文章编号: 1004-0609(2011)09-2132-07

组合形式对打孔闭孔泡沫铝板吸声效果的影响

梁李斯,姚广春,穆永亮,华中胜

(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110089)

摘 要:将不同打孔率、厚度、打孔方式的闭孔泡沫铝板与玻璃棉进行组合,使用驻波管吸声测试仪进行吸声系 数测试,研究组合形式对闭孔泡沫铝板吸声效果的影响。结果表明,通过对吸声峰值、降噪系数、半峰宽值的计 算和比较可以看出,吸声峰值在低频的试样在前、峰值在高频的试样在后的组合形式有利于吸声,出现两个吸声 峰,降噪系数和半峰宽值也都大大提高;打孔闭孔泡沫铝板与玻璃棉的组合使峰值略有提高,但性能总体的改变 不大,而玻璃棉本身易造成环境污染,因此,该种组合不适于在吸声领域应用。

关键词: 吸声系数; 泡沫铝; 玻璃棉; 打孔; 吸声结构 中图分类号: TG146.2 文献标志码: A

Effect of combining form on sound absorption of closed-cell aluminum foam perforated

LIANG Li-si, YAO Guang-chun, MU Yong-liang, HUA Zhong-sheng

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110089, China)

Abstract: The closed-cell aluminum foams with various specimen thicknesses, perforation ways and perforation rates were grouped with glass wool. The sound absorption coefficient was measured by standing-wave method, and the effect of combining form on the sound adsorption of closed-cell aluminum foam perforated was studied. The results show that, being evaluated by the maximum of sound absorption coefficient, noise reduction coefficient and half-peak breadth, the specimens with the maximum of sound absorption coefficient at low frequency should be put before the specimens with the maximum of sound absorption coefficient at high frequency, which shows two peaks of sound adsorption, and greatly increases the noise reduction coefficient and half-peak breadth. The maximum of sound absorption coefficient and half-peak breadth. The maximum of sound absorption coefficient and half-peak breadth. The maximum of sound absorption coefficient at high frequency, which shows two peaks of sound adsorption coefficient increases slightly in a combination of closed-cell aluminum foam perforated and glass wool. However, the glass wool is apt to cause environmental pollution. Thus, the combination is unsuitable for sound absorption.

Key words: sound absorption coefficient; aluminum foam; glass wool; perforation; sound absorption structure

闭孔泡沫铝从 20 世纪 50 年代研制成功以来,由 于其基于铝又优于铝的各种性能而引起了研究人员的 注意^[1-3],经过几十年的发展,闭孔泡沫铝的生产工艺 得到了进一步的完善^[4],尤其是近几年实现大量生产 之后,闭孔泡沫铝越来越广泛地应用于各个领域,如 减振、降噪、吸能等^[5-7]。闭孔泡沫铝在吸声领域常作 为声屏障、消声器的主体材料^[8]。作为金属吸声材料, 它本身除了较好的吸声效果外,环保、耐火、寿命长 等优点也使得其在吸声领域获得了很好的应用前 景^[9-11]。为了提高吸声系数,人们对闭孔泡沫铝进行 打孔、加空腔、背后贴膜、压缩等一系列处理,对其 吸声效果产生了积极的作用^[12-15],尤其是打孔,可以 使吸声系数大大提高^[16-17],对于一定密度、一定厚度 的泡沫铝板合适的打孔率在个别频率段可以使吸声系 数高达 0.95 以上。打孔闭孔泡沫铝材料作为一种特殊 的吸声材料制作成共振吸声板比普通的共振吸声板更

收稿日期: 2010-08-25; 修订日期: 2010-11-22

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA03Z512);国家自然科学基金资助项目(50774021)

通信作者:姚广春,教授,博士;电话: 024-83686462; E-mail: gcyao@mail.neu.edu.cn

具吸声优势,而玻璃棉是一种多孔类吸声材料,将打 孔的闭孔泡沫铝板与玻璃棉进行组合以研究其吸声效 果。在初步探讨打孔率对吸声系数大小和吸声峰值出 现频段的影响之后,本文作者将不同打孔率、厚度、 打孔方式的闭孔泡沫铝吸声板进行组合,研究组合结 构对吸声的影响,同时,希望得到更宽的吸声频段, 以取得更好的吸声效果。

