

青年园地

金属纤维多孔材料复合结构的声学性能

王建忠, 汤慧萍, 敖庆波, 马 军, 李爱君

(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: 针对精密电子元器件等领域在受限空间内的噪声处理难题, 以纤维直径为 $08\ \mu\text{m} \sim 020\ \mu\text{m}$ 的 316L 不锈钢纤维为原料, 首先采用真空烧结技术制备了厚度为 2 mm, 孔隙率为 55% ~ 76% 的不锈钢纤维多孔材料, 然后将其与穿孔板、金属薄板复合并采用真空烧结技术制备了厚度为 3 ~ 4 mm 的复合结构, 利用 4206 型声学阻抗管测试了金属纤维多孔材料及其复合结构的吸声系数和隔声量。系统分析了不锈钢纤维多孔材料的孔隙率与纤维直径、穿孔板结构参数及金属薄板对复合结构的吸声性能和隔声性能的影响规律。研究表明: 当金属纤维多孔材料的厚度为 2 mm 时, 宜选择单层复合结构进行噪声处理, 其吸声系数稳定在 0.3 ~ 0.4; 当声波频率超过 3000 Hz 时, 宜选择梯度复合结构进行噪声处理, 其吸声系数最高可达 0.75。穿孔板显著提高了复合结构的吸声系数。相对于穿孔板吸声结构而言, 复合结构将第一共振频率向低频方向移动且将共振频率附近的吸声频带变宽。在梯度金属纤维多孔材料层间添加金属薄板后, 可进一步提高其吸声系数。

关键词: 多孔材料; 金属纤维; 穿孔板; 复合结构; 吸声; 隔声

中图分类号: TQ343.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)07-0550-07

Acoustic Performance of Complex Structure Made by Porous Metal Fibers Materials

WANG Jianzhong, TANG Huiping, AO Qingbo, MA Jun, LI Aijun

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

Abstract: In order to control the noise in the field of precision electronic components within the confined space, porous stainless steel fiber materials with thickness of 2 mm and the porosities of 55% ~ 76%, were prepared by sintering process in the vacuum using the 316L stainless steel fiber with diameters of $8\ \mu\text{m}$ to $20\ \mu\text{m}$ in the paper. Then a complex structure with thickness of 3 ~ 4 mm was made by sintering process in the vacuum using the porous stainless steel fiber materials, the perforated panel and the thin metal plate. The sound absorption coefficient and the transmission loss of porous metal fiber materials as well as the complex structure were tested by the acoustic impedance tube with type of 4206. The effects of the porosity and the fiber diameter of porous stainless steel fiber materials, the parameters of the perforated panel and the thin metal plate on the sound absorption and sound insulation properties were systematically analyzed. To control the noise, the single complex structure should be used and the sound absorption coefficient is stable at 0.3 to 0.4 when the thickness of porous metal fiber materials is 2 mm. Furthermore, the gradient complex structure should be used and the maximum sound absorption coefficient is about 0.75 when the sound frequency is higher than 3000 Hz. In addition, the sound absorption coefficient of complex structure can be obviously improved by adding the perforated panel in the front of porous metal fiber materials. The first resonance frequency of complex structure moves to the lower frequency direction and the sound absorption frequency range is widened at the adjacent resonance frequency compared with the perforated panel. Additionally, the sound absorption coefficient of gradient porous metal fiber materials can also be improved by adding the thin metal plate on the interface between single porous metal fiber materials.

Key words: porous materials; metal fiber; perforated panel; complex structure; sound absorption; sound insulation

收稿日期: 2016-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51301141); 陕西省科技创新团队(2015KCT-11); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTCQ01-111)

第一作者: 王建忠, 男, 1980年生, 教授级高级工程师

通讯作者: 汤慧萍, 女, 1966年生, 教授, 博士生导师, Email: hptang@c-nin.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.07.08

1 前 言

噪声污染已经成为继水污染、空气污染之后的第三大污染, 它不仅严重危害人的听觉系统、心血管系统和神经系统^[1], 而且还会诱发多种疾病。噪声也会损伤精密仪器, 甚至使精密仪器失效。同时, 高强噪声会对建

