# 基于声压-质点速度声强探头的 材料吸声系数的测量<sup>\*</sup>

李凌志 1,2† 程 攻 1,2 刘英杰 1,2 卢炳武 1,2

(1 汽车振动噪声与安全控制综合技术国家重点实验室 长春 130011)(2 中国第一汽车集团股份有限公司技术中心 长春 130011)

**摘要** 通过由一个声压换能器和一个质点速度换能器所构成的传感器(p-u 声强探头)同时测量材料表面附近的 声压和质点振动速度,可直接得到其声学阻抗,进而得到材料的反射因子、吸声系数。本文利用一个 p-u 探头声 强测量系统,在半消声室内测量了三聚氰胺泡沫的吸声系数,分析了声源高度和入射角度、材料样本尺寸和厚度 对吸声系数测量的影响,并和阻抗管中测量得到的法向吸声系数进行了对比。最后分析了声阻抗率的幅值和相位 误差对吸声系数的影响,推导了它们的误差传递公式。

关键词 p-u 声强探头,吸声系数,声阻抗率,误差分析
 中图分类号: O429
 文献标识码: A
 文章编号: 1000-310X(2012)03-0202-07

# Measurements of the absorption coefficients with a combined particle velocity-pressure sound intensity probe

LI Lingzhi<sup>1,2</sup> CHENG Gong<sup>1,2</sup> LIU Yingjie<sup>1,2</sup> LU Bingwu<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Comprehensive Technology on Automobile Vibration and Noise & Safety Control, Changchun, 130011) (2 China FAW Co., Ltd. R & D Center, Changchun, 130011)

**Abstract** Using a combined particle velocity-pressure sensor (p-u sound intensity probe), the acoustic impedance of an absorbing materials, and consequently its reflection factor and absorption coefficient, can be determined by simultaneous measurements of sound pressure and particle velocity at a position near the surface of the materials. Using a p-u intensity probe system in a semi-anechoic room, we measured the acoustic impedance of melamine, and analyzed how the source height, incidence angle, the size and thickness of the materials sample affect the measurement, and compared to the normal impedance measured using a standing wave tube. We also analyzed how the amplitude and phase error of the acoustic impedance affect the absorption coefficient, and derived an error propagation formula.

**Key words** p-u sound intensity probe, Sound absorption coefficient, Specific acoustic impedance, Error analysis

<sup>2011-09-09</sup> 收稿; 2012-03-26 定稿

<sup>\*</sup>中国第一汽车集团股份有限公司科技创新项目(编号1052)

作者简介:李凌志 (1978-), 男, 广东惠阳人, 博士, 研究方向: 近场声全息, Beamforming, 声强测量, 声学信号处理。

程攻 (1984-), 男, 助理工程师, 硕士。

刘英杰 (1972-), 男, 高级工程师, 硕士。

卢炳武 (1962-), 男, 研究员级高级工程师, 硕士。

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup>通讯作者:李凌志, E-mail:lilingzhi@rdc.faw.com.cn

# 1 引言

吸声材料的吸声系数及其表面的声阻抗率对 于如汽车内饰材料的设计、优化等噪声控制是极其 重要的参数。具有国际标准的声学材料吸声系数测 量方法有两类,一类是阻抗管法<sup>[1-2]</sup>,这类方法可测 量吸声材料的法向入射吸声系数或声阻抗率;二是 混响室法<sup>[3]</sup>,此方法在测量扩散场条件下,有无吸 声材料时的两个混响时间,利用赛宾混响公式得到 材料的无规入射吸声量和吸声系数。阻抗管法对材 料试样的形状、面积都有严格的要求,混响室法则 要求试验材料的面积需足够大,且只能在混响室内 完成测量。

