

金属纤维多孔材料的吸声性能

敖庆波, 王建忠, 李爱君, 支浩, 马军, 汤慧萍

(西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016)

摘要: 采用松装、压制、定位 3 种烧结方式制备了厚度为 1~30 mm 的不锈钢纤维多孔材料, 采用丹麦 B&K 公司的双传声器阻抗管测试吸声系数, 系统研究了孔隙度和丝径对吸声性能的影响规律。结果表明: 在不同厚度条件下, 孔隙度有着不同的最佳范围值, 如 1~3 mm 时, 孔隙度在 80%~85% 的范围内, 5 mm 时, 孔隙度在 85%~90% 的范围内, 10~15 mm 时, 孔隙度在 90%~94% 范围内全频吸声性能较好, 随着厚度的增加, 这个最佳范围值随之增大; 在厚度 ≤ 3 mm 时, 材料的丝径越细, 全频吸声性能越好; 当厚度在 3~20 mm 的范围内时, 随着厚度的增加, 粗丝径样品的吸声性能逐渐变好, 其吸声峰值向低频移动, 并且保持着高频处较好的吸声性能; 当厚度 ≥ 20 mm 时, 材料的丝径越粗, 全频吸声性能越好。

关键词: 金属纤维多孔材料; 厚度; 吸声性能; 孔隙度; 丝径

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)02-0387-05

金属纤维多孔材料具有耐高温、抗氧化、耐冲击、长寿命、易加工、性能稳定及结构可设计性强等优点, 是一种新型的高效吸声材料, 不仅可以用于高温高声强条件下做减振降噪材料, 在具有腐蚀和氧化的恶劣环境中, 也呈现良好的吸声性能^[1-6]。

有关金属纤维多孔材料吸声性能的研究, 主要是从孔隙度、孔径、厚度及空腔等方面进行的^[7-14]。在某一指定厚度条件下, 随着材料孔隙度的增大, 其吸声系数的最大值会向高频移动, 低频处的吸声系数会相应降低, 也就是孔隙度越低, 材料在低频处的吸声性能越好, 孔隙度越高, 材料在高频处的吸声性能越好; 孔径和孔隙度的作用相似, 孔径越小, 材料在低频处的吸声性能越好, 孔径越大, 材料在高频处的吸声性能越好; 在某一指定孔隙度值条件下, 增加材料厚度可以大大改进材料在低频时的吸声能力, 厚度越大, 平均吸声系数越大, 吸声频带越宽, 材料整体吸声能力也就越强, 厚度的增加对高频的吸声性能没有太大影响; 材料背后的空气层厚度越大, 材料的低频吸声性能越好^[12,13], 当空气层的厚度为入射声波 1/4 波长的奇数倍时, 吸声系数最大。

以上研究工作均是在某一特定厚度条件下进行的, 并没有对某一厚度范围内的孔隙度和丝径对吸声系数的影响规律进行系统研究, 国内外也没有相关工作的报道, 而目前由于实际应用环境对所使用材料厚

度的限制十分苛刻, 因此为选取性能优异的减振降噪材料, 在不同厚度条件下, 多孔材料主要的结构参数对其吸声性能影响规律的研究是十分重要的, 对实际应用具有重要的指导作用。

本实验采用松装烧结、压制烧结、定位烧结方式制备了厚度为 1~30 mm 不锈钢纤维多孔材料, 然后针对孔隙度和丝径对材料吸声性能的影响做了系统的研究。

1 实验

选取 $\Phi 8\sim 20\ \mu\text{m}$ 的 316L 不锈钢纤维为原料, 通过牵切、铺毡、高温烧结、平整、后续尺寸精加工制得不锈钢纤维多孔样品, 具体制备过程详见文献[11]。

设计样品的厚度分别为 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30 mm。设计 3 种烧结方式: 松装烧结、压制烧结、定位烧结, 3 种烧结方式示意图如图 1 所示。

