

# 用比较法测量流阻时对微压计的精度要求

胡颂纯

(上海工程技术大学纺织学院 · 200061)

本文指出,用比较法测量流阻时,将不可避免地引入较大的测量误差,然后指出减小测量误差的途径。

## 1 前言

文献[1]提出了用待测试件和参考试件相比较的方法来测量多孔性吸声材料的流阻,而把通常按定义来测量的方法称为直接法,比较法的最大优点是不必测量流量,从而使测量过程变得简便,但在仅使用普通的U形管微压计的情况下,也带来了较大的测量误差,本文就是对此作一探讨,并提出减小测量误差的途径。

## 2 直接法测流阻

按定义测量流阻原理如图1所示,在一圆筒中安装有被测材料试件M,使用方法(通常是利用风扇或密闭水箱排水)从材料下方抽气,使材料下方形成相对于大气的负压 $p$ ,设大气压强为 $p_0$ ,则其压差 $p$ 可用U形管压强计测出:

$$p = p_0 - p = \rho g h \quad (1)$$

式中 $\rho$ 为U形管压强计内液体密度, $h$ 为两臂液柱的高度差,由于该压差很小,通常把U形管置于倾斜状态,以提高测量灵敏度,成为微压计,若U形管倾角为 $\alpha$ ,则此时

$$p = \rho g l \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

式中 $l$ 为U形管压强计两臂液柱的长度差,同时测出空气流过试件的体积速度 $u$ ,即可求得流阻 $R_M^{[2]}$ 及试件材料的流阻率 $r$ :

$$R_M = p / u \quad (3)$$

$$r = (p / u) \cdot A / T \quad (4)$$

式中 $A$ 为试件截面积, $T$ 为试件厚度。

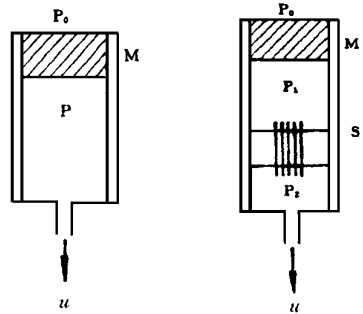


图 1

图 2

## 3 比较法测流阻

由于测量空气的体积速度 $u$ 要有一定的设备,如流量计,文献[1]提出了比较法测量,其原理如图2,在待测试件M的下方另外安设一个参考试件S,参考试件由一束孔径 $d$ 和长度 $l$ 精确测定的玻璃毛细管组成,因此其流阻既可从理论上由泊肃叶定律求出,又可用高精度微压计和流量计实验测出,从而得以校核准确。设参考试件的流阻为 $R_S$ ,当气流稳定时,连续通过两试件的空气流量和体积速度相等,令在待测试件下方及参考试件下方形成的负压分别为 $p_1$ 和 $p_2$ ,则由式(1)~(3)得:

$$R_M = R_S \frac{p_0 - p_1}{p_1 - p_2} = R_S \frac{l_1 \sin \alpha_1}{l_2 \sin \alpha_2} \quad (5)$$

$$R_S = \frac{\rho g}{u} \cdot (l_2 \sin \alpha_2 - l_1 \sin \alpha_1) \quad (6)$$

已假定两微压计中液体密度相同,故只要测出两微压计的读数 $l_1$ 和 $l_2$ ,以及倾角 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ ,即可由参考流阻 $R_S$ 求得待测流阻 $R_M$ 。

## 4 流阻测量误差分析

### 4.1 直接法测量

当用密闭水箱排水抽气时,空气的流量与水的流量相等,而水的流量容易测准,误差可在1%以下,计时误差也可在1%以下,从而空气体积速度  $u$  的测量误差可忽略,流阻的测量误差仅与微压计读数  $l$  的误差  $(l)$  及倾角  $\alpha$  的测量误差  $(\alpha)$  有关,由式(2)、式(3)及误差传递公式<sup>[3]</sup>,可得

$$R_M = \frac{g}{u} ( (l) \sin \alpha + l \cdot \cos \alpha ) \quad (7)$$

$$\text{相对误差} \frac{R_M}{R_M} = \frac{(l)}{l} + \frac{(\alpha)}{\alpha} \quad (8)$$

