铝纤维板共振结构声学特性的理论初析

王佐民,俞悟周

(同济大学声学研究所,上海 200092)

摘要:铝纤维板与背后空腔组成的吸声结构具有明显的共振吸声特性。铝纤维板的声学参量,即相对声阻抗率 ζ 和等效厚度 l 与等效参孔率 σ 的比值,可由驻波管法测量的吸声系数频响曲线反演求得。由于铝纤维毡的材质均摊性,铝纤维板共振吸声结构不再可以看成"局部反应"的声学元件,在空腔内加置小间距的横隔板有助于提高结构的吸声性能。

关键词:铝纤维板;共振结构;吸声特性

中图分类号:TB535 文献标识码:A 文章编号:1000-3630(2005)-03-0183-04

Theoretical analysis on acoustical characteristics aluminum fiberboard

WANG Zuo-min , YU Wu-zhou

(*Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*)

Abstract: The absorbing structure made of an aluminum fiberboard and a cavity on its back has clear resonance absorption characteristics. The resonant frequency and amplitude are related to the cavity depth, surface density, degree of compression, and the mounting. Acoustical parameters of an aluminum fiberboard, relative acoustical impedance ζ and ratio of the equivalent thickness l with equivalent porosityσ, can be obtained through an absorption coefficient spectrum measured in a standing wave tube. In general, acoustical characteristics of an absorbing structure can be studied using the common theory based on a micro-perforated panel resonance absorbing structure. The aluminum fiberboard cannot be regarded as a "local reaction" material because of the even spread of the aluminum blanket. The absorption property can be improved when partitions close to each other are installed in the back cavity.

Key words: aluminum fiberboard; resonance construction; absorbing characteristics

1 引 言

铝纤维板是在两种不同网孔的铝网之间铺设一层铝纤维毡,然后滚压成 1.0mm~2.5mm 厚度的薄板。国内成品铝纤维板的铝纤维毡面密度有 550g/m^2、850g/m^2、1100g/m^2、1650g/m^2 和 2000g/m^2 等几个规格。铝纤维板是一种具有良好的物化性能的声学材料,有着广泛的应用前景。

收稿日期:2004-05-25; 修改日期:2004-07-11

作者简介:王佐民(1944-),男,研究员,研究方向:噪声与振动控制。

2 铝纤维板的声学特性

铝纤维板贴实安装时的吸声系数很小。通常将铝纤维板用龙骨(隔板)安装,在其背面留有一定厚度的空气层空腔,组成吸声结构(如图 1 所示)。

图 2 是面密度为 550g/m^2,厚度为 1.35mm 铝纤维板在空腔深度分别为 100mm 和 150mm 时垂直入射吸声系数的频响曲线。测量表明,这种吸声结构具有十分明显的共振特性,其峰值频率与空腔的深度密切相关,随着空腔深度的增加,共振峰频率降低。而垂直入射吸声系数的峰值基本保持不变。

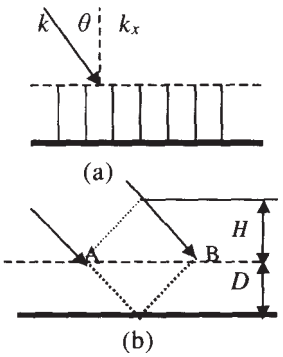

图1 铝纤维板共振吸声结构
(a)有隔板 (b)无隔板

Fig.1 Aluminum fiberboard resonance absorbing construction (a) there are partitions (b) no partition

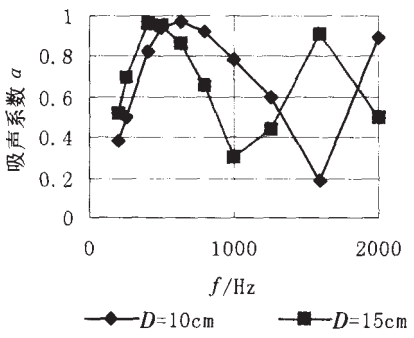

图2 垂直入射吸声系数频响曲线

Fig.2 Normal-incidence absorption coefficient spectra

十分显然,铝纤维板的声学参量,应与其物理参量,例如面密度、板厚、纤维直径、网板刚度及网板孔径等密切相关,也应与面板的安装方式密切相关。

初步的测量分析表明,吸声结构的降噪系数随铝纤维毡面密度的增加会有所提高。其中,对低于500Hz的低频频段,吸声效果增加较为明显。当面板的面密度不变,厚度不同,即铝纤维毡的压实程度不同时,中低频部分的吸声系数会随厚度增加而略有提高,高频部分基本相同。

