

孔结构对不锈钢纤维多孔材料吸声性能的影响

敖庆波, 王建忠, 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: 设计了两种不锈钢纤维多孔材料的铺制方法: 平行铺制和直立铺制。通过控制铺制方法、纤维的长/径比和烧结工艺得到具有不同孔结构的不锈钢纤维多孔材料。对具有不同孔结构的不锈钢纤维多孔材料的吸声性能进行分析。结果表明, 长/径比为 5000 的不锈钢纤维多孔材料的性/价比最高; 当材料厚度 ≤ 15 mm 时, 平行铺制的纤维多孔材料较直立铺制的吸声性能好; 当材料厚度 > 15 mm 时, 铺制方法的影响不显著; 烧结结点数量的多少对不锈钢纤维多孔材料吸声性能贡献不大。

关键词: 不锈钢纤维; 结构参数; 吸声性能; 铺制方式

中图分类号: TF125.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)10-3241-05

金属纤维多孔材料不仅具有较好的吸声性能、力学性能, 还具有很好的机械加工性能, 是新一代功能一体化材料, 可用于减振降噪、整机-装甲防护、电磁屏蔽、传热换热等领域。针对金属纤维多孔材料的相关研究近年来也得到了研究者的重视^[1-8]。

金属纤维多孔材料的孔结构是由孔隙、纤维骨架、烧结结点 3 个要素构成, 孔隙以孔隙率、孔形貌(均匀孔、梯度孔)、孔径表征; 结点以结点形貌、结点数量表征; 骨架是由金属纤维互相搭接构成的。孔隙率的大小是通过控制单位体积内所用材料的质量来实现; 金属纤维多孔材料的孔隙构型通过控制纤维的长短和铺制方式完成: ①短纤维组成的金属纤维多孔材料内部的孔大多为不完整的; 而长纤维组成的孔绝大部分具有完整的孔壁。②平行铺制的金属纤维多孔材料, 内部孔型均为复杂的、交错的; 直立铺制的金属纤维多孔材料, 内部孔型均为与上下表面相通的直孔。

孔结构是影响金属纤维多孔材料声学性能的主要因素之一, 选择合适的结构参数对于金属纤维多孔材料在吸声应用中充分发挥作用是关键。为完善孔结构与金属纤维多孔材料吸声性能的关系, 本实验针对不锈钢纤维多孔材料纤维的长/径比、孔隙构型、结点数量这 3 个因素对吸声性能的影响规律进行了系统研究。

1 实 验

平行铺制的纤维多孔材料的制备工艺在文献[9]

中已经详细介绍了, 在此不予赘述。本文主要介绍直立纤维多孔材料的制备方法。

1.1 直立不锈钢纤维多孔材料的制备过程

①利用纤维束直接制备直立不锈钢纤维多孔材料将不锈钢纤维按照一定长度进行牵切, 利用体积质量称重法(式(1))对所需不锈钢纤维多孔材料按照设定的孔隙度进行质量计算:

$$M = (1 - \varepsilon) \rho_s V \quad (1)$$

式中: M 为预烧多孔体的质量(g); ε 为设计的孔隙率(%); ρ_s 为致密材料的密度(g/cm³); V 为预烧结试样多孔体的体积(cm³)。

称取相应质量值的纤维束, 进行垂直铺制。将其放入烧结模具中进行烧结, 高温烧结后对坯料进行尺寸加工即得到内部纤维呈直立状分布的不锈钢纤维多孔材料。

②利用铺制好的纤维毡间接制备直立不锈钢纤维多孔材料

以不锈钢纤维毡为原料, 采用“平行铺制—高温烧结—纵向切割”的方法制得直立纤维多孔材料。

1.2 测试方法

利用 FBP-IV 型多孔材料孔径检测仪按照 GB/T 5249-1985《可渗透性烧结金属材料气泡试验孔径的测定》测试不锈钢纤维多孔材料的最大孔径。采用丹麦 B&K 公司的 4206 型双传声器阻抗测量管, 按照 GB/T 18696.2-2002《声学阻抗管中吸声系数和声阻抗的测

收稿日期: 2018-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(51701164); 陕西省科技新星项目(2018KJXX-060)

作者简介: 敖庆波, 女, 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 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