松装烧结: 将纤维平整的放入烧舟内, 上表面不施加任何压力, 待烧结完成后, 利用液压机对其进行平整处理并压制到设定厚度; **压制烧结:** 将材料放入烧舟后, 在其上表面放置一张不锈钢板, 即在纤维表面施加定压力, 以确保材料在高温烧结过程中, 随着纤维内部变形储能的消失逐渐下降达到设定厚度; **定位烧结:** 利用定位装置将纤维毛毡预压到设计厚度, 然后置于烧结炉中进行烧结。

利用线切割机对制备好的样品进行切割, 样品尺

收稿日期: 2016-02-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51201139, 51134003); 国家重点基础研究发展计划“973”计划资助项目 (2011CB610302)

作者简介: 敖庆波, 女, 1982 年生, 硕士, 西北有色金属研究院金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231095, E-mail: panpan0605@163.com

寸分别为 $\Phi 29, \Phi 100$ mm, 切割精度控制在 0~0.2 mm 范围内。

根据 GB J85-1985 标准利用丹麦 B&K 公司的 4206 型双传声器阻抗测量管, 对金属纤维多孔材料的吸声系数进行测试, 测试频率范围为 50~6400 Hz。

2 结果与讨论

2.1 烧结方式对吸声性能的影响

以直径 $\Phi 8 \mu\text{m}$ 的不锈钢纤维为原料, 采用 3 种烧结方式制成厚度为 3 mm、孔隙度为 85% 的不锈钢纤维多孔材料, 吸声性能如图 2 所示。

将上图制得的不锈钢纤维多孔材料利用扫描电镜将其侧面进行照相, 得到图 3。

从图 2 中可以看出, 松装烧结制得的结构吸声性能较其他两种工艺制得的结构要好, 首先从图 3 中可以看出, 松装烧结制得的不锈钢纤维多孔材料在厚度方向存在孔径梯度分布, 即上层纤维分布较分散且孔

径较大, 而下层纤维分布较紧密且孔径较小, 孔径在纵向上也呈梯度分布; 压制烧结制得的不锈钢纤维多孔材料整体结构纤维分散较均匀, 孔径也较松装烧结得到的结构小; 定位烧结制得的不锈钢纤维多孔材料较压制烧结制得的材料纤维分散更加紧密, 整体孔径均小于前两种烧结方式制得的结构。其次, 松装烧结制得的结构内部纤维间的缠结力较其他两种工艺制得的材料要小, 即纤维间的烧结结点较其他两种材料要少得多, 这是导致其他两种材料吸声性能较低的主要原因。这与文献[15]所述的结论一致, 即金属纤维多孔材料内部纤维搭接点越少, 声波在通过材料时引起的振动越大, 使声能的消耗量增多, 最终起到较好的吸声作用。综上所述, 本实验选取松装烧结为烧结工艺。

2.2 不同厚度条件下孔隙度对吸声性能的影响规律

图 4 为 6 种厚度条件下, 孔隙度对不锈钢纤维多孔材料吸声性能的影响。从图中可以看出, 当厚度为 1 mm (图 4a)、2 mm (图 4b)、3 mm (图 4c) 时, 孔隙度在 80%~85% 的范围内, 全频的吸声性能较好, 而孔隙度过高或是过低均不利于全频吸声; 当厚度增加

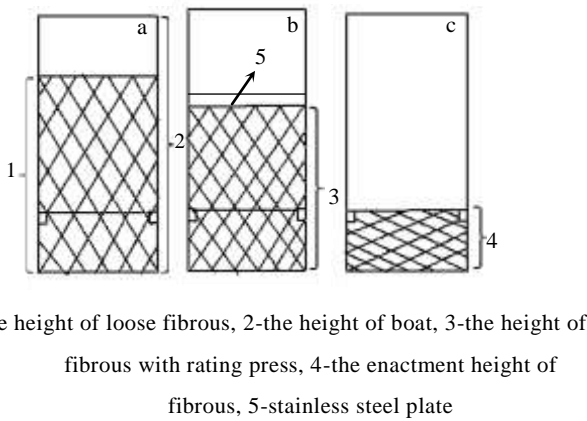


图 1 不锈钢纤维在烧舟内的装置方式

Fig.1 Deposit method of stainless steel fibrous in the material boat: (a) loose sintering, (b) compacting sintering, and (c) positioning sintering.

