

79.815
620

毕托管測量風量和計算

國家計量局 編



冶金工業出版社

第一章 风量的計算

§ 1 当前风量計算上存在的問題

我局工作組在为鋼鉄元帅配載望远鏡时，发现风量风压的測量工作显得特別重要和突出。但在进行风量、风压測量的过程中，各地以及局內工作組采取的計算方法很不統一，算出的风量也无法比較，深感不便，主要的原因是由于沒有全面考虑下面的因素：

1. 毕托管系数

因为毕托管构造的不同，測量时所得到的差压数值与实际的数值亦有某些差別。故在計算风量时，公式中必須引入修正系数，这个修正系数称为毕托管系数。

2. 插入深度校正系数

毕托管在管道中心軸綫上，測得的动压力是最大动压力，計算出来的速度是最大的速度，必須乘上一个修正系数才求得平均速度，即毕托管插入深度校正系数是平均速度和最大速度的比值。当直径小于2000毫米时，修正系数为：0.83~0.84，管径大于2000毫米时为0.93。

3. 溫度、压力校正系数 K

即把測量所得的风量換算成为标准状态（溫度 20°C 和絕對压力为760毫米水銀柱）的风量。

在沒有考虑上述因素以前，我們在常州、合肥算出的风量往往大于鼓风机的額定风量。

如：在合肥市安徽省財貿鋼鉄厂8立方米5号高爐的試点工作中，鼓风机的額定风量为25立方米/分，而我們測量的热风风量在溫度为 490°C 、热风压力为100毫米水銀柱、差压为11毫米、管子內径为250毫米时。

① 不考虑上述三种修正系数时，为39.33立方米/分；

② 只考虑插入深度系数而毕托管系数和温度、压力系数不考虑时，为 33.04 立方米/分；

③ 考虑插入深度系数和毕托管系数而不考虑温度、压力系数时，为 32.38 立方米/分。

§ 2 压力、温度校正系数问题是怎样提出的

根据以上所述，仅考虑插入深度系数和毕托管系数并没有解决风量计算的实际问题。

温度、压力的变化对计算风量的影响：在常州时曾考虑过，但由于当时工作组同志们对风量的初步计算还没有掌握，如果再考虑温度、压力等因素就更加不便，况且在 1 立方米土爐上计算出来的风量与实际风量的差别也不特别显明，所以当时也就没有再往下进行了。

到合肥以后，按照常州的公式计算出来的风量反比鼓风机额定风量大，工作组同志和爐子上的工人同志都对它发生怀疑。因此，就不得不把温度、压力的变化对风量的影响考虑进去，于是又重新研究了温度、压力的修正系数，经过这样计算的结果，应考虑的因素也就较全面了。

例如：管道直径 $D=250$ 毫米，

差压 $h=11$ 毫米水柱，

热风温度 $t=490^{\circ}\text{C}$ ，

热风压力 $P=100$ 毫米水银柱。

计算出的温度、压力校正数 $K=0.66$ ，

$$\text{不考虑温度、压力影响的风量 } Q = 175.17 D^2 \sqrt{\frac{h}{\gamma_H} \varepsilon} \\ = 32.38 \text{ 立方米/分,}$$

$$\text{实际风量 } Q_H = KQ = 32.38 \times 0.66 = 21.37 \text{ 标准立方米/分。}$$

§ 3 压力、温度校正系数问题是怎样着手解决的

由于以上问题的发生，经过大家开动脑筋，想办法，找资料，

并仔細从理論上分析，最后确定加入毕托管系数、插入深度校正系数和溫度、压力校正系数因素的問題就得到圓滿的解决。风量計算的完整公式如下：

$$Q_H = A \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{\frac{2g}{r_H} h (\tau_H - \tau') \varepsilon} \sqrt{\frac{T_H}{T} \frac{P}{P_H}} \text{ 标准立方米/秒}$$

$$= 60 \cdot A \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{\frac{2g}{r_H} h (\tau_H - \tau') \varepsilon} \sqrt{\frac{T_H}{T} \frac{P}{P_H}} \text{ 标准立方米/分。}$$

