

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.06.016

## 不同直径纤维混合玻璃纤维纸的保温隔音性能

李艳明 陈照峰 陶华 杨勇 吴操 鲍舒婷 王飞

(南京航空航天大学绝热与节能材料国际实验室,南京,211106)

**摘要:**玻璃纤维纸是一种优良的阻燃保温隔音过滤材料,在高铁、航空航天和航海领域有广泛的应用。本文通过湿法打浆工艺制备不同纤维混合的玻璃纤维纸,重点探究其孔径分布、透气性能、保温性能以及隔音性能。结果表明:随着玻璃纤维纸中细纤维含量的增加,平均孔径和透气率先减小后增加;随着玻璃纤维纸中细纤维含量的增加,纸张的导热系数先降低后升高,隔音量先升高后降低。纤维配比为粗纤维 50%+细纤维 50%,玻璃纤维纸的保温隔音性能最佳。

**关键词:**玻璃纤维纸;保温;隔音

**中图分类号:** TB321

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2017)06-0858-07

### Heat and Sound Insulation Properties of Glass Fiber Paper with Different Diameter Fiber

LI Yanming, CHEN Zhaofeng, TAO Hua, YANG Yong, WU Cao, BAO Shuting, WANG Fei

(International Laboratory for Insulation and Energy Efficiency Materials, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

**Abstract:** Glass fiber paper is a kind of excellent non-flammable, heat and sound insulation, filterable materials, which is widely used in high-speed rail, aerospace and marine areas. This paper mainly explores pore diameter distribution, air permeability, heat and sound insulation property of glass fiber paper prepared of beating by wet process with different diameter fiber. The results show that with the increase of content of fine glass fiber of paper, the average pore diameter and air permeability decrease firstly and then increase, the thermal conductivity of paper decreases firstly and increases subsequently, and the sound transmission loss of paper increase firstly and decreases subsequently. At the ratio of 50% crude fiber and 50% fine fiber, the glass fiber paper has the best heat and sound insulation properties.

**Key words:** glass fiber paper; heat insulation; sound insulation

随着科技的进步,人们生活水平的提高,对飞机、汽车和高铁等交通工具的舒适感要求越来越高,交通工具的保温隔音措施需要做的越来越好。为了达到保温降噪的目的,优质的保温隔音材料已经成为科研工作者研究的重点<sup>[1-4]</sup>。

火焰法玻璃纤维,纤维直径 $\leq 4 \mu\text{m}$ ,以玻璃球

或碎玻璃为主要原料,配合一些纯碱,硼砂等辅料,经熔化用火焰喷吹,将熔融玻璃液喷吹制成无机纤维<sup>[5-6]</sup>。由于具有纤维直径较细、耐高温性能好、强度高、吸湿性低及绝缘性好等一系列优异特性,已成为保温、隔音和过滤的首选材料。目前已广泛应用在建筑、石化、能源、航空航天等领域<sup>[7-9]</sup>。

**基金项目:**江苏省联合载体项目(BM2016010)资助项目。

**收稿日期:** 2016-11-28; **修订日期:** 2017-10-27

**通信作者:** 陈照峰,男,教授,博士生导师, E-mail: zhaofeng\_chen@163.com。

**引用格式:** 李艳明,陈照峰,陶华,等. 不同直径纤维混合玻璃纤维纸的保温隔音性能[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(6): 858-864. LI Yanming, CHEN Zhaofeng, TAO Hua, et al. Heat and sound insulation properties of glass fiber paper with different diameter fiber[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(6): 858-864.

