

特殊孔结构 ZA27 合金泡沫的吸声性能

胡 松, 左孝青, 谢香云, 陆建生, 周 芸, 刘荣佩

(昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093)

摘 要: 通过渗流铸造法制备宽孔径范围、层状梯度、层状周期 3 种特殊孔结构的 ZA27 合金泡沫, 并对其吸声性能进行研究。结果表明: 随频率的升高, 低频区吸声系数增加, 中频区吸声系数降低到一个最小值后上升, 高频区吸声系数趋于平缓; 宽孔径范围 ZA27 合金泡沫随孔径变化及孔隙率的增加吸声系数平均提高 0.025; 层数多的层状梯度孔结构的吸声性能相对层数少的梯度孔结构平均提高 0.037; 层数多的层状周期孔结构的吸声性能比层数少的周期孔结构平均提高 0.027; 特殊孔结构 ZA27 合金泡沫在低频区的吸声性能优于特殊孔结构 Al-Si12 合金泡沫的。

关键词: ZA27 合金泡沫; 特殊孔结构; 吸声性能

中图分类号: TG146.13

文献标志码: A

Sound absorption properties of ZA27 alloy foams with particular pore structures

HU Song, ZUO Xiao-qing, XIE Xiang-yun, LU Jian-sheng, ZHOU Yun, LIU Rong-pe

(School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The sound absorption properties of ZA27 infiltration casting foams with three kinds of particular pore structures such as wide aperture, layered gradient and layered periodical were studied. The results show that, with increasing the frequency, the sound absorption coefficient increases in low frequency region, while decreases to minimum value and then moves up in intermediate frequency region, and tends to be gentle in high frequency region. The sound absorption coefficient of alloy foam with wide aperture is average improved 0.025, along with aperture varied and porosity increased; the sound absorption property of alloy foam with multiple layers gradient pore structure is improved 0.027, compared the one that has few layers; the sound absorption property of alloy foam with layered periodical pore structure is average increased 0.027, compared the one that has few layers. At low frequency, the sound absorption properties of alloy foams with particular pore structures are better than those of the Al-Si12 alloy foams.

Key words: ZA27 alloy foam; particular pore structure; sound absorption property

通孔泡沫金属除了具有高比强、高能量吸收、高阻尼和低热(电)导率等特性^[1-5]外, 还具有良好的吸声性能, 且在高温及潮湿环境下稳定性好, 无毒, 不老化, 在噪声控制领域有广阔的应用前景。目前, 对通孔泡沫金属吸声性能的研究主要集中于单一孔结构的铝基泡沫^[6-9], 而对具有特殊孔结构的高阻尼性锌基合金泡沫的研究还未见报道。本文作者前期进行了特殊

孔结构 Al-Si12 合金泡沫及其吸声性能的研究^[10], 在此基础上, 本文作者用渗流铸造法制备了特殊孔结构的 ZA27 合金泡沫, 即宽孔径范围孔结构、层状梯度孔结构及层状周期孔结构, 并对其在不同频率下的吸声系数进行研究, 以期利用 ZA27 合金泡沫的特殊孔结构特性及其基体的阻尼特性提高吸声性能, 为 ZA27 合金泡沫的开发提供有益的参考。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51164019); 云南省应用基础研究重点资助项目(2010CC004)

收稿日期: 2013-12-13; **修订日期:** 2014-02-16

通信作者: 左孝青, 教授, 博士; 电话: 0871-65109952; E-mail: zxqdzhm@hotmail.com

1 实验

1.1 特殊孔结构 ZA27 合金泡沫的制备

采用 ZA27 合金为原料,用 NaCl 颗粒为前驱体(其粒径见表 1),通过渗流铸造法制备了宽孔径范围孔结构 ZA27 合金泡沫、层状梯度孔结构 ZA27 合金泡沫及层状周期孔结构 ZA27 合金泡沫。

表 1 前驱体 NaCl 颗粒粒径

Particle No.	Particle size/mm
P1	>2.5
P2	2.0–2.5
P3	1.43–2.0
P4	0.9–1.43
P5	0.6–0.9

