

铝纤维复合板结构参数对吸声性能的影响规律

杨富尧¹, 韩钰¹, 聂京凯¹, 陈新¹, 祝志祥¹, 肖伟民², 林群³, 陈荣柱³

- (1. 中国电力科学研究院 电工与新材料研究所, 北京 100192;
2. 北京市劳动保护科学研究所 国家环境保护城市噪声与振动控制工程技术中心, 北京 100054;
3. 浙江温州电力局, 温州 325000)

摘要: 利用吸声材料降噪是治理变电站噪声污染的重要途径。以铝纤维、铝箔、铝板网为原料, 采用冷轧法制备具有不同结构参数的铝纤维复合吸声板, 采用阻抗管的标准测试方法检测铝纤维复合板吸声系数, 研究材料的纤维板面密度、空腔厚度、纤维种类等参数对材料吸声性能的影响。结果表明: 试验采用的铝纤维复合板具有优异的吸声性能, 采用切削法纤维及面密度为484 g/m²的铝纤维复合板吸声性能最好; 随空腔厚度的增大, 吸声系数的峰值向低频段移动。

关键词: 铝纤维复合板; 变电站; 吸声性能; 结构参数; 吸声系数

中图分类号: TB31; TB535 **文献标志码:** A

Effects of structure parameters of aluminum fibrous composite panel on sound-absorption properties

YANG Fu-yao¹, HAN Yu¹, NIE Jing-kai¹, CHEN Xin¹, ZHU Zhi-xiang¹, XIAO Wei-min², LIN Qun³, CHEN Rong-zhu³

- (1. Department of Electrical Engineering and New Material, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
2. Beijing Municipal Institute of Labor Protection-State Environmental Protection Engineering Center for Urban Noise and Vibration Control, Beijing 100054, China;
3. Zhejiang Wenzhou Electric Power Bureau, Wenzhou 325000, China)

Abstract: Using noise absorption materials is an important way to control noise in substations. The aluminum fibrous composite panel with different structure parameters, which is based on aluminum fibers, aluminum foil and aluminum net board, was successfully fabricated by using cold-rolled method, and its sound absorption coefficient was measured by standing wave ratio method. The effects of surface density, airspace thickness and fiber categories on the sound absorption coefficient were investigated. The results show that the aluminum fibrous composite panel with surface density of 484 g/m², which is prepared by cutting fibers, has the best sound-absorption property. The airspace thickness shows a great influence on the sound absorption coefficient at low frequency, the sound absorption coefficient peak values shift to the low frequencies with the airspace get thicker.

Key words: aluminum fibrous composite panel; substation; sound-absorption property; structure parameters; sound absorbing coefficient

近年来, 我国超特高压输电工程快速发展, 城区扩建的高电压等级的变电站不可避免地进入人口密集

区^[1-2], 变电站厂界和周围部分较高的噪声污染对站区周围的社区、学校以及站内运行人员的正常作业造成

基金项目: 国家电网公司科技资助项目(DG71-10-001)

收稿日期: 2011-06-07; 修订日期: 2012-03-01

通信作者: 杨富尧, 工程师, 硕士; 电话: 010-82813345 转 8504; E-mail: yangfuyao@epri.sgcc.com.cn

了严重影响^[3], 急需采取合理降噪措施进行治理。而改制站内设备的结构降噪治理周期长、成本高、可行性差^[4-7], 故目前对于已投运的变电站主要采用吸声材料进行降噪。

针对变电站噪声源特点及服役环境, 根据国内外大量吸声材料相关的试验及应用研究数据^[8-12]可知, 与其他类型的吸声材料相比, 金属纤维吸声板因其具有强度高、吸声效果好、易加工、耐候性好、传热好、环保易回收以及综合使用成本低等优点而受到广泛关注^[13-16]。其中铝纤维因密度小、用量省、耐蚀性好、加工工艺简单、生产成本低, 较其他金属纤维相比拥有更大优势。然而国内铝纤维吸声板的研究起步较晚, 应用推广缺乏相关系统的试验数据支撑。对于金属纤维吸声板, 面密度(纤维质量)、空腔厚度和纤维种类等因素对其吸声性能影响较大^[12-14]。本文作者通过制备具有不同结构参数的铝纤维吸声板, 研究分析结构参数对铝纤维复合板吸声性能的影响规律, 对铝纤维吸声板结构参数的优化及吸声材料的发展具有一定的指导与推动作用。