除了上述标准方法以外,也有学者使用别的测 量原理和方法来得到材料的吸声系数。Tamura 提出 了一种基于空间傅里叶变换(即近场声全息)的方 法<sup>[4-5]</sup>,这种方法测量靠近材料表面的二个平行面的 复声压,然后对其进行空间傅里叶变换分解为平面 波,利用声传播原理将入射和反射平面波进行分 离,进而得到任意角度的反射系数。这种方法没有 对声场本身进行任何的假设,但是试验比较复杂, 需要较大的试验样品。Lanoy, Vermeir 和 Lauriks<sup>[6]</sup> 提出了一种使用 p-u 声强探头的测量方法, p-u 探头 直接测量到材料附近的声压和质点振动速度,两者 相除得到声阻抗率,在材料表面反射平面波或球面 波的假设下,可以计算出材料的反射系数,最终得 到吸声系数。这种方法测量简单,对所测材料的形 状、面积要求较低,可以测量不同入射方向下的吸 声系数。Lanoye 对三聚氰胺试样进行了吸声系数的 测量试验,试验证明了在中高频域,声强探头法与 阻抗管法的结果较为吻合,对于入射角较小的情 况,材料的面积较小就可以保证结果准确。

本文回顾了吸声系数的测量原理,并介绍了 p-u 探头的标定方法,在半消声室内对三聚氰胺泡 沫进行了详细测量,对比了不同声源高度、不同声 波入射角、不同材料面积及厚度对测量结果的影 响,并和阻抗管中测量得到的法向吸声系数进行了 对比,最后对 p-u 探头测量得到的声阻抗率按幅值 和相位进行了误差分析。

### 2 测量方法

#### 2.1 标定方法

p-u 声强探头由一个声压换能器和一个质点速

度换能器所构成,本文使用的 p-u 探头为 Microflown的USP 三维声强探头。在测量前必须对 p-u 探头的幅值进行标定,并对 p 探头和 u 探头之 间的相位进行标定。对于不同的频率范围,需采用 不同的标定方法。阻抗管法标定的有效频率范围为 30 Hz~4 kHz,自由场法标定的有效频率范围为 200 Hz~20 kHz。自由场标定法在低频域(250 Hz 以下)的可信度不够高<sup>[7]</sup>,这是由于标定一般是在 半消声室内进行,而地面的低频反射波会对标定产 生不可消除的影响。如果能在低频采用阻抗管法的 标定数据,那么标定曲线将更加准确。图 1 为 Microflown提供的该探头Z方向的(a)声压幅值灵敏 度曲线,(b)质点振动速度幅值灵敏度曲线和(c) p 和



u 相位标定曲线。实际使用的声压、质点振动速度 需要除以图示的灵敏度曲线,它们之间的互谱相位 应该加上图示的相位标定曲线。

#### 2.2 计算方法和误差分析

#### 2.2.1 镜像源模型

镜像源模型是基于平面波反射的假设,即需要 满足点声源到材料的距离大于波长。如图2所示, 材料放置在硬地面上,p-u探头放置在材料的上侧, 距离材料的距离为*d*,距离地面的高度未*h*,材料 的厚度为*h*-*d*,点声源*S*距离 p-u探头的水平距离 为*r*,距离材料表面的垂直距离为*H*。p-u 探头接 收到的总声压包括直达声和经材料反射后的镜像 声源*S*'的反射声。当声源距离样品的距离大于声源 的波长时,接收点的总声压为

$$p = \frac{p_0}{r_1} e^{i(\omega t + kr_1)} + R(\omega, \theta_0) \frac{p_0}{r_2} e^{i(\omega t + kr_2)}, \qquad (1)$$

式中, *p*<sub>0</sub>为声源的振幅, *ω*为角频率, *R*(*ω*, *θ*<sub>0</sub>)为 材料的反射系数, *r*<sub>1</sub>, *r*<sub>2</sub>分别为点声源和镜像点声源 距离 p-u 探头的直线距离。接收点的质点振动速度为

$$u = \frac{p_0}{\rho_0 c} \left( \frac{1 - ikr_1}{-ikr_1} \right) \frac{\cos \theta}{r_1} e^{i(kr_1 + \omega t)}$$
  
-  $R(\omega, \theta_0) \frac{p_0}{\rho_0 c} \left( \frac{1 - ikr_2}{-ikr_2} \right) \frac{\cos \theta_0}{r_2} e^{i(kr_2 + \omega t)},$  (2)

