

泡沫铝基多孔金属复合材料吸波性能

薛向欣, 刘 欣, 张 瑜

(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘 要: 采用雷达截面法研究表面涂覆吸波涂料的泡沫铝复合材料的吸波性能, 讨论电磁波频率和吸波涂料种类对材料吸波性能的影响。结果表明, 材料的吸波性能随频率的增加而增加; 表面涂覆磁介质型吸波涂料的泡沫铝复合材料的吸波性能较佳, 在 12.0~18.0 GHz 频段内样品 CFe 的吸波性能最好, 而在 26.5~40.0 GHz 频段内样品 CNi' 的吸波性能最好。

关键词: 泡沫铝; 多孔金属; 吸波性能; 涂覆

中图分类号: TB 383; O 451

文献标识码: A

Electromagnetic wave absorption properties of aluminum foams-based porous metal composite

XUE Xiang-xin, LIU Xin, ZHANG Yu

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The absorbing properties of the aluminum foams coated absorbing paint were studied and tested by Radar Cross Section (RCS) method. The influence of electromagnetic wave frequency and absorbing paint species on absorbing properties of materials was discussed. The results indicate that the absorbing properties increase with increasing frequency. The absorbing properties of the materials coated magnetic dielectric absorbing paint are better than others, and that of the sample CFe is the best in the frequency range of 12.0–18.0 GHz, while that of the sample CNi' is optimal in 26.5–40.0 GHz.

Key words: aluminum foams; porous metal; absorbing property; coating

多孔金属泡沫铝材料是近几十年发展起来的一种结构功能材料, 作为结构材料, 它具有轻质和高比强度的特点; 作为功能材料, 它具有多孔、减振、阻尼、吸音、散热、吸收冲击能、电磁屏蔽等多种物理性能, 由于其实现了结构材料轻质多功能化及众多高技术的需求, 已经成为交通、建筑及航空航天等领域的研究热点^[1-6]。研究表明, 多孔泡沫铝材料在吸声材料及电磁屏蔽领域都具有一定的优势, 当声波或电磁波进入泡沫铝材料内部传播时, 由于结构中存在复杂的孔洞结构, 可以使声波及电磁波能量不断损耗, 促进泡沫铝材料吸声及屏蔽电磁波的作用。人们已经对泡沫铝材料的吸声机理及电磁屏蔽现象进行研究, 并建立相

关的模型, 然而却很少见到关于泡沫铝材料对电磁波吸收性能的研究报道^[7-10]。

各种电气、电子设备或者系统一方面对周围电磁干扰十分敏感, 另一方面其本身又会对周围环境发出电磁干扰, 电磁波对人类工作和生活环境的污染已成为严重的社会问题, 解决这一问题的关键方法之一在于轻质高效电磁波屏蔽吸收材料的设计、制备与应用^[6]。为此本实验在多孔金属泡沫铝表面涂覆了吸波涂料, 设计制备了泡沫铝吸波复合材料, 并对其吸波性能进行了初步研究, 希望利用泡沫铝的结构特征充分发挥吸波涂料的作用, 从而优化泡沫铝对电磁波的吸收性能, 获得新型轻质的泡沫铝吸波复合材料。

1 实验

1.1 实验原料

用于涂覆的泡沫铝基材, 为东北大学材料先进制备技术工程研究中心采用熔体发泡法制备的泡沫铝硅合金, 平均孔隙率 80%~90%; 吸波涂料用吸波剂包括纳米级钛酸钡粉(90 nm)、碳化硅粉(1~2 μm)、Ni-Zn 铁氧体粉($\leq 44 \mu\text{m}$)、羰基镍粉(2.2~2.8 μm)及以一定比例混合的 Ni-Zn 铁氧体/羰基镍复合粉(质量比为 80:20); 以环氧树脂 E-44 为粘结剂, 加入适当分散助剂。

