

超薄金属纤维复合膜材料的低频吸声性能

敖庆波, 王建忠, 马军, 李焱, 吴琛, 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: 针对限域空间 (≤ 5 mm) 噪声防护对超薄吸声结构的重大需求, 以不锈钢纤维毡为原料, 利用低温烧结技术制备了由不锈钢纤维多孔材料和金属薄膜组成的复合膜材料。利用 B&K 声学测试平台对复合膜材料进行频率范围在 50~1000 Hz 之间吸声系数的测试, 分析了结构参数对复合膜材料吸声性能的影响规律。分别通过研究金属纤维多孔材料的孔结构(孔径、丝径、烧结结点)及金属薄膜的层数对复合膜材料吸声性能的影响规律。结果表明, 在频率为 50~1000 Hz 的范围内, 超薄复合膜材料的最优结构为金属纤维多孔材料按照细丝径、小孔面向声源, 粗丝径、大孔在后的顺序排列, 材料内部复合铜箔可有效提高材料在低频处的吸声性能。

关键词: 金属纤维; 复合结构; 吸声性能; 金属薄膜; 低频

中图分类号: TF125.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)11-3861-04

限域空间内的低频噪声控制无法得到较好的处理, 如潜艇、战车、电子器件外的低频噪声控制等等。实现利用小尺寸结构高效调控低频声波是声学领域极具挑战和急需解决的科学难题, 也是设计现代装备长期追求的目标^[1, 2]。很多吸声材料均存在低频吸声性能差的特点, 近年来众多研究均是从改善材料低频吸声性能出发, 通过改变材料内部结构, 或者降低共振频率(共振带宽就会变窄), 单一的改变材料本身的结构配比, 实现提高低频吸声性能的可控空间是有限的^[3-11]。如金属纤维多孔材料、金属泡沫多孔材料、穿孔板共振吸声结构, 以及近年来发展起来的声学超材料等等, 均是针对 1500 Hz 频率以下的声学特性, 以得到较好低频吸声性能为目标进行研究工作的。而多数声学材料及结构均是在较厚的条件 (≥ 60 mm) 下, 能够发挥较好的吸声性能, 如果在很薄的情况下, 在低频处的吸声性能则较差; 共振吸声结构虽然可以通过设计吸声峰值将某一频率下的吸声性能提高, 但其吸声频带较窄; 而超材料多数为金属块体与塑料薄膜配合使用得到具有低频高效吸声性能, 且多数超材料是采用 3D 打印技术制得的^[12, 13]。对于一些要求苛刻的使用环境, 对使用材料的材质提出了更高的要求, 除了所需的声学性能外, 耐腐蚀、机械加工性、使用寿命等特点都是使用的指标参数。金属纤维多孔材料已经成功应用于电子器件外做减振降噪材料^[14-16], 以及航空发动机中做高温声衬材料^[17], 其在腐蚀情况下的吸声性

能也表现很好^[18], 金属纤维多孔材料是在苛刻环境下做噪声控制的最佳选择, 鉴于超材料的膜振动设计思路, 结合金属纤维多孔材料优异的环境适应性, 开发出一种金属纤维复合膜材料, 针对该结构的声学特性进行系统研究, 是十分必要的。

为得到低频吸声性能较好的金属纤维复合膜材料, 本研究针对金属纤维多孔材料的孔结构参数(孔径、丝径、烧结结点)、膜材料的层数对复合材料的吸声性能的影响规律进行了系统研究。

1 实验

金属纤维多孔材料的制备方法在文献[19]中已经详细介绍了, 此次不予赘述。金属(不锈钢)纤维复合铜薄膜材料的制备工艺: 置于氢气烧结炉中, 在氢气气氛下, 温度为 1000 °C (± 10 °C) 的条件下保温 2 h, 随炉冷却即可。

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量 第 2 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 50~1000 Hz 之间, 频率间隔为 2 Hz。

2 结果与讨论

收稿日期: 2019-11-15

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, 教授级高级工程师, 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

2.1 膜层的作用

以丝径梯度多孔材料为研究对象(孔隙度为 76%，丝径分别为 8 和 12 μm ，每层厚度为 2 mm)，选取铜箔作为复合膜材料的膜层，单层铜箔厚度为 0.1 mm。分析对比添加铜箔前后丝径梯度多孔材料吸声性能的变化(如图 1 所示)。

从图1可以看出，铜箔的加入使丝径梯度多孔材料在500~1000 Hz频率范围内的吸声性能有很大提高，平均吸声系数达0.23。薄膜材料具有与丝径梯度多孔材料相比较小的刚度，属于软相介质，金属纤维属于硬相介质，两者具有不同的吸声机理，其靠自身微振动作用消耗较长声波的能量，金属薄膜的加入提高了材料对低频长声波的阻隔作用，利用较为柔软的金属膜表面与声波产生微振动作用，结合金属纤维梯度多孔材料较好的宽频吸收声能的特点^[18]，两者的结合有效提高了复合膜材料对低频声音的吸收能力。

