

打孔闭孔泡沫铝的吸声能力

梁李斯, 姚广春, 王 磊, 马 佳, 华中胜
(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110089)

摘 要: 闭孔泡沫铝板具有一定的吸声性能, 对闭孔泡沫铝板进行打孔处理后, 其吸声效果显著提高。使用驻波管法测试不同打孔率以及在泡沫铝板背后设置不同厚度空腔时吸声系数和吸声频率的变化。测量结果表明: 以适当的打孔率打孔后, 吸声系数提高 30% 左右, 打孔率过高, 吸声系数反而降低; 随着在泡沫铝吸声板后设置的空腔厚度的增加, 吸声峰值向低频偏移。可通过改变打孔率和背后空腔深度来设计用于降噪的闭孔泡沫铝吸声结构。

关键词: 吸声; 闭孔泡沫铝; 打孔; 空腔

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Sound absorption of perforated closed-cell aluminum foam

LIANG Li-si, YAO Guang-chun, WANG Lei, MA Jia, HUA Zhong-sheng

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

Abstract: The closed-cell aluminum foam panels have certain sound absorption properties, which are significantly increased by perforating the aluminum foam panels. The sound absorption properties were studied from the perforation rate, cavity thickness with standing waves tube. The results show that the sound absorption coefficient of closed-cell aluminum foam increases by 30% after being perforated. However, when the perforation rate exceeds a certain value, the sound absorption coefficient decreases. Moreover, the highest sound absorption coefficient shows the trend of traveling to low-frequency region with increasing the cavity thickness.

Key words: sound absorption; closed-cell aluminum foam; perforation; cavity

随着工业化的推进和现代交通运输业的发展, 噪声问题越来越突出, 日益严重地影响着我们的生产和生活, 噪声污染、水污染与空气污染一起被称为当代三大污染^[1]。城市环境噪声成为亟待解决的环境问题。

对于噪声控制的研究, 吸声是一个重要的方法。而吸声效果的好坏在很大程度上取决于吸声材料本身。目前, 吸声材料来源广泛, 种类繁多, 从传统的棉麻类有机纤维到新研制的金属基材料, 从使用单纯共振吸声或多孔吸声材料到将两种方式相结合的吸声结构。随着研究的进展, 性能优良的吸声材料不断出现^[2-5], 吸声结构日益优化。泡沫铝材料作为新兴的特殊结构材料用于吸声领域历史不长, 且主要为渗流铸

造法生产的开孔泡沫铝, 对吸声性能的研究也主要针对这类泡沫铝材料^[6-8]。对于闭孔泡沫铝材料研究较少, 且不够深入和系统。本文作者在总结前人研究结论和成果的基础上^[9-11], 进一步研究闭孔泡沫铝打孔后背后空腔的深度、打孔率等因素对闭孔泡沫铝吸声性能的影响, 探寻各因素影响闭孔泡沫铝吸声的规律。

1 实验

1.1 闭孔泡沫铝材料制备

图 1 所示为熔体发泡法制作泡沫铝的工艺流程图。该方法是将发泡剂加入到具有一定黏度的熔融金

属铝液之中并搅拌均匀; 发泡剂受热分解产生气体并在铝液中形成气泡, 阻止气泡逸出并冷却含有气泡的铝液, 即可获得泡沫铝^[12-14]。熔体发泡法需要添加钙、氧化铝粉等作为增粘剂, 发泡剂一般采用的是金属氢化物, 如 TiH₂、ZrH₂ 和 HfH₂ 等, 生产出来的泡沫铝孔洞之间相互独立, 强度较高。本研究所用材料为纯铝基的闭孔泡沫铝, 发泡工艺采用熔体发泡法。