式中*θ*,*θ*<sub>0</sub>分别为声源*S*、其镜像声源*S*′和探头的连线与地面法向的夹角。



由 P 和 u 则可以得到声阻抗率

$$Z(\omega) = \frac{p}{u} = \rho_0 c \frac{\frac{e^{ikr_1}}{r_1} + R(\omega, \theta) \frac{e^{ikr_2}}{r_2}}{\left(\frac{1 - ikr_1}{-ikr_1}\right) \frac{\cos\theta}{r_1} e^{ikr_1} - R(\omega, \theta) \left(\frac{1 - ikr_2}{-ikr_2}\right) \frac{\cos\theta_0}{r_2} e^{ikr_2}}.$$
(3)

进一步得到声压反射系数

$$R(\omega,\theta) = e^{ik(r_1 - r_2)} \frac{r_2}{r_1} \frac{Z(\omega) \left(\frac{1 - ikr_1}{-ikr_1}\right) \cos \theta_0 - \rho_0 c}{Z(\omega) \left(\frac{1 - ikr_2}{-ikr_2}\right) \cos \theta + \rho_0 c},$$
(4)

当 p-u 探头位置非常接近材料表面时,有 $\theta \approx \theta_0$ ,  $r_1 \approx r_2$ 。方程(4)可写为

$$R(\omega,\theta) \approx \frac{Z(\omega) \left(\frac{1-ikr_1}{-ikr_1}\right) \cos \theta - \rho_0 c}{Z(\omega) \left(\frac{1-ikr_1}{-ikr_1}\right) \cos \theta + \rho_0 c}, \qquad (5)$$

由于该镜像源模型基于平面波这个假设,即要求 kr 足够大,方程(5)可以进一步简化为

$$R(\omega,\theta) \approx \frac{Z(\omega)\cos\theta - \rho_0 c}{Z(\omega)\cos\theta + \rho_0 c}.$$
 (6)

将声阻抗率写成声阻和声抗率的关系,
Z = R + jX, R 为声阻率, X 为声抗率,则反射系
数绝对值的平方可写成

$$\left|R(\omega,\theta)\right|^{2} \approx \frac{\left|R\cos\theta - \rho_{0}c\right|^{2} + (X\cos\theta)^{2}}{\left|R\cos\theta + \rho_{0}c\right|^{2} + (X\cos\theta)^{2}}.$$
 (7)

材料的吸声系数为

$$\alpha(\omega,\theta) = 1 - \left| R(\omega,\theta) \right|^2, \qquad (8)$$

方程(7)、(8)表明,当法向入射时,即 $\cos\theta=1$ 时, 材料表面的声阻抗率 $Z(\omega)$ 等于空气的特性阻抗率  $\rho_0 c$ 时,此时反射系数等于0,吸声系数等于1;如 果声阻率R为负数,则 $|R(\omega, \theta)|^2$ 将大于1,即吸声 系数为负数,这是不符合物理意义的,此时必然是 由于某种误差的影响导致声阻抗率的相位处于  $[\pi/2, 3\pi/2]之间,此时<math>R$ 为负数;只有当声阻率R接近 $\rho_0 c$ ,声抗率X足够小于 $\rho_0 c$ 时,此时的声学 材料才能够有较好的吸声性能,反之,当R偏离 $\rho_0 c$ 较大,X大于 $\rho_0 c$ 时,此时材料的吸声性能则会较 差。当入射角 $\theta$ 逐渐变大,声阻抗率的法向分量  $Z\cos\theta$ 将变小,由于 p-u 探头的相位误差将产生较 大影响。

