

不锈钢纤维多孔材料及其复合结构的隔声性能

敖庆波, 王建忠, 马军, 吴琛

(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: 本研究以 8 μm 不锈钢纤维毛毡为原料, 利用体积称重法和高温烧结工艺制备出具有不同孔隙率、平均孔径和厚度的不锈钢纤维多孔材料。通过结构优化设计了正梯度结构、反梯度结构和薄膜复合结构, 对 3 种结构进行了隔声性能的测试, 分别研究了 3 种结构的隔声特性。隔声结果表明, 不锈钢纤维多孔材料具有一定的隔声性能, 厚度为 20 mm, 孔隙率为 85%, 在 50~6400 Hz 频率范围内, 不锈钢纤维多孔材料的平均隔声量为 18.91 dB; 其孔隙率越低, 平均孔径越小, 厚度越厚, 材料的隔声性能越好; 设计的正梯度和反梯度结构的隔声性能比单层不锈钢纤维多孔材料的隔声性能差; 添加金属薄膜的不锈钢纤维多孔复合材料在中高频处的隔声性能有很大提高, 厚度为 20 mm, 平均隔声量达 27.86 dB, 最高处提高 16.96 dB。

关键词: 金属纤维多孔材料; 隔声性能; 薄膜材料; 结构优化

中图分类号: TB34

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)05-1444-05

科技发达的现代, 高速列车已经日益成为人们出行的首选交通工具, 高速、便利、舒适安全是现代高速列车的主要发展目标, 为了全面实现此目标, 要求高速列车制造技术不断在探索和创新。目标要求高速列车各组成部件性能指标不断提升的同时, 也要解决日渐突出的噪声问题。高速列车行驶中的噪声不仅对车内乘客的舒适度有很大影响, 还对铁路沿线居民的生活环境造成了严重的噪声污染^[1]。

高速列车的噪声问题是制约其快速发展的瓶颈之一, 噪声源由轮轨噪声、空气动力噪声、集成系统噪声和高架结构噪声组成^[2-3]。随着车速的不断提高, 轮轨噪声成为总辐射噪声的主要声源。其中轮轨噪声的散射按车速的 3% 比率增加, 空气噪声按车速的 5%~6% 比率增加^[4]。运行速度不同时, 声音强度也不同, 例如时速在 300 km/h 时, 噪声频率为: 20~10000 Hz, 噪声声压级在 70~110 dB 之间。目前应用于高速列车车内的减振降噪材料有碳纤维复合材料、超长纤维棉、玻璃丝绵、铝中空结构(铝蜂窝、波纹板)^[5], 还有高速列车专用粘合剂及泡沫胶带, 均具有粘结和阻尼减振作用^[6]; 用于高速列车外的降噪措施有: 对车体表面进行仿生结构设计^[7](Koch 雪花表面织构, 最高空气摩擦噪声比光滑表面低 18.5 dB); 对高速列车流线型头型进行优化设计,

达到减振降噪作用^[8]; 在铁路沿线建立声屏障(铁路路基区声屏障高度范围为 3.45~3.95 m, 桥梁区的合适高度在 3.15 m 以上)、种植绿化带等^[9]。然而, 上述研究均未从轮轨噪声治理方向出发。轮轨噪声主要来自转向架处的滚动噪声、摩擦噪声和撞击噪声, 而转向架是高速列车运行的重要组成部分, 其性能对列车系统运行的可靠性和安全性产生非常重要的影响, 所以对该部位进行降噪迫在眉睫, 目前有研究在其周围设置裙板, 从而改善其周围空气的流动方式, 降低横向空气进入列车底部后的冲击作用, 裙板既减小了空气的阻力系数, 还降低了空气的摩擦噪声^[10]。单独使用裙板虽然可以大大降低轮轨噪声向外辐射, 但会将轮轨噪声集中在车体底部, 进而通过车体底板传入车厢内, 增大车内噪声, 所以裙板结构还需继续优化。

金属纤维多孔材料以其优异的吸声特性, 以及其良好的功能特性, 被应用于各个噪声控制领域: 电子器件的减振降噪^[11]、管道噪声控制^[12]、高温声衬^[13]、以及具有酸碱腐蚀的环境^[14]等, 本研究拟将金属纤维多孔材料应用于高速列车上, 不仅可以用于车体内部吸收外部车体产生的噪音, 还可以用于车体外与裙板结合吸收轮轨噪声, 在提高高速列车的品质及性能的同时, 还大大的拓宽了金属纤维多孔材料的应用市场。本实验主要研究不同孔