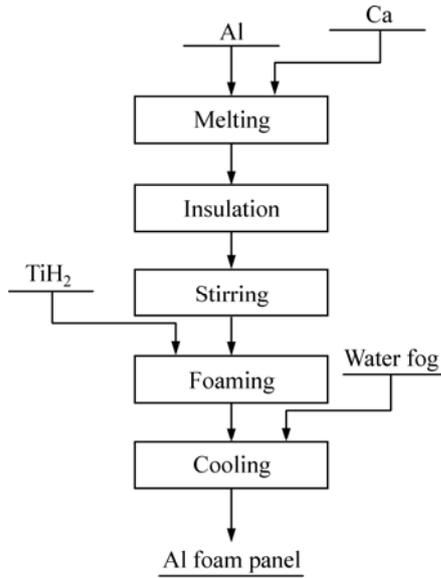


图 1 熔体发泡法制备泡沫铝流程图

Fig.1 Flow chart of Al foams made by melt foaming method

1.2 测试仪器与原理

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。驻波管为一圆形截面的长管道, 管壁由密实坚硬材料制成, 内表面平滑无缝。驻波管分两段, 一为试件段, 装置试件; 另一为测试段, 为驻波管主体, 进行测量。两段横截面与壁厚完全相同且同轴连接。驻波管测试的频率范围与管的粗细和长短有关, 因此, 若要覆盖不同频段, 需使用长短、粗细不同的管。测试频率满足下

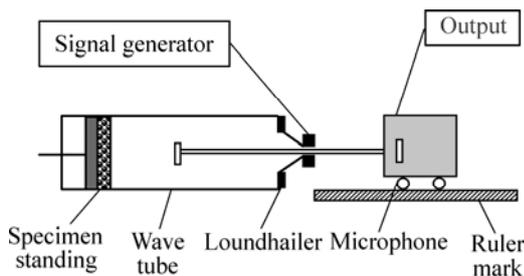


图 2 驻波管吸声测试仪结构示意图

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

列公式:

$$f_1 < \frac{3.83c}{\pi D} \tag{1}$$

$$f_2 > \frac{c}{2l} \tag{2}$$

式中: f_1 为测试频率上限; f_2 测试频率下限; c 为声速; l 为管长; D 为管直径。

1.3 试验方案

由于驻波管的测试条件要求, 所选试样的直径均为 99 mm。实验共作了 5 组比较, 选了 2 种密度的试样, 一种是低密度(0.30 g/cm³), 另一种是较高密度(0.78 g/cm³)。对这两类试样进行不同背后空腔深度, 不同打孔率的比较, 研究吸声效果受不同因素影响的原理与规律。

1.4 打孔方式

本实验对闭孔泡沫铝进行打孔, 均使用直径为 2 mm 的钻头, 因实验使用的样件为直径 99 mm 的圆形闭孔泡沫铝材料, 因此按辐射状分布较为均匀, 打孔从圆心向外打在一系列同心圆的圆周上, 因为钻头直径不变, 孔的大小和形状相同, 若打孔率不同, 则打孔个数随之改变。对应打孔率的打孔个数根据公式推导计算如下:

$$X = \pi r^2 N / (\pi R^2) \tag{3}$$

$$N = XR^2 / r^2 \tag{4}$$

式中: N 为打孔个数; X 为打孔率; r 为打孔孔半径; R 为样件半径。

关于打孔孔径的问题, 根据马大猷^[15]对开孔薄板的研究情况, 开孔孔径越大, 管内流体力阻越小; 相反管径越小, 流阻越大, 如果管径小到一定程度, 力阻就很大, 就可以成为很好的吸声材料。过大或过小的孔径都不利于吸声, 考虑吸声效果和操作的可实现性, 选取 2 mm 的打孔直径是较适宜的, 既能形成一定阻力又能组成亥姆霍兹共振体系, 因此, 在本实验中均采用 2 mm 的打孔孔径。本实验中闭孔泡沫铝所打孔均为通孔。图 3 所示为未打孔、打孔 3.5%和打孔 4%的闭孔泡沫铝试样的实物图。由图 3 可看出, 未打孔闭孔泡沫铝的宏观形貌和闭孔泡沫铝的大致打孔情况, 可看到采取此种打孔方式, 孔在闭孔泡沫铝上均匀分布。