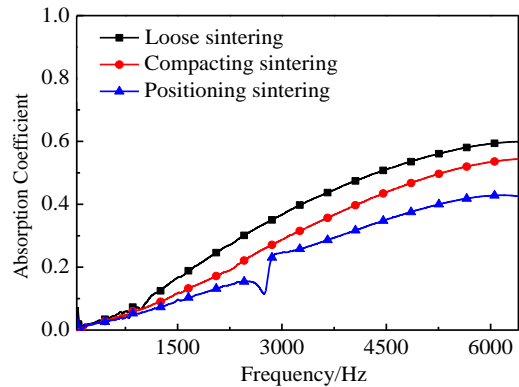


图 2 烧结方式对吸声系数的影响

Fig.2 Effects of sintering processing on sound absorption coefficient

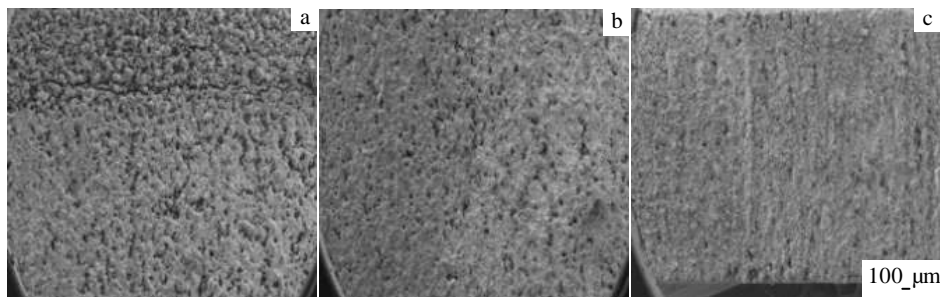


图 3 3 种烧结方式制得的不锈钢纤维多孔材料 SEM 照片

Fig.3 SEM images of stainless steel fibrous porous materials by different sintering: (a) loose sintering, (b) compacting sintering, and (c) positioning sintering

到 5 mm (图 4d) 时, 孔隙率在 85%~90% 的范围内, 全频吸声性能较好, 随着厚度的增加, 10 mm (图 4e)、15 mm (图 4f)^[14] 时孔隙率在 90%~95% 范围内全频吸声性能较好。出现上述结果主要是因为: 孔隙度过大, 材料过于稀疏, 声波进入后不容易发生二次或是多次反复碰撞, 部分声波有可能发生透射, 声能损耗较少, 从而材料的整体吸声性能不好; 孔隙度太小, 材料过于密实, 声波不易进入材料内部, 吸声性能明显下降^[9]。文献[16]中将孔隙度细化为孔径和曲折度, 孔径大的多孔材料不如孔径小的吸收的声能多, 但孔径尺寸也不能无限减小, 因为孔径过小, 会导致材料表面过于密实, 大部分声波在未进入材料前就已经被反射回去, 所以对于不同厚度的多孔材料, 孔径存在一个最佳尺寸; 而对于孔隙的曲折度来说, 曲折度代表一个材料内部孔的复杂程度, 曲折度越大, 材料的内部通道就越复杂, 这样材料的吸声系数也就越大。文献[17]中指出, 孔隙度和空气流阻是息息相关的, 空气流阻存在一个最佳范围值, 过高时, 材料的空气穿透力降低, 材料的吸声性能下降; 过低时, 因摩擦力和粘滞力引起的声能损耗降低, 导致材料的吸声性能下降。文献[18]中指出, 材料的孔隙度增大, 其密度减小, 反之密度增大。一种多孔吸声材料对应存在一个最佳吸声性能的密度范围。