收稿日期: 2023-05-08

基金项目: 中国载人航天工程空间应用系统资助项目(KJZ-YY-NCL104); 秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2022-182); 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, 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

隙率、平均孔径和厚度对材料隔声性能的影响规律，测试了正梯度结构、反梯度结构以及薄膜复合结构的隔声性能，分析了隔声机理，为降低高速列车的噪声提供理论及数据支持，为金属纤维多孔材料能够在高速列车上使用奠定基础。

1 实验

选取直径为 8 μm，单重为 400 g/m² 的 316L 不锈钢纤维毛毡为原料；将纤维毛毡剪切成尺寸为 165 mm×165 mm 的正方形毛料，利用质量体积公式 (1) 计算出所需正方形毛料的总质量，将剪切好的毛料整齐的堆叠在烧舟内进行高温烧结即可。

$$\varepsilon = 1 - M/\rho V \quad (1)$$

其中， ε 为样品的孔隙率， M 为样品的质量， ρ 为 316L 不锈钢的密度， V 为样品的体积。

烧结工艺：烧结温度为 1100 °C，保温 2 h，升温速率为 10 °C/min，冷却方式为随炉冷却至室温即可停炉。

利用线切割机将烧制好的不锈钢纤维多孔材料及其复合结构切割成 $\Phi 29$ mm 和 $\Phi 100$ mm 的圆柱形样品(如图 1 所示)，尺寸公差为 -0.2~0 mm，经过清洗烘干后即可进行隔声性能测试。

采用丹麦 B&K 公司的 Pulse 声学测试平台，采用传递函数法中的四传感器阻抗管法，检测不锈钢纤维多孔材料及其复合结构的隔声性能。频率范围在 50~6400 Hz 之间，间隔为 8 Hz。

2 结果与讨论

2.1 孔隙率对隔声性能的影响

利用 5 种孔隙率（孔隙率分别为 70%、75%、80%、85%、90%、95%，厚度均为 10 mm）的不锈钢纤维多孔材料进行隔声量（sound transmission loss, TLn）的测试，分析孔隙率对材料隔声性能的影响规律，结果如图 2 所示。并计算出每种材料在 50~6400 Hz 频率范围内的



图 1 样品照片

Fig.1 Photo of sample

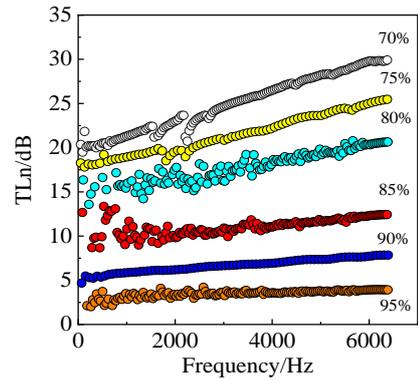


图 2 孔隙率对隔声性能的影响

Fig.2 Effects of porosity on sound insulation properties of the samples at 10 mm thickness

平均隔声量，见表 1。

从图 2 中可以看出不锈钢纤维多孔材料在整个测试频率范围内隔声性能表现为：中低频处为阻尼控制区，由于声波和不锈钢纤维多孔材料产生了共振，隔声性能波动比较明显，在此频范围内部分样品出现了第一共振峰；高频处为质量控制区和吻合效应区，此频率范围内的隔声性能随频率的升高而缓慢升高，隔声曲线趋于平缓。

从图 2 和表 1 还可以看出，随着不锈钢纤维多孔材料的孔隙率逐渐降低，隔声性能逐渐升高。主要原因为：隔声作用的产生是由于有障碍物使声波产生反射或者折射，从而发生能量损耗使声能降低；本节所设计样品中，孔隙率为 95% 的 6# 样品，其孔隙占材料总体积的 95%，金属纤维占材料总体积的 5%，相对密度为 0.399 g/cm³，使其对声能的损耗量最小，平均隔声量（算数平均值）仅为 3.84 dB；孔隙率为 70% 的 1# 样品，相对密度为 2.394 g/cm³，平均隔声量为 24.96 dB；密度提高 6 倍，隔声量提高 6.5 倍。

