

# 梯度纤维多孔材料的吸声特性及结构优化

敖庆波, 王建忠, 李爱君, 支浩, 马军, 许忠国, 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:** 利用金属纤维为原料, 制成内部具有梯度孔结构的金属纤维多孔吸声材料。梯度孔结构可分为孔隙度梯度和丝径梯度, 分别研究了这 2 种梯度结构的吸声特性。结果表明, 厚度在 6~30 mm 范围内时, 孔隙度梯度结构按照孔隙度从大到小的顺序排列有利于提高全频的吸声性能; 厚度为 3 mm 时, 孔隙度梯度结构的排列顺序对吸声性能的影响规律恰好相反; 丝径梯度结构的吸声特点是当厚度为 3 mm 时, 细丝径纤维多孔材料在前, 全频吸声性能较好; 当厚度 $\geq 15$  mm 时, 粗丝径纤维多孔材料在前, 全频吸声性能好; 厚度在 3~15 mm 之间, 2 种排列方式的丝径梯度结构的吸声-频率曲线存在一个交点, 随着厚度的增加, 该交点逐渐向低频方向移动。

**关键词:** 金属纤维; 梯度结构; 吸声特性; 厚度

中图分类号: TF125.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)02-0697-04

近年来, 金属纤维多孔材料作为吸声降噪材料已经广泛地应用于各个领域, 如化工厂、炼油厂等大型管道输送系统中, 作为吸声隔声材料安装在管道及阀门外, 降噪效果很显著, 典型的降噪量为 30 dB<sup>[1]</sup>。该应用环境下对材料的使用厚度没有限制, 所用金属纤维多孔材料的厚度大概在 30~90 mm 之间选取; 对于电子元器件等限域空间内的降噪, 则使用超薄金属纤维多孔材料作为吸声材料, 降噪效果很明显, 使电子元器件的工作稳定性提高 1 倍以上<sup>[2]</sup>。限域空间对材料的厚度要求很严格, 由于使用空间的限制, 吸声材料的厚度限制在 3 mm 以内; 作为航空发动机高温声衬材料, 使用环境的温度为 500 °C, 同时还伴随着强气流冲击, 高声强 150 dB。宽频噪声源, 利用金属纤维多孔材料制成高温声衬材料, 安装在发动机外侧, 其隔声量达到 20 dB, 材料厚度设定在 10~30 mm 之间。随着金属纤维多孔材料在噪声控制领域应用的不断扩展, 针对金属纤维多孔材料吸声性能的研究工作变得十分重要。由于单层材料的孔结构单一, 吸声频率曲线存在峰值-谷值现象, 在峰值频率处的吸声系数较大, 其它频率的吸声性能较差。在实际应用时, 大多选取梯度纤维多孔材料, 梯度纤维多孔材料较单层材料有着较好的宽频吸声性能, 通过具有不同孔结构的单层材料复合在一起, 避免了峰值频率吸声性能好而其它频率吸声性能差的缺点<sup>[3,4]</sup>。

研究者们针对金属纤维多孔材料的丝径、孔隙度、

厚度及空腔对材料吸声性能的影响规律进行了系统的研究, 还涉及到部分梯度结构的吸声特性研究<sup>[3-15]</sup>。并且为获得较好的吸声性能, 利用穿孔板与金属纤维多孔材料进行复合, 该复合结构具有较好的吸声性能<sup>[16]</sup>。

不同厚度的金属纤维多孔材料的吸声特性规律不同。为使金属纤维多孔材料在实际应用中能够发挥更好的吸声降噪性能, 本实验针对不同厚度条件下梯度结构的吸声规律进行了研究。材料为 316L 不锈钢纤维, 梯度结构的总厚度设计为 3、6、9、15、30 mm, 测试了不同厚度的梯度结构的吸声性能, 并对对比分析了梯度结构多孔材料的吸声规律。

