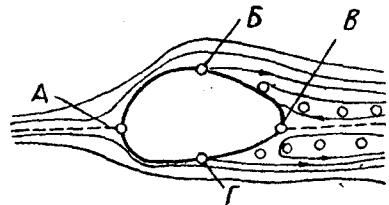
空氣分子的運動速度在 AB 部分增加，並且在 B 點變為最大。

由於物體 B 點處形狀彎曲，空氣分子在慣性作用影響之下即離開物體的表面，因此結果在 B 點之後即形成真空。

在此真空部分，開始吸入物體後面的空氣，該空氣之分子即遭遇到一股氣流，遂被携走，並在此破裂點之後形成渦流。

由於渦流運動使大量空氣分子逐漸地被吸入渦流中，以致於渦流不可能保持在物體表面上了，而脫離開物體順着氣流的方向前進；此時該處又成為真空代替了離開的渦流，重新再吸入空氣，形成渦流，這種過程重新開始。由於全部氣流動量的改變（減少）使形成渦流的過程往復進行。

由於這種氣流量的改變，物體對氣流產生外力，因而對氣流引起衡量，也就是物體對氣流的作用（圖 7）。這種作用的方向與氣流的方向相反。氣流對物體

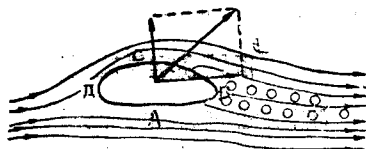


第 6 圖 由於氣流的破壞所形成的物料微粒對稱流動的情況

的作用也是如此，即氣流對物體所有動壓力的合力，其大小與物體對氣流的作用力相等，其方向則與物體對氣流作用的方向相反。

已知物體表面 ΠAB 上壓力差，即可確定所有壓力的合力。同時必須記住，表面上 ΠAB 的壓力大於 BCD 上的壓力，此壓力之差將由於渦流的破壞而成為週期性的改變。氣流對物體表面的壓力——合力線稱為氣流對物體的動壓力。

除氣流對物體的動壓力之外，氣流分子與物體表面之間的摩擦力的合力線對物體也有作用。所以物體因氣流的壓力所產生的總力等於動壓力與摩擦力向量的幾何和數。當物體的表面不光滑，氣流流動也很對稱時（沒有脫流破壞），則只能引起摩擦力；但假若物體的表面光滑，氣流流動也不對稱，這就是帶有脫流破壞的流動時，有一定數值的動壓力。因此物體的形狀與其在氣流中的位置有很重要的意義。假若物體分佈在氣流中比較均勻，則其壓力將接近於氣流的中心方向，假若物體或速度的分佈在氣流（即碰着物體之前的氣流）中不勻齊，則其壓力的方向將與氣流的中心形成一角度，同時此壓力成為兩分力：一為正面壓力（與氣流方向一致），一為上昇力，垂直於氣流的方向（上昇力向着流速大的方面）。



第7圖 由於氣流的破壞所形成的物料微粒不對稱流動的情況

正面壓力。當物體隨氣流作對稱流動時，氣流中心線與 X 軸的方向一致，正面壓力與物體對稱軸的最大斷面面積 F_k （物體的投影面積，該投影面積垂直於空氣氣流速度的方向）及氣流對物體的動壓力成正比。

$$P_d = \frac{(v_a - v_m)^2}{2g} \gamma_a \text{ 公斤/平方公分,} \quad (10)$$

式中： v_a —空氣流動的速度，公尺/秒；

v_m —物體流動的速度，公尺/秒；

$v_a - v_m$ —空氣流動的相對速度，公尺/秒；

γ_a —空氣比重，公斤/立方公尺。

空氣的正面壓力等於：

$$P_x = K_x \gamma_a F_k \frac{(v_a - v_m)^2}{2g}, \quad (11)$$

也就是正面壓力與空氣的比重，物體斷面面積和空氣的速度頭成正比。

係數 K_x 是一個無名數，主要決定於物體的形狀及其在氣流中的位置以及空氣流動的特性（層流或湍流）。