3 理论分析

广义而言,铝纤维板共振吸声结构是穿孔板共振吸声结构的一个特例。在吸声原理和频率特性等方面具有相似性。因此可以借鉴一般的穿孔板共振吸声结构的分析方法来加以讨论[1,2]。

3.1 垂直入射

共振吸声结构的垂直入射相对声阻抗率 ζ,即单位面积吸声结构的声阻抗 Za 与空气特性阻抗 $\rho_0 c_0$ 的比值,其实部 r 称相对声阻率,虚部 x 称相对声抗率。

$$\zeta = (r + jx) \tag{1}$$

$$x = x_1 + x_2 = \coth\left(\frac{j\omega D}{c_0}\right) + j\left(\frac{\omega l}{\sigma c_0}\right) \tag{2}$$

其中,ω 为入射波的角频率,D 为空腔深度,l 为考虑各项修正后的等效板厚,σ 是板的等效穿孔率。

当声波垂直入射时,吸声结构的吸声系数:

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + x^2} \tag{3}$$

共振时:

$$\alpha_{max} = \frac{4r}{(1+r)^2} \tag{4}$$

图3给出两种铝纤维板共振吸声结构垂直入射吸声系数的测量值曲线和理论计算曲线,两者吻合甚好。这说明可采用共振吸声结构的模型对铝纤维板的吸声性能进行理论分析。理论计算的困难之处在于如何选定公式(2)中的 l 与 σ 的比值。如前所述,影响铝纤维板声学参量的因素复杂,目前尚难由若干直观的物理参量通过简单运算求得。在计算图3曲线时,是先根据实测曲线的峰值频率反演求得比值 l/σ;由垂直入射吸声系数的峰值 α_{max} 来反演 r 值,然后再由公式(3)计算理论曲线。

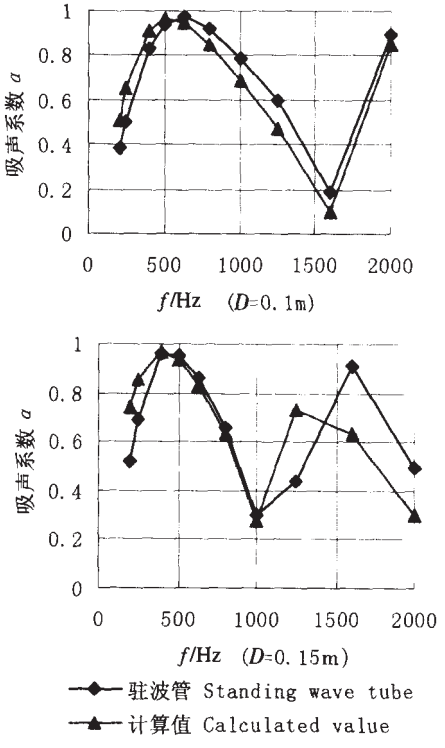

图3 垂直入射吸声系数

Fig.3 Normal-incidence absorption coefficients

这里,提出一种测量铝纤维板声阻率 r 和比值 l/σ 的方法,即依据公式(1)~(3)对垂直入射吸声系

数的实测曲线进行最小二乘法拟合,从而获得铝纤维板的声学参数。

3.2　斜入射

3.2.1　小间距隔板吸声结构

在实际问题中,声波往往不只是垂直入射于结构面板,吸声结构的声学性能将与入射角 θ 密切相关。

当铝纤维板共振吸声结构内部存在间距不大的隔板时,共振吸声结构为"局部反应"材料。入射声波进入空腔后经过多次反射后再与同一区域的入射声波迭加形成驻波。这个驻波只与入射声波的垂直分量有关,相当于波数 $k=\omega/c_0$ 乘以 $\cos\theta$。吸声结构空腔的法向声阻抗率为:

$$x_1=\frac{1}{\cos\theta}\coth\left(\frac{j\omega D\cos\theta}{c_0}\right) \tag{5}$$

斜入射时的吸声系数为:

$$\alpha(\theta)=\frac{4r\cos\theta}{(1+r\cos\theta)^2+(x\cos\theta)^2} \tag{6}$$