通过改变 NaCl 的填料状态,制得特殊孔结构 ZA27 合金泡沫:利用盐颗粒 1、2、3、4 及 5 中两种或两种以上的混合颗粒为填料粒子,制得宽孔径范围孔结构 ZA27 合金泡沫;通过不同粒径盐颗粒的梯度排列,制得层状梯度孔结构 ZA27 合金泡沫;通过不同粒径盐颗粒的周期排列,制得层状周期孔结构 ZA27 合金泡沫。表 2 所列为制备 ZA27 合金泡沫孔结构及尺寸参数,孔隙率由孔结构分析软件 BWJScan^[11]分析处理得到。图 1 所示为表 2 所对应的各 ZA27 合金泡沫孔结构样品实物照片。

1.2 吸声性能测试

将 ZA27 合金泡沫样品线切割成尺寸如表 2 所列的圆柱体,利用 SW-477 阻抗管测试其吸声系数,非对称孔结构样品,声波从大孔端入射,测量的频率分别为 1000、1250、1600、2000、2500、3150、4000、5000 和 6300 Hz。为衡量 ZA27 合金泡沫的综合吸声性能,用上述 9 个频率的吸声系数算术平均得到平均吸声系数,以反映材料的综合吸声性能,并分别计算

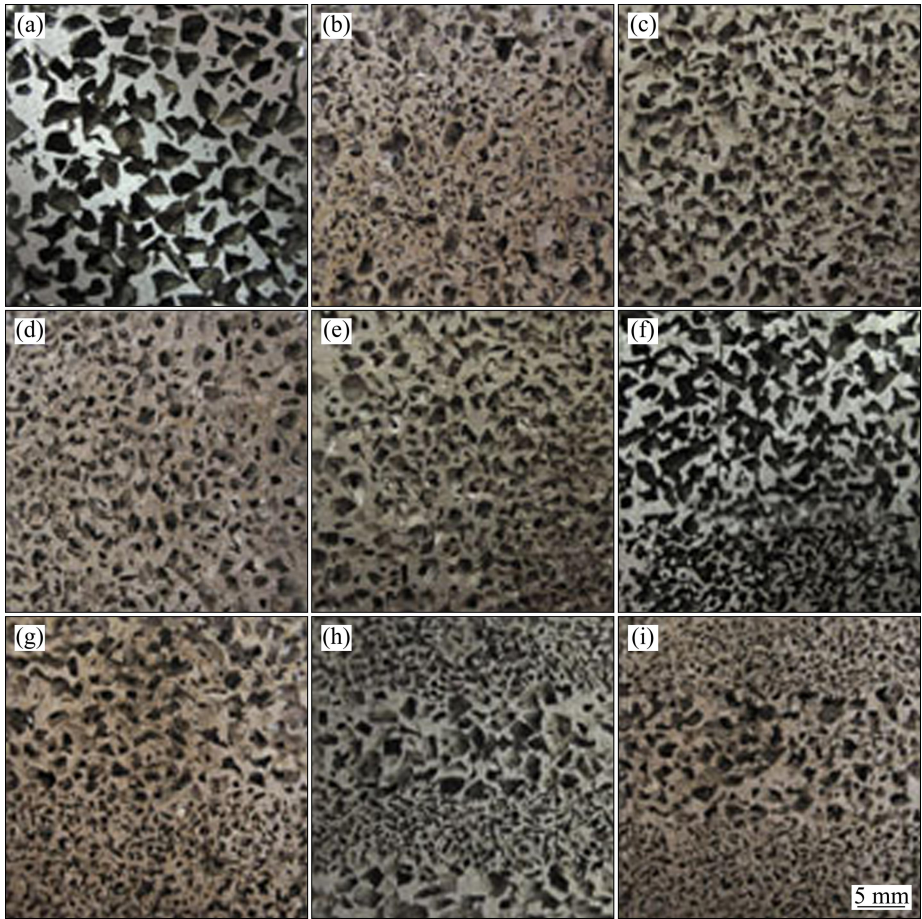


图 1 ZA27 合金泡沫样品实物照片

Fig. 1 Pictures of ZA27 alloy foam: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3; (d) Sample 4; (e) Sample 5; (f) Sample 6; (g) Sample 7; (h) Sample 8; (i) Sample 9