量第二部分：传递函数》检测不锈钢纤维多孔材料的吸声系数。频率范围在 50~6400 Hz 之间。

2 结果与讨论

2.1 直立不锈钢纤维多孔材料均匀度评价

以直径为 8、12、20 μm 的不锈钢纤维为例，利用上述方法制备了孔隙度为 80% 的直立不锈钢纤维多孔材料。通过对体积和质量的复测，利用式 (1) 计算得到的结果如表 1 所示。

表 1 样品的设计孔隙度和实际孔隙度对比

Table 1 Comparison of the design and actual porosity

Diameter/ μm	Design porosity/%	Actual porosity/% (method①)	Actual porosity/% (method②)
8	80	85.1	78.8
		76	78.8
		78.8	78.8
12	80	72.5	79.4
		75.2	79.5
		81.4	79.4
20	80	86.5	79.3
		82.1	78.8
		74.3	79.2

从表 1 可以看出，方法①制备的直立不锈钢纤维多孔材料的孔隙分布较为分散，误差较大，主要是在成型过程中，纤维束分布不均造成的，材料整体的孔隙度值准确，但是在其局部取样时，部分位置纤维过多，造成孔隙度值低，部分位置纤维分布稀疏，造成孔隙度值高；方法②制备的直立不锈钢纤维多孔材料的孔隙分布较为均匀，误差为-1.5%，说明孔隙分布均匀。这主要是因为原料选取时，使用的是铺制好的纤维毡。故为保证后期实验数据的准确性，采用方法②来制备直立不锈钢纤维多孔材料。

2.2 纤维长/径比对吸声性能的影响

金属纤维长/径比是通过控制牵切工艺实现的，通过调节牵切机的牵伸形式、握持距、牵伸倍数、出条速度等参数实现对纤维长度的控制。

选取直径为 8 μm 的拉拔不锈钢纤维为原料。采用牵切机制备了 3 种长/径比的金属纤维束：1000、2000、5000，制成孔隙度为 85%，厚度为 3 mm 的多孔材料，对其最大孔径进行了测试，测试结果如表 2 所示。

表 2 纤维多孔材料的最大孔径

Table 2 Maximum pore size of the fiber porous material

Ratio of length to diameter	Maximum pore size/μm
1000	38
2000	37
5000	38

从表 2 可以看出，在各结构参数均相同的情况下，3 种长/径比样品的最大孔径几乎相同，由此说明纤维的长/径比对不锈钢纤维多孔材料的微观结构影响不大。

为了解长/径比对不锈钢纤维多孔材料的吸声性能的影响规律，对 3 种样品的吸声性能进行了测试，结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出，纤维长/径比为 2000 的多孔材料全频吸声性能较其它两种材料差，从制备 3 种长/径比纤维的工艺来考虑：长/径比越小，牵切工艺越复杂，生产成本越高，反之，长/径比越大，生产成本越低。从以上两方面考虑，应选取长/径比为 5000 的纤维为原料。

2.3 孔隙构型对吸声性能的影响

利用两种铺制方式制备了不锈钢纤维多孔材料，如图 2 所示。从图中可以看出，平铺法制备的不锈钢纤维多孔材料内部纤维均在一个平面上呈杂乱无章分布，其孔结构呈多边形；直立法制备的不锈钢纤维多孔材料内部纤维均与平面垂直或成一定角度倾斜的有序分布，其孔与材料上下表面成垂直分布。

针对 4 组不同厚度 (10, 15, 20, 60 mm) 条件下的平铺纤维多孔材料和直立纤维多孔材料的吸声性能进行了测试，对比了相同厚度条件下，两种铺制方法的纤维多孔材料的吸声性能，结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出，厚度 ≤ 15 mm 时，在全频范围内，平行铺制的纤维多孔材料吸声性能优于直立铺制的纤维多孔材料。这是因为直立铺制的纤维多孔材料内部孔与材料上下表面垂直连通，即所谓的贯通孔，声波很容易进入到材料内部，但由于孔通道贯通上下表面，声波也较容易通过材料内部而产生透射现象。随着厚度的增加，直立铺制的纤维多孔材料的吸声性能逐渐提升，并与平行铺制的材料的吸声性能相近。