1 实验

1.1 实验材料与方法

1.1.1 材料制备工艺

本研究所用闭孔泡沫铝试样由东北大学制备,所 用生产工艺为熔体转移发泡法。采用熔体转移发泡法 制备闭孔泡沫铝^[18]共有5个步骤:1)在电炉里熔化铝 以及金属钙的混合物;2)向熔体里加入TiH₂;3)将 熔体转移到发泡箱;4)将发泡箱放入保温炉中并在里 面发泡;5)冷却。经过上述5个过程可以得到闭孔泡 沫铝块体,若制作成吸声板需要对块体再进行切割, 按照所需得到不同厚度的闭孔泡沫铝板。生产过程如 图1所示。



图1 熔体发泡法制备泡沫铝金属

Fig. 1 Schematic diagrams of melt foaming method process

1.1.2 闭孔泡沫铝材料的表征

通过阿基米德排水法测闭孔泡沫铝体积,称量质 量后,计算得到其密度,本研究共选两种密度的材料: 0.2 g/cm³和 0.3 g/cm³。80%的孔径为 3~5 mm,孔形态 主要以五边形十二面体和十四面体为主。孔分布均匀, 无连通孔,缺陷少。厚度取两种: 10 mm 和 15 mm。 1.1.3 实验原理与测试仪器

1) 实验原理

吸声材料的吸声能力,从实用角度,是以吸声系

数来表示。声波入射到材料表面时,入射声能(*E*_i)的一 部分反射(*E*_r),一部分声波入射能量中被材料吸收部分 所占的比率,表示为^[8]

$$\alpha = 1 - \frac{E_{\rm r}}{E_{\rm i}} = \frac{E_{\rm i} - E_{\rm r}}{E_{\rm i}} \tag{1}$$

当 *E*_i=*E*_r 时, *α*=0,表示材料是完全反射的;当 *E*_r=0 时,*α*=1,表示材料是全吸收的。因此,吸声系 数在 0~1 之间变化,吸声系数越大,材料的吸声效果 越好。

2) 测试仪器

测试仪器为中国科学院声学研究所的驻波管吸声 系数测试仪,图2所示为测试仪器的结构原理,测试 仪主要由驻波管、声源系统、接受系统等部分组成。 该仪器所测吸声系数为法向入射吸声系数。测试的中 心频率为200~2000 Hz,按照1/3倍频程分布,依次 为200、250、315、400、500、630、800、1000、1250、 1600和2000 Hz。



图 2 驻波管吸声测试仪结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of standing-wave-tube sound absorption tester

1.2 实验过程

根据驻波管的测试条件要求,所选试样均为直径 99 mm。经熔体发泡法制备的闭孔泡沫铝材料采用线 切割的方法进行加工,根据测试的需要,分别加工出 厚度为10 mm 和15 mm 的试样。总共进行了两组比 较实验。选取两种密度的试样,一种试样的密度为0.2 g/cm³,另一种试样的密度为0.3 g/cm³;打孔孔径分别 为1.5、2.5、3.0 和 3.5 mm,打孔率均为2%,背后空 腔均为30 mm。一组试样用于比较峰值出现在不同频 段的试样组合后的吸声效果,另一组试样用于比较背 后加玻璃棉后对吸声效果的影响。

对试样使用钻头进行打孔,打孔的孔排列方式取 两种。一种为正方形排列,一种为正三角形排列,具 体的排列形式如图 3 所示。根据打孔率计算孔心距, 得到所需的测试样件。



图3 泡沫铝打孔方式示意图

Fig.3 Schematic diagrams of perforation way for closed-cell aluminum foam: (a) Square arranging; (b) Triangle arranging

2 结果与讨论

对吸声系数峰值、降噪系数和半峰宽的测试结果 进行分析和讨论。

 1) 吸声系数峰值是指吸声系数所能取得的最大 值,代表了该吸声材料主要的吸声频段。吸声系数在 式(1)中已经列出。

2) 降噪系数 C_{NR} 是中心频率在 250、500、1 000 和 2 000 Hz 的吸声系数的平均值:

$$C_{\rm NR} = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1\ 000} + \alpha_{2\ 000}}{4} \tag{2}$$

式中: *a*₂₅₀、*a*₅₀₀、*a*₁₀₀₀ 和 *a*₂₀₀₀分别为材料在 250、500、 1 000 和 2 000 Hz 的吸声系数值,体现该吸声材料在 整个频段内的吸声能力,反映出对于一些噪声频段较 宽的情况该材料是否具有应用价值。

3) 半峰宽是指吸声系数降到峰值一半时频带的宽度,常用 *Q* 表示:

$$\Omega = 6.6 \lg \left[\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2Q}\right)^2} + \frac{1}{2Q} \right]$$
(3)