综合以上结论可以得出, 在不同厚度条件下, 均存在一个最佳孔隙度范围值, 在这个最佳值范围内,

材料表现出较好的全频吸声性能, 而且从 6 幅图的发展趋势可以得出随着材料厚度的增加, 这个孔隙度范围值会逐渐提高。

2.3 不同厚度条件下丝径对吸声性能的影响规律

图 5 为丝径 $\phi 8, \phi 12, \phi 20 \mu\text{m}$, 厚度为 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30 mm 不锈钢纤维多孔材料的吸声频率曲线。从图中可以看出, 在厚度 $\leq 3\text{mm}$ (图 5a、5b、5c) 时, 材料的丝径越细, 在全频范围内, 吸声性能越好; 当厚度在 3~20 mm (图 5d~图 5g) 的范围内时, 随着厚度的增加, 粗丝径样品的吸声性能逐渐变好, 其峰值向低频移动, 并且保持着高频处较好的吸声性能; 当厚度 $\geq 20\text{mm}$ (图 5h) 时, 粗丝径样品在全频范围内的吸声性能均好于细丝径样品。

出现上述结果主要是因为: 在材料较薄时 ($\leq 3\text{mm}$), 厚度值是丝径值的几十到几百倍, 在这个数量差条件下, 利用细丝径纤维制备的样品内部微孔数量较粗丝径纤维制备的样品多, 孔径小, 曲折度大, 有利于声波在材料内部多次反射耗散声能, 而利用粗丝径纤维制备的样品, 由于孔径较大且孔数量较少, 曲折度小, 声波在入射时由于孔通道短, 导致大量透射现象出现, 使材料的吸声能力减小; 随着厚度的增加, 厚度值与丝径值的差值达到几百到几千倍, 材料内部微孔数量随之增加, 声波在材料内部的透射现象逐渐减少, 无论是粗丝径还是细丝径制备的纤维多孔材料全频吸声性能均有所提高, 声波在经过材料表面引起