1.2 材料制备

与平板铝合金材料相比, 泡沫铝合金表面粗糙多孔, 比表面积大(图 1), 更易于嵌合涂料, 形成具有较强附着力的涂层。然而也正因为泡沫铝合金表面的这种特点, 使得生产加工过程中残留的油脂、碎屑等杂质极易滞留于表面的凹坑与孔隙中, 很难彻底清洗干净, 从而大大影响涂装质量。因此首先要对泡沫铝合金表面进行净化处理, 以除去表面油脂及残留孔隙中的杂质, 针对泡沫铝的表面特点, 本实验采用弱碱液高压喷洗, 结合超声波清洗及湿喷砂的净化处理工艺, 获得润洁的泡沫铝涂装表面, 为下一步的涂覆工作做好准备。

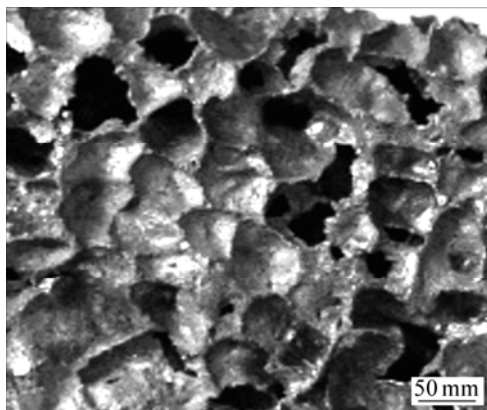


图 1 泡沫铝合金表面形貌

Fig.1 Surface morphology of aluminum foams alloy

为使各吸波填料能够均匀地分散在涂料中, 在配制涂料前分别对其进行偶联剂预处理, 然后将填料(70%, 质量分数)与分散助剂及稀释后的粘结剂混合, 经研磨、搅拌、超声波振荡及过筛等工序分散均匀后, 喷涂于泡沫铝合金表面, 60 $^{\circ}\text{C}$ 固化, 制得所需材料。

1.3 性能测试

采用 GJB 2038—94 “雷达吸波材料反射率测试方法”中的雷达截面(RCS)法测量吸波材料的反射率, 即在给定波长和极化条件下, 将电磁波从同一方向、以同一功率密度入射到雷达吸波材料(RAM)平面和良导体平面, 雷达吸波材料平面与同尺寸良导体平面的镜面反射功率之比即为反射率

$$R(f) = 10 \lg[P_1(f) / P_0(f)] \quad (1)$$

式中 $R(f)$ 为 RAM 的反射率, dB; $P_0(f)$ 为通过测量金属平板垂直入射时的频域响应而得到的其随频率变化的回波功率; $P_1(f)$ 为通过测量相同尺寸 RAM 平板垂直入射时的频域响应所得到的其随频率变化的回波功率。

测量在微波暗室(含紧缩场)内进行, 测量系统以 HP8530A 矢量网络分析仪为基础构成, 测量频率范围为 8.0~18.0 GHz 和 26.5~40.0 GHz。试样尺寸为 180 mm $\times$ 180 mm, 测试时样板背面衬金属底板。

1.4 实验方案设计

泡沫铝合金表面粗糙多孔, 为了使涂料分布均匀, 采用喷涂方法涂覆涂料。本实验分别从电磁波频率和吸波涂料两方面研究泡沫铝复合材料的吸波性能, 其中检测频率范围为 8.0~18.0 GHz 和 26.5~40.0 GHz 两个微波段; 选择 3 种不同吸波机理的吸波涂料进行研究, 磁介质型吸波剂包括羰基镍粉(记作 CNi 和 CNi')、Ni-Zn 铁氧体粉(记作 CFe)以及二者的混合粉(记作 CM), 电阻型吸波剂为碳化硅(记作 CSi), 电介质型吸波剂为钛酸钡(记作 CBa); 泡沫铝板材平均孔径小于 6~7 mm。