式中: *Q* 为无量纲的品质因数,与打孔板后空腔深度, 共振声波波长及相对声阻率等因素有关。

2.1 打孔闭孔泡沫铝组合

第一组主要为不同打孔孔径的试样,先对试样单 独测试吸声系数值,再将试样进行组合,组合形式为 串联,组合前吸声系数 1/3 倍频程分布图如图 4 所示。

图 4 中各试样的工艺参数如下:

试样 A 厚度 10 mm, 打孔孔径 3 mm, 打孔率 2%, 孔正方形排列, 背后空腔 30 mm;

试样 B 厚度 10 mm, 打孔孔径 2.5 mm, 打孔率 2%, 孔正方形排列, 背后空腔 30 mm;

试样 C 厚度 15 mm, 打孔孔径 1.5 mm、2.5 mm, 打孔率两种孔径各占 1%, 孔三角形排列, 背后空腔 30 mm;

试样 D 厚度 10 mm, 打孔孔径 3.5 mm, 打孔率 2%, 孔正方形排列, 背后空腔 30 mm。

打孔后的闭孔泡沫铝板背后加空腔的结构主要依 靠共振吸声,该结构仿照亥姆霍兹共振器的吸声机理, 亥姆霍兹共振器与共振吸声结构的示意图如图 5 所 示。亥姆霍兹共振器由几个声学作用不同的声学元件 组成,开口管及管内附近空气随声波振动,相当于一 个声质量元件。空腔内的压力随空气的胀缩而变化, 是一个声顺元件。空腔内的空气在一定程度上随声波 而振动,也具有一定的声质量。空气在开口壁面的振 动摩擦,由于粘滞阻尼和导热作用,会使声能损耗, 它的声学作用是一个声阻。当入射声波频率接近共振 器固有频率时,孔颈的空气柱产生强烈振动,在振动 过程中,由于克服摩擦阻力而消耗声能。反之,当入 射声波频率远离共振器固有频率时,共振器振动很弱, 声吸收作用很小,因此,共振器吸声系数随频率变化, 最高吸声系数出现在共振频率处。共振吸声结构模仿 亥姆霍兹共振器的吸声机理,相当于一系列并联的亥 姆霍兹共振器,其吸声规律与亥姆霍兹共振器相似。

组合前单测试样的吸声峰值、降噪系数、半峰宽 值、峰值所在中心频率列于表 1。由表 1 可见,这组 试样吸声峰值相差不大,试样 C 和 D 的降噪系数值高 于试样 A 和 B 的,半峰宽值则是试样 B 的远高于另 外 3 个试样的。由此可见,试样 B 的吸声峰覆盖的频 段更宽,更具实际应用价值。由于选择峰值所在中心 频率不同的试样进行组合,因此吸声峰值所在中心频 率决定于测试样件的共振频率。关于穿孔板的共振频 率有如下计算公式:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(t+0.8d)L}}$$
(4)



图 4 不同打孔孔径试样组合前吸声系数 1/3 倍频程分布图

Fig.4 1/3 octave spectrograms of sound absorption coefficient of samples perforated with different hole diameters: (a) Sample A; (b) Sample B; (c) Sample C; (d) Sample D





Fig.5 Schematic diagram of single resonator (a) and resonant absorption structure (b)

式中: *L* 为板后空气层厚度; *t* 为板的厚度; *d* 为孔径; *c* 为声速; *P* 为穿孔率。

从表1中可看出,除试样B外,其他3个试样的 峰值频率均为500Hz,因此,将试样B与其他3个试 样分别组合后再次进行吸声系数的测量。 **表1** 组合前单个试样的吸声峰值、降噪系数、半峰宽值和 峰值所在中心频率

 Table 1
 Maximum of sound absorption coefficient, noise

 reduction coefficient, half-peak breadth and mid-frequency of

 single specimen

Sample	Maximum of sound absorption coefficient	Noise reduction coefficient	Half-peak breadth/ Hz	Mid-frequency/ Hz
А	0.95	0.38	378	500
В	0.94	0.38	949	800
С	0.93	0.45	400	500
D	0.91	0.44	397	500

几组试样的组合方式为串联,即一前一后,试样 之间加 30 mm 空腔、试样与后壁间加 30 mm 空腔。 组合之后吸声结构形式如图 6 所示。

组合结构的吸声系数测试结果如图 7 所示,其吸 声峰值、降噪系数、半峰宽值列于表 2。由图 7 和表 2



图6 组合吸声结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of composite sound absorption structure