#### 2.2.2 误差分析

在基于镜像源模型的 p-u 探头声学材料吸声系 数测量的过程中,除了模型的适用性条件外,如式 (4)所示,可能存在的误差首先有测量位置的误差, 这影响式(4)中的 $r_1 、 r_2 风 \theta_0 、 \theta$ ,这部分误差由于 p-u 探头位置非常接近材料表面,对最后表达式(6) 中的影响非常小,当法向入射时,就完全没有影响 了。再有就是声阻抗率  $Z(\omega)$ 的测量误差,可分为 p 和 u 各自的幅值误差、相互之间的相位匹配性误差、 测量设备的系统误差及测量环境引起的误差等。为 了分析方便,我们可将声阻抗率表示成幅值和相位 的关系,即  $Z(\omega) = Ae^{i\varphi}$ ,则式(6)可表达为

$$R(A,\varphi) \approx 1 - \frac{2\rho_0 c}{Ae^{i\varphi}\cos\theta + \rho_0 c},\tag{9}$$

式中 *A* 为声阻抗率 *Z*(*ω*) 的幅值, *φ* 为其相位, 幅 值和相位的偏微分方程为

$$dR(A,\varphi) = \frac{2\rho_0 c\cos\theta}{\left(Ae^{i\varphi}\cos\theta + \rho_0 c\right)^2} e^{i\varphi} (dA + iAd\varphi), (10)$$

从式中可知,相位引起的误差比幅值引起的误差前 面多了一项iA,即和幅值有关,泡沫吸声材料通常 在低频的吸声能力较弱,由前述分析可知,此时声 阻率 R 偏离 ρ<sub>0</sub>c 较大,声抗率 X 大于 ρ<sub>0</sub>c 时,即幅 值 A 比较大,此时由于相位误差带来的反射系数误 差会大于幅值误差引起的误差。

#### 3 测量过程及数据分析

本文研究的声学材料是三聚氰胺泡沫,使用 LMS Q-sources 中频体积声源,激发的频率范围为 200Hz~8kHz,该声源和一4m长的圆形软管连接, 管口直径为3cm(可看做单极子声源)。试验在半 消声室内进行,半消声室的低频截止频率为50Hz。 使用 B&K 3560C 作为信号发生器和数据采集系统, 发出伪随机噪声,频率带宽为 6.4 kHz,用 Matlab 进行数据后处理。

如图 3 所示,将待测材料平铺于地面上,p-u 探头穿过空心钢管,通过夹具固定在一支架上,探 头位于材料的几何中心处,仔细调整至 p-u 探头 Z 方向垂直于材料表面,在所有测量过程中始终保持 距离材料表面高度为 1 cm。圆形管通过钢管固定在 支架上,通过调节支架或卡具,可改变点声源距离 地面的垂直高度及距 p-u 探头的水平距离,即改变 声波的入射角度。测量过程中,我们使用铅垂和卷 尺对探头及声源的进行位置测量,可以保证其位置 误差不会超过 5 mm。由以上误差分析可知,p-u 探 头位置非常接近材料表面时,这部分误差对最后计 算结果的影响非常小。



#### 3.1 不同声源高度

如图 2 所示, 三聚氰胺泡沫的长宽分别为 1250mm×1250mm,厚度为5cm,探头位于材料的 几何中心,距离材料距离 d=1 cm,声源位于 p-u 探 头的正上方,改变声源距离材料表面的高度分别为 *H*=107 cm、71 cm、41 cm、28 cm, 根据镜像源法基 于平面波假设条件,这几个测量高度分别对应的适 用频率下限为 320 Hz、480 Hz、837 Hz 和 1225 Hz。 测得的吸声系数对比图如图 4 所示,从图中可知, 各高度的吸声系数变化趋势是一致的,随着频率的 增大,各曲线逐渐重合。当H=71 cm时,吸声系数 从 250 Hz 开始就和 H=107 cm 接近, 两者偏差在 500 Hz 时为 0.08。当 H=41 cm 时,从 630 Hz 开始 就和 H=107 cm 接近, 两者偏差在 630 Hz 时为 0.06。 当 H=28 cm 时,从 1000 Hz 开始至高频和 H=107 cm 接近。两者偏差在 1000 Hz 时为 0.02。这证明了前 述的镜像源模型在其适用范围内具有较好的一致 性和稳定性。





