

# 松散颗粒材料的流阻测试

多孔媒质的声学特性已经包括 Ragleigh 在内的许多学者作了详细的研究,提出了一些模型。这些模型一般是建立在流阻、孔隙率及结构因子等非声学物理参量的基础之上的。流阻是影响该类材料声学特性的一个重要参量,所以流阻的测量自然受到有关学者的重视,有关测试方法已收入到国际标准 ISO 9053 及其它有关标准中。

碎石(如沙及砾石等)在某些情况下可以作为一种廉价的多孔声吸材料。国外有学者根据 ISO 标准的规定,设计了一个简单的设备,对该类材料的流阻进行了测试。测试采用稳态气流法和声学法两种方法,并作了比较。方法比较简便,本文将简单介绍这一测试技术,以供有关读者参考。

## (1) 试验材料

对碾粹了的石灰石粒子用方形网孔筛进行筛选,经过筛选的材料按其尺寸大小分为 6 种; 0.2mm-0.5mm, 0.5mm-0.8mm, 0.8mm-1.0mm, 1.0mm-1.6mm, 1.6mm-2.0mm, 2.0mm-4.0mm。

由于粉末含量会影响这些材料的空气流阻,所以,每种材料在测试前要经过清洗和自然干燥。

## (2) 稳态气流技术

具有平行平面的多孔层流阻的定义是:

$$R_1 = \frac{1}{d} \frac{P}{Q} = \frac{A}{Q} \frac{P}{d} \quad (1)$$

式中,  $P$ (Pa) 是样品两个表面间的压强差,它由强行通过材料的稳态空气体积流  $Q$  ( $m^3/s$ ) 形成。 $d$ (m) 是多孔层厚度。 $v = Q/A$  ( $m/s$ ) 是流经表面积为  $A$  ( $m^2$ ) 的样品(上方或下方)的空气流平均速度,样品层上方和下方的气流平均速度相等意味着压强差  $P$  足够小。

样品测试装置如图 1,基本上是按  $R_1$  的定义而设计建立起来的。由一有机玻璃管组成(内径 9.9cm,长为 110cm),由一构架保持垂直。一节长 40cm 直径相同的管,同轴耦合于前一节上边,作安装样品用。该管下部有一金属网,当颗粒材料倒入该管时,金属网起阻挡作用,以便材料保持在这一节管内。在金属网下的一个压力出口处接有一个电子差分压力计。当水从按装于装置低部的调节阀流出并注入测试装置下边管子时,压力计可读出压强差  $P$ 。透明管外表面有步长为 5cm 的若干等步长标记,用秒表测出水柱表面通过这些标记的时间,管内空气速度  $v$  便可测定。

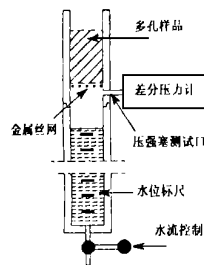


图 1 松散颗粒材料样品为稳态气流流阻的测试装置

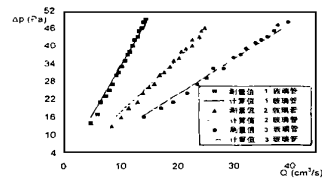


图 2 由校准玻璃管构成的三种样品的压强差分体积流流速关系

测试数值的正确性是利用所谓“气流流阻器”来检验,因为气流阻器两端的压差是可以理论来预测的。其实测值与理论值进行比较就可检验测量的正确性。流阻器由若干校准玻璃管(内径 2.7mm,长 26cm)构成,用橡皮塞将其封装于长 40cm 的样品保持器的上部入口处,其作用和样品保持器相似。图 2 表示了用单根(或两根、三根)校准玻璃管情况下测试的压强差  $P$  与流速率  $Q$  之间的关

系,图 2 中各条直线则表示每一样品按园管中片流的 Poiseuille 定律计算得到的预测值,即

$$P = \frac{128 l Q}{D^4} \quad (2)$$

式中,  $P$  (Pa) 是通过园管后的压降, 是在园管中流动的液体的粘滞系数(对 20 的空气而言,  $= 1.8 \times 10^{-5} \text{kgm}^{-1} \text{s}^{-1}$ );  $l$  (m) 是管长;  $D$  (m) 是管子内径;  $Q$  是管中体积流速。图 2 给出的结果充分说明所述测试方法达到了预期的目的。