表 1 不同孔隙率不锈钢纤维多孔材料的平均隔声量

Table 1 Average sound insulation of the stainless steel fiber porous materials with different porosities

Sample	Porosity/%	Relative density/g cm ⁻³	Average sound insulation/dB
1#	70	2.394	24.96
2#	75	1.995	21.46
3#	80	1.596	17.92
4#	85	1.197	11.23
5#	90	0.798	6.69
6#	95	0.399	3.84

2.2 平均孔径对隔声性能的影响

由于金属纤维多孔材料的孔结构较为复杂，其孔径无法逐一表征，故利用平均孔径表征金属纤维多孔材料的整体孔径特性。根据公式(2)可以通过不锈钢纤维多孔材料的孔隙率计算出对应的平均孔径值，如表 2 所示。

$$d = 6.15D\varepsilon^{3.35} \quad (2)$$

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， ε 为纤维毡孔隙率。

从表 2 中数据可知，随着孔隙率的增加，多孔材料的平均孔径也随之增加，两者呈指数关系，该材料的隔声性能随着平均孔径的增加而减小，主要因为声波在小孔径内传播，易于发生多次反射和折射，且不易穿透材料；而声波在通过大孔径时，由于大孔径的材料孔与孔之间的连通性较好，易于声波穿透材料产生透射，起不到较好隔声作用。

2.3 厚度对隔声性能的影响

利用 6 种厚度（10、20、30、40、50 和 60 mm，孔隙率均为 85%）的不锈钢纤维多孔材料进行隔声量的测试，分析厚度对材料隔声性能的影响规律，结果如图 3

所示。并计算出每种材料在 50~6400 Hz 频率范围内的平均隔声量，见表 3。

从图 3 和表 3 结果可以看出，随着厚度的增加，材料隔声性能有明显提高。增加不锈钢纤维多孔材料的厚度，即增加了材料内部孔通道的长度，增加了声波通过时的路程，声能大幅衰减，孔通道长度越长，能量消耗越大。厚度为 20 mm，孔隙率为 85%，在 50~6400 Hz 频率范围内，不锈钢纤维多孔材料的平均隔声量为 18.91 dB。厚度为 60 mm 的不锈钢纤维多孔材料在 50~6400 Hz 频率范围内隔声量大于厚度为 10 mm 的不锈钢纤维多孔材料，最高处提高约 70 dB，平均隔声量提高 50.79 dB。

2.4 梯度孔结构对隔声性能的影响

制备了双层孔隙率梯度纤维多孔结构（孔隙率值分别为 95% 和 85%），通过改变梯度结构在测试过程中的安装方向，获得了文献[15]中的正梯度结构和反梯度结构，并与单层材料的隔声性能进行了对比，其结果如图 4 所示。并计算出每种结构在 50~6400 Hz 频率范围内的平均隔声量，见表 4。

梯度结构可以降低材料整体的总质量，使内部孔道呈喇叭形，易于声波进入。从图 4 和表 4 结果可以看出，正梯度结构和反梯度结构的隔声性能在 50~6400 Hz 范围内表现几乎一致，虽然通过设计孔隙率梯度结构在吸声方面有很大作用^[15]，但是在隔声方面，梯度结构的设计降低了整体结构的隔声性能。所以在确认应用环境以隔声需求为主后，要选取单一孔结构的不锈钢纤维多孔材料为宜。

2.5 复合隔声结构设计

为进一步提高不锈钢纤维多孔材料的隔声性能，本研究利用声学超材料的设计思路^[16-17]，将薄膜作为夹层加入到多层不锈钢纤维多孔材料中成为复合隔声结构，对其进行了隔声性能测试，结果如图 5 所示。并计算出在 50~6400 Hz 频率范围内的平均隔声量，见表 5。

表 2 不同平均孔径不锈钢纤维多孔材料的平均隔声量

Table 2 Average sound insulation of the stainless steel fiber porous materials with different average pore sizes

Sample	Porosity/%	Average pore size/ μm	Average sound insulation/dB
1#	70	37	24.96
2#	75	47	21.46
3#	80	58	17.92
4#	85	71	11.23
5#	90	86	6.69
6#	95	104	3.84