1 实验

如图 1 所示, 铝纤维复合板由具有不同孔径尺寸的铝板网、铝纤维毡、铝箔及龙骨(隔板)组成, 其中影响铝纤维复合板吸声性能的主要因素有纤维种类、面密度(纤维质量)和空腔厚度。铝纤维复合板具体制备过程为: 将铝板网、铝纤维毡、铝箔进行前期热处理, 然后分别剪切成 11 cm×11 cm 大小, 按照图 1 所示位置铺好, 使用小型轧机轧制成 1.50 mm 厚的铝纤维复合板。图 2(a)和(b)所示分别为以切削和熔抽纤维为原料制备的复合板。将铝纤维复合板采用龙骨(隔

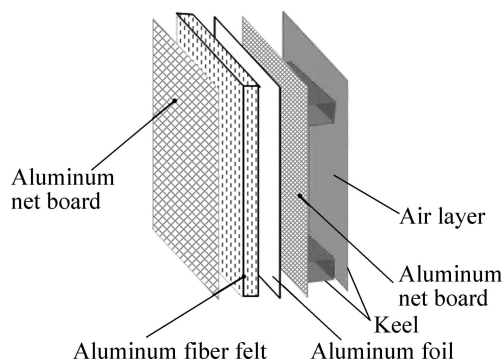


图 1 铝纤维复合板各组成部分及龙骨(隔板)结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of components of aluminum fibrous composite panels and the keel (partition)

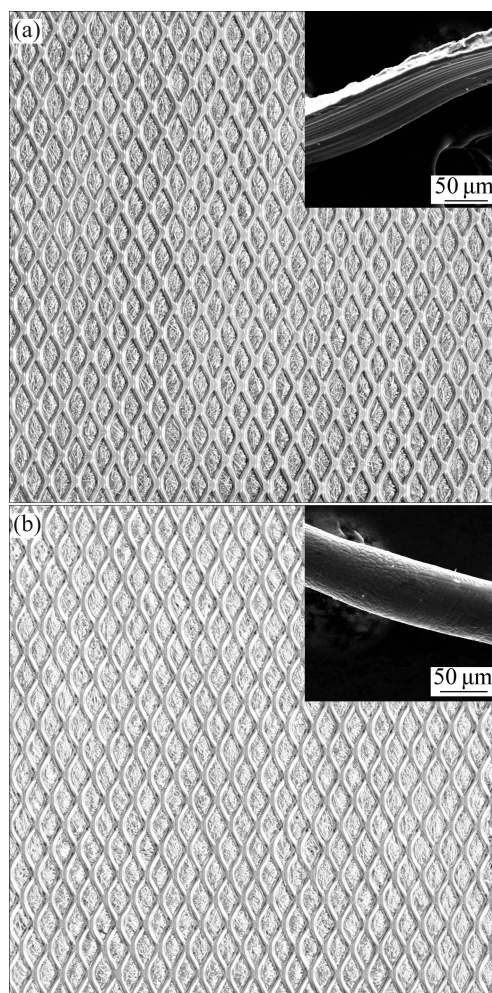


图 2 两种铝纤维复合板的宏观形貌

Fig. 2 Macro-morphologies of aluminum fibrous composite panels: (a) Composite panels with cutting fibers; (b) Composite panels with fusing drawing fibers

板)安装, 与板背面有一定厚度的空气层组成吸声结构。各铝纤维复合板样品及其结构参数如表 1 所列。

分别选用直径为 70~90 μm 的切削法及熔抽法铝纤维^[17]为原料, 采用不同纤维面密度和空腔厚度制备带有龙骨结构的铝纤维复合板, 将铝纤维复合板及龙骨(隔板)加工成吸声性能检测所需的尺寸 $d99.5\text{ mm}$ 。采用驻波比法, 按照 GBT/18696《声学—阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量》检测铝纤维板吸声结构的吸声系数, 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^[18]。