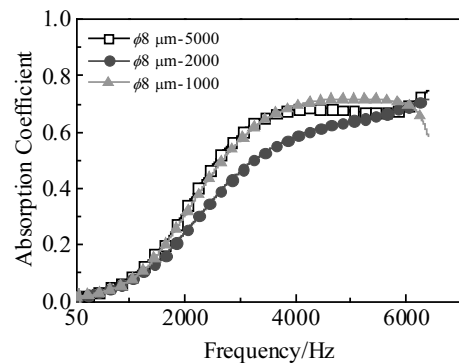


图 1 纤维多孔材料的吸声-频率曲线

Fig.1 Sound absorption-frequency curves of the fiber porous material

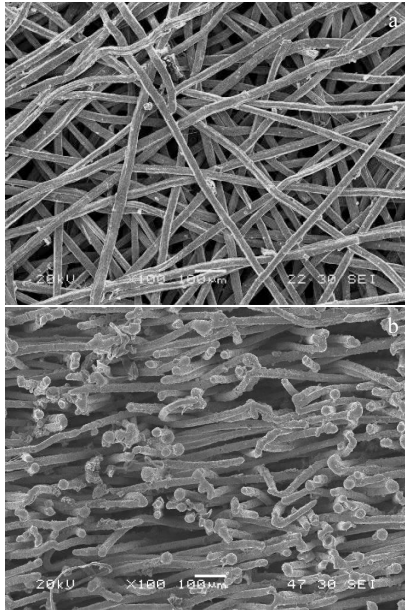


图 2 不锈钢纤维多孔材料的 SEM 照片

Fig.2 SEM morphologies of the stainless steel fiber porous materials: (a) parallel and (b) erect

主要原因是随着厚度的增加，直立铺制的纤维多孔材料孔通道变得较为复杂，与上下表面的贯通程度变弱，

使声波的透射量减小，所以全频吸声性能与平行铺制的纤维多孔材料接近。

2.4 结点数量对纤维多孔材料吸声性能的影响

金属纤维多孔材料经过高温烧结后，其内部会形成一定数量的烧结结点。结点数量与烧结前纤维之间的搭接点有关，搭接点越多，结点数量也越多。烧结结点是构成孔结构的主要因素之一。

利用同步辐射X射线层析表征技术和三维重构软件结合得到单位体积内不锈钢纤维多孔材料内部的烧结结点数量。图 4 所示是采用两种丝径：8 和 20 μm 的纤维制备的具有不同烧结结点数量的多孔材料吸声系数的变化曲线（常声压条件下）。由图可知，纤维丝径相同时，具有不同结点数量的不锈钢纤维多孔材料的吸声系数近似相同。由此说明烧结结点数量对材料的吸声性能没有影响。这与文献[10]中阐述的结论一致，即金属纤维多孔吸声材料在成形过程中，材料内部纤维搭接在一起即可，纤维之间的结点尺寸及数量对材料吸声性能的贡献不大。

高声强条件下的声能较大，声波的振动频率也较大，在此环境中，具有不同数量烧结结点的不锈钢纤维多孔材料的吸声系数的变化规律如图 5 所示。由图可知，烧结结点数量对吸声系数也未产生任何影响，这与常声压条件下的影响规律相同(见图 4)。