筑物产生不同程度的破坏,如出现门窗损伤、玻璃破碎、墙体开裂、抹灰震落等现象。因此,吸声降噪逐渐成为一个有关高科技、环境以及人类协调发展急需解决的难题。

控制噪声的方法主要有主动降噪法、被动降噪法和有源降噪法。目前,主要采用被动降噪法来控制噪声,即采用吸声材料或吸声结构进行噪声处理。常用的吸声材料包括纤维状、颗粒状和泡沫状多孔性吸声材料,吸声结构包括共振吸声结构和特殊吸声结构。金属纤维多孔材料属于多孔性吸声材料,它是一类非常重要的吸声降噪材料^[2-4],由于具有优异的吸声性能而受到广泛关注。目前,科研人员主要针对金属纤维多孔材料的孔隙率^[5-8]、厚度^[4,9]、纤维直径^[5]、纤维材质^[5]、材料背后空腔厚度^[4]、声压级^[10-12]、环境温度^[13,14]等因素对多孔材料吸声性能的影响规律进行了系统的研究,也取得了丰硕成果。金属纤维多孔材料具有优异的高频吸声性能,但是其低频吸声性能较差,因此为了进一步提高金属纤维多孔材料的吸声性能,西北有色金属研究院设计并制备出了两种梯度孔结构金属纤维多孔材料,即丝经梯度孔结构纤维多孔材料和孔隙率梯度孔结构纤维多孔材料,并通过优化声学界面数量、排列方式使纤维多孔材料的吸声性能获得显著提升,在声波频率为1500~6400 Hz范围内的吸声系数均大于0.90,最高可达0.998^[15-17]。西北有色金属研究院将梯度孔结构金属纤维多孔材料的优化方案推广应用到石化生产工业中的气体输送系统进行降噪处理,通过对常规的吸声矿棉及金属纤维多孔材料进行梯度化孔隙结构设计,解决了大尺寸复杂管路系统的降噪难题,使得管路系统噪声降低19~39 dB。西北有色金属研究院开发的“金属纤维梯度多孔吸声材料”获得了2015年中国有色金属工业科学技术奖一等奖。然而,上述研究或应用过程中的金属纤维多孔材料的厚度均超过5 mm,这对于受限空间内的噪声处理显然不合适。

目前,不仅航空航天领域、精密电子元器件领域对吸声降噪材料的厚度有严格限制,而且大型输送管道在进行降噪处理时对材料的厚度也有一定要求。金属纤维多孔材料内部孔道长度主要由材料厚度决定,厚度越大,孔道长度越长,材料的低频吸声性能越好。但在受限空间内,却难以通过增加材料厚度这一最直接、最有效的措施来提高材料的吸声性能。如果采用降低孔隙率或减小孔径的方法来提高材料的低频吸声性能时,材料的高频吸声性能又有所下降。前期研究表明^[8,9,17],当金属纤维多孔材料的厚度较薄(≤ 5 mm)时,通过优化材料的孔隙率、纤维直径、孔径及梯度孔结构等方法提高材料吸声性能的效果不明显。

穿孔板是由我国著名科学家、中国科学院马大猷院士^[18,19]在20世纪60年代提出的,是国内发展最早的声衬材料并被广泛用于噪声控制工程中。薄的板材,如钢板、铝板、胶合板、塑料板等按一定的孔径和穿孔率穿上孔,在背后留下一定厚度的空气层,便构成穿孔板共振吸声结构。由于采用共振吸声原理,穿孔板共振吸声结构吸声频带较窄,在共振频率范围内吸声性能较好,低于或高于此频率范围的吸声性能显著降低。另外,穿孔板共振吸声结构的吸声性能,尤其是高频吸声性能远低于多孔吸声材料。广大科技人员针对穿孔板共振吸声结构、穿孔板与多孔材料(泡沫镍、玻璃棉、发泡水泥)复合吸声结构开展了大量研究^[20-23],但其厚度均超过10 mm,有的甚至近100 mm,远超过受限空间内对材料厚度的要求。

为此,本文将充分利用金属纤维多孔材料、穿孔板、金属薄板的吸声、隔声优势来制备并优化复合结构(厚度为3~4 mm),系统分析金属纤维多孔材料与穿孔板的结构参数对复合结构的吸声、隔声性能的影响规律,拟对解决受限空间内的噪声处理难题提供重要的理论支持和实践指导。