3.2.2　无隔板吸声结构

由于铝纤维板材质的均摊特性,声波可以在铝纤维板的任何位置以任何角度进出空腔。当铝纤维板共振吸声结构内部不存在隔板时,入射声波在 A 处进入空腔并经底板反射后,在 B 点回到面板(参见图 1(b))。这样,由 A 处进入的声波将与 B 处的入射波共同作用确定 B 处的总声压和总振速,即两者共同决定 B 处空腔的法向声阻抗率。因此,通常的"局部反应"概念不再适用,相应地,空腔声阻抗率的计算公式必需加以修正。

从图 1(b)可知,入射平面波在 B 处与 A 处的位相不同。这相当于在垂直方向,入射波提前了 H 行程,则空腔的深度减少了 $H/2$,经过简单的几何运算,可得空腔的等效深度:

$$D' = D-\frac{D}{2}\mathrm{tg}^2\theta \tag{7}$$

将 D' 代替公式(5)中的 D,则可得到斜入射时无隔板吸声结构空腔的法向声阻抗率:

$$x_1 = \frac{1}{\cos\theta}\coth\left(\frac{j\omega D'\cos\theta}{c_0}\right) \tag{8}$$

在空腔等效深度 D' 的计算公式中,当 θ 足够大时,$\mathrm{tg}\theta$ 将大于 $\sqrt{2}$,这时式(7)的计算值为负值。这在数学上是没有意义的,但有非常清晰的物理图像,表示当 B 点与 A 点相距甚远时,B、A 两处入射平面波声波的相位差已超过 2π。应用简谐声波相位的周期性可以方便地求得相应的 x_1 值。

3.3　无规入射

在完全理想的扩散声场中,入射声能量与立体角 Ω 成正比,而与入射方向无关。记入射角为 θ,在单位时间内投射在单位面积元的声能量与 $\cos\theta\mathrm{d}\Omega$ 成正比。由此得到无规入射时的平均吸声系数[2]。

$$\overline{\alpha} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \alpha(\theta)\sin(2\theta)d\theta \tag{9}$$

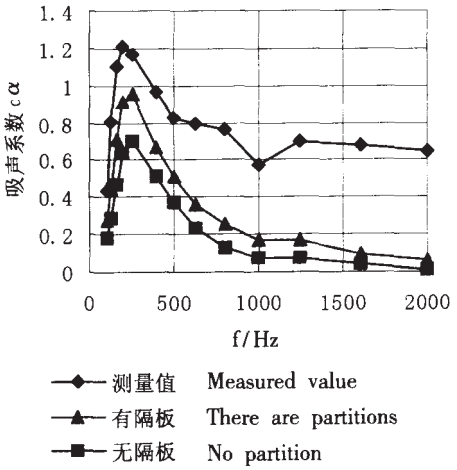

图 4　无规入射吸声系数

Fig.4　Statistical absorption coefficients

图 4 给出厚度为 1.35mm,面密度为 550g/m^2、空腔深度为 150mm 吸声结构的无规入射吸声系数频响曲线,测量试件的隔板间距为 50cm×50cm。分析表明,对于铝纤维板共振吸声结构,隔板的存在有助于吸声效果的提高。目前有限试样的测量结果也定性地佐证了这个结论。

实测曲线与小间距隔板计算曲线之间存在一定的差异。这可能是由两方面的原因所产生的。其一,是垂直入射吸声系数与混响室法无规入射吸声系数之间不存在严格的对应关系,由公式(9)表征的相互联系仅是"理想"条件下的推导。通常,计算值均要小于实际值。其二,由于声波的波动特性,混响室法测量时会产生所谓的"边缘效应",使得吸声系数的测量值大于实际值,甚至会得到吸声系数超过 1 的测量结果。

4　讨　论

(1) 原则上,可以根据严格的声学理论来分析铝纤维毡的宏观声学特性,进而加深机理方面的了

(下转第 192 页)

