

## 不锈钢纤维多孔材料的吸声性能

汤慧萍, 朱纪磊, 王建永, 葛 渊, 李 程, 邸小波

(西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室, 西安 710016)

**摘 要:** 采用不锈钢纤维为原料制备不同孔隙性能的纤维多孔材料, 采用驻波管法检测该纤维多孔材料的空气声吸收系数, 研究材料的孔隙度、纤维直径以及材料厚度等参数对吸声性能的影响, 同时研究在材料背后设置空气层以及空气层厚度对材料吸声性能的影响关系。结果表明: 实验采用的不锈钢纤维多孔材料具有较好的吸声性能, 材料的孔隙度越高、厚度越大、纤维越细, 材料的吸声性能越好, 在材料背后设置空气层可显著改善其低频吸声性能, 材料背后的空气层厚度越大, 材料的低频吸声性能越好。

**关键词:** 不锈钢纤维; 多孔材料; 吸声材料; 吸声系数

中图分类号: TB 31; TB 535

文献标识码: A

## Sound absorbing properties of stainless steel fiber porous materials

TANG Hui-ping, ZHU Ji-lei, WANG Jian-yong, GE Yuan, LI Cheng, DI Xiao-bo

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

**Abstract:** The stainless steel fiber with different diameters was introduced to fabricate porous sound absorbing materials, whose sound absorption coefficient was measured by standing wave tube method. The effects of porosity, fiber diameter, and thickness of the fibrous porous materials on the sound absorption coefficient were investigated, and the sound absorbing performance of the fibrous materials with airspace on back with different thickness was also analyzed. The results show that the sound absorption coefficient increases with increasing porosity and thickness of fibrous materials. The airspace shows a great influence on the sound absorption coefficient at lower frequency, the thicker the airspace, the higher the sound absorption coefficient.

**Key words:** stainless steel fiber; porous materials; sound absorbing materials; sound absorbing coefficient

噪声污染是当今世界公认的环境问题, 它与空气污染和水污染是当代环境的三大污染源<sup>[1]</sup>, 从 20 世纪 50 年代起, 随着工业、运输业的迅猛发展, 噪声污染日益严重<sup>[2]</sup>。噪声的危害是多方面的, 它不但会加速建筑物和机械结构的老化, 影响设备及仪表的精度和使用寿命<sup>[3]</sup>, 还严重影响人类的生活质量, 损害人的听觉系统、心血管系统和神经系统<sup>[4]</sup>。噪声控制已成为一个有关高科技、环境以及人类协调发展急需解决的

重要课题<sup>[5]</sup>, 目前主要的解决办法是使用吸声材料<sup>[6-7]</sup>, 这也被看作是一种有效的被动式吸声降噪方法<sup>[8]</sup>。

金属纤维多孔材料是一类重要的吸声材料<sup>[9-10]</sup>, 不但可用于水下低频吸声<sup>[11]</sup>, 而且具有强度高、易加工、耐高温和抗恶劣环境能力强等优点<sup>[12-13]</sup>, 是一类具有良好发展前途的吸声材料<sup>[14-15]</sup>。本文作者采用不锈钢纤维制备不同孔隙性能的纤维多孔材料<sup>[16-17]</sup>, 研究不锈钢纤维多孔材料的孔隙度、透气度和厚度等参

数对材料吸声性能的影响。

## 1 实验

采用 316L 不锈钢纤维为原料制备具有不同孔隙性能的不锈钢纤维多孔吸声材料,选用的纤维直径分别为 50 和 100  $\mu\text{m}$ 。具体制备过程如下:将束状的不锈钢纤维剪切成 60 mm 长的纤维段,纤维段经分散处理后均匀地铺入模具内,铺制后的样品受压预定型后在真空下烧结,烧结后的样品按照设计的厚度(10 mm 和 25 mm)压制成型,然后加工成吸声性能检测所需的尺寸  $d$  100 mm 和  $d$  29 mm,其中  $d$  100 mm 样品用于检测 0~1 600 Hz 频率范围内的吸声性能, $d$  29 mm 样品用于检测 0~6 400 Hz 频率范围内的吸声性能。为研究孔隙度、透气度和厚度等参数对不锈钢纤维多孔材料吸声性能的影响,分别制备多种孔隙结构的不锈钢纤维多孔材料样品,各样品的性能如表 1 所列。