2.2 薄膜层数对吸声性能的影响

选取孔径梯度结构(丝径为 12 μm ，孔径分别为 10 和 40 μm 的梯度结构，每层 2 mm)和丝径梯度结构(孔径为 10 μm ，丝径为 12 和 20 μm 的丝径梯度，每层 2 mm)，分别在 2 种梯度结构中添加单层和 5 层金属薄膜，对比 2 组具有不同薄膜厚度的复合膜材料的吸声性能，结果如图 2 所示。从图 2 可以看出，增加金属薄膜的层数，可以提高复合膜材料在 50~1000 Hz 频率范围内的吸声性能。主要原因为 50~1000 Hz 频率范围内，多层金属膜材料与梯度金属纤维多孔材料结合，增加了金属膜材料的微振动作用，提高了材料整体的吸声性能。

2.3 孔径的影响

选取孔径为 10 和 40 μm 制成的 2 组梯度结构(每层厚度 2 mm)，丝径均为 12 μm ，通过分别调换面向声源一面的材料来获得 2 种具有不同孔径的复合膜材料，得到孔径对复合膜材料吸声性能的影响规律，结果如图 3 所示。从

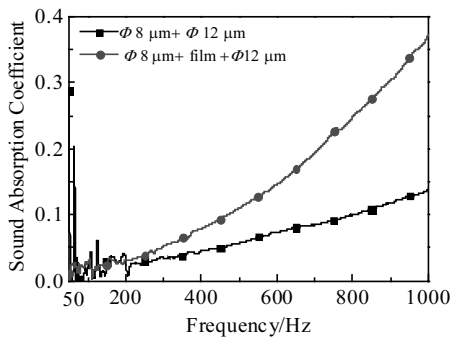


图 1 添加铜箔前后的复合材料吸声系数

Fig.1 Sound absorption coefficient of the complex materials with and without Cu film

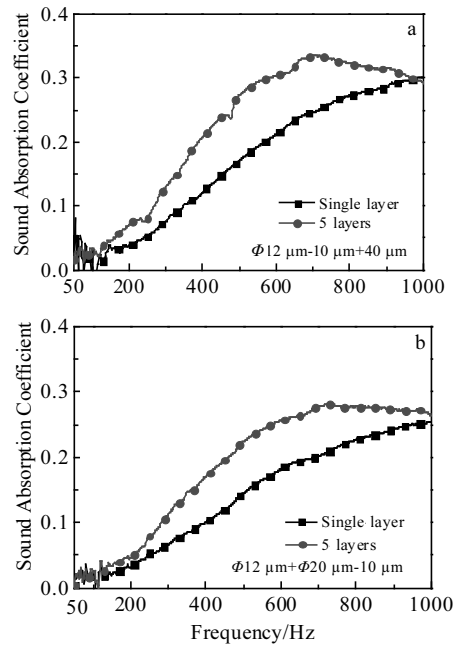


图 2 薄膜层数对复合材料吸声系数的影响

Fig.2 Effects of the film layers of the complex materials on sound absorption coefficient: (a) pore diameter gradient structure and (b) fiber diameter gradient structure

图 3 可以看出，孔径较小的金属纤维多孔材料面向声源会使复合膜材料在频率 50~1000 Hz 范围内有较好的吸声性能。主要原因为 50~1000 Hz 范围内的声波波长较长，在吸声结构厚度较薄的情况下，孔径较大的结构透声现象较孔径较小的结构严重，不利于声波能量的消耗，所以在此频率范围内，应选取小孔径材料面向声源。

2.4 丝径对吸声性能的影响

选取丝径为 8、12 和 20 μm 制成的 2 组梯度结构(梯度结构内部均附有相同层数的金属薄膜)，孔隙度均为 90%，每层厚度为 2 mm，通过分别调换面向声源一面的材料来组成 2 种具有不同丝径的复合膜材料来获得丝径对复合结构材料吸声性能的影响规律，结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，较细丝径的金属纤维多孔材料面向声源有利于复合膜材料在频率为 50~1000 Hz 范围内的吸声，并且在丝径条件不变的条件下，孔径较小可以提高复合结构在低频处的吸声降噪。主要原因是 50~1000 Hz 范围内的声波波长较长，在吸声结构厚度较薄的情况下，丝径越粗，材料表面对声波的反射作用越大，致使少量声波进入复合膜材料内部，最终导致复合膜材料的吸声作用大大降低。所以在此频率范围内，应选取细丝径材料面向声源。