研究表明,保温材料的密度、种类、孔径大小、结构组成、气孔中气体种类和压力影响导热系数<sup>[10]</sup>。李倩等<sup>[11]</sup>通过对在不同玻璃纤维直径和不同孔隙率条件下计算结果的分析,讨论玻璃纤维直径和材料孔隙率对保温纸导热系数的影响,在此基础上确立基于材料孔隙率的导热系数近似简易预测公式。郑新苗等<sup>[12]</sup>研究了纤维直径对玻璃棉纤维纸微观结构和宏观性能的影响。结果表明:随着玻璃棉纤维平均直径的降低,孔隙率成明显增大的趋势,纸张的厚度逐渐增大,透气度越小;玻璃棉纤维纸的导热系数有明显降低的趋势,当玻璃棉纤维平均直径小于 $1\ \mu\text{m}$ 时,导热系数随直径的变化较明显,且直径越小,导热系数减小得越快。何红梅等<sup>[13]</sup>研究了温度、多孔填料及填料的添加比例对6种不同打浆度玻璃棉纤维纸导热系数的影响。温度升高会提高纸张的导热系数。添加填料的种类和目数对其成纸的导热系数也有所影响。Mo等<sup>[14]</sup>发现不同种类的纤维混合影响纸张的保温性能。Delany等<sup>[15]</sup>证明纤维材料的声学性能取决于密度和流阻。Castagnede等<sup>[16]</sup>发现纤维毡的吸声性能随着透气性的增加而降低。Kim等<sup>[17]</sup>发现材料的孔隙率和空气层影响多层纤维纸的声学性能。Li等<sup>[18]</sup>探讨了混合纤维对材料的声学性能影响。结果表明,与单一纤维多孔材料,混合纤维多孔材料具有更好的宽频声学特性。徐颖等<sup>[19]</sup>证明多孔材料的直径增大,孔隙率增大,厚度增大,材料的吸声性能提高。

本实验采用不同纤维直径混合的火焰法玻璃纤维制备玻璃纤维纸并探讨其保温隔音性能。通过对孔径分布、透气率、导热系数以及隔声量进行表征,研究其保温隔音影响机理,寻找纤维混合玻璃纤维纸保温隔音性能最佳比例,为玻璃纤维隔保温隔音纸的纤维选择和性能改善提供一些思路。

## 1 实验

### 1.1 材料制备过程

玻璃纤维棉的制备主要分为火焰法和离心法。研究表明细小的纤维直径可以使玻璃纤维毡获得优异的保温隔声性能,火焰法制备的玻璃纤维直径更细小,可以达到 $3\ \mu\text{m}$ 以下,因而火焰法玻璃棉具有比离心法玻璃棉更优异的隔音隔热性能。本实验采用火焰法制备玻璃纤维,将玻璃纤维通过湿法打浆抄纸工艺制备成玻璃纤维纸,研究火焰法玻璃纤维纸的隔音隔热性能

称取平均直径 $3.4\ \mu\text{m}$ 和 $1.4\ \mu\text{m}$ 两种火焰法玻璃棉 $20\ \text{g}$ 放入浆料疏解器中,加入约 $10\ \text{L}$ 水,并滴加 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 调节玻璃棉纤维浆液 $\text{pH}$ 值至

$2.5\sim 3.0$ 左右,通过疏解器进行疏解,将疏解好的浆料倒入纸样抄片器内稀释后成形。将毛布覆盖在成形的手抄片上,然后用圆桶轻轻滚压,使手抄片粘在毛布上,接着将毛布和湿手抄片放入真空干燥器内抽真空干燥至水分约为 $10\%\sim 15\%$ ,取出后揭下毛布,将未完全干燥的手抄片置于鼓风干燥箱内烘干。温度设定为 $100\sim 120\ ^\circ\text{C}$ ,烘干至手抄片完全干燥。

### 1.2 材料性能表征

#### 1.2.1 玻璃纤维直径测试

采用L3230型金相显微镜测试玻璃纤维直径。取玻璃纤维中任意一束,截取长度 $10\sim 15\ \text{mm}$ ,放在载玻片上,将纤维分开。然后用玻璃棒蘸取一滴酒精在载玻片上,浸渍试样并覆盖上盖玻片。随机选择纤维,记录所在视野的所有纤维,直至获得100个读数,根据实验所得数据绘制玻璃纤维直径分布图。