2 实验

2.1 金属纤维多孔材料的制备

以纤维直径分别为8、12和20 μm 的316L不锈钢纤维为原料,制备了厚度为2 mm,孔隙率分别为55%、68%和76%的不锈钢纤维多孔材料,其制备工艺流程如图1所示。其中,烧结工序是在真空炉内进行,真空度为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ Pa,烧结温度为1250 $^{\circ}\text{C}$,保温时间为2 h。

所制备的不锈钢纤维多孔材料的微观形貌如图2所示。

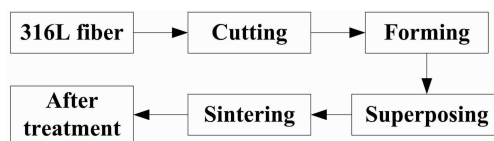


图1 不锈钢纤维多孔材料的制备工艺流程

Fig. 1 Preparation process of porous stainless steel fibers materials

2.2 复合结构的设计与制备

2.2.1 穿孔板的结构设计及制备

穿孔板的穿孔率、孔径、板厚及第一共振频率之间的关系可由式(1)^[24]表示:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{d(l + 0.8P)}} \quad (1)$$

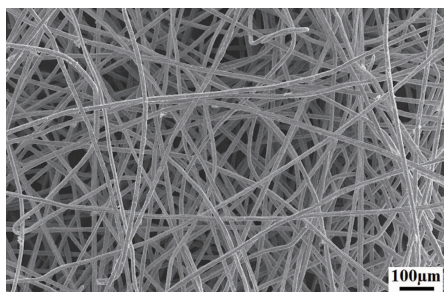


图 2 316L 不锈钢纤维多孔材料的微观形貌(纤维直径为 12 μm)

Fig. 2 Microstructure of porous 316L stainless steel fibers materials (the fiber diameter of 12 μm)

式中:

f_r ——第一共振频率, Hz

C ——声波在空气中的传播速度, m/s

σ ——穿孔板的穿孔率, %

d ——空腔深度, mm

P ——孔径, mm

l ——穿孔板的厚度, mm

穿孔板上的孔呈正三角形分布。

作者以 316L 不锈钢板为研究对象, 利用式(1)确定了穿孔板的具体参数, 如表 1 所示。

表 1 穿孔板的结构参数

Table 1 Parameters of perforated panel

No.	Punching rate / %	Pore size / mm	Panel thickness / mm
1 [#]	3.0	4	1
2 [#]	7.3	3	1

2.2.2 复合结构的制备方法

金属纤维多孔材料复合结构的制备方法主要有两种: ①单层金属纤维多孔材料复合结构: 将单层结构金属纤维多孔材料与穿孔板叠制后放入真空烧结炉内进行高温烧结, 保温结束后随炉冷却即得到复合结构; ②梯度金属纤维多孔材料复合结构: 将制备好的单层结构金属纤维多孔材料按照梯度孔的方向进行排列, 然后将孔径较小的一面与穿孔板叠制后(穿孔板在下)放入真空烧结炉内进行高温烧结, 保温结束后随炉冷却即得到复合结构。上述制备复合结构的工艺流程如图 3 所示。

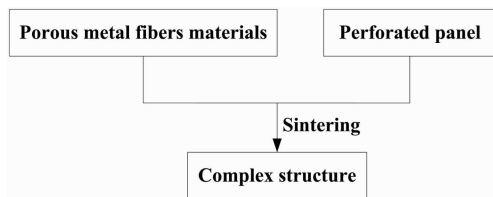


图 3 复合结构的制备工艺流程

Fig. 3 Preparation process of complex structure

2.3 声学性能测试方法

室温条件下, 采用丹麦 B&K(Brüel & Kjær)公司生产的 4206 型声学阻抗管(图 4)测试复合结构的吸声系数和隔声量, 测试频率范围为 50 ~ 6400 Hz。吸声系数的测试标准为 ISO 10534-2: 1998(Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method), 隔声量尚无检测标准。



图 4 声学性能测试仪器(4206 型 B&K 管)

Fig. 4 Testing equipment of acoustic property (B&K tube with 4206 type)