表 2 所制备 ZA27 合金泡沫的孔结构及尺寸参数

Table 2 Cell structures and size parameters of fabricated ZA27 alloy foams

Sample No.	Salt particle configuration mode	Pore structure	Porosity/%	Diameter of zinc foam/mm	Height of zinc foam/mm
1	P1	Single regular pore size	67.61	30	30
2	P1+P3+P5	Wide pore size range	71.06	30	30
3	P3(60%)+P5(40%)	Wide pore size range	68.71	30	30
4	P3(40%)+P5(60%)	Wide pore size range	67.61	30	30
5	P3+P4+P5	Wide pore size range	64.49	30	30
6	10 mm P3+10 mm P4+10 mm P5	Gradient of three layers	65.52	30	30
7	15 mm P3+15 mm P5	Gradient of two layers	65.52	30	30
8	7.5 mm P3+7.5 mm P5+ 7.5 mm P3+7.5 mm P5	Periodical of four layers	67.61	30	30
9	10 mm P5+10 mm P3+10 mm P5	Periodical of three layers	67.61	30	30

了 ZA27 合金泡沫在低频区(1000~2500 Hz)、中频区(2500~5000 Hz)和高频区(5000~6300 Hz)的平均吸声系数以进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 孔径范围对 ZA27 合金泡沫吸声性能的影响

图 2 所示为不同孔径范围孔结构 ZA27 合金泡沫(样品 2、3、4 和 5)与常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫(样品 1)吸声系数和频率的关系。同为宽孔径范围孔结构 ZA27 合金泡沫, 其吸声性能从好到差的顺序为样

品 2、3、4、5, 吸声系数随着孔隙率的增加而提高。比较孔隙率相同的样品 1 和 4, 从图 2 可看出, 在低频区和高频区, 具有宽孔径范围孔结构 ZA27 合金泡沫的吸声性能优于常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫的, 但在中频区, 宽孔径范围孔结构 ZA27 合金泡沫的吸声性能略低于常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫的。常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫的平均吸声系数为 0.61, 4 个宽孔径范围孔结构 ZA27 合金泡沫的平均吸声系数为 0.68, 宽孔径范围孔结构 ZA27 合金泡沫的吸声性能总体上优于常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫的。

2.2 层状梯度孔结构对 ZA27 合金泡沫吸声性能的影响

图 3 所示为不同层数层状梯度孔结构 ZA27 合金泡沫(样品 6 和 7)与常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫(样品 1)的吸声系数和频率的关系。由图 3 可见, 在孔隙率大致相同的条件下, 具有 3 层层状梯度孔结构的样品 6 的吸声性能优于二层层状梯度孔结构的样品 7。比较样品 6 和 1, 在低频区和高频区, 具有层状梯度孔结构 ZA27 合金泡沫的吸声性能都优于常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫的, 但在中频区, 层状梯度孔结构 ZA27 合金泡沫的吸声性能略低于常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫的。常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫的平均吸声系数为 0.61, 2 个层状梯度孔结构 ZA27 合金泡沫的平均吸声系数为 0.74, 层状梯度孔结构 ZA27 合金泡沫的吸声性能总体上优于常规单一孔结构的 ZA27 合金泡沫的。

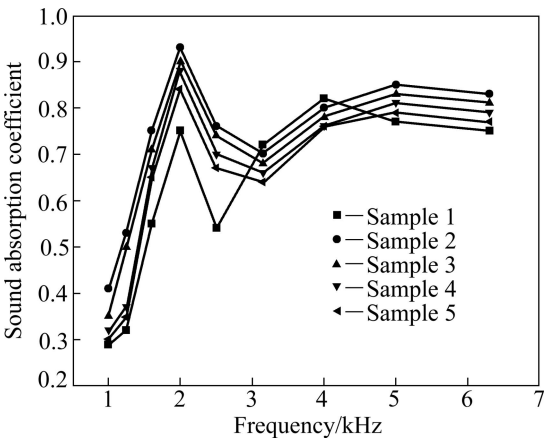


图 2 ZA27 合金泡沫样品 1、2、3、4 和 5 吸声系数与频率的关系

Fig. 2 Relationship between sound absorption coefficient and frequency of ZA27 alloy foams 1, 2, 3, 4 and 5