### (3) 声学技术

假如有一简谐平面声波垂直作用于一具有刚性框架的多孔材料薄层时,一振荡气流将强行通过此薄层,在薄层的两个表面之间可观测到随时间而变化的(声)压降。如果薄层的厚度远小于声波波长,那么可认为材料薄层前表面处与后表面处的粒子速度相等,就是说气流通过了这薄层材料。在这种情况下,其复压降与复质点速度之比 $\frac{P}{v}$ 被定义为该多孔层的流阻抗,压降与质点速度一般不同相。流阻抗不仅有阻,而且还有质量型抗,这是流阻抗随着频率慢慢增大的原因。Ingard 和 Dear 指出,当频率足够低时,孔隙中空气运动的惯性效应可以忽略,因此,具有刚性框架的多孔层流阻抗的实部可近似等于此多孔层的稳态气流阻  $P/l$ 。

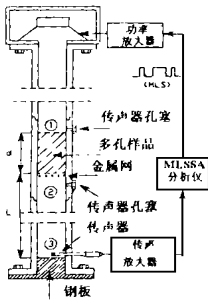


图 3 松散颗粒材料的流阻抗测试装置  
对无损耗管的简单平面波分析可得:

$$Z_f = \frac{p_1 - p_2}{v} = -j c \frac{p_1}{p_3 \sin(kL)} + j c \cot(kL) \quad (3)$$

式中  $Z_f$  是多孔层的流阻抗,  $p_1$  是在位置 1 (恰好在样品上表面上)测得的声压,  $p_2$  是位于样品下表面的位置 2 处的声压,  $c$  是空气的特性阻抗(是密度,  $c$  为声速),  $p_3$  是管子底部刚性端附近位置 3 处的声压,  $k = \omega / c$  为波数(空气中),  $\omega$  是圆频率,  $L$  是样品下表面和管底刚性端面间的距离。

当  $L$  为  $1/4$  波长的奇数倍时, 亦即

$$L = (2n + 1) \lambda / 4, \quad n = 0, 1, 2, 3 \quad (4)$$

(3) 式中  $\cot(kL) = 0$ , 且当  $n = 0, 2, 4, \dots$  时,  $\sin[k(2n + 1) \lambda / 4] = 1$ , 当  $n = 1, 3, 5, \dots$  时,  $\sin[k(2n + 1) \lambda / 4] = -1$ 。因此, 在特定的频率  $f_n = (2n + 1) c / 4L, n = 0, 1, 2, 3, \dots$  时, 其无量纲流阻抗为:

$$\frac{Z_f}{c} = \frac{-j}{(-1)^n} \frac{p_1}{p_3} = \frac{-j}{(-1)^n} \left[ \text{Re} \left( \frac{p_1}{p_3} \right) + j \text{Im} \left( \frac{p_1}{p_3} \right) \right] \quad (5)$$

$f = f_n, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$ , 其实部为:

$$R_f / c = [1 / (-1)^n] \text{Im}(p_1 / p_3) \quad (6)$$

$f = f_n, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$

虚部为:

$$\frac{X_f}{c} = \frac{-j}{(-1)^n} \text{Re} \left( \frac{p_1}{p_3} \right), \quad (7)$$

$f = f_n, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$

当  $f_n$  足够低时, 式(3)中压降( $p_1 - p_2$ )和质点速度几乎是同相位的, 因而流阻抗  $Z_f$  近似为实数, 由(7)式给出的虚部( $f = f_u$ )可忽略, 样品材料的流阻可近似为:

$$R_1 = R_f / d \quad (c/d) p_1 / p_3 \quad (8)$$

$f = f_n, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$

测量是通过获取线性系统的频率响应来实现的。频率响应则是使用 MLSSA 分析仪获得。该单通道分析仪将线性系统输出信号与馈给该系统输入端的最大长度序列(MLS)信号进行卷积, 由卷积可得到该线性系统的脉冲响应, 然后进行 FFT 变换即可得出所需要的频率响应。如果系统是时不变的, 显然声压比可用同一传声器先后置于两个不同位置时所获得的频率响应之比来确定。

表 1 被采用的松散颗粒材料的流阻数据

颗粒尺寸范围 (m)	$R_{iss}$ (Pa s/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s$ (%)	$R_{la}$ (Pa s/m <sup>2</sup> )	$\sigma_a$ (%)
0.2-0.5	$2.70 \times 10^5$	2.2	$2.44 \times 10^5$	9.7
0.5-0.8	$5.08 \times 10^4$	5.2	$4.48 \times 10^4$	7.9
0.8-1.0	$2.40 \times 10^4$	8.9	$2.19 \times 10^4$	8.8
1.0-1.6	$1.24 \times 10^4$	5.7	$1.37 \times 10^4$	8.1
1.6-2.0	$5.88 \times 10^3$	7.8	$6.60 \times 10^3$	8.7
2.0-4.0	$2.49 \times 10^3$	10.9	$4.99 \times 10^3$	17.9

