

矿井通風阻力測量

黃元平編著

煤炭工业出版社

內 容 提 要

本書的主要內容，是論述礦井通風各種阻力測量的理論和工作方法；從類型上說，包括摩擦阻力、局部阻力和正面阻力的測量法；從規模上說，包括全礦性的、區域性的和個別巷道的阻力測量法。

本書的特点是：從我國煤礦的實際情況出發，以改進我國的礦井通風阻力測量工作為目的，對我國常用的各種測量方法和儀器作了比較細緻的分析和評價，其中，用微分氣壓計的測量方法說明得很具體和詳盡，最後，對應推廣的先進方法和應廣泛使用的新型儀器，也提出了具體意見。

這本書，煤礦通風工作人員和中等技術以上學校學生可以在實際工作中應用，也可以在理論學習時參考。

612

礦井通風阻力測量

黃元平編著

*

煤炭工業出版社出版（地址：北京市東安門外大街）

北京市書刊出版業營業許可證出字第084號

煤炭工業出版社印刷廠排印 新華書店發行

*

開本 78.7×109.2 公分^{1/32} * 印張 3 十 * 插頁 2 * 字數 63,000

1957年10月北京第1版

1957年10月北京第1次印刷

統一書號：15035·372 印數：0,001—1,400冊 定價：(10)0.55元

前 言

在一九五五年的暑假，我曾經参加过开滦唐山礦一次全礦性的通風阻力測量的計劃与操作工作，当时做这项工作的目的是：檢查該礦通風压力的分配情况，鑑定全礦、各个开采水平以及各条主要巷道的通風阻力，为改善通風尋找依据。这次測量工作的規模比較大，参加工作的人员也比较多（共33人），使用的仪器也比较先進（苏联使用較廣的微分气压計），虽然事先作了一些計劃与准备工作，但在測量过程中，仍然碰到了許多問題。通过这次实际工作，大家深深感到：全礦性的通風阻力測量，不僅僅是一項技術性的工作，而且也是一項具有高度組織与計劃性的工作，要做好它，却不是很簡單的！

然而，毫无疑問，通風阻力測量是礦井通風工作的主要環節之一，是搞好礦井通風实际工作的基礎。为了使这样一項既重要又不太簡單的工作，能有一些較為具体而通俗的参考資料，我把参加这次实际工作的一些体会，結合有关理論，進行簡單分析，編寫成这本小冊子。

初稿曾于一九五五年十月底完成，今年春節假期又作了补充和修改。虽然前后時間有这許久，但編寫的实际時間却很短促，加以个人的業務能力較差，實踐經驗也不夠，所以，本書必然会有不少的錯誤和不妥善的地方，殷切地希望有关的同志們随时給予改正。

在編寫过程中，曾参考下列各書刊的有关資料，謹向編著者們表示深切的謝意。

1. 苏联斯闊成斯基和闊馬洛夫合著：礦內通風学（中譯本），煤炭工業出版社出版；

2. Государственный Макеевский Научно-Исследовательский институт “МакНИИ”：Проветривание Каменноугольных Шахт；