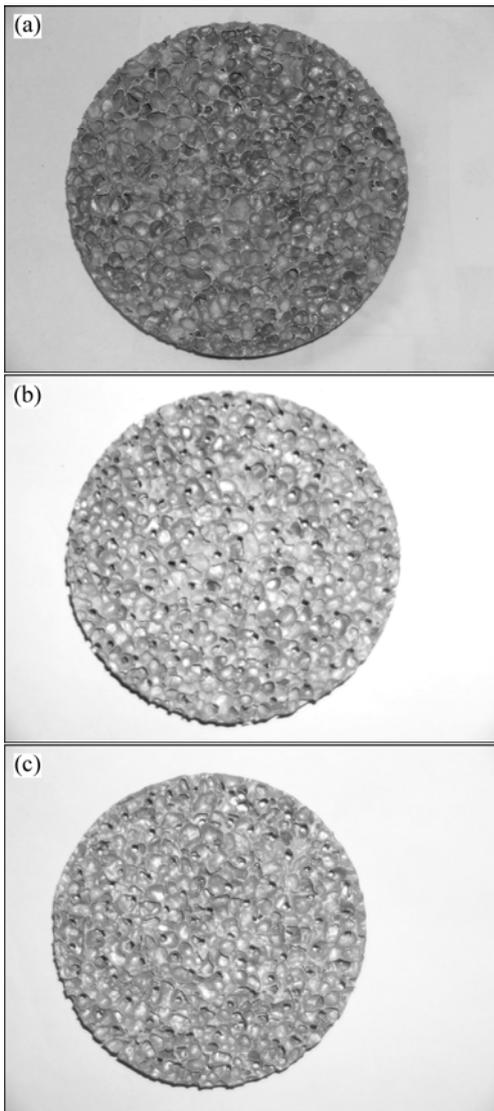


图3 闭孔泡沫铝试样实物图

Fig.3 Photos of closed-cell Al foams using as absorption materials: (a) No perforation; (b) Perforation rate 3.5%; (c) Perforation rate 4.0%

2 结果与讨论

2.1 不同打孔率

图4(a)所示为密度 0.78 g/cm^3 ，厚度 15 mm ，背后空腔 30 mm ，打孔率分别为 3%、5%、10% 的闭孔泡沫铝吸声系数的比较。由图4(a)可见，随着打孔率的增大，吸声峰值向高频偏移，但最高吸声系数逐渐降低。因此，通过打孔率来调节吸声峰值，将材料用于不同频率分布的噪声虽然是一个较好的应用方向，但应结合改变孔隙率、厚度及其他条件，不能单纯增加打孔率，过高的打孔率不利于吸声。

图4(b)所示为密度 0.3 g/cm^3 ，厚度 10 mm ，背后空腔 30 mm ，打孔率从 0.5% 到 4% 一个系列的闭孔泡沫铝吸声系数比较。由图4(b)可见，随着打孔率的增大，吸声峰值先增大后减小，由低频向高频偏移，吸声峰值除第一峰值外在高频还出现第二吸收峰，打孔率较高时第一吸收峰峰值下降，第二吸收峰峰值甚至超过第一吸收峰，打孔率为 4% 的试样第一吸收峰已经不明显，第二吸收峰成为它主要的吸声峰值。打孔率为 1% 和 1.5% 的样件吸声峰值最高，接近 1.0，峰值出现在中频。闭孔泡沫铝本身具有一定的吸声能力，当对闭孔泡沫铝样件进行打孔后，泡沫铝板与背后空腔形成亥姆霍兹共振器，吸声机理类似于多孔板的吸声机理，亥姆霍兹共振器的吸声特性曲线如图5所示。比较图4和5可看出，打孔闭孔泡沫铝的吸声特性曲线与亥姆霍兹共振器的吸声曲线有相似之处。其第一吸收峰对应材料的一阶共振频率，是吸声系数最大的位置，第二吸收峰对应材料的二阶共振频率。由图4(b)可见，几种不同打孔率的闭孔泡沫铝的吸收率均出现