表中最后两列是用声学技术获得的结果(同一种材料)。 $R_{la}$ 是平均流阻。每一种颗粒尺寸范围(除范围为 0.2mm-0.5mm 以外),样品厚度均取 8cm 和 16cm。颗粒尺寸范围为 0.2mm-0.5mm 的材料,为了在高流阻材料的背面得到满意的信噪比,样品厚度取 3cm 和 4cm,在这种情况下第一样品被重倒 4 次; $\sigma_a$ 是相应的百分标准误差。

通过对松散颗粒材料流阻两种测试方法得到的数据分析揭示了这两种方法具有很好的兼容性,除了最大颗粒尺寸外,对表中所列颗粒尺寸范围两种方法是兼容的。稳态气流的方法虽然较简单,但比较耗时,与声学方法相比不确定度较大。

丁玉薇编译自: Gino Iannace, et al., J. A. S. A. 1999, 106(3): 1416.

1982, 83: 53-65.

- [ 7 ] A. F. Seybeit. [ J ]. J. Sound Vib, 1981, 75: 519-526.
- [ 8 ] 甘常胜. [ J ]. 应用声学, 1989, 8(5): 4.
- [ 9 ] 陈继康等. [ J ]. 应用声学, 1995, 14(6): 26.
- [ 10 ] 姜哲, 郭骅. [ J ]. 声学学报, 1991, 16(5): 330.
- [ 11 ] 徐滇等. [ J ]. 应用声学, 1991, 10(3): 9-15.
- [ 12 ] 任明章等. [ J ]. 应用声学, 1991, 10(5): 24.
- [ 13 ] 胡章伟等. 选择声强法用于强背景噪声下声源识别 [ J ]. 应用声学, 1991, 10(4): 31-36.
- [ 14 ] R. Hickling and W. Wei. [ J ]. J. A. S. A., 1995: 97.
- [ 15 ] Liu xun, etc. Passive tracking and size estimation of volume target based on acoustic intensity vector [ J ]. Chinese Journal of Acoustics, admitted.

当样品下的管子长度为 2.08m 时,式(8)中的比值  $p_1/p_3$  可以在最低特征频率  $f = 41\text{Hz}$  时得到。当  $L = 1/4$  时。声压极小值恰好在样品下,而声压极大值则在管端钢板上。由于相应于  $1/4$  的频率对温度的依赖性,故在每一轮测量之前应在位置 2 处测定其频率响应,检验它的数值。与第一极小值相应的频率可被取作计算比值  $p_1/p_3$  时所用频率。

#### (4) 测试结果

稳态气流测试是在样品两端维持不同压力情况下实现的,其范围为 0~50Pa,由于颗粒大小及样品厚度不同,气流速度范围为 0.3mm/s-26.2mm/s 之间。每一种颗粒尺寸范围的样品,用三种不同厚度进行测试,厚度范围在 3cm-38cm 之间。对每一种样品,由于颗粒大小分布不同以及倒入样品保持器时不同沉降将对测试结果产生影响,为克服这种影响,所以倒入样品保持器中的样品至少更换 3 次。测试数据如表,表中第一列是相应样品颗粒尺寸范围,第二列是材料流阻  $R_{iss}$  的总平均值,第三列是百分标准误差  $\sigma_s$ ,它等于标准误差除以均值所得值的 100 倍,是样品变异性及测试随机误差的一种度量。

(上接第 97 页)

#### 参考文献:

- [ 1 ] H. F. Olson. System responsive to the energy flow in sound waves [ P ]. U. S. Patent 1892644, 1932.
- [ 2 ] C. W. Clapp and F. A. Firestone. [ J ]. J. A. S. A., 1941, 13: 124-136.
- [ 3 ] S. Baker. [ J ]. J. A. S. A., 1995, 27: 269-273.
- [ 4 ] F. J. Fahy. Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals [ J ]. J. A. S. A., 1997, 62: 1057-1059.
- [ 5 ] J. Y. Chung. [ J ]. J. A. S. A., 1978, 64: 1613-1616.
- [ 6 ] J. C. Pascal and C. Carles. [ J ]. J. Sound Vib,