3. Weeks：Ventilation of Mines；

4. 哈羅夫專家在北京礦業学院所作的學術演講集編；

5. 煤礦工業，1952年第25期；前煤礦管理总局編；

6. 北京礦業学院学报，第一次科学討論会專集之二，1956年第2号。

最后，我應該深深感謝組織上給予参加这次实际工作的机会，感謝新社会給予和平的劳动环境，飲水思源，我們一定要在党所領導的偉大的社会主义建設事業中貢獻出一切力量！

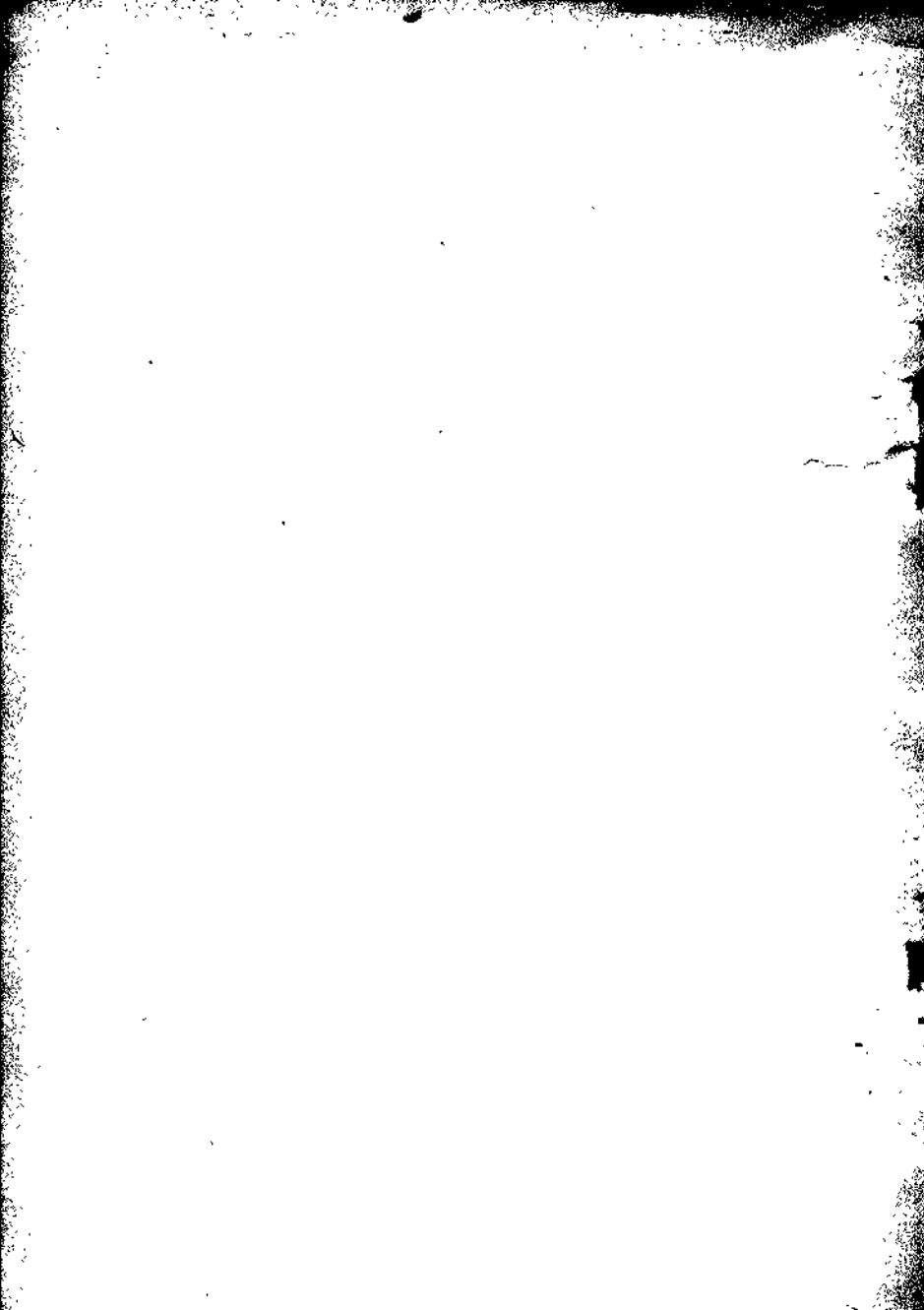
黃元平于北京

1955年10月27日完成初稿
1957年2月4日完成修正稿

目 录

前 言

第一節 对通風基本公式应有的認識	5
第二節 通風阻力的意义	11
一、摩擦阻力	11
二、局部阻力	14
三、正面阻力	16
第三節 通風阻力测量的必要性和一般概念	22
一、通風阻力测量的必要性	22
二、通風阻力测量的一般概念	23
第四節 用微分气压計的测量法	23
一、仪器的構造、原理与使用	23
二、测量方法	27
三、测量資料的整理和总结	44
四、用微分气压計测量的优缺点	64
第五節 用无液气压計的测量法	65
第六節 用傾斜水柱計的测量法	70
第七節 摩擦阻力系数 α 的测量法	77
第八節 局部阻力的测量法	80
第九節 正面阻力的测量法	83
第十節 掘進通風的風管阻力鑑定方法	85
一、概述	85
二、理論分析	87
三、鑑定方法	95
四、鑑定資料的应用	100



第一節 对通風基本公式应有的認識

在絕大多數的情況下，風流在礦內風道中是作紊流狀態的流動，這和水流在管道中流動的情況有着相似的物理特性。所以，可以依照水力學上與此相當的公式(1)推演而成礦井通風學上的基本公式(2)。這個基本公式的用途很大，有了它，我們能夠計算風流通過某一風道因摩擦而生的壓力損失，也能夠測算任何風道對於風流所產生的摩擦阻力，並進一步求算整個礦井的通風壓力和阻力。因此，對於這個公式作一些起碼的認識，是完全必要的。

水力學上所指出的水流在平直的管道中作紊流狀態流動的摩擦公式為：

$$H = \frac{\beta L V^2}{3gr}, \quad (1) \textcircled{1}$$

式中 H = 水流自平直的管道起點至末點因與管壁摩擦而損失的壓頭，公尺；

β = 表示管道壁粗糙程度的係數，是一個不名數；