其中液体密度  $\rho$  和重力加速度  $g$  为公称值,因此不存在测量误差。式(8)表明,测量的相对误差包括两项,而这两项是互逆的:当减小倾角  $\alpha$  时,可以提高测量灵敏度,即增大  $l$ ,从而减小第1项,但第2项将增大;反之则第1项增大而第2项减小。若按通常测量时  $\alpha$  取  $6^\circ$  左右,测角误差(包括水平基准面校正误差)按使用带游标的角度尺估计为小于  $0.3^\circ$  (18),微压计读数  $l$  一般在10mm以上,读数误差  $(l)$  可小于0.5mm,把这些数据代入式(8)得:  $R_M/R_M = 10\%$  可见流阻的测量误差较小,测量值有足够的准确度。

此外当在较大的空气流速下进行测量时,  $l$  将增大,第1项减小,从而相对误差  $R_M/R_M$  更小。

### 4.2 比较法测量

用比较法测试件流阻时,误差计算较为复杂,令(5)式中  $l_1 \sin \alpha_1 = A$ ,  $l_2 \sin \alpha_2 = B$ ,则

$$R_M = R_S A / (B - A)$$

$$R_M = R_S \left( \frac{A}{B-A} + \frac{A(B+A)}{(B-A)^2} \right) \quad (9)$$

$$\frac{R_M}{R_M} = \left( \frac{A}{A} + \frac{B}{B} \right) / 1 - (A/B) \quad (10)$$

容易得出:

$$A/A = ( (l_1) / l_1 ) + ( (\alpha_1) / \alpha_1 )$$

$$B/B = ( (l_2) / l_2 ) + ( (\alpha_2) / \alpha_2 )$$

$$A/B = ( (l_1) / l_2 ) \cdot ( \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 )$$

取  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ , 因  $\alpha$  很小,  $\tan \alpha \approx \alpha$ ,  $\sin \alpha_1 = \sin \alpha_2 = \sin \alpha$ ; 又

$(l_1) = (l_2) = (l)$ , 则式(10)可简化为

$$\frac{R_M}{R_M} = \left[ \frac{(l)}{l} \left( \frac{l_2}{l_1} + 1 \right) + 2 \frac{(\alpha)}{\alpha} \cdot \frac{l_2}{l_1} \right]$$

$$/ ( (l_2) / l_1 ) - 1 \quad (11)$$

式(11)表明,用倾斜式微压计和比较法测量流阻时,测量的相对误差与3个因素有关:  $(l) / l_1$ , 即

微压计读数的相对误差。  $(\alpha) / \alpha$  即测角相对误差。

$l_2 / l_1$  即参考试件两侧空气对大气压强差之比。

令该3项分别为:  $(l) / l_1 = a$ ,  $(\alpha) / \alpha = b$ ,  $l_2 / l_1 = c$ , 则(11)式又可表示为:

$$\frac{R_M}{R_M} = \frac{a(c+1) + 2bc}{c-1} = a + 2b + \frac{2(a+b)}{c-1} \quad (12)$$

$a, b, c$  3项为正值,且  $c > 1 (p_2 < p_1)$ , 该式表明试件测量相对误差  $R_M/R_M > a + 2b$

比较式(12)与式(8)(即直接法测量的相对误差

$R_M/R_M = a + b$ , 似乎相差不多,事实上式(12)中第3项由于分母为  $c-1$ , 是误差的主要部分,从以下典型的数值来看,

(1) 当气流速度很小时,  $l_1$  与  $l_2$  均为几个毫米,如  $l_1 = 3\text{mm}$ ,  $l_2 = 4\text{mm}$ , 仍取

$$(l) = 0.5\text{mm}, \quad (\alpha) = 0.3^\circ = 6^\circ \text{ 则 } a = 0.167, b = 0.05, c = 4/3, R_M/R_M = 157\%$$

(2) 当气流速度较大时,  $l_1$  与  $l_2$  约为十几个毫米,如  $l_1 = 14\text{mm}$ ,  $l_2 = 18\text{mm}$ , 则  $a = 0.036, b = 0.05, c = 18/14, R_M/R_M = 73.6\%$

(3) 当气流速度更大时,  $l_1$  与  $l_2$  接近100mm, 如  $l_1 = 80\text{mm}$ ,  $l_2 = 100\text{mm}$ , 则  $a = 0.006, b = 0.05, c = 100/80 R_M/R_M = 55.6\%$

这些计算表明,提高气流速度确能减小测量相对误差,但减小程度是有限的。

如果我们能够提高微压计读数及测角的精度,例如使  $(l)$  从小于0.5mm提高到小于0.1mm,从小于  $0.3^\circ$  提高到小于  $0.1^\circ$ ; 这时,上述3种情况下的测量误差分别成为 36.7%, 20.8%, 17.8%, 较为接近于正常测量要求。