2 结果与分析

2.1 面密度对吸声性能的影响

图 3 所示为固定 8 cm 背腔(即铝纤维吸声板后空

表1 铝纤维复合板样品及其结构参数

Table 1 Structure parameters of aluminum fibrous composite panels

Sample No.	Fiber category	Surface density/(g·m ⁻²)	Thickness of airspace/cm
1	Cutting fiber	484	8
2	Cutting fiber	605	8
3	Cutting fiber	726	8
4	Fusing drawing fiber	484	8
5	Fusing drawing fiber	605	8
6	Fusing drawing fiber	726	8
7	Cutting fiber	484	0
8	Cutting fiber	484	4
9	Cutting fiber	484	12
10	Fusing drawing fiber	484	0
11	Fusing drawing fiber	484	4
12	Fusing drawing fiber	484	12

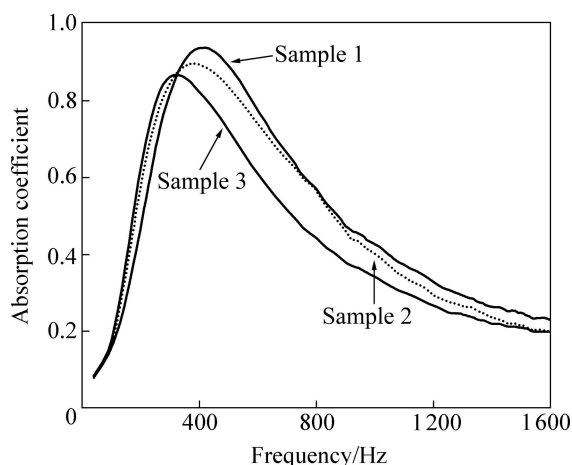


图3 不同面密度的切削铝纤维复合板吸声性能的对比

Fig. 3 Comparison of absorption coefficients of cutting fibers samples with different surface densities

气腔厚度),以切削纤维毡为原料制备的3种不同面密度铝纤维复合板的吸声性能对比,图4所示为采用熔抽铝纤维毡为原料制备的3种不同面密度铝纤维复合板吸声性能对比。测量频率采用三分之一倍频程。测量结果表明,该吸声结构共振特性十分明显,吸声系数变化趋势均为随着频率 f 的增加而先增大后减小,在200~600 Hz范围内共振频率出现明显的共振吸声峰。目前国内外发展的吸声材料如岩棉、玻璃棉等无机纤维材料以及不锈钢纤维材料均具有在高频段吸声性能好,而在低频段吸声效果差的缺点^[19-21]。由图3和4可见,该方法制备的铝纤维复合板在低频段具有

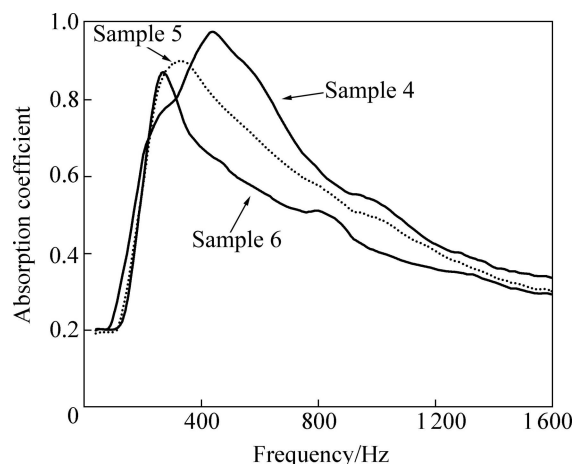


图4 不同面密度的熔抽铝纤维复合板吸声性能的对比

Fig. 4 Comparison of absorption coefficient of fusing drawing fibers samples with different surface densities