L = 管道的長度，公尺；

V = 水在管道中流動的平均速度，公尺/秒；

g = 重力加速度，是一個近乎不變的常數，其值為 9.81 公尺/秒²；

r = 水力半徑，用公尺表示，其值等於水流的截面積與該截面的濕界綫之比，濕界綫即是水流與管道截面相接

① (1)式的來由，可參考水力學書籍。

触的交綫長度。設 d 为管道的直徑，若水在管道中滿流时，則濕界綫等于管道的周界 P ，水流的截面積即為管道的截面積 S ，水力半徑 $= \frac{S}{P} = \frac{\frac{1}{4}\pi d^2}{\pi d} = \frac{d}{4}$ 公尺；若水流在管道中半滿时，水力半徑仍為 $\frac{d}{4}$ 公尺， $\left[\text{即 } \frac{\frac{1}{2}S}{\frac{1}{2}P} = \frac{\frac{1}{2}(\frac{1}{4}\pi d^2)}{\frac{1}{2}\pi d} = \frac{d}{4} \right]$ 。

$$(1) \text{ 式的單位, } [H] = \frac{(\text{公尺}) \times (\text{公尺/秒})^2}{(\text{公尺/秒}^2) \times \text{公尺}} = \text{公尺}.$$

根据上述(1)式，推演成为通風学中基本公式(6)的理論如下：

設： h = 風流自起点至終点因与風道壁面摩擦而損失的壓力，公斤/平方公尺，或公厘水柱^①。如果該風道內沒有因其他因素（例如局部及正面阻力）而引起的壓力的額外損失，那么，此摩擦壓力損失就代表該風道所需要的通風壓力（簡称風壓），又名壓差、負壓損失（抽出式通風时）或正壓損失（壓入式通風时）。

① 在实用上，一般認為純淨的水每一立方公尺的重量为1000公斤，这就是純淨水的容重 γ 为1000公斤/立方公尺。我們取一段水柱來說明它的高度 H (公尺) 和壓力的关系，設此水柱的底面積为 S (平方公尺)，則此水柱所產生的總壓力 P 的关系式为：

$$P = \gamma \times H \times S,$$

其單位为：

$$[P] = \frac{\text{公斤}}{\text{立方公尺}} \times \text{公尺} \times \text{平方公尺} = \text{公斤}.$$