实验首先对实体铝合金平板、泡沫铝合金空白板及表面涂覆羰基镍粉的泡沫铝合金板(CNi)的吸波性能进行了测试。比较三者的吸波性能(图 2)可知, 在 26.5~40.0 GHz 频段内铝合金平板对电磁波基本全部反射, 没有吸波功能, 而泡沫铝合金样板的吸波性能可达 -10 dB。其中样板 CNi 反射率曲线位于空白板下方, 吸波性能与空白板相比略有增加, 二者反射率曲线均随着微波频率增加而增加; 样板 CNi 反射率曲线趋势与原泡沫铝合金空白板相同, 表明涂覆吸波涂料基本不改变材料自身的吸波特点, 只是平行增加材料的吸波性能。

通过以上比较实验可以看出, 泡沫铝合金自身对电磁波具有一定的吸收效果, 但低频吸波效果不好, 实际应用价值有限。在泡沫铝合金表面涂覆吸波涂料可在一定程度上改善其吸波性能, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 材料的吸波性能至少提高 0.3 dB, 低于 10 dB 的带宽由空白板的 5.47 GHz 增至 6.63 GHz, 预计通过吸波涂层设计及增加涂层厚度可以进一步改善材料的吸波性能。在本实验中, 泡沫铝表面涂覆单层羰基镍等吸波涂料后, 已使泡沫铝合金的吸波性能有所改善, 这主要得益于泡沫铝合金较大的比表面积及其复杂的多孔结构。因此, 实验首先分析频率对材料吸波性能的影响, 在此基础上初步研究单一吸波涂料及复合吸波涂料对材料吸波性能的影响, 通过这些研究可为后期泡沫铝表面涂覆复合吸波涂层的设计奠定理论基础。

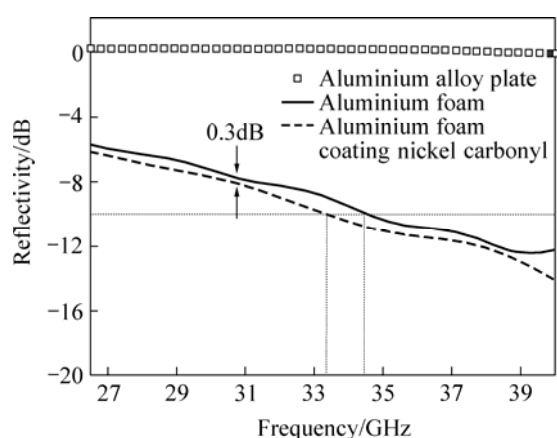


图 2 铝合金平板、泡沫铝及涂覆吸波涂料后泡沫铝的吸波性能

Fig.2 Absorbing properties of aluminum alloy plate, aluminum foams and aluminum foams coating absorbing paint

2 结果与分析

2.1 电磁波频率对材料吸波性能的影响

以表面涂覆 Ni-Zn 铁氧体样品的吸波性能为例, 研究电磁波频率对材料吸波性能的影响, 在 8.0~18.0 GHz 与 26.5~40.0 GHz 两个频段内测试材料的吸波性能, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 样品 CFe 的吸波性能随着频率的增加而增加, 反射率曲线在这两个频段内都没有明显峰值, 呈现出材料的宽频特点, 这正是吸波材料所需要的特性; 越向高频, 材料的吸波效果越好: 在 8.0~18.0 GHz 频段内材料的吸波效果不明显, 没有达到一般领域对吸波材料的要求(≤ -10 dB), 而在 26.5~40.0 GHz 频段内材料的吸波效果得到显著提高, 趋于 -10 dB。其他涂覆钛酸钡、碳化硅、羰基镍粉及复合粉的各样板吸波性能随频率的变化规律与此一致, 因此可以推断频率越高材料的吸波性能