较好的吸声效果,吸声系数峰值达到0.9以上。因此,针对变压器、高压电抗器和电容器产生的噪声以63~500 Hz的中低频电磁噪声为主^[4-7]的特点,采用该新型铝纤维复合板进行噪声治理与变电站的噪声源得到了较好的契合。

由图3和4可知,相同的频率范围内,不同面密度的样品吸声性能不同。共振频率吸声峰均随面密度的增加,总体吸声性能变差,峰值略微下降,这种共振吸声结构可借鉴穿孔板共振吸声结构加以讨论。法向相对阻抗率为 ξ ,是单位面积吸声结构的声阻抗 Z_a 与空气特性阻抗 $\rho_0 c_0$ 的比值。如式(1)~(3)所示^[22]。

$$\xi = r + jx \quad (1)$$

$$x = x_1 + x_2 = \frac{1}{\cos \theta} \coth \left(\frac{j\omega D \cos \theta}{c_0} \right) + j \left(\frac{\omega l}{\sigma c_0} \right) \quad (2)$$

式中:实部 r 为相对法向声阻率,虚部 x 为相对法向声抗率, ω 为入射波的角频率, θ 为入射声波角度, D 为空腔厚度, l 为考虑各项修正后的等效板厚, σ 为板的等效穿孔率。

当声波入射时,吸声结构的吸声系数为

$$\alpha = \frac{4r \cos \theta}{(1 + r \cos \theta)^2 + (x \cos \theta)^2} \quad (3)$$

对于任一特定角度,吸声系数 α 的大小变化趋势相同。为了方便讨论,仅需考虑声波垂直入射时(θ 为 0°)各参量的影响。铝纤维复合板吸声系数的大小取决于实部 r 和虚部 x 。当面密度增大时,即纤维含量增多,相同面积下的铝纤维复合板变得更加密实,等效穿孔率 σ 减小,使依靠空气摩擦震动消耗能量的阻性部分作用减小,声阻率减小($r < 1$),所以共振吸声峰

值会随着面密度的增大而略微下降。并且 σ 较低时,虽一定程度上改善了低频吸声性能,但由于声波较难进入材料内部,样品的总体吸声性能变差。面密度增大等效板厚 l 略有增加,使两种铝纤维复合板吸声系数峰值均向低频段移动,这与不锈钢纤维多孔材料的吸声特性类似^[23]。

2.2 空腔厚度对吸声性能的影响

图5和6所示为固定面密度、改变空腔厚度时铝纤维复合板吸声性能的对比。由图5和6可以看出,有无空腔对吸声性能影响很大。没有空气层时(空腔厚度为0 cm),两种纤维板的吸声系数均低于0.2,达不到吸声效果。面密度相同时,尽管背腔空气层厚度不同,同种纤维吸声板的吸声系数峰值大小相近,与2.1节中的分析一致。随着空腔厚度的增大,共振吸声峰

逐渐向低频移动,该规律符合王佐民和俞悟周^[24]对该共振结构声学特性的理论分析:低频声波的波长较长,易在空腔厚度大时形成共振吸声结构,而高频声波波长较短,空腔厚度越小则越易形成共振吸声结构。由图5和6可见,增加空腔厚度可显著改善该两种铝纤维复合板的低频吸声性能,但使高频段的吸声系数降低。当空腔厚度达到12 cm时,在高频段出现吸声谷。一般认为,当纤维板空腔厚度等于1/4波长的奇数倍时,其相应的频率长处的声压为零,空气质点的振动速度最大,则吸声可获得最大的吸声系数。这是因为距刚性壁面1/4波长板所起的摩擦阻性效果最大,使声能损耗达到最大,达到最好吸声效果,这时出现共振吸声峰;而距刚性壁面1/2波长处的声压最大,质点振动速度为零,这时相应频率材料的吸声系数最小,出现吸声谷。