單位底面積上的壓力 p 則为：

$$p = \frac{P}{S} = \gamma H.$$

r = 空气的容重(單位容積的重量), 公斤/立方公尺;

P = 風道的周界, 公尺;

S = 風道的截面積, 平方公尺;

Q = 通过風道的風量, 立方公尺/秒。

因为压头 = 压力/容重,

$$\text{即 } [H] = \left[\frac{h}{r} \right] = \left(\frac{\text{公斤}}{\text{平方公尺}} \right) / \left(\frac{\text{公斤}}{\text{立方公尺}} \right) = \text{公尺}. \quad (2)$$

又因空气在風道中流动只有一种滿流的情况, 所以, 对于風流來說, 不論風道的截面積如何, 水力半徑永远等于風道的截面積与風道的周界之比。

$$\text{即 } r = \frac{S}{P} = \frac{\text{公尺}^2}{\text{公尺}} = \text{公尺}. \quad (3)$$

(2)(3)兩式代入(1)式得:

$$\frac{h}{r} = \frac{\beta L V^2}{2g \frac{S}{P}} \text{公尺},$$

$$[p] = \frac{\text{公斤}}{\text{立方公尺}} \times \text{公尺} = \text{公斤/平方公尺}.$$

这个公式表明压力 k 只和水柱高度 H 及容重 r 成正比, 而与水柱底面積 S 的大小无关。

当水柱的高度 $H = 1$ 公尺时,

$$\text{則 } p = 1000 \times 1 = 1000 \text{ 公斤/平方公尺};$$

当水柱的高度 $H = \frac{1}{1000}$ 公尺 = 1 公厘时,

$$p = 1000 \times \frac{1}{1000} = 1 \text{ 公斤/平方公尺}.$$

以上說明, 高度为 1 公厘的水柱, 正好相当于 1 公斤/平方公尺的压力值; 高度为 x 公厘的水柱, 就相当于 x 公斤/平方公尺的压力值。所以, 通風压力值(公斤/平方公尺)的大小常用“公厘水柱”值的高低來表示。

$$\text{即 } h = -\frac{\beta L r P V^2}{2 g s} \text{ 公厘水柱,} \quad (4)$$

(4)式的單位是:

$$\begin{aligned} [h] &= \frac{\text{公斤}/(\text{公尺}^3) \times (\text{公尺}) \times (\text{公尺}) \times (\text{公尺}/\text{秒})^2}{\text{公尺}/\text{秒}^2 \times (\text{公尺})^2} \\ &= \frac{\text{公斤}}{(\text{公尺})^2} = \text{公厘水柱,} \end{aligned}$$

$$\text{令 } a = \frac{r \beta}{2 g} \quad (5)$$

(5)式代入(4)式得:

$$h = -\frac{a L P V^2}{S} \text{ 公厘水柱.} \quad (6)$$

这就是通風学上非常重要的基本公式, 式中 a 通常称为摩擦阻力系数, 它的單位是:

$$[a] = \frac{\text{公斤}}{(\text{公尺})^3} \cdot \frac{\text{公尺}}{\text{秒}^2} = \frac{\text{公斤} \times \text{秒}^2}{(\text{公尺})^4}$$

但实际应用时, 一般不寫出此單位。

从(5)式可以看出, 若風道壁的粗糙程度保持不变(即 β 不变), 則摩擦阻力系数 a 与空气的容重 r 成正比例, 也就是說, 在不同的時間內, 如果同一風道中的空气容重發生了变化, 那么前后時間內的 a 值也就不相同了。因此, 为了分析与比較礦井各条巷道的 a 值, 相当于各不相同的 r 值的各巷道 a 值都必須按礦井平均的空气容重(1.2 公斤/立方公尺)進行換算。对于一般不同性質的風道來說, a 的标准值如表 1 所列。