#### 3.2 不同入射角度

材料长宽分别为1500mm×670mm,厚度为3cm, 声源距离材料垂直高度 H=77 cm,探头位于材料的 几何中心,距离材料 d=1 cm,改变声源距离 p-u 探 头水平距离分别为 r=76 cm 和132 cm,即入射角 θ 分 别为 45°和 60°。最后声源位于材料的正上方 71 cm 处,即入射角为 0°。图 5 为测得的吸声系数对比图。 从图中可看出,随着入射角度的增大,较低频率开 始出现负的吸声系数,这是由于角度大时,p-u 探 头的相位不匹配误差引起的测量误差将变大。图 6 为式(10)中入射角分别为 0°、45°和 60°的反射系 数对声阻抗率相位的偏微分绝对值 |dR/dφ| 对比 图,从图中可看出,随着入射角变大, |dR/dφ| 在 低频将逐渐变大,相同的相位误差则会引起较大的 误差。



#### 3.3 不同样品尺寸

材料的厚度为 5 cm, 探头位于材料的几何中 心,距离材料 d=1 cm,声源位于 p-u 探头的正上 方,声源距离材料表面高度为 H=71 cm,改变材料 的长宽尺寸,从大至小分别为 1250 mm×1250 mm、 600 mm×600 mm、300 mm×300 mm、150 mm×150 mm。 图 7 为测得的吸声系数对比图。从图中可知,对于 材料尺寸大于 300 mm×300 mm 时,各曲线符合较 好,当尺寸为 150 mm×150 mm 时,在较低频率时和 其余曲线相差较远。从入射角分别为 45°和 60°时的 不同面积的吸声系数对比图中可知(文中未给出), 随着角度变大,小面积的结果变得越来越差,这反 过来也说明,对于较大的入射角测量,需要更大的 待测样件才会得到比较好的结果。这和前面误差分 析的理论分析是一致的。



#### 3.4 不同厚度样品和双传声器阻抗管法结果对比

材料的长宽尺寸为 1500 mm×670 mm, 探头位于 材料的几何中心, 距离材料 *d*=1 cm, 声源位于 p-u 探 头的正上方, 声源距离材料表面高度为 *H*=71 cm, 改变 材料的厚度依次为 105 mm、50 mm、30 mm 和 10 mm。

依据标准 ISO 10534-2:1998(E),采用双传声器 阻抗管法对上述不同厚度的三聚氰胺泡沫进行了 法向吸声系数测量,使用的设备为 B&K 的双传声 器阻抗管 4206。(a) 10 mm、(b) 30 mm、(c) 50 mm 和(d) 105 mm 的法向吸声系数对比,材料的长宽尺 寸为 1500 mm×670 mm, H=71 cm。

图 8 为阻抗管和 p-u 探头测量结果的对比以及 它们之间的偏差,从图中可知,随着材料厚度的增 加,吸声系数呈增大趋势,各厚度的偏差大部分都 在 0.1 之内, p-u 探头和阻抗管测量得到的结果具有 很好的一致性。



图 8 不同材料厚度的法向吸声系数对比

## 4 结论与讨论

分析了半消声室内三聚氰胺泡沫不同声源高 度、不同入射角度、不同材料的尺寸、厚度的吸声 系数测量结果,并和阻抗管中测量得到的法向吸声 系数进行了对比,得到如下结论,基于镜像源模型 在声源距离大于波长的前提下,得到的吸声系数具 有很好的一致性和稳定性;在入射角较大时,由于 p-u 探头的相位不匹配误差引起的测量误差将变 大,这和进行的误差分析完全符合;样品的尺寸对 于法向吸声系数的影响很小,对于一定入射角时, 则需要较大的声学材料,这表明可以使用该技术对 于汽车内饰等吸声材料进行现场测量;针对不同厚 度样品, p-u 探头和阻抗管测量得到的结果具有很好的一致性。

对吸声系数的误差分析表明,排除模型本身的 局限性外,其中最重要的误差主要是声阻抗率的相 位误差,当材料的吸声系数较小时,相位误差可以 导致得到负的声阻率,这样将产生没有物理意义的 负吸声系数。要保证在普通房间、乃至车内等复杂 声学环境中能测量到可靠、稳定的吸声系数,对 p-u 探头的幅值和相位进行现场校准是值得进一步研 究的工作。

**致谢** 郎德科技有限公司借给我们 Microflown 的 三维 p-u 声强探头。特此表示感谢。



#### 参考文献

- [1] GB/T 18696.1-2004, 声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第 1 部分: 驻波比法[S].
- [2] GB/T 18696.2-2002, 声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第2部分: 传递函数法[S].
- [3] GB/T 20247-2006, 声学 混响室吸声测量[S].