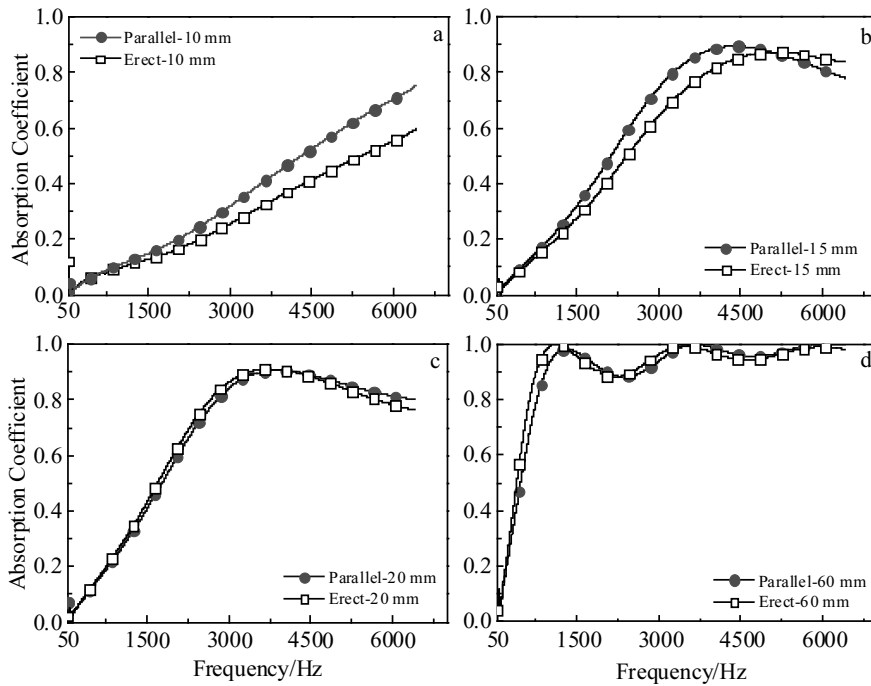


图 3 两种铺制方式不同厚度的纤维多孔材料的吸声-频率曲线

Fig.3 Sound absorption-frequency curves of two paving methods of fiber porous materials with different thicknesses: (a) 10 mm, (b) 15 mm, (c) 20 mm, and (d) 60 mm

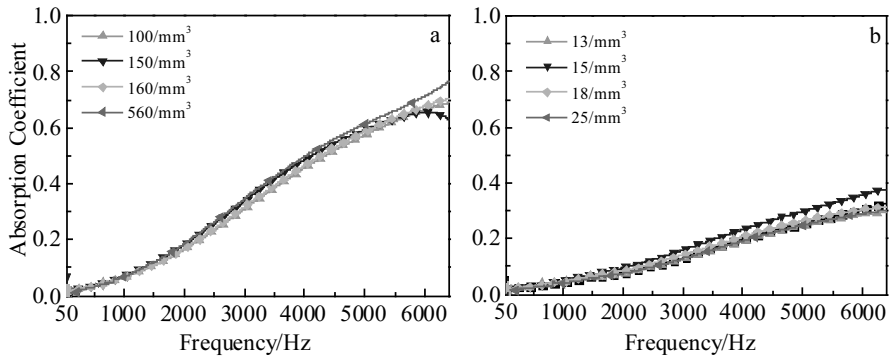


图 4 具有不同烧结结点数量的纤维多孔材料的吸声性能

Fig.4 Sound absorption properties of the fiber porous materials with different sintering node numbers: (a) fiber diameter of 8 μm and (b) fiber diameter of 20 μm

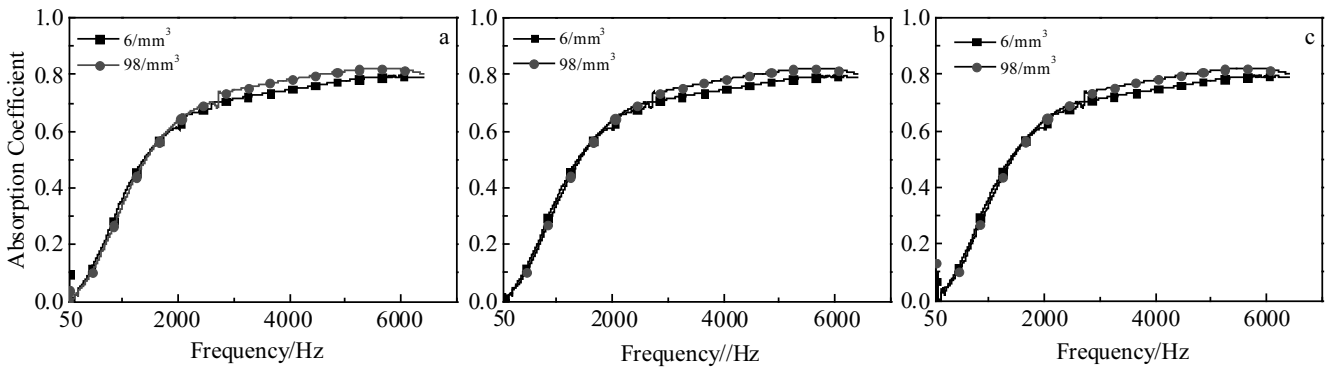


图 5 高声强条件下具有不同烧结结点数量的样品吸声-频率曲线对比

Fig.5 Comparison of sound absorption-frequency curves of samples with different sintering nodes numbers under higher sound intensities: (a) 120 dB, (b) 132 dB, and (c) 156 dB