#### 1.2.2 孔径测试

采用PSDA-20型孔径测试仪测试玻璃纤维纸孔径。利用浸润性的液体充分浸润多孔材料,然后通过气体将液体排出,根据所用气体压力和液体表面张力来计算材料孔径。测试最大孔径时,气体的压力由小变大,气体逐渐将液体从孔隙中排开而冒泡,通过第1个气泡的压差,就可按式(1)计算出材料的最大孔径

$$D = \frac{4\gamma\cos\theta}{\Delta p} \quad (1)$$

式中: $D$ 为材料的最大孔径, $\gamma$ 为浸润液的表面张力( $\text{N/m}$ ), $\theta$ 为浸润液与被测材料的浸润角, $\Delta p$ 为在试样两侧的压差。

测定孔径分布时,气体压力逐渐增大,孔道中的液体逐渐被排除,同时气体的流量也随之增大,直至液体从所有的孔隙中排除。通过气体流量和试样两端压差,即可得出流量与压差曲线,解析曲线可得孔径分布<sup>[20]</sup>。选择玻璃棉纸样品为圆形,直径为 $3\ \text{mm}$ ,液体流量为 $20\ \text{L/min}$ ,浸润剂表面张力 $\gamma$ 为 $16\times 10^{-3}\ \text{N/m}$ 。

#### 1.2.3 玻璃纤维纸透气性能测试

采用YG461E型数字式透气量仪测试玻璃纤维纸透气率。透气性指材料两面存在固定压差情况下,材料透过空气的能力,习惯上用透气率表示,即在规定的实验面积、压差和时间条件下气流垂直通过材料的速率,单位为 $\text{mm/s}$ 。材料的透气性测试原理是根据材料的特点,选择相应的喷嘴口径,抽取空气,使得材料两侧达到固定压差,产生稳定的气流通过材料,再根据喷嘴孔径和两侧压差大小计算材料的透气率。按式(2)可以计算透气率

$$R = \frac{\overline{q_v}}{A} \times 167 \quad (2)$$

式中:  $R$  为透气率,  $\overline{q_v}$  为平均气流量;  $A$  为试验面积, 167 是由  $\text{dm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$  换算成  $\text{mm}/\text{s}$  的换算系数。在测试前, 将待测试样进行预调湿, 将样品在温度  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 相对湿度  $65 \pm 2\%$  的标准大气压环境中达到平衡。对同一样品的不同部位测量至少 4 次, 求其平均值。对纸张透气率进行测试, 样品的尺寸为  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。测试面积为  $20 \text{ cm}^2$ , 压力设定为  $200 \text{ Pa}$ 。

#### 1.2.4 玻璃纤维纸保温性能测试

采用 HFM436 型热流法导热仪对玻璃纤维纸进行导热系数测试。导热系数是指在稳定传热条件下,  $1 \text{ m}$  厚的材料, 两侧表面的温差为  $1 \text{ K}$ , 在  $1 \text{ h}$  内, 通过  $1 \text{ m}^2$  面积传递的热量, 单位为  $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ 。通常把导热系数小于或等于  $0.2$  的材料称为保温材料, 而把导热系数在  $0.05 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$  以下的材料称为高效保温材料。HFM 436 系列导热仪是一种测量绝热材料热传导特性的仪器。进行测试时, 把样品放置在两个具有固定温差的测试板之间, 两个测试板上的热流传感器可以测得通过样品两个表面之间的热流变化, 并且依此计算出样品的导热系数, 当热流达到稳定时测试完成, 即得到样品在此平均温度下的导热系数。其基本结构如图 1 所示。