## 1 实验

孔隙度梯度结构和丝径梯度结构的制备方法与文献[3-7]的制备方法一致。单层纤维多孔材料的制备过程可简述为配毡、称重、装舟、高温烧结、压制、切割, 标准声学测试样尺寸为  $\Phi 29$  mm,  $\Phi 100$  mm, 切割精度为  $-0.2$  mm。梯度结构的制备方法: 将多个单层纤维多孔材料叠放在一起, 按照丝径或孔隙度从大到小的顺序排列, 烧结时, 将丝径较粗的一层或孔隙度较小的一层放在底部即可。

组成梯度结构的材料每层厚度是相等的, 例如: 梯度结构的总厚度为 3 mm, 由 2 层材料组成, 每层厚度为 1.5 mm; 梯度结构的总厚度为 30 mm, 由 3 层材料组成, 每层厚度为 10 mm。

收稿日期: 2017-02-23

基金项目: 国家科技支撑计划 (2012BAC02B05); 国家自然科学基金 (51301141); 陕西省科技创新团队 (2015KCT-11)

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

采用丹麦 B&K 公司的 4206 型双传声器阻抗测量管，按照 GB J85-1985《驻波管吸声系数与声阻抗率测量规范》检测金属纤维多孔材料的吸声系数。常声压频率范围为 50~6400 Hz。

## 2 结果与讨论

### 2.1 孔隙度梯度结构的吸声特性

选取 2 种孔隙度的金属纤维多孔材料制成梯度结构，丝径均为 8 μm，孔隙度梯度结构总厚度设计为 3、6、10、20、30 mm。对不同的孔隙度梯度结构多孔材料进行吸声性能测试，测试结果如图 1 所示。

如图 1a~1d 所示，厚度从 30 mm 逐级减小到 6 mm，当孔隙度按照从大到小的顺序排列时，大孔隙度面向声源。这样不同大小的孔排列在一起，形成了一个近似喇叭口状的结构，既有利于声波的进入，也有利于声能的耗散。每层材料的峰值频率不同，当组成一个整体材料后，其吸声频带增加，最终达到了宽频吸声效果。文献[3,6]中也得出相同的结论，其中文献[6]中所设计的孔隙度梯度结构的厚度为 30~75 mm。

如图 1e 所示，当孔隙度按照从小到大的顺序排列时，小孔隙度面向声源有利于全频吸声性能的提高。这与较厚梯度结构的孔隙度排列顺序正好相反。总厚度为 3 mm 的材料可称之为超薄材料。因为厚度对声波的传播及声能的耗散有着很大的影响，当厚度较薄时，由于与材料厚度相比，声波波长较长，在超薄材

料中传播路径较短，且内部孔结构即传播通道的复杂程度也较小，所以导致超薄金属纤维多孔材料及梯度结构全频吸声性能较差。如果大孔面向声源，会导致声波直接穿透材料，无法达到吸声效果，而小孔面向声源，则会使声波无法全部穿透材料，使部分声波在材料内部运动从而耗散声能。

金属纤维多孔材料的中流量平均孔径经验公式<sup>[17]</sup>为：

$$d = 6.15D\epsilon^{3.35} \tag{1}$$

式中， $d$  为中流量平均孔径（以下简称为平均孔径）； $D$  为纤维丝径； $\epsilon$  为纤维毡孔隙度。

根据式(1)可以得出，同一丝径条件下，随着孔隙度的增加，材料的平均孔径增大。上述内容与文献[18]中的结论结合后得出以下结论：对于不同厚度的单层材料，孔隙度存在一个吸声最佳范围值，且这个值随着厚度的增加有所提高。对于较厚的金属纤维多孔材料，该孔隙度最佳值范围在 90%~95%之间，而对于较薄的金属纤维多孔材料来说，孔隙度最佳范围值则在 70%~80%之间。这与孔隙度梯度结构的吸声规律相符，即在较薄的情况下，孔隙度梯度结构小孔隙度材料在前，全频吸声性能较好，在较厚的情况下，孔隙度梯度结构大孔隙度材料在前，全频吸声性能较好。