文献[11]中, 通过对比经过退火处理和未经过退火处理的两种金属纤维多孔材料的拉伸性能表明, 经过退火处理的金属纤维多孔材料的抗拉性能较未经过退火处理的大幅降低, 这与两种工艺处理的样品内部烧结结点数量不同有关, 退火处理会导致材料内部烧结结点数量降低 40%以上。

通过分析烧结结点对金属纤维多孔材料的吸声性能和力学性能的影响可知, 虽然烧结结点对吸声性能影响不大, 但是对材料的强度贡献很大。在材料的实际应用过程中, 不但要有较好的吸声性能, 还要有一定的强度, 所以在材料制备过程中, 还是有必要使材料内部形成一定数量的烧结结点。

3 结 论

1) 通过对 3 种长/径比 (1000、2000、5000) 的不锈钢纤维多孔材料进行吸声性能和生产成本比较, 可知长/径比为 5000 的样品的性/价比最高。

2) 当纤维多孔材料的厚度 ≤ 15 mm 时, 平铺方法制备的不锈钢纤维多孔材料的孔结构较直立方法制备的材料的孔结构复杂, 无贯通孔存在, 因此前者的吸声性能优于后者; 当不锈钢纤维多孔材料的厚度 > 15 mm 时, 材料的铺制方法对其孔结构的影响不显著, 因此其吸声性能基本相同。

3) 烧结结点数量的多少对常声压和高声强条件下的不锈钢纤维多孔材料的吸声性能贡献不大, 纤维之间互相搭接在一起即可。但从实际应用考虑, 有必要形成一定数量的烧结结点, 以增加样品的强度。

参考文献 References

[1] Zhou Han(周 汉), Wu Jiuhui(吴九汇), Hu Zhiping(胡志平). *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*(力学学报)[J], 2013, 45(2): 229

[2] Wang Jianzhong(王建忠), Xu Zhongguo(许忠国), Ao Qingbo(敖庆波) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金

- 属材料与工程[J], 2016, 45(6): 1636
- [3] Ding Yuxiang(丁宇翔), Xu Ying(徐颖), Xu Ning(徐宁). *Noise and Vibration Control(噪声与振动控制)*[J], 2012, 32(5): 177
- [4] Ao Qingbo(敖庆波), Wang Jianzhong(王建忠), Li Aijun(李爱君) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(2): 387
- [5] Huang Zhen(黄真), Du Zhe(杜喆), Duan Yijie(段挹杰) *et al.* *Chinese Journal Urban and Rural Industrial Hygiene(中国城乡企业卫生)*[J], 2016(11): 43
- [6] Sun Fugui, Chen Hualing, Wu Jiuhui. *Applied Acoustics*[J], 2010, 71: 221
- [7] Chang Baojun(常宝军), Wang Xiaolin(王晓林), Peng Feng(彭锋) *et al.* *Technical Acoustic(声学技术)*[J], 2009, 28(4): 450
- [8] Dai Xiaonan(戴晓楠), Yu Tao(于涛). *Gas & Heat(煤气与热力)*[J], 2013(9): 18
- [9] Tang Huiping(汤慧萍), Wang Jianzhong(王建忠). *Sintered Porous Metal Fiber Materials(金属纤维多孔材料)*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016
- [10] 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
- [11] Tang H P, Ma J, Wang J Z *et al.* *JOM*[J], 2017, 69(4): 647

Effect of Pore Structure on the Sound Absorption Properties of the Stainless Steel Fiber Porous Materials

Ao Qingbo, Wang Jianzhong, Ma Jun, Tang Huiping

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

Abstract: Two kinds of paving methods (parallel paving and erect paving) of the stainless steel fiber porous materials were designed. The materials with different pore structure were obtained by controlling the paving method, the ratio of length to diameter of the fiber and the sintering process. The sound absorption properties of the stainless steel fiber porous materials with different pore structure were analyzed. Results show that the ratio of performance to cost of the stainless steel fiber porous material whose fiber has the length to diameter ratio of 5000 is the highest. When the thickness of the material is ≤ 15 mm, the sound absorption properties of the fiber porous materials prepared by the parallel way are better than by the erect. When the thickness of the material is >15 mm, the influence of paving method is not significant. The number of sintering nodes makes little contribution to the sound absorption properties of the stainless steel fiber porous materials.

Key words: stainless steel fiber; structural parameters; sound absorption properties; paving method

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