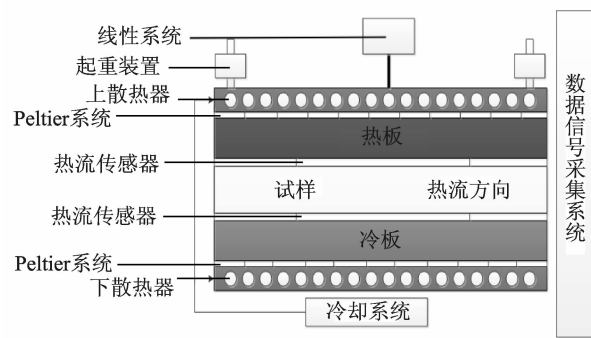


图 1 热流法导热仪测试导热系数基本结构示意图

Fig. 1 Basic structure diagram of heat flow method of thermal conductivity instrument

玻璃纤维纸由固相和气相组成。其总热导率  $\lambda_{\text{tot}}$  由式(3)表示

$$\lambda_{\text{tot}} = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r \quad (3)$$

式中:  $\lambda_s$  为固体热导率,  $\lambda_g$  为气态的热导率,  $\lambda_r$  为辐射热导。测量环境温度对  $\lambda_r$  影响较小,  $\lambda_s$  通过原子晶格振动进行热传输,  $\lambda_g$  为气体分子相互碰撞进行的热对流。对纸张进行导热系数测试。测试样品直径  $20 \text{ cm}$ , 测试温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 1.2.5 玻璃纤维纸隔音性能测试

采用驻波管法对玻璃纤维纸进行隔音性能测试。测试系统为 AWA6290T 传递函数吸声系数测试系统, 分析数据采用 AWA6290M 软件。评价材料隔音性能的物理量是隔音量 TL(单位为 dB), 又称作传声损失。驻波管法测量试材料的隔音量通常采用四传声器法, 测量装置和测试原理如图 2 所示<sup>[21]</sup>。测试样品大小为  $29 \text{ mm}$ , 选择  $1/3$  倍频程作为测试频率。

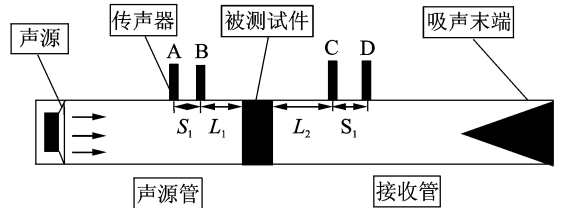


图 2 驻波管四传声器法测隔音量原理图

Fig. 2 Principle diagram of sound transmission loss by four-microphone standing wave tube method

当声波  $E_i$  发出后, 遇到障碍物, 分成 3 部分, 声波的反射  $E_r$ 、沿纤维轴向传播的声音  $E_a$  以及透过的声音  $E_t$ , 反射掉的声音  $E_r$  和沿轴向损失掉的声音  $E_a$  的总和为隔掉的声音, 声音在玻璃纤维纸中传播如图 3 所示<sup>[22]</sup>。

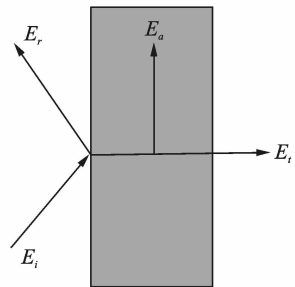


图 3 声波在玻璃纤维纸中的传播示意图

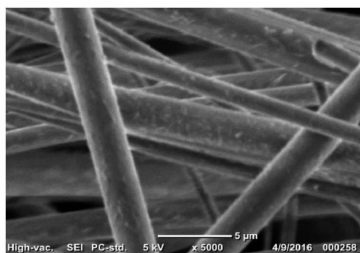
Fig. 3 Principle diagram of sound propagation in glass fiber paper