式中：A——毕托管插入深度的校正系数，采取 0.84；

D——管道的內径，米；

g——重力加速度，等于 9.81 米/秒²；

h——差压，毫米水柱；

τ_H ——水在 20°C 时的重度，等于 0.998 克/厘米³；

τ' ——空气在 20°C 时的重度，等于 0.001205 克/厘米³；

ε ——毕托管系数，从經驗数据中，标准毕托管系数 ε 的数值是在 1.02~1.04 范围中，当用不同的管子作成毕托管时，一定要通过实验用比較的方法来求出毕托管的系数；

P——在工作状态下风的绝对压力，即标准大气压力加上风的表压力，毫米水銀柱；

T——t°C + 273，在工作状态下风的绝对溫度 (°K)；

T_H ——t_H°C + 273，在标准状态下风的绝对溫度 (°K)；

P_H, t_H, τ_H 分别为标准状态 (溫度为 20°C、压力 760 毫米水銀柱) 的绝对压力，溫度和空气的重度。

把上式中的常数經過計算合併后即得：

$$Q_H = 159.415 D^2 \sqrt{h \varepsilon} \sqrt{\frac{T_H}{T} \frac{P}{P_H}},$$

$$159.415 D^2 \sqrt{h} = Q \sqrt{\frac{T_H}{T} \frac{P}{P_H}} = K$$

从实际工作中証明，我們以上所用的計算公式是完整而正确的。

§ 4 表的使用說明

为了便于爐长、工长了解本高爐确切的风量，我們根据国内目前一般中小高爐情况，根据风量的計算公式可以事先算出 Q 和 K ，如表 1 和表 2 所示，然后两表联合使用，即可很快的算出实际风量。

查表的方法和步骤：

1. 由表 1 先查出由已知差压换算的风量对应值；
2. 再由表 2 查出相当此状态的溫度、压力校正系数；
3. 以上两数相乘即可算出实际风量。

例：管道直径 $D=250$ 毫米，
风的压差为 $h=13$ 毫米水柱，
风的压力 $P=100$ 毫米水銀柱，
风的溫度 $t=500^{\circ}\text{C}$ ，
由表 1 查得 $Q=35.91$ 立方米/分，
由表 2 查得 $K=0.655$ 。

实验得出紫銅管毕托管系数 $\sqrt{\xi}=0.98$ ，故实际风量：
 $Q_H = 35.91 \times 0.655 \times 0.98 = 23.05$ 标准立方米/分。

第二章 风量的测量

§1 风量的测量

进风的多少，通常是首先测量风的压力差，然后再经过换算来求得的。风的压力共有三种：

- ① 静压力——风对风管道壁所施的压力；
- ② 动压力——风进入管道后，因运动快慢所产生的压力，这是由风的动能转变而来的；

③ 全压力——动压力加静压力就是全压力，又称总压力。

1. 风量的概念

风量是单位时间内沿着管道流过的热风或冷风的数量。风量的单位：(1) 重量单位，如公斤/分；(2) 容积单位，如米³/分。通常则是以容积单位米³/分来表示。

热风或冷风的容积风量，常以换算到 20°C 及 760 毫米水银柱的标准米³/分来表示。重量风量与容积风量换算的关系如下：

$$G = Qr \dots\dots\dots (1)$$

式中：G——重量风量，公斤/分；

Q——容积风量米³/分；

r——风的重度，公斤/米³。

热风或冷风沿着管道流过的数量与风速之间的关系：

$$Q = \bar{v} A \dots\dots\dots (2)$$

式中： $\bar{v}$ ——风的平均速度，米/分；

A——管道的横截面积，米²。

只要测量了风的平均速度，就可以知道风量的大小。这样测量出来的是风的瞬时数量。

风压是垂直作用在单位面积上的风力。

$$P = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (3)$$

式中: P ——压力, 公斤/米²;

A ——面积, 米²;

F ——垂直作用在面积 A 上的总压力, 公斤。

2. 风量、风压的测量元件

国家計量局工作组在常州、合肥、錦州的試点工作中, 由于毕托管的取材較容易, 构造簡單, 压力損失小, 使用方便, 計算也比較簡單, 認為在小土爐或 8 ~ 28 立方米小高爐上, 都可以以毕托管作为取压元件来大量采用和推广。