2.3 纤维种类对吸声性能的影响

分别对比图3和4、图5和6可知,切削纤维的吸声曲线较平滑,而熔抽纤维的曲线则略显凹凸不平,这是由于切削铝纤维较易加工,易形成形状规则的铝纤维毡,方便铺展,均匀性较好。而熔抽铝纤维由于制备工艺复杂,表面粘性强,铺展困难,使制备铝纤维复合板时纤维较难铺展,不可避免存在纤维铺设不均匀现象。

为方便比较,由表2列出两种铝纤维复合板各样品的吸声性能。由表2可以看出,具有相同空腔厚度(空气层厚度大于0 cm)和面密度的铝纤维复合板吸声系数峰值大小接近,均在0.90左右。比较63~500 Hz中低频段两吸声板的平均吸声系数可知,空腔厚度大于4 cm时,切削铝纤维复合板的平均吸声系数较高,吸声效果较好。而在40~1 600 Hz整体频段,切削纤维板的平均吸声系数则较低,这说明切削铝纤维复合板在高频段的吸声系数衰减较快,不适合作为高频吸声材料使用。但由于切削法铝纤维制备工艺简单,生产技术成熟,成本低,产能大,而熔抽法纤维制备工艺复杂,对设备、环境要求苛刻,原料获取困难,并且变压器、电抗器和电容器产生的噪声以中低频电磁噪声为主,因此,综合考虑后选择切削铝纤维复合板为治理变电站噪声的吸声材料。

由上述检测结果及分析可知,通过改变面密度、铝纤维复合板空腔厚度和纤维种类等参数可直接影响材料的吸声性能。吸声系数的总变化趋势是随频率的增加而呈波浪起伏状,且共振吸声峰值、谷值出现的频率位置受以上各参数的影响。因此,可通过改变以

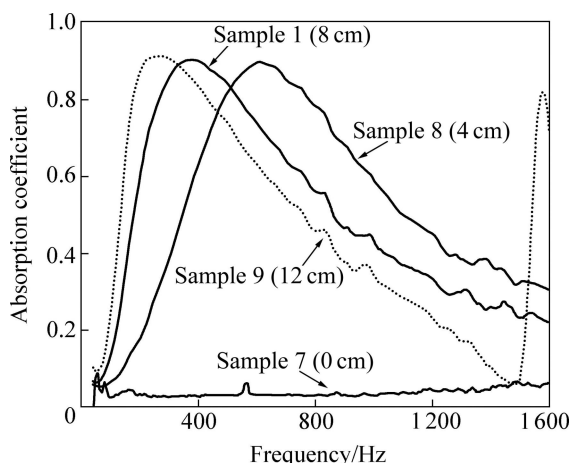


图5 不同空腔厚度的切削铝纤维复合板吸声性能的对比
Fig. 5 Comparison of absorption coefficient of cutting fibers samples with different airspace thickness

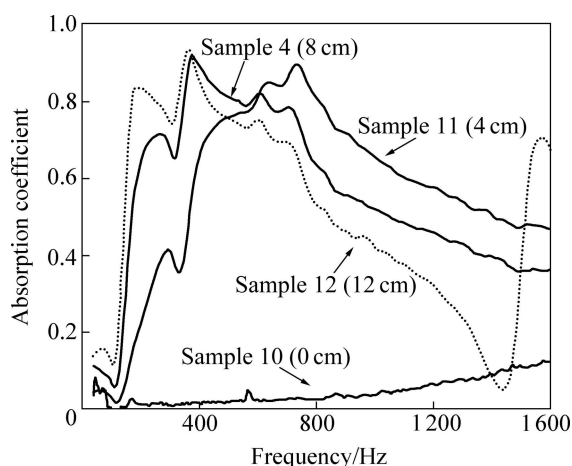


图6 不同空腔厚度的熔抽铝纤维复合板吸声性能的对比
Fig. 6 Comparison of absorption coefficient of fusing drawing fibers samples with different airspace thickness