## 2 结果与讨论

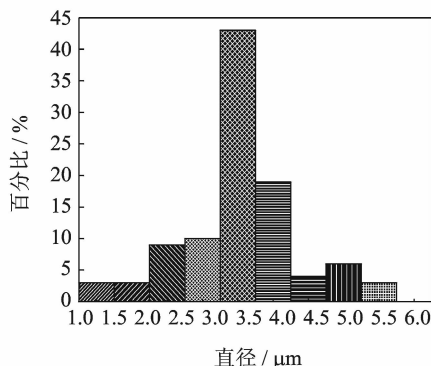
### 2.1 纤维直径分布

本实验利用显微镜统计两种纤维的直径, 测试根数分别为 100 根, 取其平均值: A 样品平均直径为  $3.4 \text{ }\mu\text{m}$ ; B 样品平均直径为  $1.4 \text{ }\mu\text{m}$ 。纤维直径分布情况如图 4 所示。

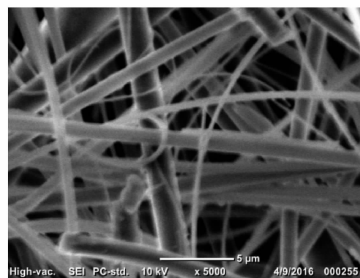
从玻璃纤维直径及其分布图可以看出, 所有玻璃纤维直径的分布呈现近似正太分布, 纤维直径主要集中在平均直径处。测试结果表明玻璃纤维直径存在一定的随机性和离散度, 可通过对玻璃液的成分和工艺参数的精确控制获得直径正态分布的玻璃纤维。



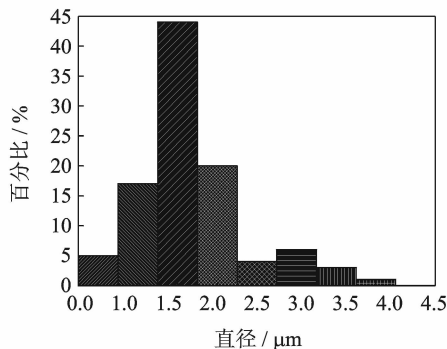
(a) Sample A



(b) Glass fiber diameter distribution of sample A



(c) Sample B



(d) Glass fiber diameter distribution of sample B

图 4 玻璃纤维直径及其分布

Fig. 4 Glass fiber diameter and distribution

## 2.2 玻璃纤维纸结构特征参数

A 和 B 纤维按一定比例混合,玻璃纤维纸的厚度和密度结果如表 1 所示。由表可见,随着玻璃纤维 B 含量的增加,纸张厚度先降低后增加,纸张密度先增加后降低。

由表可知,纯 A 玻璃棉制成的 1# 纸张厚度为 1.601 cm,大于纯 B 纤维棉制成的 11# 纸张厚度 1.491 cm,而当 A 和 B 各占 50% 时,纸张 6# 的厚度为 1.401 cm,最薄,密度最大,达到 0.182 g/m<sup>3</sup>,

表 1 玻璃纤维纸的厚度和密度

Tab. 1 Thickness and density of glass fiber paper

编号	玻璃纤维 A/%	玻璃纤维 B/%	厚度/cm	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )
1	100	0	1.601	0.159
2	90	10	1.543	0.165
3	80	20	1.501	0.170
4	70	30	1.452	0.176
5	60	40	1.425	0.179
6	50	50	1.401	0.182
7	40	60	1.417	0.180
8	30	70	1.432	0.178
9	20	80	1.449	0.176
10	10	90	1.466	0.174
11	0	100	1.491	0.171

该现象符合配比原理。

## 2.3 孔径分布

图 5 为玻璃纤维 B 对玻璃纤维纸平均孔径、最小孔径和最大孔径的影响。由图可见,玻璃纤维纸孔径随着玻璃纤维 B 的百分含量的增加呈先显著减小后缓慢增加的趋势,孔径分布与密度具有对应性和相关性,当 A, B 各占 50% 时,纤维纸密度最大,因而孔径最小。