## 5 提高比较法测量精度的途径

表面上看,造成比较法测量流阻误差较大的原因是式(7)中分母为两项数量级相同的微压之差,而分子是其中一项微压本身,那么能不能改换图2中两试件的位置,即把标准试件S放在测量筒顶部,而把待测试件M放在下部呢?这当然是可以的,但通过类似的误差分析,可得此时的相对误差与式(10)相同,因此交换两试件位置并不能提高测量精度,反而使测量时必不可少的对待测试件M的密封操作变得困难。事实上,式(10)中的  $A/A$  和  $B/B$  就是两个压差的相对测量误差  $(p_1) / p_1$  和  $(p_2) / p_2$ ,  $A/B$  就是两个压差的比值  $p_1 / p_2$ , 式(11)可

(下转 48 页)

医学上的细胞粉碎,冶金工业上的金属粉末制取等都需要超声粉碎。

#### (4) 超声处理

超声处理涉及面也十分广泛,例如超声淬火可大大提高材质淬火后的硬度与淬火速度,且抗拉强度和屈服极限比一般淬火有明显提高。目前在污水处理上引入超声波也取得了进展,用超声辐照空气饱和的污水,可使污物发生裂解。例如国外用 530kHz 超声辐照以空气饱和的含五氯苯酚盐的污水 50min,其中五氯酚盐浓度可从  $10^{-4}$ M 降到  $5 \times 10^{-6}$ M,国内用 30kHz 50W 电功率聚焦超声辐射含五氯酚盐的水溶液 50min 处理实验,五氯酚盐在水溶液中明显被分解,表明超声有可能成为一种新颖、无污染的污水处理方法。

超声在空气中的处理另一重要应用是凝聚,凝聚效应在电厂等烟囱除尘中非常有用。利用高强度超声把空气中粒子凝聚起来,其凝聚效果与超声振幅、强度、频率和作用时间有关。超声除尘比目前其它除尘都有效,但需

要的声能约几十 kW 以上。

#### (5) 声化学

声化学崛起的历史不过 10 年左右,但不仅引起学术界的关注,也激起了企业界的强烈兴趣,声化学是指利用超声波开启化学反应新通道,加速化学反应的新方法,其基础还是声空化效应,它并非声能与物质的直接相互作用,其基础原理还是声空化,它在合成化学、聚合化学、电化学、环境化学等方面的研究已取得了很大进展。

功率超声应用除上述外还有许多,尤其新技术开发,例如超声马达、超声悬浮等都受到各先进国家重视。90 年代功率超声新技术和应用发展迅速,研究开发机构不断壮大,近来有一些功率超声专著相继出版,反映了我国功率超声前景广阔,但目前应进一步重视应用研究向市场转化,能否设想使高校,研究所、工厂走集约化道路,形成联合体,发挥各自优势,把我国功率超声研制与应用提高到一个新的台阶,并逐步走出国门走向世界。

(上接第 45 页)

$$\frac{R_M}{R_M} = \left( \frac{p_1}{p_2} + \frac{p_2}{p_2} \right) / \left( 1 - \frac{p_1}{p_2} \right) \quad (13)$$

式(13)表明,减小测量相对误差的根本途径是:适当增大流速,以提高压差  $p_1$  和  $p_2$  本身读数,如前所述。式(15)中因子  $1/(1 - (p_1/p_2))$  的值大于 1(压差比  $p_1/p_2$  恒小于 1),它使流阻的总测量误差大于两个微压计测量误差之和,因此可称之为放大因子,减小压差比  $p_1/p_2$ (这反映在式(11)就是设法增大  $c$  值)可以减小放大因子,从而减小测量误差。具体方法是采用流阻较大的参考试件来测量流阻较小的待测试件。由式(5)

可得放大因子  $k$  与两试件的流阻比有关:

$$k = 1 / (1 - p_1 / p_2) = 1 + R_M / R_S \quad (14)$$

因此流阻比  $R_S / R_M$  越大,放大因子越小,测量相对误

差越小,但要注意,由于实际上  $R_S$  本身也要通过测量确定,其误差将计入  $R_M$ ,因此  $R_S$  必须首先尽可能测准。提高压强测量仪器的精度,考虑到实际要求的相对误差小于 20%,以及放大因子  $k$  的作用,微压计的精度  $(p)/p$  最好在 0.05 以上。

#### 参考文献

- 1 殷业. 多孔吸声材料流阻的测量及吸声性质研究, 同济大学硕士论文. 1992.5., 25~27.
- 2 ASTM, standard test method for airflow resistance of acoustical materials, C- 522- 80.
- 3 林抒等. 《普通物理实验》. 人民教育出版社, 1981. 9: 8