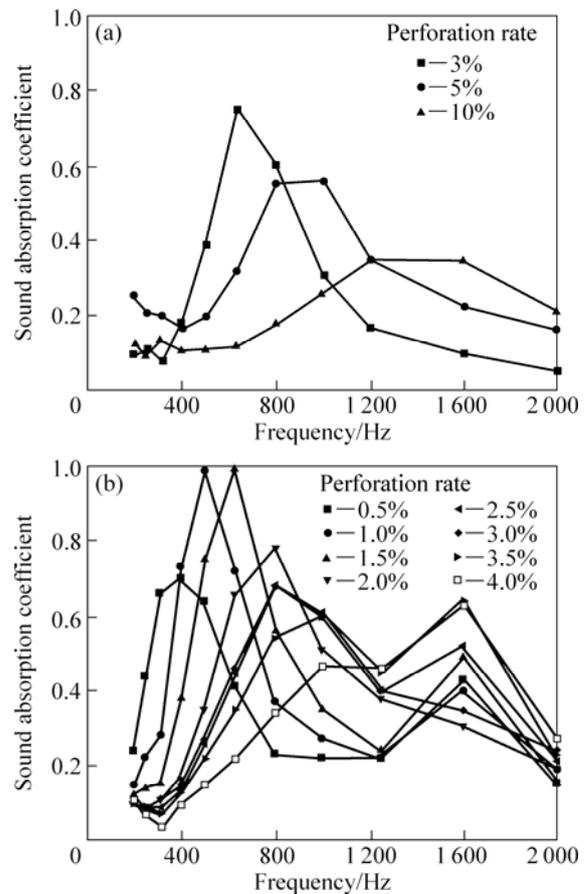


图4 不同打孔率的泡沫铝吸声系数曲线

Fig.4 Sound absorption coefficients curves of samples with thickness of 15 mm (a) and 10 mm (b) under different perforation rates

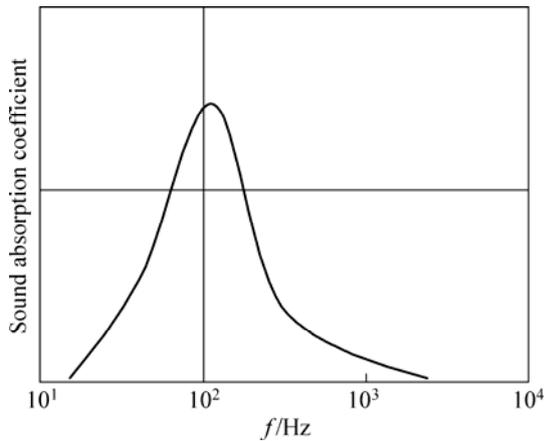


图 5 亥姆霍兹共振器吸声特征曲线
Fig.5 Sound absorption characteristic curve of Helmholtz resonator

在 1 600 Hz 左右。打孔之后的闭孔泡沫铝材料因为兼具几种吸声作用, 其吸声系数比未打孔时大大提高, 但打孔率也会影响峰值的移动, 不同打孔率的吸声峰值出现在不同的频率段。由图 4(b)可见, 打孔率升高到一定程度会导致吸声峰值的降低, 因此过高的打孔率对吸声效果并不起到积极作用, 这在图 4(b)中得到更好的验证, 如果想要得到较高频率的吸声峰值可以考虑改变厚度或背后空腔深度等因素。但密度较低时, 如图 4(b)情况, 几种打孔率吸声峰值均不低于 0.6, 因此, 一般情况下通过改变打孔率对不同频率分布的噪声进行吸收仍是可行的方法。

2.2 不同背后空腔深度

图 6(a)所示为打孔率 1.5%, 密度 0.30 g/cm³, 厚度 10 mm, 背后空腔分别为 5、10、30 mm 时的闭孔泡沫铝吸声系数比较。在不同打孔率的测试中发现, 打孔 1.5%是能够得到较高吸声率的一个比较好的打孔率, 因此选择在此打孔率下测不同背后空腔深度的吸声, 进一步探讨吸声系数受背后空腔影响的情况, 希望得到更明显的测试效果。由图 6(a)可见, 随着背后空腔深度的增加, 吸声系数随之增加, 同时, 吸声峰值向低频迁移, 对于迁移的原因可以有两种解释, 一是对于多孔材料, 背后空腔深度的增加等同于材料本身厚度的增加, 由于厚度增加导致吸声峰值向低频偏移, 故出现如图 6(a)所示的迁移趋势; 第二种解释是基于穿孔吸声结构的特性, 穿孔吸声结构的共振频率如式(5)所示, 受到声速、穿孔率、背后空腔深度和穿孔有效长度的影响, 前两个条件在本实验中都固定不变, 频率随背后空腔深度和穿孔有效长度增加而减