毕托管又叫动压管, 它的作用是把风的动能轉变为位能来进行测量, 是用一根弯成 90° 角的弯管和一根直管联合使用。直管用来测量靜压力; 弯管用来测量全压力。因为弯管是插到流体內的, 靜压力也就同时传到了管内, 所以测量的是全压力。要想知道动压力, 就得从全压力中减去靜压力。即:

$$P_h = P_o - P \dots\dots\dots (4)$$

式中: P_h ——动压力, 公斤/米²;

P_o ——全压力, 公斤/米²;

P ——靜压力, 公斤/米²。

我們在测量压力时, 通常是测量风的靜压力。但是在测量风量时, 則风量与管道的橫截面积以及风速有关。风速越大, 风量也越大。毕托管是用测量风速的方法来测风量的, 不是直接测量, 而是把速度轉变为压力再去测量它。

根据能量不灭定律, 风的动能轉变为动压力, 可以用下式表示:

$$P_h = \frac{\gamma V^2}{2g} \dots\dots\dots (5)$$

式中: P_h ——由动能或速度轉变的动压力, 公斤/米²;

γ ——风的重度, 公斤/米³;

V ——风速, 米/秒;

g ——重力加速度, 等于 9.81 米/秒²。

在风量表 (或差压計) 中, 如果工作液体上面还有其他物质

存在，工作液体形成差压时，与液柱高度相等的其他物质所形成的压力柱的影响，在计算时必须减去。即：

$$P_h = P_0 - P = h(r_h - r') \dots\dots\dots (6)$$

式中：h——差压，毫米液柱；

r_h ——差压计工作液体的重度，克/厘米³；

r' ——差压计工作液体上面物质的重度，克/厘米³。

(6) 式代入 (5) 式得：

$$\frac{r V^2}{2g} = h(r_h - r')$$

$$V = \sqrt{\frac{2g}{r} h(r_h - r')} \dots\dots\dots (7)$$

实际传送到差压计中去的不是全压力，因为全压力只是在毕托管前端开孔处的某一点存在，而传送到差压计里去的必然是这部分横截面上的平均压力。因为这个孔无论多么小，它总会占据一定的面积，所以也就不只是一点了。并且很易看到：利用毕托管测静压力的地方并不完全与测全压力的地方在同一点。事实上，在我们测量风量、风压的管道中，在相隔象毕托管上两个孔那么远的静压力并不是相同的，因此，实际传到差压计的压差与毕托管的大小和形状有关，而不是真正等于动压力和全压力之差。为了校正从公式 (7) 计算风速的结果，在公式中我们引进了一个系数 ε ，称为毕托管系数。于是得到下列的式子：

$$V = \sqrt{\frac{2g}{r} h(r_h - r') \varepsilon} \dots\dots\dots (8)$$

由 (8) 式可知，毕托管所能测量的只是测量头的动压力。为了测量风量，要知道的却是横截面上的平均速度。在管道中，如果风的流动没有受到扰动，则最大速度就在管子的中心轴线上。所以，把弯管插到管子轴线上，所测量的就是风的最大速度。最大速度与平均速度的关系如下：

$$\bar{V} = 0.84 V_m \dots\dots\dots (9)$$

由上式可以看出，测得风速 V_m ，就可以通过计算求得 $\bar{V}$ 。

§2 毕托管的校正

1. 仪器設備

① 两个系数 (K) 已知的测微压力計和重度 (γ) 已知的酒精;

② 标准毕托管 (事先已定出系数 ξ 的毕托管);

③ 测定被校正毕托管的风管;

④ 連接毕托管出口与压力計的管子。

2. 計算公式

假定:

(1) 斜管压力計的规格相同, 即系数 K 相同;

(2) 所用工作液体相同, 如采用重度 γ 相同的酒精;

(3) 傾斜角度相同。

$$\xi_r = \frac{a_s - a_{os}}{a_r - a_{or}} \xi_s \dots\dots\dots (10) \text{ [附注]}$$