3 结果与讨论

3.1 金属纤维多孔材料的结构参数对复合结构吸声系数的影响

3.1.1 孔隙率对吸声系数的影响

图 5 为不锈钢纤维多孔材料的孔隙率对复合结构吸声系数的影响, 其中穿孔板采用表 1 中的 1[#]穿孔板, 不锈钢纤维多孔材料的厚度为 2 mm, 纤维丝径为 12 μm , 孔隙率分别为 55%、68% 和 76%。由图可知, 频率低于 1000 Hz 时, 多孔材料的孔隙率对吸声系数没有影响; 频率超过 1500 Hz 时, 随着多孔材料孔隙率的增加, 吸声系数逐渐增加。主要原因为: 穿孔板吸声结构实际上是由许多单个共振器并联而成的共振吸声结构, 当声波垂直入射到穿孔板表面时(暂不考虑板振动), 孔内及周围的空气随声波一起往复振动, 相当于一个“活塞”, 它反抗体积速度的变化, 是个惯性量。穿孔板与壁面间的空气层相当于一个“弹簧”, 它阻止声压的变化。此外, 由于空气在孔附近往复振动存在摩擦阻尼, 它可以消耗声能^[25], 使声能转变为热能而耗散。在穿孔板背后填充不锈钢纤维多孔材料, 尽管增大了背后的声阻, 但同时也大大减弱了空气往复振动所带来的声波能量消耗。当使用孔隙率为 76% 的金属纤维多孔材料时, 声波容易通过, 促使振动加快并且被吸收; 当使用孔隙率为 55% 的金属纤维多孔材料时, 由于孔径较小, 透过穿孔板的声波并没有或者发生微量的振动, 此时主要体现了金属纤维多孔材料的吸声特点, 其吸声系数呈现上升趋势。

由图 5 还可以看出, 当金属纤维多孔材料的孔隙率为 68% 和 76% 时, 曲线的吸声峰值出现在约 2500 Hz

处。由式(1)和表1计算得知,1[#]穿孔板的第一共振频率约为3248 Hz。在共振频率附近,穿孔板吸声结构的空气振动很强烈,声能损耗最大,即吸声系数最高。由此说明,穿孔板背后添加金属纤维多孔材料后,第一共振频率向低频方向移动。另外,单层复合结构在共振频率附近的吸声频带较穿孔板吸声结构的吸声频带宽。

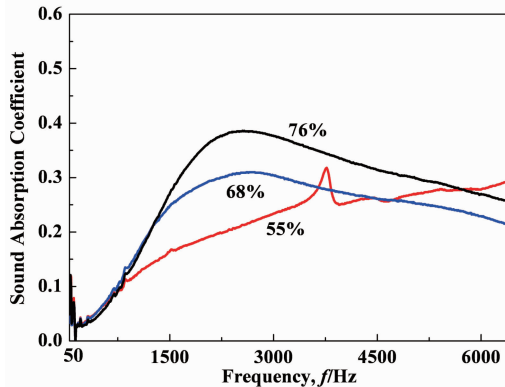


图5 多孔材料的孔隙率对复合结构吸声系数的影响

Fig. 5 Effect of porosities of porous materials on sound absorption coefficient of complex structure

3.1.2 纤维直径对吸声系数的影响

图6为纤维直径对复合结构吸声系数的影响,其中穿孔板采用表1中的1[#]穿孔板,不锈钢纤维多孔材料厚度为2 mm,孔隙率为68%,纤维直径分别为8、12和20 μm 。由图可知,三条曲线的变化趋势相同,均在约2500 Hz处出现吸声峰值,吸声系数最高可达约0.4。而1[#]穿孔板的第一共振频率约为3248 Hz。可以看出,在穿孔板背后紧贴金属纤维多孔材料,其共振频率会向低频方向移动,且频带变宽,从而弥补了穿孔板在非共振频率处吸声系数较低的缺点。由图6还可以看出,频率超过约1250 Hz时,随着纤维丝径的增加,复合结构的吸声系数呈现明显的下降趋势。