可见,几组测试结果均出现双峰图像,比单测的吸声峰值有所提高,尤其是组合 A+B,其两个峰值分别为

0.97 和 0.993,峰宽大大增加,降噪系数也高达 0.67, 说明整个频段内吸声系数值均较高。两个试样单测时 均有自己的共振频率,吸声峰值出现在共振频率处, 组合之后在各自的共振频率处出现峰值,但彼此之间 有一定的影响,因此,峰值不严格出现在单测时的共 振频率位置,而吸声峰值本身也有所提高。对比组合 A+B 和 B+A 可以看出,虽然是相同的两个试样,但 前后位置不同测试结果大不相同。组合 A+B 的各项性 能均有较大提高,而组合 B+A 就差得多,连第二峰也 不明显。因此,测试时将单测峰值在低频的试样置于 前,将单测峰值在高频的试样置于后是有利于吸声的 组合形式。

2.2 打孔闭孔泡沫铝与玻璃棉组合

将打孔闭孔泡沫铝板与玻璃棉进行组合,所选闭 孔泡沫铝板密度为 0.3 g/cm³,厚度为 10 mm,打孔率 为 2%,孔径为 3.5 mm,孔排列方式为正三角形。首 先测试未加玻璃棉时的吸声系数,然后在泡沫铝板背



图 7 组合后吸声系数 1/3 倍频程图

Fig.7 1/3 octave spectrograms of sound absorption coefficient of composite sample: (a) Composite A+B; (b) Composite C+B; (C) Composite B+A; (d) Composite B+D

第21卷第9期

表2 组合后试样的吸声峰值、降噪系数和半峰宽值

Table 2Maximum of sound absorption coefficient, noisereductioncoefficient and half-peak breadth of compositesample

Composito	Maximum of sound	Noise reduction	Half-peak
Composite	absorption coefficient	coefficient	breadth/Hz
A+B	0.993	0.67	1 234
C + B	0.920	0.59	940
B + A	0.920	0.45	403
B + D	0.980	0.45	737

后加10、20、30和40 mm的玻璃棉,玻璃棉紧贴闭 孔泡沫铝板放置,分别测量吸声系数。

打孔闭孔泡沫铝板背后加不同厚度玻璃棉的吸声 系数如图 8 所示,吸声峰值、降噪系数、半峰宽值列 于表 3。由图 8 和表 3 可见,吸声峰值与降噪系数随 玻璃棉厚度的增加均逐渐增大,而半峰宽值随玻璃棉 厚度增加而减小,但变化值不大。 根据前人的经验, 当穿孔板后空气层填入疏松吸声材料时,空腔内的声 质量和声顺都增加,穿孔的末端阻抗也增加,即空腔 的有效深度增大,穿孔的有效长度也增加,与未填材 料时相比,共振频率向低频方向移动,移动量通常在 一个倍频程以内,同时吸声系数有所提高。从图 8 可 以看出,在该组测试中,随所加玻璃棉厚度的增加, 吸声峰呈向低频迁移的趋势,峰值逐渐增大,低频吸 声系数整体都得到提高。整个吸声系数的变化都是在 原打孔闭孔泡沫铝板的基础上发生的,相当于提高了 原板的吸声性能,但如果考虑实用性,因玻璃棉存在



图 8 打孔闭孔泡沫铝与玻璃棉组合的吸声系数 1/3 倍频程 分布图

Fig.8 1/3 octave spectrogram of sound absorption coefficient of combination of closed-cell aluminum foam perforated and glass wool

表3 背后添加玻璃棉后试样的吸声峰值、降噪系数和半峰 宽值

 Table 3
 Maximum of sound absorption coefficient, noise

 reduction
 coefficient and half-peak breadth of composite

 specimen

Thickness of	Maximum of	Noise	Half-peak
glass	sound absorption	reduction	breadth/
wool/mm	coefficient	coefficient	Hz
0	0.85	0.35	490
10	0.90	0.38	457
20	0.98	0.40	415
30	0.98	0.42	415
40	0.98	0.41	412