按照式(1)计算出不同丝径和不同孔隙度的金属纤维多孔材料对应的平均孔径，如表 1 所示。从表中可以看出，同孔隙度的金属纤维多孔材料，丝径越粗，

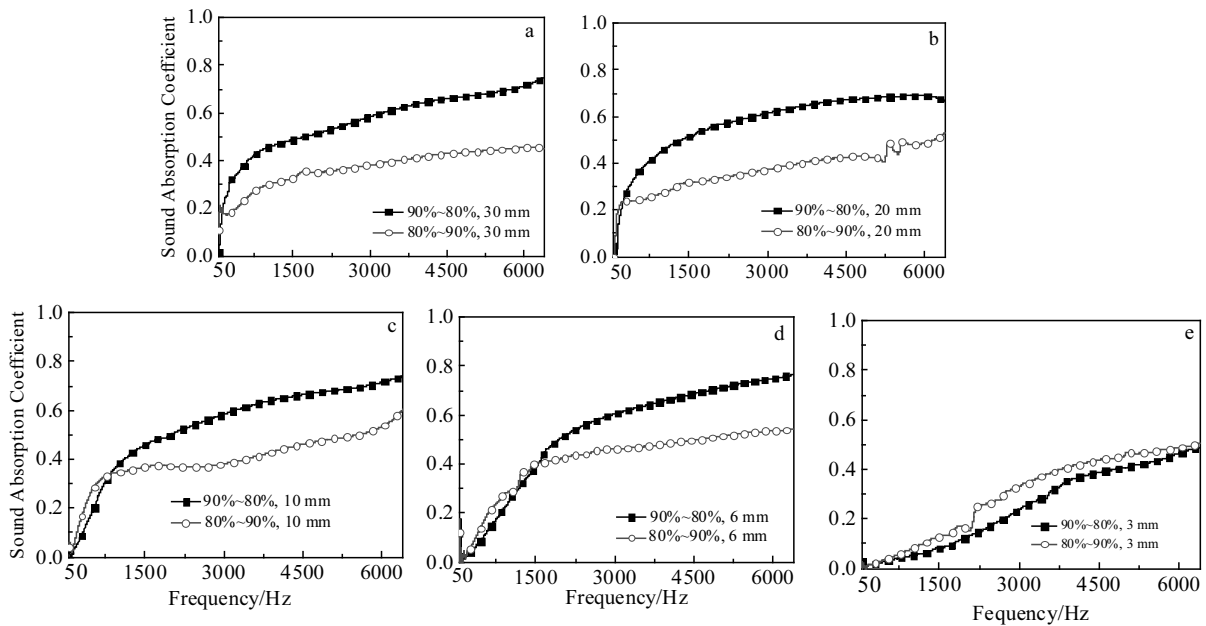


图 1 不同厚度的孔隙度梯度结构的吸声-频率曲线 (丝径均为 8 μm)

Fig.1 Sound absorption vs frequency curves of the porosity gradient structure (fiber diameter 8 μm) with different thicknesses: (a) 30 mm, (b) 20 mm, (c) 10 mm, (d) 6 mm, and (e) 3 mm

表 1 具有不同丝径与孔隙度的纤维多孔材料的平均孔径  
**Table 1 Mean pore size of the fibrous porous materials with different wire diameters and porosity ( $\mu\text{m}$ )**

Porosity/%	Wire diameter/ $\mu\text{m}$		
	8	12	20
85	28	42	71
90	34	52	86

材料的平均孔径越大；而同丝径的金属纤维多孔材料，孔隙度越大，材料的平均孔径越大。

**2.2 丝径梯度结构的吸声特性**

不同丝径的单层纤维多孔材料组成的梯度结构，不仅可以使材料整体的结合强度提高，还可以降低材料在成形过程中的烧结温度，这样使材料的制备成本大大降低，也有利于拓宽金属纤维多孔材料在工程上的应用。选取 3 种丝径的金属纤维多孔材料制成梯度结构，丝径分别为 8、12、20  $\mu\text{m}$ ，孔隙度均为 90%，总厚度设计为