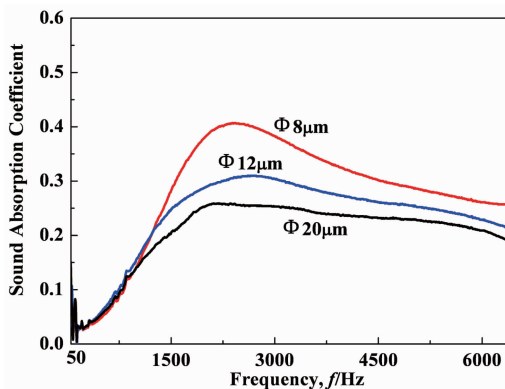


图6 纤维直径对复合结构吸声系数的影响

Fig. 6 Effect of fiber diameters on sound absorption coefficient of complex structure

3.2 穿孔板的结构参数对复合结构吸声系数的影响

图7为表1中两种穿孔板的结构参数对复合结构吸声系数的影响曲线,其中不锈钢纤维多孔材料的厚度为2 mm,孔隙率为68%,纤维直径为12 μm 。由图可知,当频率低于约1800 Hz时,两种复合结构的吸声系数基本一样;当频率高于1800 Hz时,2[#]穿孔板制备的复合结构的吸声系数显著高于1[#]穿孔板制备的复合结构的吸声系数,且前者的吸声系数最高达到0.43,后者的吸声系数最高仅0.31。结合表1可以得出,穿孔板的穿孔率对复合结构吸声系数的影响远大于其孔径的影响。由图7还可以看出,当频率超过3000 Hz时,2[#]穿孔板制备的复合结构的吸声系数随频率的增加趋于平稳。

由式(1)和表1计算得知,1[#]穿孔板第一共振频率约为3248 Hz,而2[#]穿孔板约为5414 Hz。由图7可知,1[#]和2[#]穿孔板制备的复合结构的吸声峰值分别约为2500 Hz和3500 Hz,再次证实了复合结构将穿孔板的共振频率向低频方向移动。同时,复合结构在共振频率附近的吸声频带较穿孔板吸声结构的吸声频带宽。

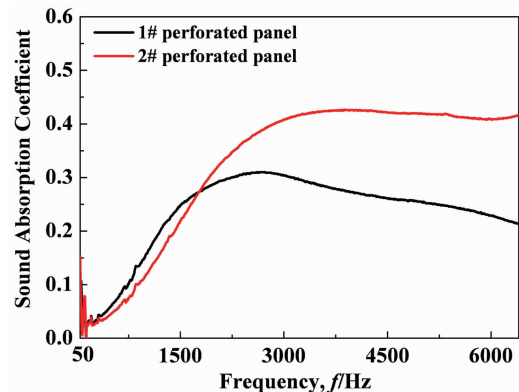


图7 穿孔板结构参数对复合结构吸声系数的影响

Fig. 7 Effect of parameters of perforated panel on sound absorption coefficient of complex structure

3.3 金属纤维多孔材料与复合结构的吸声系数对比

图8为单层金属纤维多孔材料(曲线2)、梯度金属纤维多孔材料(曲线1)和复合结构的吸声系数(曲线3、4),其中金属纤维多孔材料的厚度均为2 mm、孔隙率均为68%。单层金属纤维多孔材料的纤维直径为12 μm 。梯度金属纤维多孔材料为丝径梯度结构,纤维直径为 $\varnothing 20 \mu\text{m} + \varnothing 8 \mu\text{m}$, $\varnothing 20 \mu\text{m}$ 丝径的纤维多孔材料面向声源。复合结构分为两种,一种为“穿孔板+单层金属纤维多孔材料”(简称“单层复合结构”,曲线3),一种为“穿孔板+梯度金属纤维多孔材料”(简称“梯度复合结构”,曲线4),穿孔板为表1中的