小, 穿孔有效长度也受背后空腔的影响, 随着背后空腔深度的增加而增加。因此, 共振频率与背后空腔深度成反比, 吸声峰值出现随背后空腔深度增加向低频迁移的趋势。打孔闭孔泡沫铝吸声结构兼具多孔吸声与共振吸声的吸声机理, 因此需用两种理论来解释其随空腔深度变化的吸声系数变化曲线。两种作用中, 共振频率的变化应是主要的。

$$f_n = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{lD}} \tag{5}$$

式中: f_n 为穿孔结构共振频率; c_0 为声速; σ 为穿孔率; l 为穿孔有效长度; D 为空腔深度。

为了验证图 6(a)的测试效果, 使其结论具有广泛性, 另选用 3%的打孔率, 同条件下进行测试。图 6(b)所示为打孔率 3%, 密度 0.30 g/cm³, 厚度 10 mm, 背后空腔分别为 5、10、30 mm 时的闭孔泡沫铝吸声系数比较。由于图 6(b)所选试样的密度较大, 孔隙率相对较低吸声系数值整体低于图 6(a)中的测试样品的;

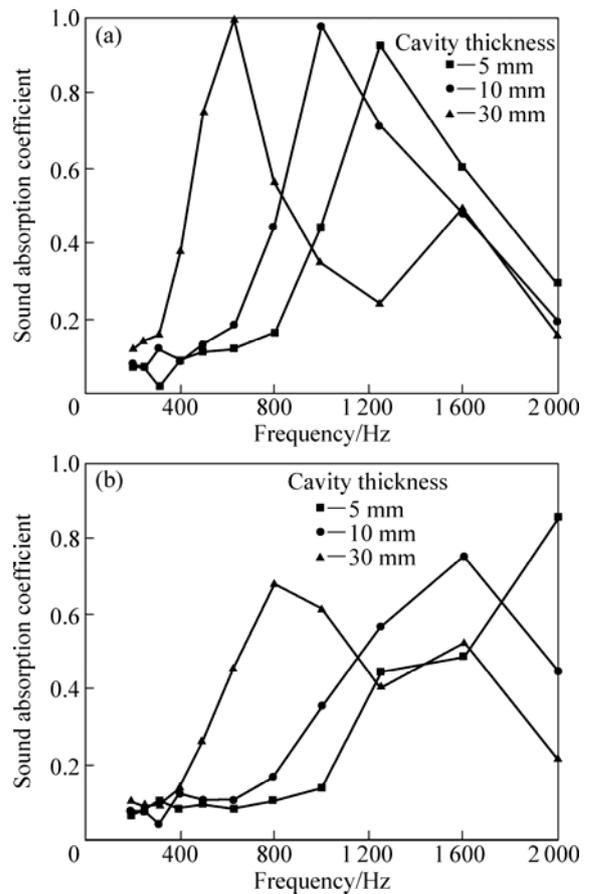


图 6 不同背后空腔深度吸声系数
Fig.6 Sound absorption coefficients of Al foams with different cavity thicknesses: (a) Perforation rate 1.5%; (b) Perforation rate 3.0%