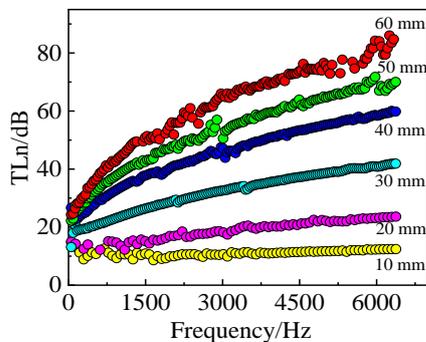


图 3 厚度对隔声性能的影响

Fig.3 Effects of the thickness on sound insulation properties of the samples at the porosity of 85%

表 3 不同厚度不锈钢纤维多孔材料的平均隔声量

Table 3 Average sound insulation of the stainless steel fiber porous materials with different thicknesses

Sample	Porosity/%	Thickness/mm	Average sound insulation/dB
1#	85	10	11.15
2#	85	20	18.91
3#	85	30	32.20
4#	85	40	45.64
5#	85	50	53.21
6#	85	60	61.94

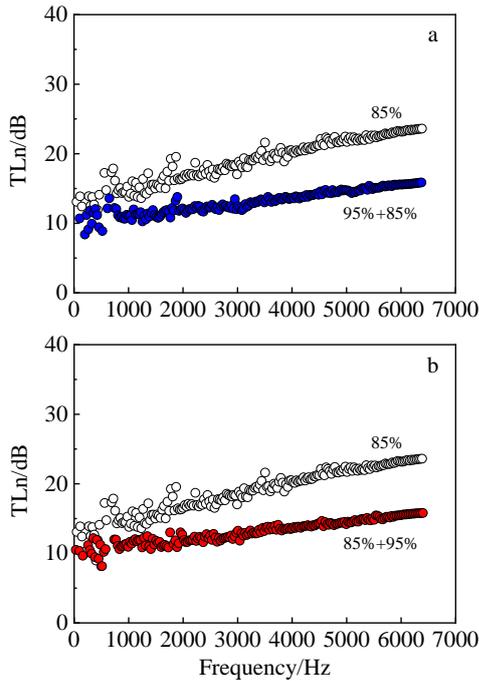


图 4 梯度结构与单层材料的隔声性能对比

Fig.4 Comparison of sound insulation properties between gradient structure and single-layer materials: (a) positive gradient structure and (b) inverse gradient structure

表 4 不同结构的平均隔声量

Table 4 Average sound insulation of the different structures

Sample	Porosity/%	Thickness/mm	Average sound insulation/dB
1#	85	20	18.91
2#	85+95	10+10	13.12
3#	95+85	10+10	13.23

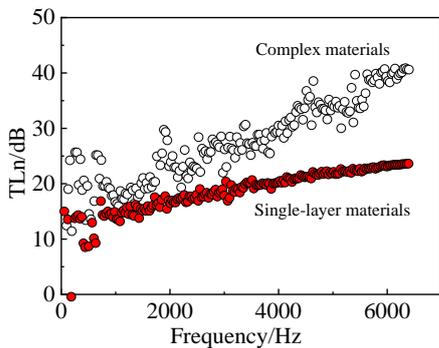


图 5 复合材料与单层材料的隔声性能对比

Fig.5 Comparison of sound insulation properties between complex materials and single-layer materials

从图 5 和表 5 数据可以看出，通过添加薄膜微振动层，在不锈钢纤维多孔结构中的孔壁对声波的反射和折

表 5 不同结构的平均隔声量

Table 5 Average sound insulation of the different structures

Sample	Thickness/mm	Average sound insulation/dB
Single-layer materials	20	18.91
complex materials	20	27.86

射的基础上，中间薄膜层也起到了对声波的多次反射和折射，明显提高了单层材料的隔声能力，最高处提高约 16.96 dB。

3 结 论

1) 通过对不锈钢纤维多孔材料的隔声性能进行研究，发现不锈钢纤维多孔材料具有一定隔声能力，厚度为 20 mm，孔隙率为 85%，在 50~6400 Hz 频率范围内，不锈钢纤维多孔材料的平均隔声量为 18.91 dB。

2) 孔隙率越低，平均孔径越小，厚度越厚，不锈钢纤维多孔材料的隔声性能越好；正梯度结构和反梯度结构的隔声性能较单层不锈钢纤维多孔材料的隔声性能差。

3) 通过添加薄膜材料制备的不锈钢纤维多孔复合结构在 50~6400 Hz 频率内的隔声性能较单层不锈钢纤维多孔材料有很大提高，中高频处提高较为明显，其平均隔声量达 27.86 dB，最大处提高 16.96 dB。