3、6、9、15、30 mm（每层厚度均相等）。对不同丝径梯度结构进行吸声性能测试，测试结果如图 2 所示。

当厚度为 3 mm 时，丝径较细的一面向声源，有利于材料全频吸声性能的提高；当厚度增加到 6 mm 时，2 种排列的丝径梯度结构的吸声系数曲线出现交点，交点处的频率为 5332 Hz，高于此频率时，粗丝径纤维在前的丝径梯度结构吸声性能好，低于该频率时，细丝径纤维在前的丝径梯度结构吸声性能好；当厚度增加到 9 mm 时，吸声频率曲线的交点向左移动到 2780 Hz 处，高于此频率时，粗丝径纤维在前的丝径梯度结构吸声性能好，低于此频率时，细丝径纤维在前的丝径梯度结构吸声性能好；当厚度增加到 15 mm 时，交点继续向左移动至 958 Hz 处，低于该频率的两条曲线几乎重合，高于此频率时，粗丝径纤维在前的丝径梯度结构吸声性能较好。当厚度增加到 30 mm 时，粗丝径的纤维面向声源，在全频范围内梯度结构的吸声性能表现最好。

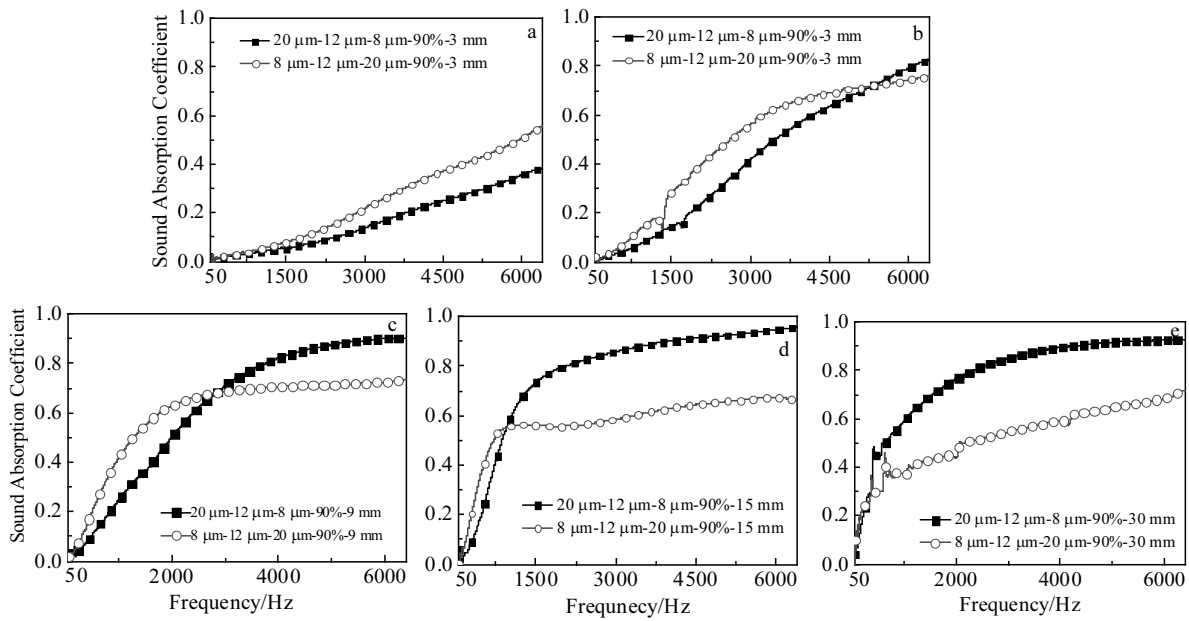


图 2 不同厚度的丝径梯度结构的吸声-频率曲线（孔隙度均为 90%）

Fig.2 Sound absorption vs frequency curves of the fiber diameter gradient structure (porosity 90%) with different thicknesses: (a) 3 mm, (b) 6 mm, (c) 9 mm, (d) 15 mm, and (e) 30 mm