由于打孔率较高, 同样背后空腔深度吸声峰值出现的位置偏高, 但变化规律是一致的, 随背后空腔深度的增加吸声峰值仍向低频迁移。

3 结论

1) 闭孔泡沫铝经打孔后吸声系数值明显增加, 整体吸声效果好于未打孔的。打孔之后的闭孔泡沫铝材料吸声效果受打孔率和背后空腔深度的影响很大。

2) 随着打孔率的升高, 吸声峰值向高频偏移, 但过高的打孔率导致吸声峰值降低, 峰值出现的位置应与材料的基频对应, 第二吸收峰对应二阶共振频率。

3) 打孔后的材料吸声峰值随背后空腔深度的增加而向低频偏移, 主要是由于空腔深度的变化引起了共振频率的变化。

4) 打孔之后闭孔泡沫铝材料吸声性能得到提高, 具有更好的应用前景, 在实际应用中可以考虑改变打孔率和背后空腔深度, 同时结合孔隙率和厚度的变化以适应针对不同频率分布类型噪声的降噪使用。

REFERENCES

- [1] 武博, 赵冬梅, 任永霞. 噪声污染危害与控制[J]. 黑龙江环境通报, 2004(2): 66-67.
WU Bo, ZHAO Dong-mei, REN Yong-xia. Harms of noise pollution and its control[J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2004(2): 66-67.
- [2] 王佐民, 俞悟周. 铝纤维板共振结构声学特性的理论初析[J]. 声学技术, 2005(3): 183-192.
WANG Zuo-min, YU Wu-zhou. Theoretical analysis on acoustical characteristics aluminum fiberboard[J]. Technical Acoustics, 2005(3): 183-192.
- [3] 钟祥璋. 聚酯纤维装饰板吸声性能的实验研究[J]. 声频工程, 2005(10): 10-14.
ZHONG Xiang-zhang. Experimental study on sound absorbing[J]. Audio Engineering, 2005(10): 10-14.
- [4] 水中和, 李跃, 彭显莉, 王武峰. 吸声材料构造形式对吸声效果的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(12): 89-91.
SHUI Zhong-he, LI Yue, PENG Xian-li, WANG Wu-feng. Influence of the structural form of sound absorbing material on the behavior of sound absorption[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(12): 89-91.
- [5] 张守梅, 曾令可, 黄其秀, 黄浪观. 环保吸声材料的发展动态及展望[J]. 陶瓷学报, 2002(1): 56-61.
ZHANG Shou-mei, ZENG Ling-ke, HUANG Qi-xiu, HUANG Lang-guan. Development and improvement for environmental protection sound-absorbing material[J]. Journal of Ceramics, 2002(1): 56-61.
- [6] 赵庭良, 徐连棠, 李道温, 战松江, 吴林美, 周为. 泡沫铝的吸声特性[J]. 内燃机工程, 1995, 16(2): 55-59.
ZHAO Ting-liang, XU Lian-tang, LI Dao-wen, ZHAN Song-jiang, WU Lin-mei, ZHOU Wei. Sound absorption characteristic of aluminum foam[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1995, 16(2): 55-59.
- [7] 赵增典, 张勇, 苗汇静. 泡沫铝的吸声性能初探[J]. 兵器材料科学与工程, 1998, 21(1): 48-52.
ZHAO Zeng-dian, ZHANG Yong, MIAO Hui-jing. Study on sound absorbent properties of foam aluminum[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1998, 21(1): 48-52.
- [8] 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, 2007, 68: 1502-1510.
- [9] 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 Metals of Society of China, 2007, 17(1): 93-98.
- [10] 尉海军, 姚广春, 王晓林, 李兵, 尹铎. 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.
- [11] 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 Engineer, 2003(4): 8-9.
- [12] 吴照金, 何德坪. 泡沫 Al 孔结构的影响因素[J]. 材料研究学报, 2000, 14(3): 277-282.
WU Zhao-jin, HE De-ping. Influential factor on the cell structure of aluminum alloy foam[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 14(3): 277-282.
- [13] YANG C C, NAKAE H. Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 313(6): 188-191.
- [14] MAA D A H. Potential of microperforated panel absorber[J]. Acoust Soc Am, 1998, 104(5): 2861-2866.
- [15] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 237-241.
MA Da-you. Foundation of modern acoustics theory[M]. Beijing: Science Press, 2003: 237-241.

(编辑 李艳红)