表 1

通 風 巷 道 的 名 稱 及 類 型	α 值
对于用混凝土或塊石砌牆帶光滑牆壁的水平巷道或傾斜巷道	0.0004
用塊石砌牆帶麻面牆壁的巷道	0.0006
用混凝土或磚砌牆的井筒	0.0008
用木料支架的井筒	0.0016
用木料支架的主要巷道与石巷	0.0015
用木料支架的通風巷道	0.0017
用木料支架的下山	0.0017
用木料支架的輪子坡	0.0012
用木料支架的輪子坡人行道	0.0017
采煤工作面	0.0080
用金屬支架的水平巷道	0.0015
其他巷道	参考“礦內通風學”附錄 III

在通風設計工作上,也就是各种風道尚未做出來以前,可以参考表 1 所列各值,進行計算。然而也應該指出,有人对現有的風道也常常采用表 1 中的 α 值,不去測定現有風道的真實而精確的 α 值,這樣做法,顯然不切合实际,甚至会造成較大的誤差。所以,确定礦井內現有各条巷道的 α 值,該是一件主要的通風工作。把(6)式寫成(7)式,在某一風道中只要把(7)式中的 L 、 P 、 V^2 、 S 及 h 都分別測算出來,便可确定該風道的 α 值。具体的測量法詳見第七節。

$$\alpha = \frac{hS}{LPV^2} \quad (7)$$

因为風量等于風道截面積与風速的相乘積。

即 $Q = SV = (\text{公尺})^2 \times (\text{公尺/秒}) = \text{公尺}^3/\text{秒}$ 。

亦即 $V = Q/S \text{ 公尺/秒}$ 。

將这个关系代入(6)式，得：

$$h = \frac{aLPQ^2}{S^3} \text{ 公厘水柱。} \quad (8)$$

以上(6)、(7)、(8)是基本公式的三种不同形式。

从这些公式中，我們得到下面一些結論：

1. 如果風道的長度截面積和風量相同，則克服摩擦阻力的風压与風道的周界成正比例。这說明在相同截面積的風道中为什么要采用近似圓形的風道（因圓形風道的周界最小，拱形風道次之，梯形最大）。

2. 如果風道的周界、截面積及風量都相同，則克服摩擦阻力的風压与風道的長度成正比例。这說明在通風系統中，为什么要縮短風路（走捷徑）而采用分区通風。

3. 如果摩擦阻力系数、風道長度、周界及風速都相同，則克服摩擦阻力的風压与風道的截面積成反比例；或如摩擦阻力系数、風道長度、周界及風量都相同，則風压与風道截面積的立方成反比例。这說明为什么要刷大阻力較大的風道、不能刷大时就必須采用多風道的并联通風。