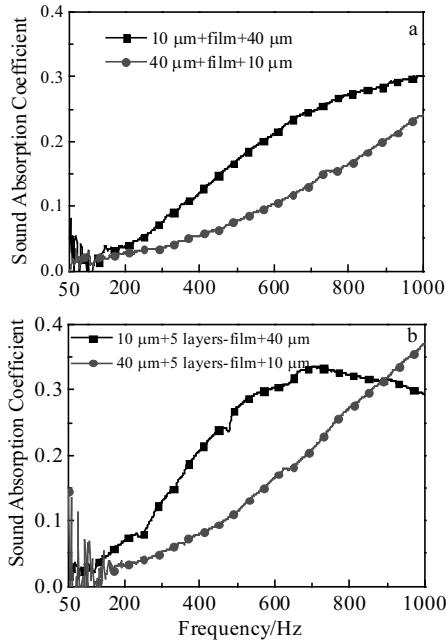


图 3 孔径对复合膜材料吸声系数的影响

Fig.3 Effects of the pore diameter of the complex materials on sound absorption coefficient: (a) one layer and (b) five layers

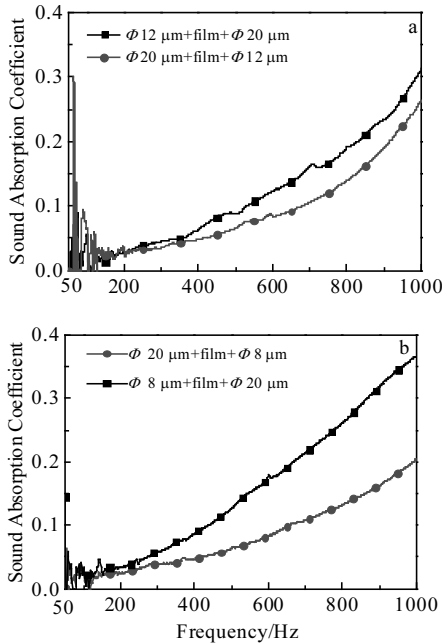


图 4 丝径对复合膜材料吸声系数的影响

Fig.4 Effects of the wire diameter of $\phi 12 \mu\text{m}$ (a) and $\phi 8 \mu\text{m}$ (b) of the complex materials on sound absorption coefficient

2.5 烧结结点对吸声性能的影响

利用不同烧结温度（1000 和 1300 °C）制备丝径为 8 和 20 μm 的金属纤维多孔材料（厚度为 2 mm），

同时切割出 $\phi 1.2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的测试样品，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金属纤维多孔材料内部的烧结结点数量（如表 1 所示），同时表 1 中还列出了复合膜材料的排列方式。

表 1 中的复合膜材料均为第 1 层面向声源，第 2 层紧靠背壁，每组复合材料内部均附有一层金属薄膜。通过对比 2 组金属纤维复合材料，获得烧结结点对复合膜材料吸声性能的影响规律，其结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出，具有不同数量烧结结点的复合膜材料在 50~1000 Hz 的频率范围内的吸声性能几乎没有差别，这与烧结结点对金属纤维多孔材料吸声性能的影响规律是相同的^[3]。由此可以得出，在利用金属纤维多孔材料作为吸声材料或者是复合结构的一部分时，在设计结构参数及制备工艺时，可以不考虑烧结结点这个参数，这不仅降低了设计材料结构的难度，缩短了制备工序，还节省了制备成本。

表 1 具有不同数量烧结结点的复合膜材料

Table 1 Complex film materials with different number sintering nodes

Sample	First layer, $\phi/\mu\text{m}$ -Number/ mm^2	Second layer	Third layer, $\phi/\mu\text{m}$ -Number/ mm^2
1#	20-13	Film	8-100
2#	20-25	Film	8-560
3#	8-100	Film	20-13
4#	8-560	Film	20-25

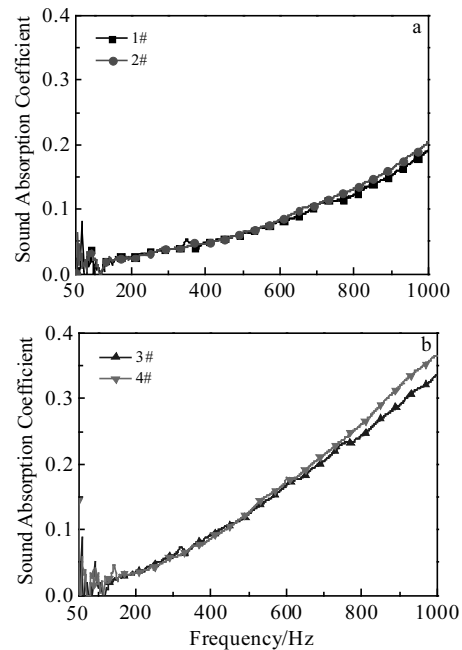


图 5 烧结结点对复合膜材料吸声系数的影响

Fig.5 Effects of the sintering node of the complex materials on sound absorption coefficient: (a) 1#, 2# and (b) 3#, 4#