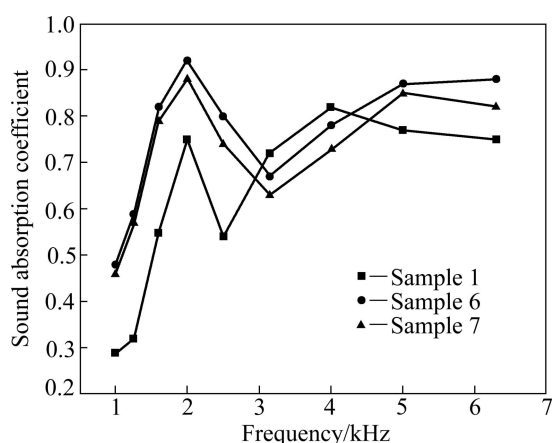


图3 样品6、7及1吸声系数与频率的关系

Fig. 3 Relationship between sound absorption coefficient and frequency of samples 6, 7 and 1

2.3 层状周期孔结构对 ZA27 合金泡沫吸声性能的影响

图4所示为层状周期孔结构ZA27合金泡沫(样品8和9)与常规单一孔结构ZA27合金泡沫(样品1)的吸声系数与频率关系。比较样品8与9, 相同孔隙率条件下, 具有四层层状周期孔结构ZA27合金泡沫的吸声性能优于三层层状周期孔结构ZA27合金泡沫的。与常规单一孔结构ZA27合金泡沫(样品1)比较, 在低频区和高频区, 具有层状周期孔结构ZA27合金泡沫的吸声性能都优于常规单一孔结构ZA27合金泡沫的, 但是在中频区, 层状周期孔结构ZA27合金泡沫的吸声性能略低于常规单一孔结构ZA27合金泡沫的, ZA27合金泡沫孔结构经周期化调制后提高了其在低频区、高频区的吸声性能。常规单一孔结构ZA27

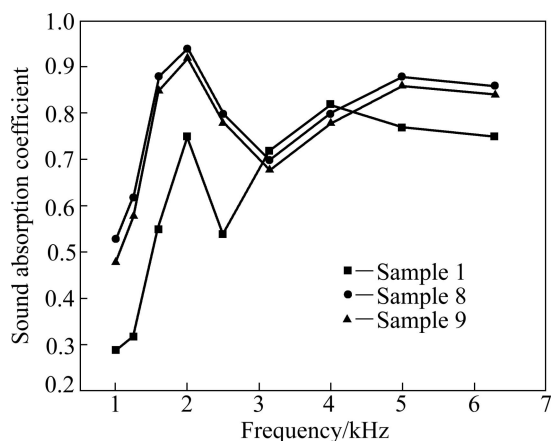


图4 样品8、9及1吸声系数与频率关系

Fig. 4 Relationship between sound absorption coefficient and frequency of samples 8, 9 and 1

合金泡沫的平均吸声系数为0.61, 2个层状周期孔结构ZA27合金泡沫的平均吸声系数为0.77, 层状周期孔结构ZA27合金泡沫的吸声性能总体上优于常规单一孔结构ZA27合金泡沫的。

3 讨论

3.1 扩张室结构

图5所示为ZA27合金泡沫的孔结构示意图。位置2为去除填料盐颗粒所得, 位置1为填料盐颗粒之间的通道, 该结构类似于突然膨胀和收缩的管道(见图6), 声波从 S_1 管道射入扩张室 S_2 , 经扩张后从 S_3 管道传出, 其吸声量可用扩张室吸声器模型^[12-13]近似计算, 即:

$$\Delta L = 10 \lg \left\{ \left[\frac{S_{32} + S_{13}}{2} \cos(kl) \right]^2 + \left[\frac{S_{21} + S_{32}}{2} \sin(kl) \right]^2 \right\} \quad (1)$$

式中: ΔL 为吸声量; $S_{32} = S_3 / S_2$; $S_{13} = S_1 / S_3$; $S_{21} = S_2 / S_1$; k 为波数, 由声波频率决定, $k = 2\pi / \lambda = 2\pi f / c$; l 为扩张室长度; λ 为波长; f 为频率; c 为声速。

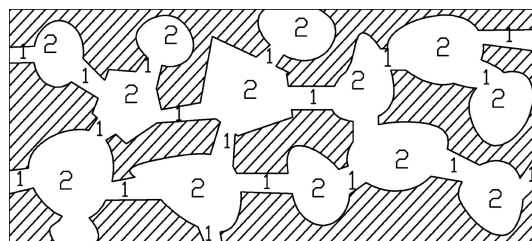


图5 ZA27合金泡沫的孔结构示意图

Fig. 5 Sketch map of pore structure of ZA27 alloy foam

由图6可见, 泡沫孔径变化越大, 则 S_{32} 、 S_{13} 和 S_{21} 越大, 声波在进入及挤出不同孔径的通道时, 产生的粘滞损耗越大, 吸声量 ΔL 增大, 吸声性能越好。因此, 提高ZA27合金泡沫孔径差, 可提高其吸声性能。