**3 结论**

1) 对于总体厚度较厚的梯度结构 ( $\geq 6$  mm)，孔隙度梯度结构按照孔隙度从大到小的顺序排列，较大孔隙度的一面面向声源有利于提高全频的吸声性能，而对于超薄孔隙度梯度结构 ( $\approx 3$  mm)，规律则恰好相反，小孔隙度的一面面向声源有利于全频吸声性能的提高。

2) 在较薄的厚度条件下 (3 mm)，丝径梯度结构的细丝径纤维多孔材料在前，全频吸声性能较好；在较厚的厚度条件下 ( $\geq 15$  mm)，粗丝径纤维多孔材料在前，全频吸声性能较好；在中等厚度条件下 (3~15 mm)，2 种排列方式的吸声-频率曲线存在一个交点，随着厚度的增加，该交点逐渐向低频移动。

## 参考文献 References

- [1] Ao Qingbo(敖庆波), Tang Huiping(汤慧萍), Lan Tiezhu(兰铁柱) *et al. Journal of Function Materials(功能材料)*[J], 2011, 42(8): 759
- [2] 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
- [3] Ao Qingbo(敖庆波). *Thesis for Master (硕士学位论文)*[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008
- [4] Bao Tengfei(鲍腾飞). *Thesis for Master (硕士学位论文)*[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012
- [5] Meng H, Ao Q B, Xin F X *et al. Composites Science and Technology*[J], 2015, 107: 10
- [6] Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊), Ge Yuan(葛渊) *et al. Rare Metal Materials and Engineering (稀有金属材料与工程)*[J], 2007, 36(12): 2220
- [7] 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): 1327
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Wang Chao-Nan, Torng Jiunn-Hwan. *Applied Acoustics*[J], 2001, 62: 447
- [12] Peng Feng(彭锋), Wang Xiaolin(王晓林), Sun Yan(孙艳) *et al. Chinese Journal of Acoustics(声学学报)*[J], 2009, 34(3): 266
- [13] Zhang Bo, Chen Tianning, Zhao Yuyuan *et al. Acoustical Society of America*[J], 2012, 132(3): 1436
- [14] 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
- [15] Meng H, Ao Q B, Tang H P *et al. Science China-Technological Sciences*[J], 2014, 57(11): 2096
- [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] Xi Zhengping(奚正平), Tang Huiping(汤慧萍). *Sintered Metal Porous Materials(烧结金属多孔材料)*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 217
- [18] 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

## Sound Absorption Characteristics and Structure Optimization of Gradient Fibrous Porous Materials

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

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

**Abstract:** Sound absorption materials were prepared using metal fibre as the raw material. The pore of the prepared material possessed gradient arrangement. The gradient pore structure can be carved up two kinds, porosity gradient structure (PGS) and fiber diameter gradient structure (FGS). The sound absorption characteristics of two kinds of the structures were studied. The results indicate that when the thickness is between 6 mm and 30 mm, the porosity of the PGS arranged from high to low, can enhance the sound absorption performance in the whole frequency range from 50 Hz to 6400 Hz. But this law is just opposite to that of the thinner PGS when thickness is about 3 mm. The characteristic of the FGS is as follows. When the thin fiber is in the front of the structure (the thickness is 3 mm), the sound absorption performance is very well in whole frequency; when the thick fiber is in the front of the structure (the thickness is  $\geq 15$  mm), the sound absorption performance is very well in whole frequency. When the thickness is in the range from 3 mm to 15 mm, there is an intersection point between the sound absorption-frequency curves of the FGS with two kinds of arranging way. The intersection point moves to lower frequency with the increasing of the thickness,

**Key words:** metal fibre; gradient structure; sound absorption characteristics; thickness

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