4. 如果風道的長度、周界、截面積及風速都相同，則克服摩擦阻力的風压与摩擦阻力系数成正比例。这說明为什么要尽量采用壁面光滑的風道。

5. 如果風道的長度、周界、截面積及摩擦阻力系数都相同，則克服摩擦阻力的風压与風速（或風量）的平方成

正比例。这就是說，風速或風量增大一倍，風压就必須增大三倍。所以从通風动力方面也能說明：井下各巷道的風速不能太大，風量需要大時必須采用多巷道的并联通風。

第二節 通風阻力的意义

礦山井巷对于風流运动所呈的阻力叫做通風阻力，这种阻力共有三种，即摩擦阻力、局部阻力和正面阻力，其中以摩擦阻力最为主要，今分述如下：

一、摩擦阻力

上節(8)式中的 $\frac{\alpha L P}{S^3}$ 一項称为風流与風道壁的“摩擦阻力”，用符号 $R_{\text{摩}}$ 來表示：

$$\text{即} \quad R_{\text{摩}} = \frac{\alpha L P}{S^3} \quad (9)$$

从这个公式可以看出：如果風道的長度、截面積、周界以及壁面的粗糙程度都保持不变，那么，摩擦阻力 $R_{\text{摩}}$ 与摩擦系数 α 成正比例，但 α 与空气容重 γ 也成正比例（前面已經說过），所以， $R_{\text{摩}}$ 与 γ 也是成正比例的。这就是說，在不同的時間内，如果同一風道中的空气容重發生了变化（虽然巷道本身条件不变），那么前后兩時間内的 $R_{\text{摩}}$ 值也就不相同了；因此，为了分析与比較礦井各条巷道的 $R_{\text{摩}}$ 值，相当于各不相同的 γ 值的各条巷道阻力 $R_{\text{摩}}$ ，都必須按礦井平均的空气容重 1.2 公斤/立方公尺進行換算，这点必須注意。

(9)式的單位是:

$$[R_{\text{摩}}] = \frac{\text{公斤} \times \text{秒}^2 / (\text{公尺})^4 \times \text{公尺} \times \text{公尺}}{(\text{公尺}^2)^3} = \frac{\text{公斤} \times \text{秒}^2}{(\text{公尺})^8}$$

这个單位甚复雜，很难記憶，故現今用“千繆”(K μ)兩字來代替它，

$$\text{即} \quad 1 \frac{\text{公斤} \times \text{秒}^2}{(\text{公尺})^8} = 1 \text{ 千繆};$$

但在应用上，有时計算出來的千繆值太小，其数值在小数点以后好几位数，不太方便，因此对于阻力單位也有用“繆”(μ)來表示的，即將一个千繆分为一千个繆來表示，

$$\text{即} \quad [R_{\text{摩}}] = 1 \text{ 千繆} = 1000 \text{ 繆},$$

$$\text{或} \quad 1 \text{ 繆} = \frac{1}{1000} \text{ 千繆}.$$

上面所說的“千繆”和“繆”都是用來表示通風阻力的單位，它們的含意就是用來表示通風阻力的大小或通風的难易程度。具有同一摩擦阻力系数 α 值的巷道，假如它們的截面積不同，則大截面積的巷道就比小截面積的巷道容易通風。因此，能夠表示某一巷道的通風难易程度并不光是摩擦阻力系数 α ，而是摩擦阻力 $R_{\text{摩}}$ ，这点是必須明确的。

將上列第(9)式代入第(8)式，又得基本公式的另一種形式:

$$h_{\text{摩}} = R_{\text{摩}} Q^2. \quad (10)$$

(10)式的單位是:

$$[h] = \frac{\text{公斤} \times \text{秒}^2}{(\text{公尺})^8} \times \left(\frac{\text{立方公尺}}{\text{秒}^2} \right)^2 = \text{公厘水柱}. \quad (11)$$

$$\text{或} \quad = (\text{千繆}) \times \left(\frac{\text{立方公尺}}{\text{秒}} \right)^2 = \text{公厘水柱。} \quad (12)$$

$$= \left(\frac{\text{繆}}{1000} \right) \times \left(\frac{\text{立方公尺}}{\text{秒}} \right)^2 = \text{公厘水柱。} \quad (13)$$

从上列(11)、(12)、(13)三式，我們必須注意：風压“公厘水柱”的数值必須是阻力“千繆”的数值与風量平方值(立方公尺/秒)²的乘積，如果阻力是用“繆”值表示时，就必須先把“繆”值化成“千繆”值以后（即把“繆”值除以1000）再乘風量的平方值才得風压“公厘水柱”的数值。

示例：風流進入某一400公尺深的豎井，該豎井的直徑 $d = 6$ 公尺，摩擦阻力系数 $\alpha = 0.0015$ ，風量 $Q = 3000$ 立方公尺/分。求風流通过这豎井所需的風压及其摩擦阻力各为若干？