比较样品2、3、4及5(见图2), 同为宽孔径范围

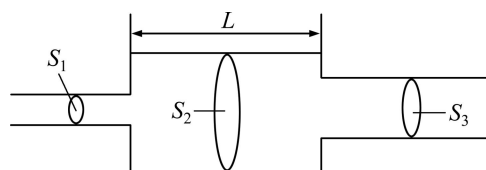


图6 入口和出口管径不同的扩张室

Fig. 6 Expansion chamber with different inlet and outlet diameters

孔结构 ZA27 合金泡沫, 由于样品 2 具有较多的扩张室结构, 且孔径变化范围大, 声波在进入及挤出不同孔径的通道时产生的粘滞损耗更大, 所以其吸声性能优于样品 5 的; 层状梯度孔结构 ZA27 合金泡沫由于孔结构的层状梯度变化, 不仅微观上有无数扩张室结构, 而且因其各梯度层间的孔径差很大(见图 7), 宏观上表现出孔径差很大的扩张室结构, 故其吸声性能要优于常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫的; 而层状周期孔结构样品 8 合金泡沫不但具有更多的扩张室结构, 而且具有四层的孔径变化范围, 声音在层状周期孔结构的 ZA27 合金泡沫中传播产生的粘滞损耗最大, 因而样品 8 合金泡沫总体上具有最好的吸声性能。

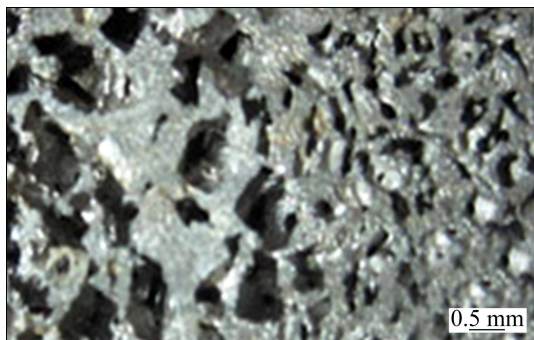


图 7 ZA27 合金泡沫层与层之间接合部分的宏观形貌

Fig. 7 Macrostructure of connecting part of different layers of ZA27 alloy foam

3.2 流阻

多孔材料的吸声性能还与其流阻有关, 低压低速时, 流阻可表示为^[14-15]

$$R_f = \frac{\Delta p S}{u} = \frac{\Delta p}{v} \quad (2)$$

而流阻又取决于多孔材料的孔结构, 如孔径、孔隙度、孔弯曲和孔的表面粗糙度等, 式(3)给出了流阻率与孔径、孔隙率的关系:

$$R_i = 32\mu / (\varepsilon d_p^2) \quad (3)$$

对于理想多孔体, 吸声系数 a 的估算方法如式(4)所示。

$$a = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 C_0}{Z + \rho_0 C_0} \right|^2 = 1 - \left(\frac{R_f - 420}{R_f + 420} \right)^2 \quad (4)$$

式中: R_f 为流阻; Δp 为空气通过材料层两端的压力差; S 为截面积; u 为空气体积速度; v 为空气线速度; R_i 为单位厚度材料的流阻率, $R_f = R_i t$, t 为厚度; μ 为流体动力黏度; ε 为孔隙度; d_p 为平均孔径; a 为吸声系数; Z 为声阻抗率; ρ_0 为空气密度; C_0 为声速。

在不考虑声频的情况下, 根据式(3)和(4), 得到 ZA27 合金泡沫样品(样品 1 和 8)的流阻及理论吸声系数如表 3 所列。可见, 层状周期孔结构的 ZA27 合金泡沫(样品 8)的吸声系数比常规单一孔结构的 ZA27 合金泡沫(样品 1)的大。随着孔结构的周期性调制, 声波在 ZA27 合金泡沫合金内部传播过程中产生的粘滞损耗越大, 与泡沫孔壁产生的摩擦越大, 与孔壁发生碰撞折射、反射的次数越多, 所受流阻越大, 能量损耗越大, ZA27 合金泡沫吸声性能越好。