表 1 不锈钢纤维多孔材料样品的结构性能

Table 1 Characteristic of stainless steel fibrous porous materials

| Sample No. | Fiber diameter/ $\mu\text{m}$ | Porosity/% | Permeability/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ | Thickness/mm |
|------------|-------------------------------|------------|--|--------------|
| 1          | 100                           | 88         | 5 860  | 10           |
| 2          | 100                           | 77         | 3 570  | 10           |
| 3          | 50                            | 73         | 2 430  | 10           |
| 4          | 50                            | 91         | 11 739   | 25           |
| 5          | 50                            | 85         | 5 434  | 25           |
| 6          | 100                           | 91         | 19 926   | 25           |
| 7          | 100                           | 85         | 5 752  | 25           |

采用驻波管法,按照 GB J85—1985《驻波管法吸声系数与声阻抗率测量规范》检测不锈钢纤维多孔材料的空气声吸收系数,检测设备采用丹麦 B&K(Brüel & Kjær)公司的 4206 型双传声器阻抗测量管<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 孔隙度对吸声性能的影响

图 1 所示为孔隙度不同的 3 种厚度 10 mm 样品的吸声频率曲线,检测的频率范围为 0~5 000 Hz。纤维多孔吸声材料在低频段吸声系数较小,当频率提高时,

吸声系数将增大,并在共振频率  $f_r$  出现第一个共振吸声峰,在  $f_r$  以上时吸声系数在峰值和谷值间的范围内起伏变化。从图 1 可以看出,3 种不锈钢纤维多孔材料的中高频吸声性能较好,但低频吸声性能较差,这是由多孔材料的吸声原理决定的,高频声波可使孔隙间空气质点的振动速度加快,空气与孔壁间的粘滞损耗也加强,使得纤维多孔材料的高频吸声性能优于低频吸声性能<sup>[19]</sup>。

对比图 1 中 3 种孔隙度样品的吸声频率曲线发现,在不同的频率范围,不同孔隙度样品的吸声性能不同:样品的孔隙度越低,中低频吸声性能越好,而高频吸声性能越差。但材料孔隙度过低,虽可一定程度上改善低频吸声性能,但由于声波较难进入材料内部,样品的总体吸声性能较差。如对孔隙度为 73% 的 3 号样品,其吸声系数最大值仅为 0.72。

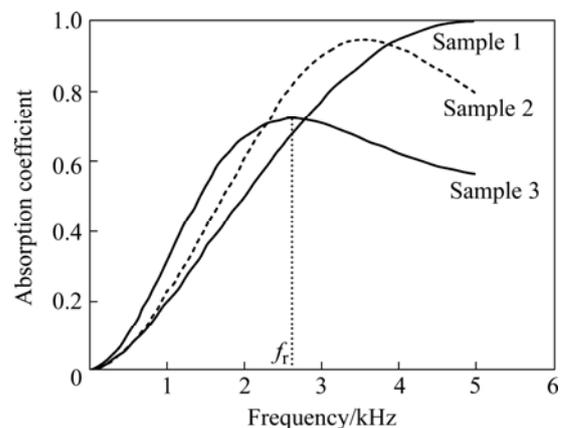


图 1 不同孔隙度样品的吸声性能对比

Fig.1 Comparison of absorption coefficient of samples with different porosities

从图 1 可见,吸声峰的位置(共振频率)与孔隙度有关,孔隙度越高,对应的共振频率越大。如孔隙度为 73% 的 3 号样品出现吸声峰值的第一共振频率约为 1 300 Hz,孔隙度为 77% 的 2 号样品第一共振频率约为 3 500 Hz,孔隙度为 88% 的 1 号样品在 5 000 Hz 时吸声系数仍未达到峰值。

### 2.2 纤维直径对吸声性能的影响

图 2 所示为纤维直径分别为 50 和 100  $\mu\text{m}$  的两种样品的吸声性能对比,两个样品的孔隙度均为 85%,透气度(5 434  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa} \cdot \text{h})$ 和 5 752  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa} \cdot \text{h})$ )相当。从图 2 可明显看出,在孔隙度和透气性能相同时,纤维直径 50  $\mu\text{m}$  样品与纤维直径 100  $\mu\text{m}$  的样品相比,前者的低频吸声性能较差,而高频吸声性能较好。