3 结 论

1) 薄膜材料的加入使金属纤维多孔材料的低频吸声性能有明显提高, 500~1000 Hz 的频率范围内的平均吸声系数为 0.23。

2) 选取金属纤维多孔材料复合薄膜结构时的主要原则为: 面向声源一侧的金属纤维要选择细丝径、小孔径的材料, 中间金属薄膜层在允许厚度范围内选择多层组成较厚的金属微振动层。

3) 烧结结点的数量对金属纤维多孔复合膜材料的低频吸声性能无影响, 所以制备金属纤维多孔复合膜材料时, 选取低温烧结技术, 既节约制备成本, 缩短制备工期, 又能得到吸声性能优异的复合膜材料。

参考文献 References

- [1] Li Yong(李 勇). *Physics(物理)*[J], 2017, 46(11): 721
- [2] Li Yong, Assouar B M. *Applied Physics Letters*[J], 2016, 108(6): 3502
- [3] Ao Qingbo(敖庆波), Wang Jianzhong(王建忠), Ma Jun(马 军) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2019, 48(48): 3241
- [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], 2018, 47(2): 697
- [5] Wang Caiping(王彩萍), Sun Tianyu(孙天宇), Wang Xiaojie(王晓杰). *Acta Materialiae Compositae Sinica(复合材料学报)*[J], 2018, 35(1): 24
- [6] Cheng Wei, Duan Cuiyun, Liu Peisheng et al. *Trans Nonferrous Met Soc China*[J], 2017, 27(7): 1989
- [7] Zhao Junjuan(赵俊娟), Li Xianhui(李贤徽), Wang Yueyue(王月月). *Acta Acustica(声学学报)*[J], 2017, 42(2): 241
- [8] Niu Jiamin(牛嘉敏), Wu Jiuhui(吴九汇). *Journal of Vibration and Shock(振动与冲击)*[J], 2018, 37(19): 45
- [9] Tang Yufan, Ren Shuwei, Meng Han et al. *Scientific Reports*[J], 2017, 7(2): 43340
- [10] Me Jun, Ma Guancong, Yang Min et al. *Nature Communications* [J], 2012, 27: 7561
- [11] Ma G, Yang M, Xiao S et al. *Nature Materials*[J], 2014, 13(9): 873
- [12] Chen Changru, Du Zhibo, Hu Gengkai et al. *Applied Physics Letters*[J], 2017, 110(22): 1903
- [13] Alexandre Leblanc, Antoine Lavie. *The Journal of the Acoustical Society of America*[J], 2017, 141: 538
- [14] Ao Qingbo, Wang Jianzhong, Tang Huiping et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2015, 44(11): 2646
- [15] 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
- [16] Ao Qingbo(敖庆波), Tang Huiping(汤慧萍), Wang Jianzhong(王建忠) et al. *Materials Review(材料导报)*[J], 2014, 28(6): 66
- [17] 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
- [18] AO QingBo, Wang Jianzhong, Ma Jun et al. *Materials Science Forum*[J], 2018, 933: 367
- [19] Tang Huiping(汤慧萍), Wang Jianzhong(王建忠). *Porous Metal Fiber Materials(金属纤维多孔材料)*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016: 4

Lower Frequency Sound Absorption Properties of Ultra-thin Metal Fiber Complex Film Materials

Ao Qingbo, Wang Jianzhong, Ma Jun, Li Ye, Wu Chen, Tang Huiping

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

Abstract: Focusing on the exigent requirement of ultra-thin sound absorption structure in the limited space for noise treatment, using stainless steel fiber felt as the raw material, the film materials composed of stainless steel fiber porous material and metal film were prepared by low temperature sintering technology. The sound absorption coefficient of complex film materials was tested by B&K acoustic test platform in the frequency range from 50 to 1000 Hz, and the effect of structural parameters on the sound absorption performance of complex film materials was analyzed. The effects of pore structure of metal fiber porous materials (pore diameter, wire diameter, sintering node) and the number of metal film layers on the sound absorption performance of complex film materials were studied. Results show that in the frequency range of 50 to 1000 Hz, the optimal structure of ultra-thin complex film materials is based on the order of the porous metal fiber material that fine wire diameter, small pore faces to sound source, while thick wire diameter and large pore is in the back. Complex copper-film inside the materials can effectively improve the sound absorption performance at low frequency.

Key words: metal fiber; complex structure; sound absorption properties; metal film; low frequency

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