3.3 微型谐振腔

ZA27 合金泡沫经孔结构调制后提高了其在低频区和高频区的吸声性能, 却略微降低了其中频区的吸声性能(见图 2、3 和 4), 其原因与“微型谐振腔”有关, 传入声波的频率与“微型谐振腔”的频率越接近, 声波在 ZA27 合金泡沫中传播产生的粘滞损耗越大, ZA27 合金泡沫在这个频率段的吸声性能越好。由于“微型谐振腔”的共振频率主要分布在低频区和高频区^[16], “微型谐振腔”的共振频率的频带宽度比较窄, 中频区远离了这个频带范围, 所以导致层状 ZA27 合金泡沫在中频区的吸声性能略有下降。

3.4 阻尼性能

与 Al-Si12 合金泡沫^[10]相比, 各种特殊孔结构的 ZA27 合金泡沫在低频区吸声系数均较高(见表 4), 其原因与材料的阻尼性能有关。阻尼可用试样振动一周所消耗的能量与外加总振动能的比内耗值 Q^{-1} 表示。材料阻尼机制有动滞后型、静滞后型、共振型和相变机制型, 锌铝合金阻尼机制属于动滞后型, 也称为弛豫型或滞弹性阻尼, 其特点是阻尼性能与振幅无

表 3 样品 1 和 8 ZA27 合金泡沫的理论吸声系数

Table 3 Theoretical sound absorption coefficients of ZA27 alloy foams 1 and 8

Sample No.	Porosity	Average pore size/mm	Flow resistance rate/(Pa·s·m ⁻²)	Flow resistance/(Pa·s·m ⁻¹)	Absorption coefficient	
					Theoretical	Measured
1	67.61	2.61	256.32	7.92	0.56	0.61
8	67.61	1.22	1487.46	36.92	0.74	0.77

关, 与频率和温度有关^[17]。赵玉珍等^[18]通过实验和理论分析得出锌铝合金阻尼与频率和温度的关系:

$$Q^{-1} = \frac{A}{f^n} \exp\left(\frac{-H_a}{RT}\right)$$

(5)

式中: H_a 为表观激活能(由温度确定); R 为玻尔兹曼常数; A 与 n 为待定系数, 由实验求出; f 为频率; T 为温度。

当温度一定时, 材料阻尼与频率成反比, 随频率的降低, 阻尼提高。常温下, 由于 ZA27 合金的阻尼较大, 所以频率对其在低频区阻尼的影响更为明显, 低频区 ZA27 合金泡沫表现出更高的吸声系数, 而在中、高频区, 影响其吸声系数因素主要是孔隙率及孔结构的变化, 与影响 Al-Si12 合金泡沫吸声系数因素相同, 故这两种合金泡沫在中、高频区的吸声系数无明显差异。

表 4 Al-Si12 和 ZA27 合金泡沫低频区吸声系数对比
Table 4 Comparison of sound absorption coefficients of Al-Si12 and ZA27 foams in low frequency range

Sample	Sound absorption coefficient		
	Wide pore size range	Layered gradient	Layered periodical
Al-Si12 alloy foam ^[10]	0.61	0.65	0.70
ZA27 alloy foam	0.63	0.71	0.73

4 结论

- 1) 宽孔径范围孔结构 ZA27 合金泡沫的吸声性能随孔径变化范围及孔隙率的增大而提高; 层状梯度孔结构 ZA27 合金泡沫的吸声性能随梯度层数的增加而提高; 层状周期 ZA27 合金泡沫随周期层数的增加, 其吸声性能提高。
- 2) 与常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫相比, 特殊孔结构 ZA27 合金泡沫在高、低频区的吸声性能较佳, 而在中频区吸声性能略有下降, 其原因与微型谐振腔有关。
- 3) 具有 4 层周期孔结构的 ZA27 合金泡沫(样品 8)具有最好的吸声性能, 在 1000~6300 Hz 的频率范围内其平均吸声系数为 0.77, 比常规单一孔结构 ZA27 合金泡沫(样品 1)的平均吸声系数提高 0.16, 其原因与扩张室结构和流阻有关。
- 4) ZA27 合金泡沫在低频区的吸声性能优于 Al-Si12 合金泡沫的, 其原因与材料的阻尼性能有关。

REFERENCES

[1] 袁文文, 陈 祥, 刘 源, 李言祥. 熔体发泡法批量制备泡沫铝板材关键技术的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3): 306-310.
YUAN Wen-wen, CHEN Xiang, LIU Yuan, LI Yan-xiang. Research on key technologies for batch preparation of aluminum foam slabs by melt foaming process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(3): 306-310.