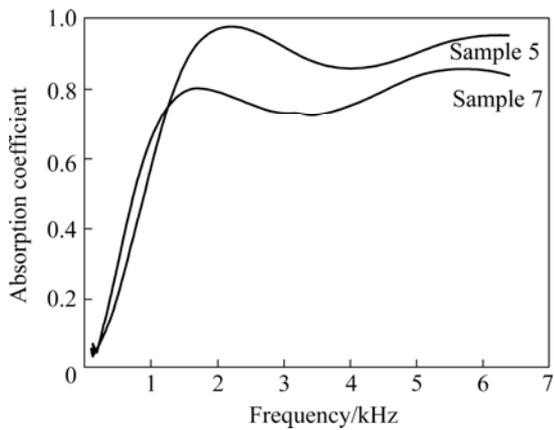


图 2 纤维直径对吸声性能的影响  
**Fig.2** Influence of diameter of fibers on absorption coefficient

图 2 中两种不同直径纤维多孔样品均出现吸声峰和吸声谷, 不锈钢纤维多孔材料在吸声峰频率范围内吸声系数较高, 而在吸声谷频率范围吸声系数较低。出现吸声峰和吸声谷的原因是: 当材料背面空腔深度等于  $1/4$  波长的奇数倍时, 其相应的频率可获得最大的吸声系数。因为离刚性壁面  $1/4$  波长处的声压为零, 但空气质点的振动速度最大, 因此材料所起的摩擦阻尼耗损的声能也最大, 从而使材料产生最大的吸声效果。离刚性壁面  $1/2$  波长处的声压最大, 这时的质点振动速度为零, 相应频率材料的吸声系数最小。影响吸声峰和吸声谷出现频率位置的因素除前述的孔隙度外, 还有纤维的直径。从图 2 中可以看出, 随着纤维直径的减小, 吸声峰和吸声谷向高频方向移动。

图 3 所示为纤维直径分别为 50 和 100  $\mu\text{m}$ 、孔隙度分别为 91% 和 85% 的 4 种样品在 0~1 600 Hz 的吸声

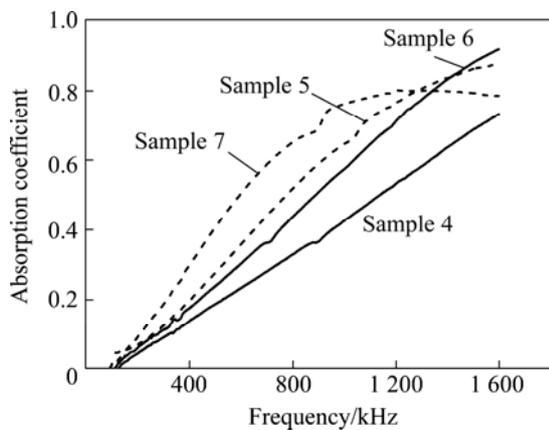


图 3 纤维直径对的中低频吸声性能的影响  
**Fig.3** Influence of diameter of fibers on absorption coefficient at frequency from 0 to 1 600 Hz

性能。对比图 3 中 4 号和 6 号、样品以及 5 号和 7 号样品这两组孔隙度相同、纤维直径不同的样品的吸声频率曲线可知, 纤维的直径越大, 材料的中低频吸声性能越好。

2.3 材料厚度对吸声性能的影响

图 4 所示为两种厚度分别为 10 和 25 mm 的样品的吸声性能对比, 两种样品的纤维直径均为 100  $\mu\text{m}$ , 其透气度相当。尽管 1 号样品的孔隙度(88%)高于 7 号样品的孔隙度(85%), 但图 4 中 7 号样品的吸声性能明显优于 1 号样品的吸声性能, 说明材料的厚度对吸声性能影响显著, 材料越厚, 吸声性能越好。

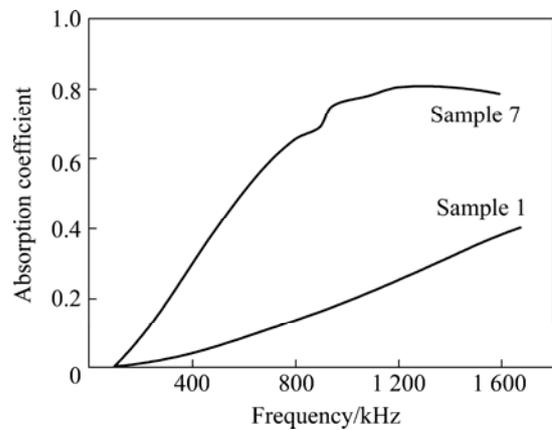


图 4 不同厚度样品的吸声性能对比  
**Fig.4** Comparison of absorption coefficient of samples with different thickness

2.4 空气层对不锈钢纤维多孔材料吸声性能的影响

图 5 所示为 1 号和 2 号样品背后有无空气层(空腔)