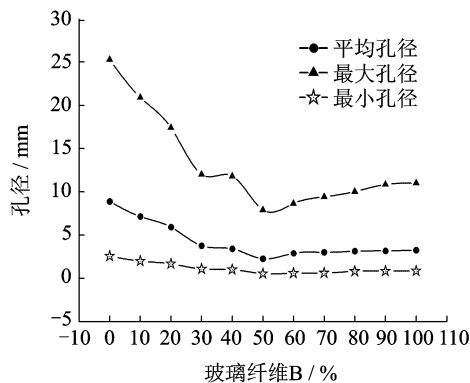


图 5 不同含量的玻璃纤维 B 对纸张孔径分布的影响

Fig. 5 Effect of different content of glass fiber B on pore size distribution in glass fiber paper

## 2.4 透气性

图 6 为玻璃纤维纸的透气率随 B 含量增加的曲线。从图中可以看出,随着纸张中玻璃纤维 B 的成分逐渐增加,纸张的透气率先降低后升高。纸张中玻璃纤维 B 含量在 0%~50% 之间,透气率下降较大,直径细小的纤维 B 对纸张的透气率影响较大。纤维 B 含量在 50%~100% 之间,透气率变化较小。在纤维配比为 50% 纤维 A+50% 纤维 B 达到最小值。

对照表 1 可知,纸张的密度先增加后减少,内部的孔径先降低后升高。对于密度较大的玻璃纤

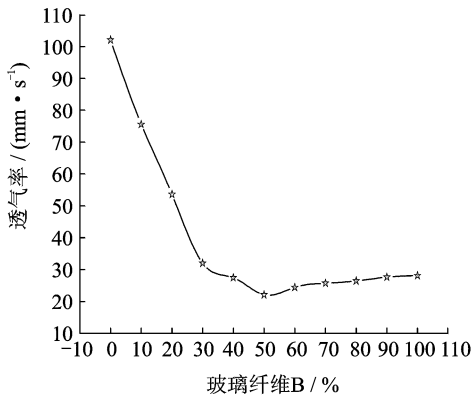


图6 不同含量的玻璃纤维B对纸张透气率的影响

Fig. 6 Effect of different content of glass fiber B on air permeability of paper

维纸来讲,当测试气流通过玻璃纤维纸的内部时,细小的孔径导致气流与玻璃纤维的接触面积增大,摩擦作用加强,气流的动能减弱变为热能散掉,进而导致透气率降低。

## 2.5 保温性能

图7为不同含量的玻璃纤维B对纸张导热系数的影响。由图可见,随着玻璃纤维B含量的逐渐升高,玻璃纤维纸的导热系数逐渐降低,当B含量大于50%后,导热系数又逐渐升高,导热系数最小的纤维配比为50%纤维A+50%纤维B。

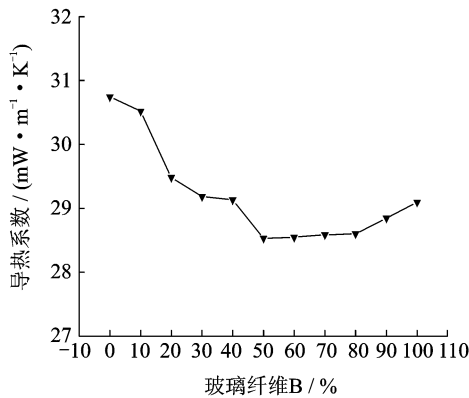


图7 不同含量的玻璃纤维B对纸张导热系数的影响

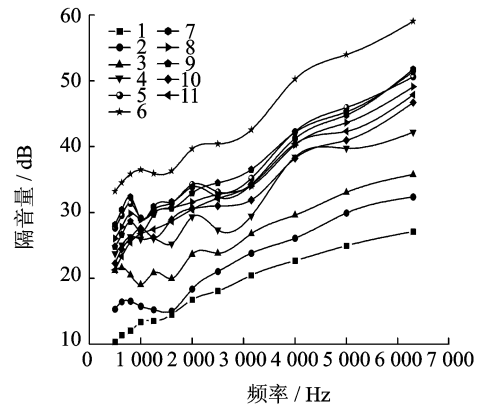
Fig. 7 Effect of different content of glass fiber B on thermal conductivity in glass fiber paper