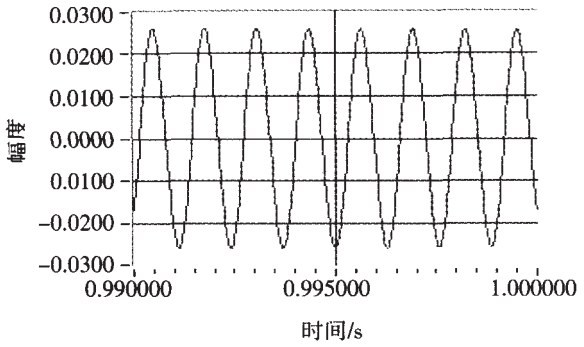

图 6 结尾 0.01s 的多普勒频移信号

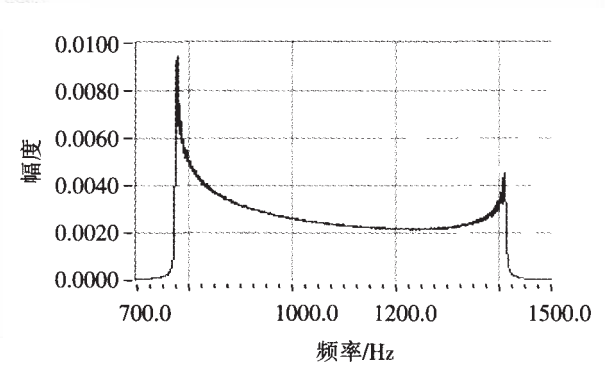

图 7 多普勒频移信号的勒频谱图

从上面的图 3~图 6 可以清楚的看到，点声源发出的信号随着距离的变化发生幅度变化和声时延。由图 4 可以看出多普勒频移信号的频率变化，接收频率从 A 到 B 越来越小，频率变化遵循下面的规律[1]：

$$f' = (1+\frac{v\cos\varphi}{C_0})\cdot f \qquad (5)$$

其中 f 为传感器接收到信号的频率，v 为声源速度，C_0 为声音在空气中的传播速度，θ 为 $A_0C\cdots A_{2N}C$ 与 AB 之间的夹角，f 为声源信号频率。

另外图 4 也验证了在仿真原理一节中所说的频移信号的能量集中在低频段（小于声源频率 1000Hz），频率幅值最小点对应的频率要比 1000Hz 要大。

4 结 论

本文是以点声源为例来模拟运动声源的多普勒效应，此种方法同样适用于模拟复杂声源，因为复杂声源可以看成是点声源的组合。用软件方法模拟多普勒频移信号的优点是节省成本，容易实现，为分析多普勒频移信号提供易得的信号源。

参 考 文 献

[1] 张秀梅. 多普勒效应公式的一种新的推导方法[J].锦州医学院学报，2001，**22**(2)：70-71.

[2] 梁军. 3D 运动声源仿真原理[J].电声技术，2000，**4**：8-9.

[3] 程守诛. 普通物理[M]. 北京：人民教育出版社，1986. 93-96.

(上接第 185 页)

解。但是，现有的毛细管吸声理论均没有考虑材料的热传导效应[3,4]。对于金属铝忽略热传导的影响，可能会“降低”理论推导的吸声效果。各种铝纤维板的相对声阻抗率可能仍需由实验测定。

(2) 铝纤维毡本身的声学特性会受安装方式的不同而有所变化，即对应不同的横向张力，比值 l/σ 会有所变化，结构吸声系数共振峰的频率也会有所偏移。

(3) 前面只讨论了小间距隔板和无隔板两种铝纤维板共振吸声结构在斜入射时的 x_1。对于有限间距隔板的一般情况，由于声波会在隔板与底板间多次反射，很难用简单的数学关系来表述反射波到达面板的位置 B 和入射平面波在 B、A 两点间的相位差。这时可能需要采用声线法等数值计算方法来加以处理。

所谓的“小间距”和“有限间距”，两者之间甚难严格划分。其不仅与入射声波的波长和空腔深度密切相关，而且也与入射角 θ 相关。一般而言，当声波的入射点 A 和多次反射后的返回点 B 间的距离远小于波长时，才可将隔板间距看为“小间距”。

参 考 文 献

[1] 马大猷.现代声学理论基础[M]，北京:科学出版社，2004.
MAA Dahyou. Theoretical fundament of modern acoustics[M]. Beijing: Science Press，2004.

[2] 赵松龄.噪声的降低与隔离(上册)[M].上海：同济大学出版社，1985.
Zhao Songling. Noise reduction and isolation (Ⅰ)[M]. Shanghai：Tongji university press，1985.

[3] Zwikker C, Kosten C W. Sound absorbing material [M]. Elsevier，1949.

[4] 赵松龄，卢元伟.声波在纤维性吸声材料中的传播[J]，声学学报，1979，**1**(1)：1-11.
ZHAO Songling, LU Yuanwei. Propagation of acoustic wave in fibrous sound absorbents [J]. Acta Acustica，1979，**1**(1)：1-11.