式中: a_s 、 a_{os} ——連接在标准毕托管上的测微压力計的細玻璃管内液面在試驗前和試驗中的讀数;

a_r 、 a_{or} ——連接在被校正毕托管上的测微压力計的細玻璃管内液面在試驗前和試驗中的讀数;

ξ_s ——标准毕托管系数。

3. 試驗步驟

(1) 在风管較直的管段上, 选择安装毕托管的部位, 标准毕托管与被校毕托管同装在一个横截面上, 弯头对着流向, 插入深度为 $0.12D$ (毕托管前面的管道离开閘門或弯管的距离为直径 10 倍以上, 后面的管道离开距离为直径 5 倍以上);

(2) 将两个毕托管同时固定在风管内, 在試驗中不得有任何搖动, 这两个毕托管必然是放置在两个不同的位置上;

(3) 将两个毕托管联結到两个校正过的压力計上, 比較其讀数, 其中一个毕托管是标准的——系数 ξ_s 是已知的;

(4) 在固定毕托管时, 取 10—15 个正向讀数 (风速增加)

[illegible]

和10~15个反向讀数(风速减小)的实驗点子;

(5) 对每一风速必須小心地从两个压力計上同时記下讀数。

4. 記錄表式

[附注] 以下是校正毕托管系数用的計算公式的基本公式, 列出以供試用:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2g}{r} (a_0 - a_{00}) K_0 r_0 \xi_0 \mu \sin \alpha_0},$$

$$V_T = \sqrt{\frac{2g}{r} (a_T - a_{0T}) K_T r_T \xi_T \sin \alpha_T},$$

$$K = 1 + \frac{d^2}{D^2 \sin \alpha},$$

$$(a_0 - a_{00}) K_0 r_0 \xi_0 \mu \sin \alpha_0 = (a_T - a_{0T}) K_T r_T \xi_T \sin \alpha_T,$$

$$\xi_T = \frac{a_0 - a_{00}}{a_T - a_{0T}} \cdot \frac{K_0 r_0 \xi_0 \mu \sin \alpha_0}{K_T r_T \sin \alpha_T} = \frac{a_0 - a_{00}}{a_T - a_{0T}} C = \tan \beta \cdot C.$$

式中: V_0 ——标准毕托管的风速;

g ——重力加速度;

a_0, a_{00} ——連接在标准毕托管上的測微压力計的玻璃細管内液面在試驗前和試驗中的讀数;

K_0 ——标准压力計系数;

r_0 ——标准压力計的工作液体的重度;

ξ_0 ——标准毕托管系数;

α_T, α_0 ——标准測微压力計細玻璃管的傾角;

μ ——风管流场系数;

V_T ——待校正毕托管的风速;

a_T, a_{0T} ——連接在待校正毕托管上的值微压力計的細玻璃管内液面在試驗前和試驗中的讀数;

K_T ——連接在待校正毕托管上的压力計的系数;

r_T ——連接在待校正毕托管上的压力計的工作液体的重度;

ξ_T ——待校正毕托管系数;

α_T ——連接在待校正毕托管上的压力計細玻璃管的傾角;

d ——測微压力計細管的直径;

D ——測微压力計大容器的直径。

§3 风量风压测量仪表的选型、安装部位和使用

1. 选型

根据准确、经济、实用的原则，可采用下列仪表：

风量的毕托管：一般用紫铜管或钢铁管制造（热风冷风均可应用），也可用其他材料代替制造。这样制成的毕托管，最好配用斜管微压计，其斜管长为150毫米；或用固定零点的U型管。

自行制造的毕托管，不能因为构造简单而忽略对它的要求，否则对风量测量的准确度有影响。毕托管连接处，一般必须要铜焊或铁焊；若用在冷风，则锡焊也就可以了。用在热风管的露出管道外面的部分，必须长一些，以防温度过高把连接的橡皮管烫坏。用在冷风管的，则可以短一些。制造时，应注意将弯管的测量头做成半圆型并打光。

毕托管的外径不大于 $\frac{1}{10}D$ （ D 是管道直径），内径不小于2毫米。静压管边要尽量小。制造材料方面，热风温度在 500°C 以下，可以应用青铜； 500°C 以上，则用不锈钢或其他能耐高温的材料。