会越好。

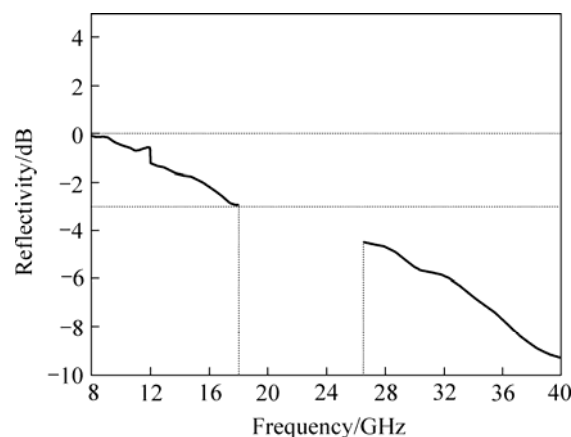


图 3 频率对样品吸波性能的影响

Fig.3 Effect of frequency on samples' absorbing property

吸波涂料对泡沫铝合金材料的吸波性能起到一定的改善作用, 但基本没有改变泡沫铝合金自身的吸波特性, 因此电磁波频率对材料吸波性能的影响规律主要由泡沫铝合金基体决定。对泡沫铝合金而言, 当电磁波入射到泡沫铝合金表面时, 一部分电磁波被铝硅导体反射, 剩余部分电磁波进入泡沫铝合金内部传播并产生一部分能量衰减, 这部分电磁波还可能透过泡沫铝的一个泡壁进入泡孔内传播, 在孔内发生反射及合金内部传播时的能量衰减, 如此过程反复多次直至电磁波到达泡沫铝板的另一侧或者完全被损耗。我们把电磁波刚进入泡沫铝合金时被其反射的部分称为反射损耗, 透射波在泡沫铝合金内部传播过程中被衰减的那部分称为吸收损耗, 电磁波在泡沫铝合金内部多个孔界面产生的多次反射而产生的衰减称为多次反射损耗^[9-10]。

对吸波材料而言, 人们希望电磁波入射到材料表面后, 大部分电磁波被吸收损耗掉, 反射回来的电磁波越少越好。结合电磁屏蔽传输线理论可知^[11-12], 电磁波入射到金属导体时所发生的衰减(S_E)包括为 3 部分, 如下式所示

$$S_E = A + R + B \quad (2)$$

式中 A 为吸收损耗; R 为反射损耗; B 为多次反射损耗。

$$A = 0.131 \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (3)$$

$$R = 168 - 10 \lg \frac{f \mu_r}{\sigma_r} \quad (4)$$

$$B = 20 \lg(1 - \exp(-2t / \delta)); \delta = (\pi f \sigma_r \mu_r)^{-1/2} \quad (5)$$

式中 f 为电磁波频率, GHz; t 为泡沫铝合金材料的厚度, mm; σ_r 为材料的相对电导率(泡沫铝电导率与铜电导率之比); μ_r 为材料的相对磁导率; δ 为电磁波穿透材料的深度。由公式(2)~(5)可知, 当泡沫铝合金材料固定, 材料的吸波性能主要取决于入射电磁波的频率, 频率增加时, 反射部分减少, 吸收损耗及多次反射损耗增加。低频时由于泡沫铝合金表面有大量的孔洞, 可以形成一定的感抗, 反射性能较好, 大部分电磁波被反射回来, 吸波效果不佳; 高频时电磁波在材料内部的吸收损耗增加, 同时泡沫铝合金内含大量非直通孔洞, 平均孔径 6~7 mm, 电磁波频率越高越容易进入, 在孔洞内发生多次界面反射, 形成较大的衰减, 因此泡沫铝合金在高频时具有较高的吸波能力。同时电磁波可以在涂有吸波涂料的泡沫铝合金孔洞内发生多次反射, 令吸波涂料的吸波作用得到充分发挥, 进一步提高材料在高频时的吸波性能。

2.3 吸波涂料对材料吸波性能的影响

在泡沫铝合金板表面涂覆不同的吸波涂料, 在 12.0~18.0 GHz 和 26.5~40.0 GHz 频段检测各样品的吸波性能, 其中用于涂覆的泡沫铝基材的板厚、平均孔径及孔隙率均相同。由各样品的反射率曲线(图 4)可知, 电介质型样品 CBa 在两个频段内的吸波性能都较差, 在 12.0~18.0 GHz 时几乎没有明显的吸波效果, 在 26.5~40.0 GHz 频段内吸波性能稍有增加, 但也仅达到了 -3 dB; 电阻型样品 CSi 的吸波性能略好于样品 CBa, 在低频段内其吸波效果仅次于样品 CFe, 而在高频段 26.5~40.0 GHz 内其吸波性能则次于样品 CNi', CFe 与 CM; 在测试的频段内, 涂覆磁性吸波涂料的样品(CNi', CFe 和 CM)的吸波性能略优于前两种样品, 在 12.0~18.0 GHz 频段内, 样品 CFe 吸波性能最好(达 -3 dB), 而在 26.5~40.0 GHz 内样品 CNi' 吸波性能最好, 低于 10 dB 带宽达 2.6 GHz。