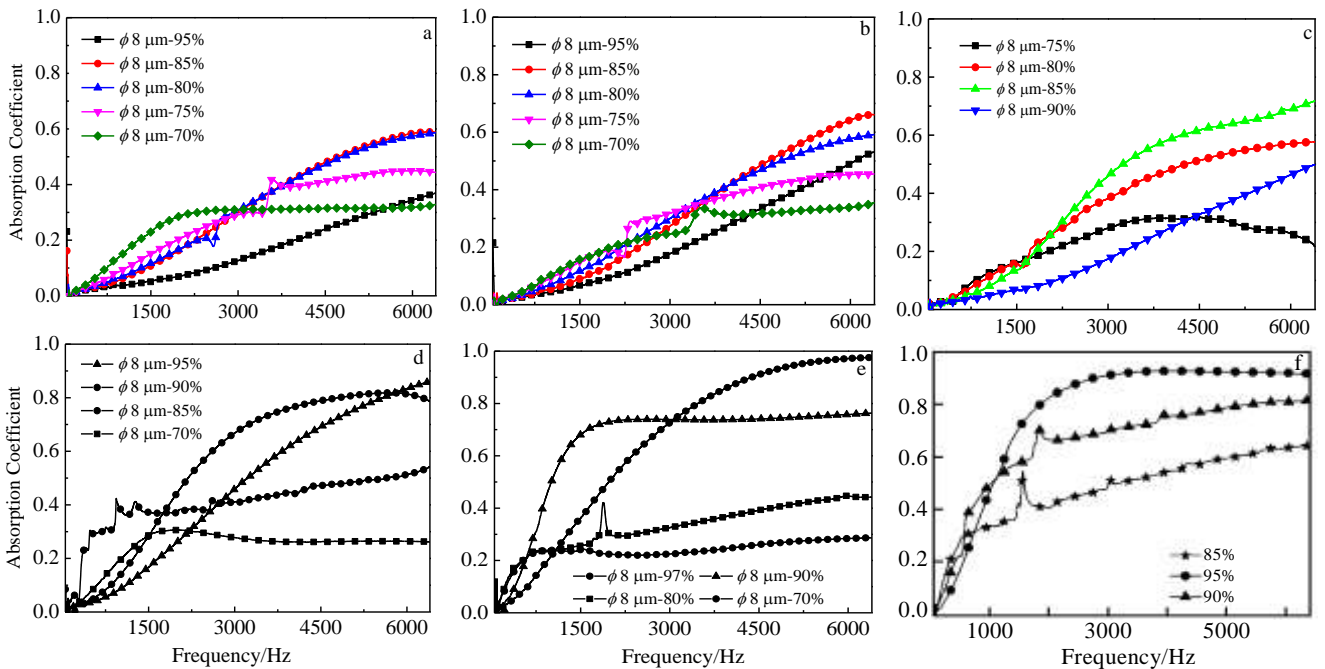


图 4 不同厚度纤维多孔材料的孔隙度对吸声系数的影响

Fig.4 Effects of the porosity on sound absorption coefficient for fibrous porous materials with different thicknesses: (a) 1 mm, (b) 2 mm, (c) 3 mm, (d) 5mm, (e)10 mm, and (f) 15 mm^[14]