参考文献 References

[1] Li Minggao(李明高), An Chao(安超), Jia Shangshuai(贾尚帅) et al. *Noise Control Technology of EMU(动车组噪声控制技术)*[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 10

[2] Zou Kaiping(邹侃平). *Study of High-speed Train interior Noise Adaptive Control Technology Based on DSP(基于 DSP 的高速列车车内噪声主动控制技术研究)*[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016

[3] Deng Xiaojun(邓小军). *Research on Interior Noise Prediction and Control Technology of High Speed Train(高速列车车内噪声预测与控制技术研究)*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017

[4] Blaschko R, Wang Bohong(王渤洪). *Converter Technology and Electric Traction(变流技术与电力牵引)*[J], 2001(3): 28

[5] Wang Ruiqian(王瑞乾). *Study on the Sound Insulation of Floor of High-speed Train and Its Improvement Methods(高速列车地板结构隔声及隔声提高方法探究)*[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014

[6] Han Ding(韩丁) ed. *Modern Urban Transit(现代城市轨道交通)*[J], 2022(3): 111

[7] Wang Jiugen(汪久根), Chen Shihong(陈仕洪). *Journal of*

- Mechanical engineering*(机械工程学报)[J], 2014, 50(7): 78
- [8] Liu Jiali(刘加利). *Study on Characteristics Analysis and Control of Aeroacoustics of High-speed Trains*(高速列车气动噪声特性分析与降噪研究)[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013
- [9] Fei Guanghai(费广海), Wu Xiaoping(吴小萍), Liao Chenyan(廖晨彦). *China Environmental Science*(中国环境科学)[J], 2015, 35(8): 2539
- [10] Sueki T, Ikeda M, Takaishi T. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*[J], 2009, 50(1): 26
- [11] Wang Jianzhong(王建忠), Ao Qingbo(敖庆波), Liu Huaili(刘怀里) *et al. Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2021, 31(6): 54
- [12] 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], 2020, 49(11): 3861
- [13] Ao Qingbo(敖庆波), Tang Huiping(汤慧萍), Lan Tieshuan(兰铁栓) *et al. Journal of Functional Materials*(功能材料)[J], 2011, 42(54): 759
- [14] 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
- [15] 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
- [16] Yang Kun(杨坤), Yang Mingyue(杨明月), Cui Shiming(崔世明) *et al. Journal of Vibration and Shock*(振动与冲击)[J], 2022, 41(22): 14
- [17] Wang Gongxian(王贡献), Shi Mengfei(史蒙飞), Xiang Lei(向磊) *et al. Noise and Vibration Control*(噪声与振动控制)[J], 2023, 43(1): 75

Sound Insulation Properties of Stainless Steel Fiber Porous Materials with Complex Structure

Ao Qingbo, Wang Jianzhong, Ma Jun, Wu Chen

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

Abstract: Stainless steel fiber felt with 8 μm in thickness was used as raw material, and stainless steel fiber porous material with different porosities, average pore sizes and thicknesses were prepared by volume-weighing method and high temperature sintering. Positive gradient structure, inverse gradient structure and film composite structure were designed by structural optimization. The sound insulation performance of the three kinds of the structures was tested, and the sound insulation characteristics of the structures were studied. The sound insulation results indicate that the stainless steel fiber porous material has a certain sound insulation performance. When the thickness is 20 mm, the porosity is 85%, the average sound insulation of the stainless steel fiber porous material is 18.92 dB in the frequency range of 50-6400 Hz. The lower the porosity, the smaller the average pore size, the thicker the thickness, the better the sound insulation performance of the material. The sound insulation performance of the designed positive gradient and the inverse gradient structures is worse than the single layer stainless steel fiber porous material. The sound insulation performance of the stainless steel fiber porous composite material with film material is greatly improved at medium and high frequencies. When the thickness is 20 mm, the average sound insulation is 27.86 dB, and the highest is increased by 16.96 dB.

Key words: stainless steel fiber; sound insulation properties; film materials; structure optimization

Corresponding author: Ao Qingbo, Professor, State Key Laboratory of Porous Metals Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231095, E-mail: panpan0605@163.com