2[#]穿孔板。

由图 8 可知,当频率低于 2000 Hz 时,曲线 1 和曲线 2 的吸声系数基本一样,说明这两种结构的纤维多孔材料对低频声波的损耗一样。当频率超过 2000 Hz 时,曲线 2 的吸声系数略高于曲线 1 的吸声系数,即单层金属纤维多孔材料的吸声性能略优于梯度金属纤维多孔材料的吸声性能,这与前期研究结果(梯度纤维多孔材料的吸声性能显著优于单层纤维多孔材料的吸声性能)不同^[16],这是由于本文中多孔材料的厚度仅为 2 mm,而文献^[16]中多孔材料的厚度为 10 mm,厚度越大,孔隙通道越长,声波耗散越快。同时,梯度金属纤维多孔材料靠近声源一侧的孔径(纤维直径为 20 μm)高于单层金属纤维多孔材料的孔径(纤维直径为 12 μm),而前者远离声源一侧的孔径(纤维直径为 8 μm)小于后者的孔径,使得声波在 $\varnothing 20 \mu\text{m}$ 丝径多孔材料与 $\varnothing 8 \mu\text{m}$ 丝径多孔材料的界面发生多次反射^[26],导致梯度金属纤维多孔材料耗散的声能低于单层金属纤维多孔材料耗散的声能。

从图 8 中还可以看出,当频率低于 1000 Hz 时,曲线 3 和 2 的吸声系数基本一样;当频率超过 1000 Hz 时,曲线 3 的吸声系数高于曲线 2 的吸声系数。由此看出,穿孔板显著提高了复合结构的吸声系数。这是由于穿孔板背后的金属纤维多孔材料大大增加了复合结构的声阻,提高了对声波的耗散^[27]。前面计算得知,1[#]穿孔板的第一共振频率约为 3248 Hz,而复合结构的吸声峰值(曲线 3)出现在 3000 Hz 处,即曲线 3 对应的复合结构将第一共振频率向低频方向移动,且曲线 3 在共振频率附近的吸声频带较单一穿孔板的吸声频带大大变宽,这是由于金属纤维多孔材料增加了复合结构的声阻所致。从图 8 还可以看出,当频率超过 2000 Hz 时,曲线 3 的吸声系数稳定在 0.3 以上。

由图 8 还可以看出,当频率低于 2500 Hz 时,曲线 4 的吸声系数略低于曲线 2 的吸声系数;当频率高于 2500 Hz 时,曲线 4 的吸声系数显著高于曲线 2 的吸声系数。当频率低于 3000 Hz 时,曲线 4 的吸声系数远低于曲线 3 的吸声系数;当频率超过 3000 Hz 时,曲线 4 的吸声系数远高于曲线 3 的吸声系数,且最高可达 0.75。

综上所述,当金属纤维多孔材料的厚度为 2 mm 时,宜选择单层复合结构进行噪声处理,且频率超过 2000 Hz 时,其吸声系数稳定在 0.3~0.4。当频率超过 3000 Hz 时,宜选择梯度复合结构进行噪声处理,其吸声系数超过 0.4,最高可达 0.75。

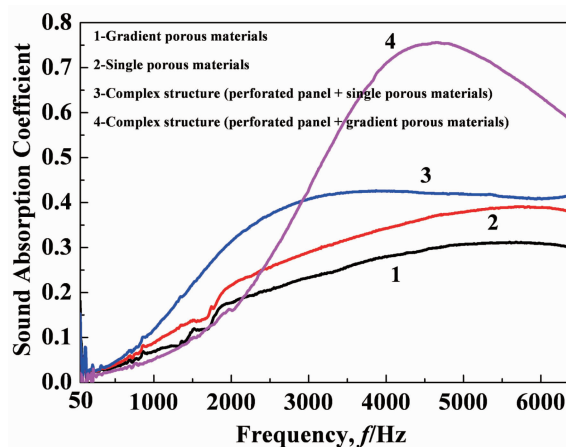


图 8 金属纤维多孔材料与复合结构的吸声系数对比曲线
Fig. 8 Sound absorption coefficient of porous metal fibers materials and complex structure

3.4 金属薄板对复合结构声学性能的影响

吸声材料可以有效地吸收声波,但对于大部分声源来说,采用隔声方法对声源进行隔离降噪更为行之有效。材料的隔声性能与材料本身的刚性、阻尼性能及声波的频率、声源的位置与性质等有很大关系。传统的隔声材料一般都十分笨重,对其可加工性、适用范围、成本等都有很大的影响。当声波传递到金属薄板时,金属薄板将发生振动,使得声波发生耗散。为此,作者在梯度结构金属纤维多孔材料层与层之间插入金属薄板,并按照 2.2.2 节中的方法②进行高温烧结制备了金属薄板复合结构,分析了金属薄板对该复合结构吸声和隔声性能的影响规律。