208

- [4] TAMURA M. Spatial Fourier-transform method for measuring reflection coefficients at oblique incidence. I . Theory and numerical examples[J]. J.Acoust. Soc. Am., 1990, 88(5): 2259-2264.
- [5] TAMURA M. Spatial Fourier-transform method for measuring reflection coefficients at oblique incidence. II . Experimental results[J]. J.Acoust. Soc. Am., 1995, 97(4): 2255-2262.
- [6] LANOYE R, VERMEIR G, Lauriks W. Measuring the free field acoustic impedance and absorption coefficient of sound absorbing materials with a combined particle velocity-pressure sensor[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2006, 119(5): 2826-2831.
- [7] BREE H de, LANOYE R. In Situ, Broad Band Method to Determine the Normal and Oblique Reflection Coefficient of Acoustic Materials. SAE 2005 Noise and vibration Conference and Exhibition, Michigan, May 16-19, 2005[C]. USA: 2005 SAE International, 2005.

# 弹性波数值模拟系统

弹性波数值模拟是石油测井仪器设计、研发和制造的 有效工具,其有助于优化仪器的换能器频率、发射与接收器 间的源距、接收器的个数及间距、隔声体的结构,也可帮助 理解特定声源在复杂环境中的声传播规律及正确认识和评 价采集到的弹性波数据,同时,还可为弹性波信息处理新方 法、新应用提供指导和手段,是声波测井及地震资料定量分 析的重要基础。

中国科学院声学研究所超声物理与探测实验室研究团 队,经过多年的研究,成功研发了弹性波数值模拟系统(第 一版),该系统基本功能包括:(1)交互式建立地层模型: 可通过指定格式参数卡、原始测井曲线读取原始模型,通过 表格编辑和曲线拖动两种方式进行模型调整和修改;(2)声 源设定:声源形状可设定为点源、线源、面源和体源,声源 类型可设定为单极子、偶极子、四极子;声源波形可设定为 不同解析函数源,也可取自离散的时间序列;(3)记录方 式:记录方式可选择只记录指定接收器处的时域波形,也可 附加记录全波场快照;记录方式可选择法向应力、振动速度 等;(4)数据可视化和处理:可实时显示或回放模拟的阵 列波形,并可对波形进行数字滤波、时差提取等基本的数据 处理;(5)模型划分:为提高模拟效率,本软件系统按模 型的复杂度,将系统划分为7个主要模块,包括均匀各向同 性地层、二维非均匀各向同性地层、二维非均匀横向各向同 性地层、三维横向各向同性地层、三维正交各向异性同性地 层、二维饱和孔隙弹性地层和二维非饱和孔隙弹性地层等; (6)算法选择:系统的主要算法为基于柱坐标的高阶交错 网格有限差分,同时采用了非分裂场的完全匹配层吸收边界 条件。系统还提供伪谱法和谱元法。对二维轴对称模型测试 表明单点计算速度平均小于2s,基本可达到实时模拟要求。 为进一步提高在三维模型中的计算速度,目前正研发基于 GPU的第二版系统。

目前,非常规油气藏是国内外的研究热点,水平钻井 和水力压裂是"非常规油气藏"高效开发的两个重要关键技 术,它们在不同程度上要求获取储层地质声学与力学参数、 天然裂缝及原位地应力,这些资料的准确获取依赖于新的声 波测井仪器研发和相对应的信息处理方法。弹性波数值模拟 系统的成功研发为声波测井理论研究与应用开发之间构筑 了一个桥梁,必将大力促进工业界和研究机构在声波测井新 仪器研发与相关处理技术方面的研究。

(中国科学院声学研究所超声物理与探测实验室 陈浩)