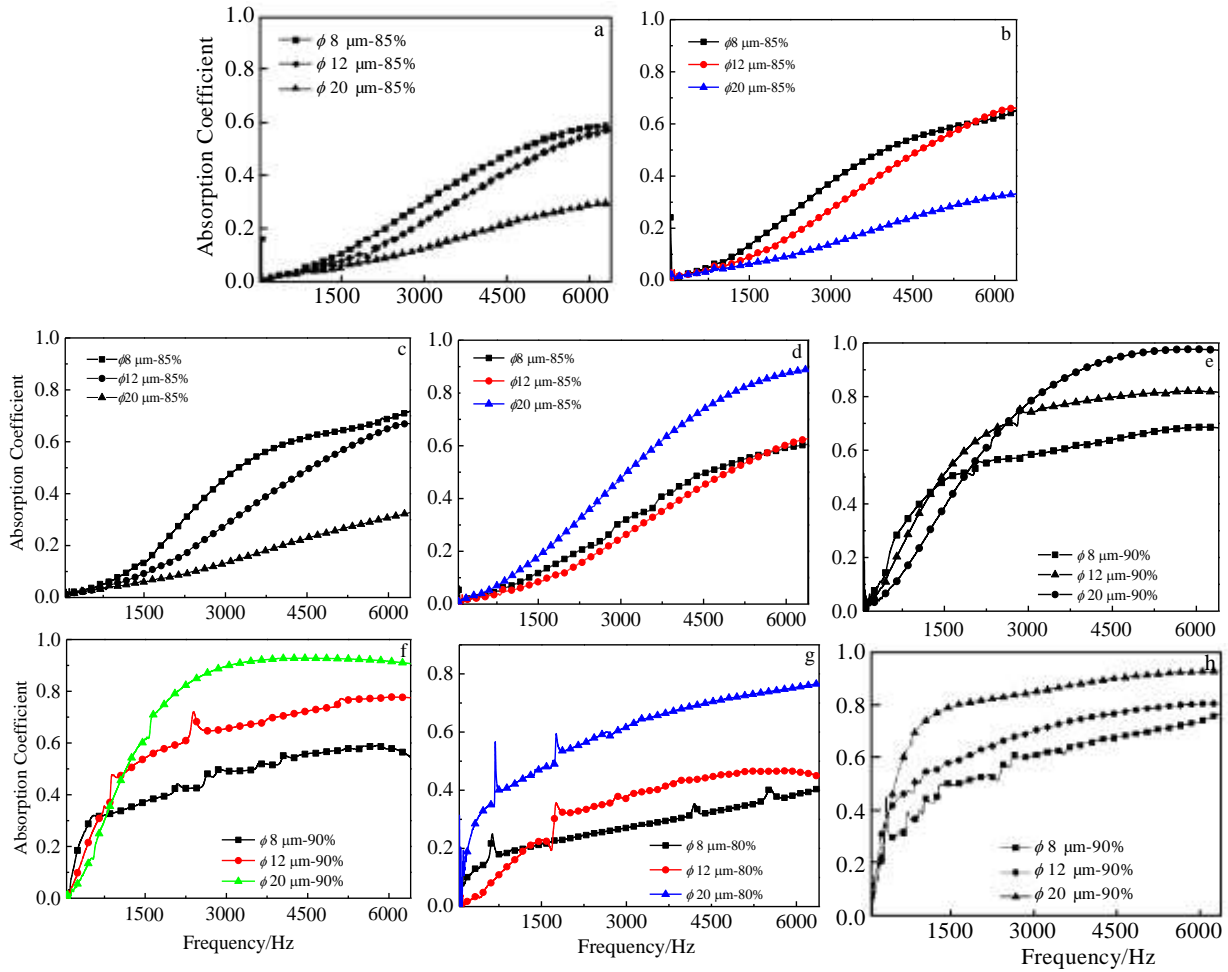


图 5 不同厚度纤维多孔材料的丝径对吸声系数的影响

Fig.5 Effects of the wire diameter of the fibers on sound absorption coefficient: (a) 1 mm, (b) 2 mm, (c) 3 mm, (d) 5 mm, (e)10 mm, (f) 15 mm, (g) 20 mm, and (h) 30 mm

孔隙内部空气振动时,空气与纤维壁面产生相对运动,从而使声能转化为热能达到消声作用^[18],由于利用粗丝径纤维制备的样品孔壁较细丝径纤维制备的样品面积大,孔内空间较大,声波与空气的相对运动量大,使声能转化成热能的量也随之增大,所以在全频范围内粗丝径纤维制备的样品吸声性能逐渐增大并向低频移动。

3 结 论

- 1) 松装烧结方式制备的不锈钢纤维多孔材料内部呈梯度结构,其吸声性能较压制和定位烧结方式好。
- 2) 对于不同厚度条件下,均存在一个最佳孔隙度范围值:厚度为 1~3 mm 时,孔隙度在 80%~85% 的范围内,全频的吸声性能较好;当厚度增加到 5 mm 时,孔隙度在 85%~90% 的范围内,全频吸声性能较好;厚度为 10~15 mm 时,孔隙度在 90%~94% 范围内全频吸

声性能较好,随着厚度的增加,这个孔隙度范围值是逐渐提高的。

- 3) 在厚度 ≤ 3 mm 时,材料的丝径越细,全频吸声性能越好;当厚度在 3~20 mm 的范围内时,随着厚度的增加,粗丝径样品的吸声性能逐渐变好,其吸声峰值向低频移动,并且保持着高频处较好的吸声性能;当厚度 ≥ 20 mm 时,材料的丝径越粗,全频吸声性能越好。

参考文献 References

- [1] Zhang Bo(张波), Chen Tianning(陈天宁), Feng Kai(冯凯) et al. *Journal of Xi'an Jiaotong University*(西安交通大学学报)[J], 2008, 42(11): 13 271
- [2] Sun Fugui(孙富贵), Chen Hualing(陈花玲), Wu Jiuhui(吴九汇). *Journal of Vibration Engineering*(振动工程学报)[J], 2010, 23(5): 502