综上所述, 泡沫铝表面涂覆磁性吸波剂的样品的吸波性能显示出一定的优势, 如羰基镍、铁氧体及它们复合粉, 其次是电阻型吸波剂碳化硅, 而电介质型的钛酸钡吸波效果最差。在泡沫铝合金基板相同条件下, 各材料吸波性能的差异是由泡沫铝合金表面不同的吸波剂所引起的^[14-16]。结合实验结果及吸波材料的研究现状, 本文作者重点分析表面涂覆铁氧体等磁性吸波剂的泡沫铝复合材料的吸波性能。

图 5 所示为吸波涂料用 Ni-Zn 铁氧体与羰基镍粉体的 SEM 形貌, 其中图 5(a)所示为尖晶石型 Ni-Zn 铁氧体粉体。由图可知, 粉体呈片状, 这是吸波剂的最

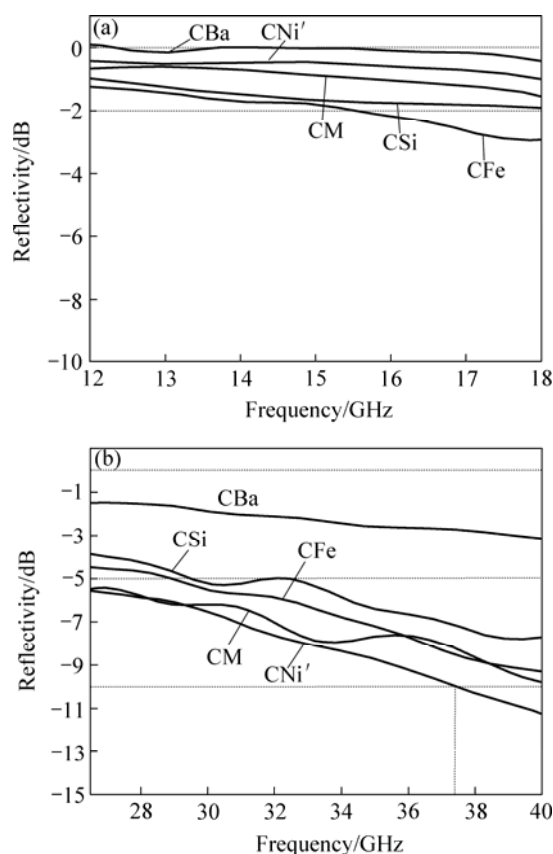


图 4 不同频段内吸波涂料对吸波性能的影响

Fig.4 Effects of absorbing paint on absorbing property of samples at different frequency ranges: (a) 12.0~18.0 GHz; (b) 26.5~40.0 GHz

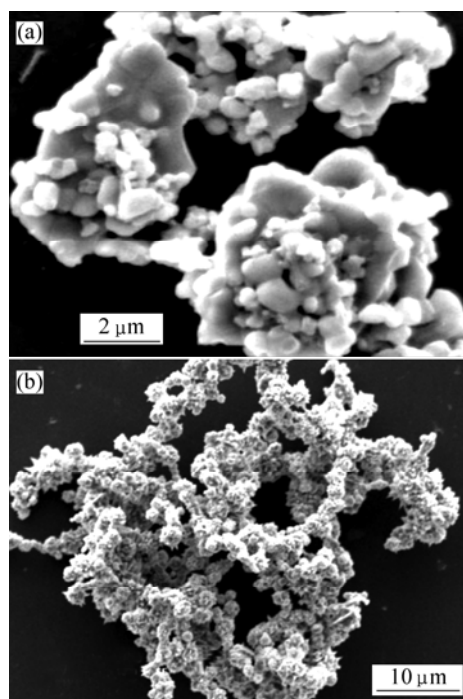


图 5 吸波剂粉体的 SEM 形貌

Fig.5 SEM micrographs of absorbers powder: (a) Ni-Zn ferrite; (b) Nickel carbonyl