压力表的取压管：一般为一直铜管或直铁管。热风及冷风的取压管，利用毕托管的静压管就行。它应垂直插入风管内，与管壁平即可。

压力表可用固定零点的U型管。

2. 安装

（1）毕托管与取压管安装的部位

① 风量：毕托管应装在热风或冷风管道的直线段上，其前后应不靠近弯管、接头或闸门等。插入毕托管处的直管段，前面部分应大于管道直径10倍，后面部分应大于管道直径的5倍以上。安装时，最好用闷头螺丝把毕托管垂直安装在管子上，以便调节其位置和取出，插入深度为直径的 $\frac{1}{2}$ 。

② 风压：利用毕托管的静压管，用三通管接到仪表上（见图1）。

(2) 仪表的安装和使用

① 自行弯制的U型管，应选质料较好的玻璃管。管子内径要均匀，约为4—6毫米，外径约为6—8毫米。两根直管部分要平行。安装时，应注意与水平面垂直。

② 自行制造的刻度标尺，应力求将刻度划准。要求每一个分度划一小分度线，不要太稀。刻度可把零点定到中间，左右分度分别自零点向下和向上刻度，两边的刻度应一样。当刻度的零点放在中间时，如果没有压力，两边的水银柱或水柱都应正在零点。对准零点的简便方法，是将刻度标尺做成能上下活动的，以便调节零点。

③ 玻璃管本身应该用三个带软垫的金属片夹住，不得松动。

④ 玻璃管的长度，应视需要情况而定，一般应考虑比应用时的最大压力还要大一些。用水代替水银作压力表的工作液体时，其管长可在1.5公尺以内考虑应用。

⑤ 在不停风的情况装拆热风或冷风风量和压力表的橡皮连接管时，应先把橡皮管子夹住，不使漏气。

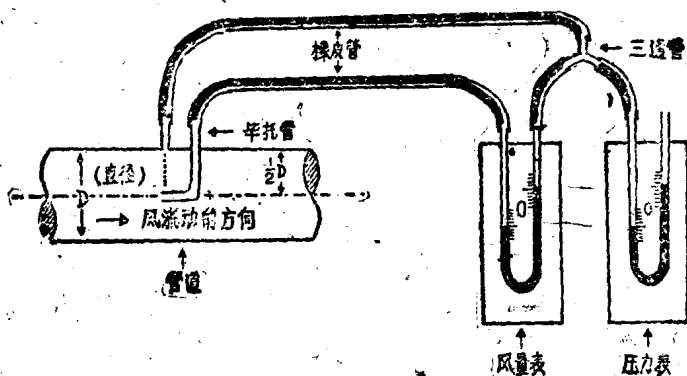


图 1

⑥ U型管用作测量风量时，两边的压力必须同时引入，一般是先用手将两个橡皮管捏紧，套在管子上以后，再同时松开。

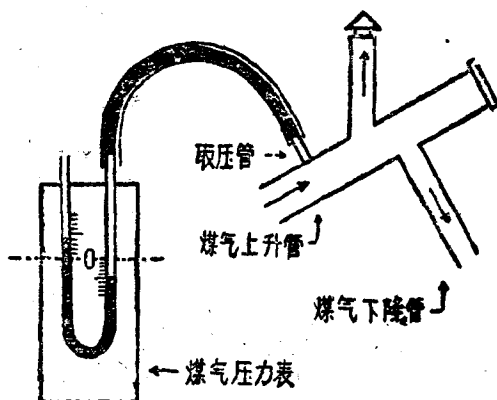


图 3

§4 风量与差压的换算

毕托管的差压指示值，要经过换算才能得到风量的数值，设把动压管安装在最大速度的地方（即管道的中心线上），最大速度 V_m 与平均速度 $\bar{V}$ 之间的关系由（9）式得：

$$\bar{V} = 0.84 V_m.$$

毕托管插入管道轴线上的修正系数：

当 $D < 2000$ 毫米， $0.83 - 0.84$ ；

$D > 2000$ 毫米， 0.93 。

平均速度的计算公式可写为下式：

$$\bar{V} = 0.84 \sqrt{\xi \frac{2g}{r} h (r_h - r')} \dots\dots\dots (11)$$

风量以 Q 表示。

风量 = 平均速度 × 管道横截面积。

$$Q = \bar{V} \times A.$$

$$Q = 0.84 \times A \sqrt{\xi \frac{2g}{r} h (r_h - r')} \text{ 米}^3/\text{秒},$$

$$\because A = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$\therefore Q = 0.84 \times \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{\frac{2g}{r} h (r_h - r')} \xi$$