表 2 铝纤维复合板样品吸声性能对比

Table 2 Comparison of absorption properties of aluminum fibrous composite panels

Sample No.	Fiber category	Sound absorption coefficient peak value	Average absorption coefficient value from 63 Hz to 500 Hz	Overall average absorption coefficient value
1	Cutting fiber	0.93	0.684	0.496
2	Cutting fiber	0.89	0.684	0.483
3	Cutting fiber	0.87	0.684	0.476
4	Fusing drawing fiber	0.96	0.631	0.585
5	Fusing drawing fiber	0.89	0.601	0.494
6	Fusing drawing fiber	0.86	0.529	0.409
7	Cutting fiber	0.06	0.032	0.035
8	Cutting fiber	0.89	0.421	0.530
9	Cutting fiber	0.90	0.732	0.466
10	Fusing drawing fiber	0.12	0.015	0.034
11	Fusing drawing fiber	0.89	0.573	0.574
12	Fusing drawing fiber	0.90	0.509	0.531

上参数,设计针对变电站的噪声特点的铝纤维复合板进行噪声治理。

3 结论

1) 该种铝纤维吸声板是一种低频吸声性能优异的吸声材料,铝纤维吸声板的面密度、空腔厚度和铝纤维种类等参数对其低频吸声性能有显著影响,其中面密度为 484 g/m²,具有一定空腔厚度的两种吸声板综合吸声效果较好。

2) 纤维吸声板无空腔时其吸声作用很小,空腔厚度的改变对材料的共振吸声峰值大小基本无影响,对整体频段吸声效果影响不大。空腔厚度增大,吸声峰和吸声谷均向低频段移动。针对变电站噪声的中低频段特点及吸声板的空间占用情况,背腔厚度 8 cm 较为合适。

3) 综合考虑变电站噪声特点及铝纤维的成本、技术等因素,选择切削铝纤维复合板进行电磁振动噪声的治理。

REFERENCES

[1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 4-7.
LIU Zhen-ya. Ultra-high voltage grid [M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2005: 4-7.

[2] 叶建斌, 陈 雁. 变电站环境噪声现场测试分析讨论[J]. 广东电力, 2005, 18(10): 53-56.

YE Jian-bin, CHEN Yan. Analysis and discussion on field measurement of substation ambient noise [J]. Guang Dong Electric Power, 2005, 18(10): 53-56.

[3] 尹大千, 吴怡敏, 余 波, 丁晓飞. 特高压直流换流站可听噪声分析与控制[J]. 电力科技与环保, 2010, 26(4): 45-47.
YIN Da-qian, WU Yi-min, YU Bo, DING Xiao-fei. Analysis and control of audible noise in UHVDC converter station [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2010, 26(4): 45-47.

[4] 张劲松. 高压直流换流站噪声综合治理研究[J]. 电力建设, 2007, 28(8): 14-16.
ZHANG Jin-song. Research on comprehensive treatment of HVDC converter station noise [J]. Electric Power Construction, 2007, 28(8): 14-16.

[5] 杨一鸣, 章旭雯. 特高压直流换流站设备的降噪措施[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 149-152.
YANG Yi-ming, ZHANG Xu-wen. Study on noise reduce for equipment at UHVDC converter station [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 149-152.

[6] 周建国, 李莉华, 杜 茵, 迟 峰. 变电站, 换流站和输电线路噪声及其治理技术[J]. 中国电力, 2009, 42(3): 75-78.
ZHOU Jian-guo, LI Li-hua, DU Yin, CHI Feng. Review on methods of noise reducing for equipment in substations, converter stations and transmission lines [J]. Electric Power, 2009, 42(3): 75-78.

[7] 陈泽萍, 李 强. 变电站环境噪声评价与防治[J]. 电力环境保护, 2008, 24(1): 61-62.
CHEN Ze-ping, LI Qiang. Transformer substation noise pollution assessment and its control [J]. Electric Power Pnvironmental Protection, 2008, 24(1): 61-62.