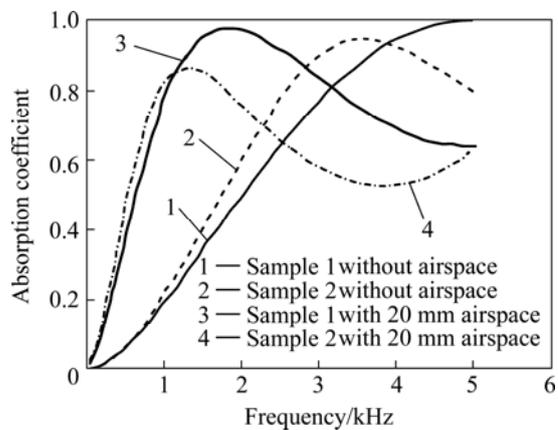


图 5 样品背面有无空气层时的吸声性能对比  
**Fig.5** Comparison of absorption coefficient of samples without and with 20 mm airspace on back

时的吸声性能对比。

从图5可以看出,样品背后增加空气层可显著提高不锈钢纤维多孔材料的中低频吸声性能,但在高频时由于出现吸声谷,增加空气层后样品的吸声性能有所降低。当多孔材料背后设置空气层时,相当于增加材料厚度,因此在材料背后设置空气层后其中低频吸声性能有所提高。设置空气层后材料的吸声频率曲线出现吸声峰和吸声谷,与厚度较高的纤维多孔材料出现吸声峰和吸声谷的原理类似,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;而为1/2波长的整数倍时,吸声系数最小。

图6所示为1号和2号样品背后设置厚度分别为20和40mm的空气层时的吸声频率曲线。

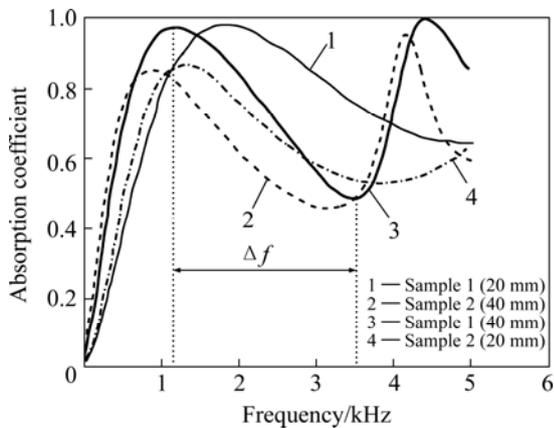


图6 设置20mm和40mm厚空气层后样品的吸声性能对比

Fig.6 Comparison of absorption coefficient of sample 1 and sample 2 specimen with different thickness of airspace on back

对比图6中两种样品在空气层厚度不同时的吸声频率曲线可以看出,增加空气层的厚度可进一步提高材料的中低频吸声性能,但对高频吸声性能没有明显的改善作用。增加空气层厚度后,材料的吸声峰和吸声谷更加明显,相邻吸声峰和吸声谷的下半频带宽 $\Delta f$ 变小,吸声系数随频率的升高而起伏的速度更快。

综合上述检测结果及分析可知,通过增加样品厚度以及设置空气层等方式可改善材料的中低频吸声性能;材料的吸声系数的总变化趋势是随频率的增加而增大,在高频段不同程度的起伏是各种多孔吸声结构的共性问题,且吸声频率曲线中峰值谷值出现的频率位置受材料的孔隙度、纤维直径等的影响,因此不同孔隙结构的纤维多孔材料在吸声性能上具有互补作用。因此,可尝试将金属纤维材料的孔隙结构设计成由多层具有不同孔隙度的材料构成,这种孔隙度梯度

结构为同时改善多孔材料的低频吸声性能以及保持中高频段良好稳定的吸声系数提供了一种思路。

### 3 结论

1) 材料的孔隙度、厚度、纤维直径等参数对其吸声性能有显著影响,孔隙度越小、厚度越大、纤维直径越大,材料的中低频吸声性能越好。

2) 不锈钢纤维多孔材料的中低频吸声系数随着声音频率的提高而提高,在高频段出现不同程度的起伏。材料的孔隙度、纤维直径均对出现吸声峰和吸声谷的声音频率有影响:随着材料孔隙度的降低、纤维直径的增加,吸声峰和吸声谷均向低频方向移动。