图 9 为金属薄板对其复合结构吸声性能的影响曲线,其中丝径梯度结构不锈钢纤维多孔材料的总厚度为 2 mm,单层结构不锈钢纤维多孔材料的厚度为 1 mm,孔隙率为 76%,纤维直径为 8 μm 和 12 μm ;单层金属薄板的厚度为 0.2 mm,穿孔板为表 1 中的 1[#]穿孔板。由图 9 可知,在丝径梯度结构金属纤维多孔材料层间添加单层金属薄板后,可显著提高多孔材料的吸声系数(曲线 2)。声波由纤维直径为 8 μm 的多孔材料传递到梯度结构界面(即金属薄板)时,声波将发生大量的发射,而反射声波将在多孔材料内部被耗散,从而提高多孔材料的吸声系数。另外,金属薄板的层数(曲线 2 和曲线 3)对复合结构的吸声系数影响较小。由图 9 还可以看出,在曲线 2 和曲线 3 所对应的复合结构的前端增加穿孔板可进一步提高复合结构的吸声系数(曲线 4 和曲线 5),吸声系数最高分别为 0.69 和 0.53,且第一吸声峰值也向低频方向移动。

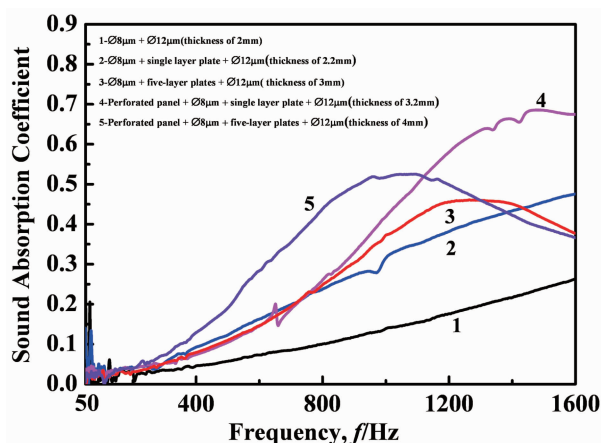


图9 金属薄板对复合结构吸声系数的影响

Fig. 9 Effect of thin metal plate on sound absorption coefficient of complex structure

在上述研究结果的基础上,测试了“穿孔板+薄板+梯度结构金属纤维多孔材料”复合结构的隔声性能,结果如图10所示。可以看出,当频率超过100 Hz时,梯度结构金属纤维多孔材料的隔声性能较低,隔声量最高约10 dB;而复合结构的隔声性能较高,隔声量均超过15 dB,最高约30 dB。

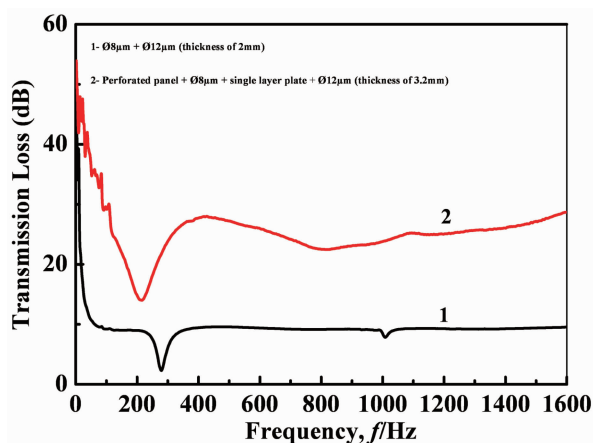


图10 复合结构的隔声性能

Fig. 10 Transmission loss of complex structure

4 结论

(1)穿孔板显著提高了复合结构的吸声系数。由穿孔板和金属纤维多孔材料制备的复合结构将第一共振率向低频方向移动,且复合结构在共振频率附近的吸声频带较穿孔板吸声结构的吸声频带宽。

(2)当声波频率超过约1250 Hz时,随着纤维丝径的增加,复合结构的吸声系数呈现明显的下降趋势,吸声系数最高约0.4。

(3)对于受限空间内的噪声处理,当金属纤维多孔材料的厚度为2 mm时,宜选择单层复合结构进行噪声处理,且频率超过2000 Hz时,其吸声系数稳定在0.3~0.4。当频率超过3000 Hz时,宜选择梯度复合结构进行噪声处理,其吸声系数超过0.4,最高可达0.75。