- [3] Ao Qingbo(敖庆波), Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊) *et al. Piezoelectrics & Acoustooptics*(压电与声光)[J], 2010, 32(5): 849
- [4] Chang Baojun(常宝军), Wang Xiaolin(王晓林), Peng Feng(彭峰) *et al. Technical Acoustic*(声学技术)[J], 2009, 4(28): 450
- [5] Peng Feng, Wang Xiaolin, Sun Yan *et al. Chinese Journal of Acoustics*[J], 2009, 34(3): 266
- [6] Zhang Bo, Chen Tianning, Zhao Yuyuan *et al. Acoustical Society of America*[J], 2012, 132 (3): 1436
- [7] Wang Jianzhong(王建忠), Xi Zhengping(奚正平). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(2): 413
- [8] Duan Cuiyun(段翠云), Cui Guang(崔光), Liu Peisheng(刘培生). *Metallic Functional Materials*(金属功能材料)[J], 2011, 1: 60
- [9] Lu Tianjian(卢天健), He Deping(何德坪), Chen Changqing(陈常青) *et al. Advances in Mechanics*(力学进展)[J], 2006, 36(4): 517
- [10] Liu Shifeng(刘世锋), Tang Huiping(汤慧萍), Liu Bo(刘波) *et al. Journal of Sichuan University, Natural Science Edition* (四川大学学报, 自然科学版)[J], 2014, 51(1): 160
- [11] Ao Qingbo(敖庆波), Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(10): 1765
- [12] Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊), Wang Jianyong(王建永) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报)[J], 2007, 17(12): 1943
- [13] Zhong Xiangzhang(钟祥璋). *Building Materials and Institution Materials*(建筑吸声材料与隔声材料)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 85
- [14] Ao Qingbo(敖庆波), Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊) *et al. Journal of Function Materials* (功能材料)[J], 2013, 44(6): 780
- [15] Ao Qingbo(敖庆波), Wang Jianzhong(王建忠), Tang Huiping(汤慧萍) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(11): 2646
- [16] Lu T J, Hess A, Ashby M F. *J Appl Phys*[J], 1999, 85: 7528
- [17] Mao Dongxing(毛东兴), Hong Zonghui(洪宗辉). *Environmental Noise Control Engineering II*(环境噪声控制工程, 第2版)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010, 1: 307
- [18] Pan Zhonglin(潘仲麟), Zhai Guoqing(翟国庆). *Noise Control Technique*(噪声控制技术)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 40

Sound Absorption Properties of Fibrous Porous Metals

Ao Qingbo, Wang Jianzhong, Li Aijun, Zhi Hao, Ma Jun, Tang Huiping

(State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Fibrous porous metals with thickness from 1 mm to 30 mm were prepared by three kinds of sintering processing, loose sintering, compacting sintering, and positioning sintering. The absorption coefficient was tested by a double microphone impedance measurement tube of B&K Company in Denmark. The effects of the porosity and the wire diameter on the sound absorption properties were studied. The results show that there are different optimum ranges of porosity with different thicknesses. When the thickness is from 1 mm to 3 mm, the optimum porosity range is from 80% to 85%; when the thickness is 5 mm, the optimum porosity range is from 85% to 90%; with the thickness from 10 mm to 15 mm, the optimum porosity range is 90%~94%, and with the increases of thickness, the porosity increases in the optimum range. When the thickness ≤ 3 mm, the smaller the fiber diameter is, the better the sound absorption performance is in the whole frequency. When the thickness is from 3 mm to 20 mm, with the thickness increasing, the sound absorption performance of the materials with smaller wire diameter become better gradually, the absorption peak shifts to the low frequency, and the sound absorption performance still keeps very well at high frequency. When the thickness ≥ 20 mm, the larger the fiber diameter is, the better the sound absorption performance is in the whole frequency.

Key words: fibrous porous metals; thickness; sound absorption properties; porosity; wire diameter

Corresponding author: Tang Huiping, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231095, E-mail: hptang@c-nin.com