### REFERENCES

- [1] 刘惠玲. 环境噪声控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.  
LIU Hui-ling. Environmental noise control[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002.
- [2] 王滨生, 张建平. 泡沫金属吸声材料制备及吸声性能的研究[J]. 化学工程师, 2003(4): 8-10.  
WANG Bin-sheng, ZHANG Jian-ping. An investigation on manufacture of foamed copper and absorbing property[J]. Chemical Engineer, 2003(4): 8-10.
- [3] 张守梅, 曾令可, 黄其秀, 黄浪观. 环保吸声材料的发展动态及展望[J]. 陶瓷学报, 2002, 23(1): 56-61.  
ZHANG Shou-mei, ZENG Ling-ke, HUANG Qi-xiu, HUANG Lang-guan. Development and improvement for environmental protection sound-absorbing material[J]. Journal of Ceramic, 2002, 23(1): 56-61.
- [4] 潘仲麟, 翟国庆. 噪声控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 27.  
PAN Zhong-lin, ZHAI Guo-qing. Noise control technologies[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 27.
- [5] XIE Zhen-kai, Ikeda T, Okuda Y, Nakajima H. Sound absorption characteristics of lotus-type porous copper fabricated by unidirectional solidification[J]. Mater Sci Eng A, 2004, 386: 390-395.
- [6] 苑改红, 王完成. 吸声材料研究现状与展望[J]. 机械工程师, 2006(6): 17-19.  
YUAN Gai-hong, WANG Xian-cheng. Current status and prospects of sound absorbing materials[J]. Mechanical Engineer, 2006(6): 17-19.
- [7] Sgard F C, Olny X, Atalla N, Castel F. On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials[J]. Applied Acoustics, 2005, 66: 625-651.

- [8] Cuesta M, Cobo P, Fernández A, Pfitzschner J. Using a thin actuator as secondary source for hybrid passive/active absorption in an impedance tube[J]. *Applied Acoustics*, 2006, 67: 15–27.
- [9] 张燕, 崔喆, 陈花玲. 金属纤维材料的吸声特性及应用研究[J]. *噪声与振动控制*, 1999(5): 32–36.  
ZHANG Yan, CUI Zhe, CHEN Hua-ling. Sound absorption characteristics and application of metal fiber materials[J]. *Noise and Vibration Control*, 1999(5): 32–36.
- [10] WANG Chao-nan, Torng J H. Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials[J]. *Applied Acoustics*, 2001, 62: 447–459.
- [11] 王晓林. 金属多孔材料吸声板的优化模型[J]. *声学学报*, 2007, 32(2): 116–121.  
WANG Xiao-lin. An optimized model for porous metal sound absorbers[J]. *Chinese Journal of Acoustics*, 2007, 32(2): 116–121.
- [12] 刘海涛, 朱锡, 石勇, 董鹏. 多孔性吸声材料的研究进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2004, 22(6): 934–938.  
LIU Hai-tao, ZHU Xi, SHI Yong, DONG Peng. Developments of porous sound-absorbing materials[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2004, 22(6): 934–938.
- [13] 钟祥瑞, 莫方朔. 铝纤维吸声板的材料特性及应用[J]. *新型建筑材料*, 2000, 11: 19–22.  
ZHONG Xiang-zhang, MO Fang-suo. Sound absorption characteristics and applications of aluminum fiber panel[J]. *New Building Materials*, 2000, 11: 19–22.
- [14] Moussatov A, Ayrault C, Castagnède B. Porous material characterization—Ultrasonic method for estimation of tortuosity and characteristic length using a barometric chamber[J]. *Ultrasonics*, 2001, 39: 195–202.
- [15] 齐共金, 杨盛良, 赵恂. 泡沫吸声材料的研究进展[J]. *材料开发与应用*, 2002, 5: 40–44.  
QI Gong-jin, YANG Sheng-liang, ZHAO Xun. Advances in sound-absorbing foam materials[J]. *Development and Application of Materials*, 2002, 5: 40–44.
- [16] Garai M, Pompoli F. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications[J]. *Applied Acoustics*, 2005, 66: 1383–1398.
- [17] 钟祥瑞, 莫方朔, 祝培生. 一种新型吸声材料-铝纤维板的吸声特性[J]. *电声技术*, 2001(1): 12–25.  
ZHONG Xiang-zhang, MO Fang-suo, ZHU Pei-sheng. A new type sound absorbing material-aluminum fiber panel[J]. *Audio Engineering*, 2001(1): 12–25.
- [18] Product Date [EB/OL]. <http://www.bksv.com/pdf/Bp1039.pdf>
- [19] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 230.  
MA Da-you. *Theoretical basis of modern acoustics*[M]. Beijing: Science Press, 2006: 230.

(编辑 龙怀中)