解：由(8)式得所需要的風压

$$h_{\text{摩}} = \frac{\alpha \pi d L Q^2}{(\pi d^2/4)^3} = \frac{0.0015 \times 3.1416 \times 6 \times 400 \left(\frac{3000}{60} \right)^2}{\left(\frac{3.1416 \times 6^2}{4} \right)^3} \\ = 1.25 \text{ 公厘水柱。}$$

由(9)式得摩擦阻力：

$$R_{\text{摩}} = \alpha L m d / \left(\frac{\pi d^2}{4} \right)^3 = 0.0015 \times 400 \times 3.1416 \times 6 / \\ \left(\frac{3.1416 \times 36^3}{4} \right) = 0.0005 \text{ 千繆} = 0.0005 \times 1000 = 0.5 \text{ 繆。}$$

驗算：由(12)式得：

$$h_{\text{摩}} = 0.0005 \left(\frac{3000}{60} \right)^2 = 1.25 \text{ 公厘水柱；}$$

或由(13)式得：

$$h_{\text{摩}} = \frac{0.5}{1000} \left(\frac{3000}{60} \right)^2 = 1.25 \text{ 公厘水柱。}$$

由(10)式得：

$$R_{\text{摩}} = h_{\text{摩}} / Q^2 = 1.25 / \left(\frac{3000}{60} \right)^2 = 0.0005 \text{ 千繆；}$$

由(13)式得：

$$R_{\text{摩}} = 1000 h_{\text{摩}} / Q^2 = 1000 \times 1.25 / \left(\frac{3000}{60} \right)^2 = 0.5 \text{ 繆。}$$

二、局部阻力

風流經過井巷的某些局部區段，例如突然擴大處、突然縮小處或拐弯處，由於風流的速度或方向發生了變化，就使得風流在某區段內產生渦流現象，因而引起了壓力的額外損失（又名震盪損失或沖擊損失），這就是說，在這些局部區段內除了有摩擦阻力所造成的壓力損失外，還有其他阻力因素所造成的壓力損失，這些其他阻力因素的總稱便叫做局部阻力。風流經過各種不同性質（擴大、縮小或拐弯）的局部阻力區段（如圖 1 所示）所產生的壓力損失，理論上各有一套公式可以計算，但是這些公式都具有一條相同的規律，就是這種壓力損失和這些局部巷道某一截面上的速度壓力（或速壓）成正比例。因此，可以用下面的總公式來表示：



圖 1

$$\begin{aligned}
 h_{\text{局}} &= \xi h_{\text{速}} = \xi_1 \frac{V_1^2}{2g} \cdot r \text{ 公厘水柱;} \\
 &= \xi_2 \frac{V_2^2}{2g} \cdot r \text{ 公厘水柱.} \quad (14)
 \end{aligned}$$

式中 ξ = 局部阻力系数，是个不名数。它和所取的速度值的大小有关，如果用 V_1 值，则此系数值为 ξ_1 ；如果用 V_2 值，则为 ξ_2 。各种性质的局部阻力巷道，各有它自己的系数 ξ 值。如果在设计工作中需要计算局部阻力而需要 ξ 的值时，可根据所设计的局部阻力类型，在下列两书的有关图表中查到：燃料工业出版社1954年出版的“矿内通风学”第275~285页；煤炭工业出版社1956年出版的“矿井巷道的通风阻力”第235页表Ⅺ。总之，在现有理论上，有些可用计算方法求出，不过，用以导出这些计算公式的理论上的巷道与实际巷道的形状，很难完全一致。用计算方法求算的 ξ 值，往往不够准确，而且对于某些特殊情况，理论上还不太好算，所以，实际工作中的各种局部阻力系数 ξ 值应该用实测的方法来确定（详见第八节）。

V = 风流在局部区段某一指定截面上的平均速度，公尺/秒。在测定系数 ξ 值时，虽然可以任意取用局部区段的前端或后端的截面上的速度，但以后利用这个系数 ξ 值来进行计算时，就必须仍然采用同一截面上的速度。