佳形状, 铁氧体适于用作低频吸波材料, 具有吸收强、频带较宽及低成本的特点, 但也具有密度大、抗氧化性差、高频吸波性能较差的缺点; 图 5(b)所示为羰基镍粉体, 呈三维链状颗粒体系网络, 具有较大的比表面积, 有较好的微波吸收性能, 但羰基镍介电常数较大且频散特性差, 低频吸收性能较差。

吸波性能与吸波材料的电磁参数、厚度及使用频率有关, 在厚度及使用频率相同时, 通过改变复合物中各组分的比例, 可改变材料的等效电磁参数, 寻找最佳配比从而优化材料的吸波性能, 铁氧体吸波剂由于具有较高的磁导率, 容易实现复合吸波材料的波阻抗与自由空间的波阻抗相匹配, 而且还能通过磁滞损耗、畴壁共振和自然共振、后效损耗等磁极化机制衰减、吸收电磁波, 因此是复合吸波材料的主要成分之一。本实验首先配制 Ni-Zn 铁氧体/20%羰基镍的复合粉, 比较涂覆 Ni-Zn 铁氧体、羰基镍及复合粉后材料的吸波性能。如图 4 所示, 低频时样品 CFe 吸波性能略高于样品 CNi' 的, 而随着频率的增加, 样品 CNi' 的吸波性能增加的幅度大于 CFe, 显示出优异的高频吸波性能; 样品 CM 为 Ni-Zn 铁氧体与 20%的羰基镍混合后喷涂于泡沫铝合金表面制得的样品, 其低频吸波性能高于 CNi', 而高频性能优于 CFe, 说明该复合粉综合了二者的吸波特点, 吸波性能介于二者之间, 改善了材料的频散特性, 预计通过调整羰基镍在复合粉中的含量可以进一步提高材料的高频吸波性能。

3 结论

1) 随微波频率的增加, 泡沫铝复合材料的吸收损耗增加, 反射损耗减小, 整体吸波性能随频率的增加而增加, 在 12.0~18.0 GHz 频段内材料的吸波效果不明显; 在 26.5~40.0 GHz 频段内材料的吸波性能趋于 -10 dB;

2) 与涂覆电阻型与电介质型吸波剂相比, 涂覆磁介质型吸波剂时材料的吸波性能较好, 在 12.0~18.0 GHz 频段内样品 CFe 的吸波性能最好, 在 26.5~40.0 GHz 内样品 CNi' 的吸波性能最好。通过 Ni-Zn 铁氧体与羰基镍的复合可以改善材料的频散特性, 其样品 CM 的吸波性能始终介于二者之间。

3) 表面涂覆吸波涂料的泡沫铝复合材料具有优于泡沫铝合金的吸波性能, 并显示出优异的高频吸波性能。在本实验条件下, 相对泡沫铝合金而言材料吸

波性能的提高有限, 且仍存在低频吸波效果较差的问题, 限制了其应用, 可在本实验的基础上对泡沫铝合金的吸波机理及表面吸波复合涂层的设计作进一步的研究, 以获得具有优良吸波性能的泡沫铝复合材料, 这项工作将为多孔金属的推广应用开辟新的领域。