[2] BANHART J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(6): 559-632.

[3] 黄 可, 何思渊, 何德坪. 梯度孔径多孔铝合金的压缩及吸能性能[J]. 机械工程材料, 2010, 34(1): 77-80.
HUANG Ke, HE Si-yuan, HE De-ping. Compression and energy absorption properties of gradual porous aluminum alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34(1): 77-80.

[4] LEHMHUS D, BANHART J. Properties of heat-treated aluminium foams[J]. Mater Sci Eng A, 2003, 349: 98-110.

[5] 王 磊, 姚广春, 罗洪杰, 梁李斯, 张志刚. Mg 粉添加量对泡沫铝发泡行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(7): 1341-1347.
WANG Lei, YAO Guang-chun, LUO Hong-jie, LIANG Li-si, ZHANG Zhi-gang. Effect of addition of Mg powders on foaming behaviors of Al foams[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(7): 1341-1347.

[6] 石少卿, 康建功, 隋顺彬. 闭孔泡沫铝材料静动力性能试验[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(2): 150-154.
SHI Shao-qing, KANG Jian-gong, SUI Shun-bin. Experimental study of quasi-static and dynamic compressive property of close-cell aluminum foam[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(2): 150-154.

[7] 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]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16: 1383-1387.

[8] ZHENG Ming-jun, CHEN Feng, HE De-ping. Air sound Absorption Property of Porous Aluminum[J]. Materials of Mechanical Engineering, 2006, 30(2): 39-41.

[9] KIM S Y, HUR B Y, KWON K C. Mechanical and sound absorption properties of closed cell Al foam by pot furnacemethod[C]//Cellular Metals: Manufacture, Properties and Application. Bremen: MIT-Verlag, 2003: 469-474.

[10] 谢香云, 左孝青, 王应武, 钟子龙, 董晓蓉. 特殊孔结构 Al-Si12 泡沫铝的吸声性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(8): 1649-1653.
XIE Xiang-yun, ZUO Xiao-qing, WANG Ying-wu, ZHONG Zi-long, DONG Xiao-rong. Sound absorption properties of Al-Si12 foams with particular pore structures[J]. Rare

- Metalmaterials and Engineering, 2013, 42(8): 1649–1653.
- [11] 左孝青, 廖明顺, 潘晓亮. VB 和计算机图形学在多孔材料中的应用[J]. 金属热处理, 2006, 31(S): 98–101.
- ZUO Xiao-qing, LIAO Ming-shun, PAN Xiao-liang. Application of vb and computer graphics in cellular material[J]. Metal Heat Treatment, 2006, 31(S): 98–101.
- [12] YU Hai-jun, YAO Guang-chun, WANG Xiao-lin, LI Bing, YIN Yao, LIU Ke. Sound insulation property of Al-Si closed-cell aluminum foam bare board material[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17: 93–98.
- [13] 周新翔. 噪声控制技术及其新进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 73–75.
- ZHOU Xin-xiang. Noise control technology and its new progress[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 73–75.
- [14] 马大猷. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 254–255, 592–603.
- MA Da-you. Acoustics handbook [M]. Beijing: Science Press, 2004: 254–255, 592–603.
- [15] 奚正平, 唐慧萍. 烧结金属多孔材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 87–88.
- XI Zheng-ping, TANG Hui-pin. Sintered metal porous material[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 87–88.
- [16] HAN F S, SEIFFERT G, ZHAO Y Y, GIBBS B. Acoustic absorption behaviour of an open-celled aluminium foam[J]. J Phys, 2003, 36(25): 294–302.
- [17] RITCHIE I G, PAN Z L, GOODWIN P E. Characterization of the damping properties of die-cast zinc-aluminum alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22(12): 617–622.
- [18] 赵玉珍. 高阻尼 Zn-27Al 合金阻尼特性及机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004: 42–49.
- ZHAO Yu-zhen. Reserch on damping property and damping micromechanism of high damping Zn-27Al alloy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004: 42–49.

(编辑 龙怀中)