风量通常以米³/分表示，故上式再×60：

$$Q = 60 \times 0.84 \times \frac{3.1416 \times 4.43}{4} D^2 \sqrt{\frac{h}{r} (r_h - r')} \xi$$

$$= 175.36 D^2 \sqrt{\frac{h}{r} (r_h - r')} \xi \text{ 米}^3/\text{分} \dots \dots \dots (12)$$

式中： $\bar{v}$ ——平均速度，米/秒；

g ——重力加速度，米/秒²；

r ——流过气体的重度，公斤/米³；

h ——风量表上的液面差（差压），毫米水柱；

A ——管道横截面积，米²；

ξ ——毕托管系数，从实验数据中，标准毕托管系数是在1.02~1.04的范围中。当用不同的管子作成毕托管时，一定要用试验方法求出毕托管系数。实验方法如第二节中所述；

r_h ——水在20℃时的重度=0.998克/厘米³；

r' ——空气在20℃时的重度=0.001205克/厘米³。

代入(12)式得：

$$Q = 60 \times 0.84 \times \frac{3.1416}{4} \times 4.43 \times D^2 \sqrt{0.998 - 0.001205}$$

$$\sqrt{\frac{h}{r}} \xi = 60 \times 0.7854 \times 4.43 \times 0.9989$$

$$\times 0.84 D^2 \sqrt{\frac{h}{r}} \xi = 175.17 D^2 \sqrt{\frac{h}{r}} \xi \text{ 米}^3/\text{分} \dots (13)$$

在高爐冶炼中，須要知道的是正常状态下的风量，因此，得把风量表上的讀数換算成标准状态时（20℃和760毫米水銀柱絕對压力）的风量 Q_n 。

$$Q = Q_n \frac{T}{T_n} \times \frac{P_n}{P} \dots \dots \dots (14)$$

$$r = r_h \cdot \frac{T_h}{T} \times \frac{P}{P_h} \dots \dots \dots (15)$$

把 (14) 及 (15) 代入 (12) 式

$$Q_h = \frac{T}{T_h} \cdot \frac{P_h}{P} = 208.5 \times 0.84 \sqrt{\frac{h}{r_h \cdot \frac{T_h}{T} \cdot \frac{P}{P_h}}} \xi$$

$$Q_h = 175.17 D^2 \sqrt{\frac{h}{r_h} \xi} \sqrt{\frac{T_h}{T} \cdot \frac{P}{P_h}} \dots \dots \dots (16)$$

式中：P——大气压力加上表压力（在工作状态下，热风的绝对压力）；

T——t°C+273（在工作状态下，热风的绝对温度）；

T_h——t_h° C+273；

P_h、t_h、r_h是在标准状态下（20°C 及 760 毫米水银柱）的压力、温度和重度。

例如：热风管道直径 D=250 毫米=0.25 米，

差压 h=20 毫米水柱，

由毫伏计上测得热风温度为 t=500°C，

压力表上测得热风压力为 100 毫米水银柱，

如果将全压管插在管道的中间，并假定测得的是最大速度，毕托管系数为 1，试求其风量 Q_h。

$$r_h = 1.205 \text{ 公斤/米}^3,$$

$$T_h = 20 + 273 = 293^\circ \text{K},$$

$$T = 500 + 273 = 773^\circ \text{K},$$

$$P_h = 760 \text{ 毫米水银柱},$$

$$P = 100 + 760 = 860 \text{ 毫米水银柱}.$$

由公式 (16) 得：

$$Q_h = 208.5 \times 0.84 (0.25)^2 \sqrt{\frac{20}{1.205 \cdot \frac{293}{773} \cdot \frac{860}{760}}} \\ = 29.17 \text{ 标准立方米/分}.$$