- [8] SUN Fu-gui, CHEN Hua-ling, WU Jiu-hui, FENG Kai. Sound absorbing characteristics of fibrous metal materials at high temperatures [J]. *Applied Acoustics*, 2009, 71: 221–235.
- [9] 熬庆波, 汤慧萍, 朱纪磊, 王建永. FeCrAl 纤维多孔材料梯度结构吸声性能的研究[J]. *功能材料*, 2009, 40(10): 1764–1766.
- AO Qing-bo, TANG Hui-ping, ZHU Ji-lei, WANG Jian-yong. Study on sound absorption performance of FeCrAl fibrous porous materials gradient structure [J]. *Functional materials*, 2009, 40(10): 1764–1766.
- [10] 冯苗峰, 吕玉恒. 吸声材料的市场需求及发展趋势探讨[J]. *噪声与振动控制*, 2007(5): 9–12.
- FENG Miao-feng, LÜ Yu-heng. Exploration of market demand and development trend of sound absorption material [J]. *Noise and Vibration Control*, 2007(5): 9–12.
- [11] WANG Lu-cai, WANG Fang, WU Jian-guo, YOU Xiao-hong. Sound absorption property of open-pore aluminum foams [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16: 1446–1449.
- [12] YANG Shu, YU Wei-dong, PAN Ning. Investigation of the sound-absorbing behavior of fiber assemblies [J]. *Textile Research Journal*, 2010, 81(7): 673–682.
- [13] 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 Huang-ling. Research on the sound absorption characteristics and application for metal fiber materials [J]. *Noise and Vibration Control*, 1999(5): 32–36.
- [14] WANG C N, TORNG J H. Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials [J]. *Applied Acoustics*, 2001, 62: 447–459.
- [15] 李海涛, 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.
- LI 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.
- [16] 钟祥璋, 莫方朔, 祝培生. 一种新型吸声材料—铝纤维板得吸声特性[J]. *电声技术*, 2001, 1: 12–16.
- ZHONG Xiang-zhang, MO Fang-shuo, ZHU Pei-sheng. Sound absorption characteristic of a new absorbing material — Aluminum fibre panel [J]. *Audio Engineering*, 2001, 1: 12–16.
- [17] 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(3): 195–202.
- [18] GB/T 18696.1—2004 声学—阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量[S].
- GB/T 18696.1 — 2004 Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes [S].
- [19] 韩冬, 张俊红, 张英, 张树朝. 金属铝纤维的性能研究及其应用进展[J]. *轻金属*, 2007(12): 67–70.
- HAN Dong, ZHANG Jun-hong, ZHANG Ying, ZHANG Shu-chao. Development of research and application of aluminum fibre [J]. *Light Metals*, 2007(12): 67–70.
- [20] 钟祥璋, 罗小华, 冬利. 覆面层对玻璃棉吸声性能的影响[J]. *应用声学*, 1998, 17(4): 41–43.
- ZHONG Xiang-zhang, LUO Xiao-hua, DONG LI. Effects of covering layers on the sound absorptive property of fibre glass board [J]. *Applied Acoustics*, 1998, 17(4): 41–43.
- [21] 钱军民, 李旭祥. 聚合物-岩棉发泡复合材料吸声性能的研究[J]. *材料开发与应用*, 2000, 15(3): 16–18.
- QIAN Jun-min, LI Xu-xiang. Acoustic property of foamed polymer-rockwool composite materials [J]. *Development and Application of Materials*, 2000, 15(3): 16–18.
- [22] 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.
- [23] 汤慧萍, 朱纪磊, 王建永, 葛渊, 李程, 邸小波. 不锈钢纤维多孔材料的吸声性能[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(12): 1943–1947.
- TANG Hui-ping, ZHU Ji-lei, WANG Jian-yong, GE Yuan, LI Cheng, DI Xiao-bo. Sound absorbing properties of stainless steel fiber porous materials [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(12): 1943–1947.
- [24] 王佐民, 俞悟周. 铝纤维复合板共振结构声学特性的理论初析[J]. *声学技术*, 2005, 24(3): 183–185.
- WANG Zuo-min, YU Wu-zhou. Theoretical analysis on acoustical characteristics aluminum fiberboard [J]. *Technical Acoustics*, 2005, 24(3): 183–185.

(编辑 何学锋)