(4)在梯度金属纤维多孔材料层间添加单层金属薄板后,可显著提高多孔材料的吸声系数,且在此结构基础上添加穿孔板可进一步提高吸声系数,吸声系数最高为0.69。

参考文献 References

- [1] Wang Jianzhong(王建忠), Xi Zhengping(奚正平), Tang Huiping(汤慧萍), et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 405-408.
- [2] Wang J Z, Tang H P, Ma Q, et al. *JOM*[J], 2016, 68(3): 890-898.
- [3] Li A J, Ma J, Wang J Z, et al. *Powder Technology*[J], 2016, 288: 109-116.
- [4] Ao Qingbo(敖庆波). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008: 28-50.
- [5] Ao Qingbo(敖庆波), Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊), et al. *Journal of Functional Materials*(功能材料)[J], 2013, 44(6): 780-782.
- [6] Wang J Z, Ao Q B, Tang H P, et al. *International Journal of Modern Physics B*[J], 2015, 29(10&11): 1540002-1-1540002-7.
- [7] Meng H, Ao Q B, Ren S W, et al. *Composites Science and Technology*[J], 2015, 107: 10-17.
- [8] Ao Q B, Wang J Z, Tang H P, et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2015, 44(11): 2646-2650.
- [9] Bao Tengfei(鲍腾飞). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012: 26-43.
- [10] 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): 1765-1768.
- [11] Peng Feng(彭 锋), Wang Xiaolin(王晓林), Sun Yan(孙 艳), et al. *Acta Acustica*(声学学报)[J], 2009, 34(3): 266-274.
- [12] Zhang Bo(张 波), Chen Tianning(陈天宁). *Journal of Xi'an Jiaotong University*(西安交通大学学报)[J], 2010, 44(3): 58-65.
- [13] Ao Qingbo(敖庆波), Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊), et al. *Piezoelectrics and Acoustooptics*(压电与声光), 2010, 32(5): 849-851.
- [14] 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): 1327-1331.
- [15] Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊), Ge Yuan(葛 渊), et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2007, 36(12): 2220-2223.

- [16] Ao Qingbo(敖庆波), Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊), *et al. Journal of Functional Materials*(功能材料)[J], 2009, 40(10): 1764-1766.
- [17] Ao Qingbo(敖庆波), Wang Jianzhong(王建忠), Li Aijun(李爱君), *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(2): 387-391.
- [18] Ma Dayou(马大猷). *Handbook of Noise and Vibration Control Engineering*(噪声与振动控制工程手册)[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 10-65.
- [19] Mao Dongxing(毛东兴), Hong Zonghui(洪宗辉). *Environmental Noise Control Engineering*(环境噪声控制工程)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 65-80.
- [20] Shang Pengfei(尚鹏飞), Huang Wude(黄伍德). *Technical Acoustics*(声学技术)[J], 2015, 34(6): 50-53.
- [21] Zhang X X, Li Z B, Kong D Y, *et al. Piezoelectrics & Acoustooptics* [J], 2017, 39(1): 48-51.
- [22] Pei C M, Zhou B, Li D K, *et al. Noise and Vibration Control*[J], 2015, 35(5): 35-38.
- [23] Lu M, Meng B N, Liu P S, *et al. Rare Metal Materials and Engineering* [J], 2015, 44(12): 3083-3088.
- [24] Zhong Xiangzhang(钟祥璋). *Building Materials for Sound Absorption & Sound Insulation*(建筑吸声材料与隔声材料)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 75-90.
- [25] Li Yaozhong(李耀中), Li Dongsheng(李东升). *Noise Control Technique*(噪声控制技术)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 60-75.
- [26] Zhu J L, Sun J, Tang H P, *et al. Powder Technology*[J], 2016, 301: 1235-1241.
- [27] Ao Qingbo(敖庆波), Tang Huiping(汤慧萍), Wang Jianzhong(王建忠), *et al. Materials Review*(材料导报), 2014, 28(6): 66-69.

(编辑 吴琛)