环境污染问题,而该种组合吸声性能的优势不够大, 不足以弥补这一缺点。因此,还是吸声峰值在不同频 段的组合用于吸声更具有应用前景。

3 结论

将吸声峰值出现在不同频段的试样进行组合
 时,以峰值出现在低频的试样置于前、峰值在高频的
 试样置于后的组合形式所得吸声效果较好。

2) 将打孔闭孔泡沫铝板与玻璃棉进行组合时,随 所加玻璃棉厚度的增加,吸声峰呈向低频迁移的趋势, 峰值逐渐增大,低频吸声系数整体都得到提高。

3) 打孔泡沫铝板与玻璃棉组合虽然也可以使吸 声系数得到一定提高,但提高幅度较少,而玻璃棉本 身又具有环境污染等问题,因此,该种组合形式用于 吸声优势不明显。

REFERENCES

- SOSNIK A. Process for making foamlike mass of metal[P]. US2434775, 1948.
- [2] ELLIOTT J C. Method of producing metal foam[P]. US2751289, 1956.
- [3] GARA B A, BOGETTI T A, FINK B K, YU C J, CLAAR T D, EIFERT H H, GILLESPIE J W. Aluminum foam integral armor: A new dimension in armor design[J]. Composite Structures, 2001, 52(3/4): 381–395.
- [4] 尉海军,李 兵,郭志强,姚广春. Al 基和 Al-6Si 基闭孔泡沫
 铝(CCAF)动态压缩性能[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(5): 704-709.

YU Hai-jun, LI Bing, GUO Zhi-qiang, YAO Guang-chun. Dynamic compressive property of closed cell aluminum foam(CCAF) with Al and Al-6Si matrix[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(5): 704–709.

- [5] 何琳,朱海潮,邱小军,杜功焕. 声学理论与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2006:120-125.
 HE Ling, ZHU Hai-chao, QIU Xiao-jun, DU Gong-huan. Acoustic theory and engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2006: 120-125.
- [6] BHATTACHARYA A, CALMIDI V V, MAHAJAN R L. Thermophysical properties of high porosity metals foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(5): 1017–1031.
- [7] ANDREWS E W, HUANG J S, GIBSON L J. Creep behavior of a closed-cell aluminum foam[J]. Acta Mater, 1999, 47(10): 2927–2935.
- [8] ANDREWS E W, GIOUX G, ONCK P, GIBSON L J. Size effects in ductile cellular solids. Part II: Experimental results[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43: 701–713.
- [9] ANDREWS E W, GIBSON L J. On notch-strengthening and crack tip deformation in cellular metals[J]. Materials Letters, 2002, 57: 532-536.
- [10] 赵庭良,徐连棠,李道韫,战松江,吴林美,周为. 泡沫铝的 吸声特性[J]. 内燃机工程, 1999, 6(2): 55-59.
 ZHAO Ting-liang, XU Lian-tang, LI Dao-yun, ZHAN Song-jian, WU Lin-mei, ZHOU Wei. Study on sound absorption properties of aluminium alloy foam [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1999, 6(2): 55-59.
- [11] YU Hai-jun, GUO Zhi-qiang, LI Bing, YAO Guang-chun, LUO Hong-jie, LIU Yi-han. Research into the effect of cell diameter of aluminum foam on its compressive and energy absorption properties [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 454/455(25): 542–546.

- [12] YU Hai-jun, YAO Guang-chun, WANG Xiao-lin, LIU Yi-han, LI Hong-bin. Sound insulation property of Al-Si closed-cell aluminum foam sandwich panels [J]. Applied Acoustics, 2006, 2007, 68(11/12): 1502–1510.
- [13] YU Hai-jun, YAO Guang-chun, LIU Yi-han. Tensile property of Al-Si closed-cell aluminum foam [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16(6): 1335–1340.
- [14] YU Hai-jun, YAO Guang-chun, WANG Xiao-lin, LI Bing, YIN Yao, LIU Ke. Research on sound insulation property of Al-Si closed-cell aluminum foam bare board material [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17(1): 93–98.
- [15] YU Hai-jun, LI Bing, YAO Guang-chun, WANG Xiao-lin, LUO Hong-jie, LIU Yi-han. Sound absorption and insulation property of closed-cell aluminum foam [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16(Special 3): 1383–1387.
- [16] 尉海军,姚广春,王晓林,李 兵,尹 铫. 铝硅闭孔泡沫铝吸 声性能研究[J]. 功能材料, 2006, 37(12): 2014-2018.
 YU Hai-jun, YAO Guang-chun, WANG Xiao-lin, LI Bing, YIN Yao. Research on sound absorption property of Al-Si closed-cell aluminum foam[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(12): 2014-2018.
- [17] 王滨生,张建平.泡沫金属吸声材料制备及吸声性能的研究
 [J].化学工程师,2003(4):8-9.
 WANG Bin-sheng, ZHANG Jian-ping. An investigation on manufacture of foamed copper and absorbing property[J]. Chemical Engineering, 2003(4):8-9.
- [18] NAKAJIMA H, HYUN S K, OHASHI K, OTA K, MURAKAMI K. Fabrication of porous copper by unidirectional solidification under hydrogen and its properties[J]. Colloids and Surfaces A, 2001, 179(2/3): 209–214.

(编辑 何学锋)