REFERENCES

- [1] Davies G J, Zhen S. Review metallic foams: their production, properties and applications[J]. *Journal of Materials Science*, 1983, 18: 1899-1911.
- [2] Degischer H P, Kristy B. Handbook of cellular metals: Production, processing, applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 5-8.
- [3] Duarte I, Banhart J. A study of aluminium foam formation kinetics and microstructure[J]. *Acta Mater*, 2000, 48: 2349-2362.
- [4] Gibson L J, Ashby M F. 多孔固体结构与性能[M]. 2nd ed. 刘培生, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003: 1.
Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structure and properties[M]. 2nd ed. LIU Pei-sheng, transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 1.
- [5] 凤 仪, 朱震刚, 陶 宁, 郑海务. 闭孔泡沫铝的导热性能[J]. *金属学报*, 2002, 39(8): 817-820.
FENG Yi, ZHU Zhen-gang, TAO Ning, ZHENG Hai-wu. Thermal conductivity of closed-cell aluminium alloy foam[J]. *Acta Metallurgical Sinica*, 2002, 39(8): 817-820.
- [6] 卢天健, 何德坪, 陈常青, 赵长颖, 方岱宁, 王晓琳. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. *力学进展*, 2006, 36(4): 517-535.
LU Tian-jian, HE De-ping, CHENG Chang-qing, ZHAO Chang-ying, FANG Dai-ning, WANG Xiao-lin. The multifunctionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. *Advance in Mechanics*, 2006, 36(4): 517-535.
- [7] 王录才, 王 芳, 游晓红, 于利民. 泡沫铝的气流噪声降噪性能[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(S1): 92-93.
WANG Lu-cai, WANG Fang, YOU Xiao-hong, YU Li-min. Gas noise damping property of foamed aluminum[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(S1): 92-93.
- [8] Wu J J, Li C G, Wang D B, Gui M C. Damping and sound absorption properties of particle reinforced Al matrix composite foams[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63: 569-574.
- [9] 尉海军, 姚广春, 李 兵, 郭志强. Al-Si 闭孔泡沫铝电磁屏蔽效能[J]. *功能材料*, 2006, 37(8): 1239-1241.
WEI Hai-jun, YAO Guang-chun, LI Bing, GUO Zhi-qiang. Electromagnetic shielding effectiveness of Al-Si closed-cell aluminium foam[J]. *Journal of Functional Materials*, 2006, 37(8):

- 1239-1241.
- [10] 凤 仪, 郑海务, 朱震刚, 陶 宁. 闭孔泡沫铝的电磁屏蔽性能[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 33-35.
- FENG Yi, ZHENG Hai-wu, ZHU Zhen-gang, TAO Ning. Electromagnetic shielding effectiveness of closed-cell aluminium alloy foams[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 33-35.
- [11] 朱新文, 江东亮, 谭寿洪. 碳化硅网眼多孔陶瓷的微波吸收特性[J]. 无机材料学报, 2002, 17(6): 1152-1156.
- ZHU Xin-wen, JIANG Dong-liang, TAN Shou-hong. Microwave absorbing property of SiC reticulated porous ceramics[J]. Journal of Inorganic Materials, 2002, 17(6): 1152-1156.
- [12] 赵玉峰, 肖 瑞, 赵东平, 赵 忠. 电磁辐射的抑制技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1980, 287: 302-308.
- ZHAO Yu-feng, XIAO Rui, ZHAO Dong-ping, ZHAO Zhong. Inhibition technology of electromagnetic radiation[M]. Beijing: China Railway Press, 1980, 287: 302-308.
- [13] 刘顺华, 郭辉进. 电磁屏蔽与吸波材料[J]. 功能材料与器件学报, 2002, 8(3): 213-217.
- LIU Shun-hua, GUO Hui-jin. Electromagnetic interference shielding and wave-absorbing materials[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2002, 8(3): 213-217.
- [14] Verma A, Mendiratta R G, Goel T C, Dube D C. Microwave studies on strontium ferrite based absorbers[J]. Journal of Electroceramic, 2002, 8: 203-208.
- [15] 王海泉, 陈秀琴. 吸波材料的研究进展[J]. 材料导报, 2003, 17: 170-173.
- WANG Hai-quan, CHEN Xiu-qin. Recent developments in study of microwave absorption materials[J]. Materials Review, 2003, 17: 170-173.
- [16] Yusoff A N, Abdullah M H. Microwave electromagnetic and absorption properties of some LiZn ferrites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 269: 271-280.

(编辑 龙怀中)