对照表1可知,玻璃纤维B含量从0%增加到100%时,纸张的密度先增加后减小。玻璃纤维纸的热传递包括固相导热、辐射和对流3个部分。当纸张的密度增加时,一方面固相导热部分增加,而另一方面空隙尺寸的减小却使辐射和对流部分随之减小,综合结果导致导热系数随着密度的增加而减小。根据热传导机理,密度继续增加,固相导热部分也越来越大,在达到某一密度后,它将超过辐

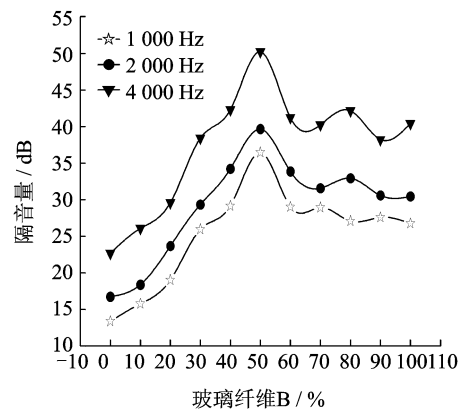
射和对流部分,而成为影响总的导热系数的主导因素,使导热系数随密度变化的曲线,从此开始回升,即大于此密度,导热系数将随密度的增大而增大。曲线上与导热系数最小值所对应的密度范围,称之为最佳密度。但在本试验目的考虑混合纤维的相互掺杂作用对纸张导热系数的影响,所制备纸张的密度较小,还未达到最佳的密度值。

## 2.6 隔音性能

图8为混合玻璃纤维纸隔音量曲线,其中图8(a)为玻璃纤维A和B混合的玻璃纤维纸的隔音量的变化,图中曲线1~11分别表示玻璃纤维B的含量从0%增加到100%的玻璃纤维纸;图8(b)为在1 000,2 000和4 000 Hz下不同含量的玻璃纤维B对纸张隔音量的影响。



(a) Effect of frequency on sound reduction index



(b) Effect of glass fiber B on sound reduction index

图8 混合玻璃纤维纸隔音量曲线

Fig. 8 Curve of sound reduction index of the glass wool paper

从图8(a)可见,随着声波频率的增加,纸张的隔音量逐渐增大,这符合玻璃棉对高频吸音更有效的规律。曲线6在整个声波频率上隔音量的最大,此时的纤维配比为50%纤维A+50%纤维B。为了方便清晰地看出隔音量随玻璃纤维B的含量的变化情况,选取特征频率1 000,2 000和4 000 Hz

来分析,绘制图 8(b)。由图 8(b)可见,随着玻璃纤维 B 含量的逐渐升高,玻璃纤维纸的隔音量先增加后降低,在玻璃纤维 B 为 50% 含量下,纸张的隔音量最大。玻璃纤维 B 的含量在 50%~100%,纸张的隔音量有波动。

随着玻璃纤维 B 含量的增加,纸张的密度先增加后减小。密度的增加导致玻璃纤维纸表面的特征阻抗与空气的阻抗不相匹配,玻璃纤维纸表面的反射加强提高整体隔声性能;密度的增加促使单位面积内的纤维数变多,孔隙曲折度增加,孔隙更加细小,声波在玻璃纤维纸内部传播时传播途径增长,摩擦增多消耗声能提高整体玻璃纤维纸的隔声量。

### 3 结 论

(1)不同纤维直径的混合会影响到纸张的厚度、密度、孔径和透气性能。随着玻璃纤维纸中细纤维 B 含量的增加,纸张的厚度先降低后增加,密度先增加后降低,平均孔径和透气率先减小后增加。

(2)随着细玻璃纤维 B 含量的增加,纸张的导热系数先降低后升高。在纤维配比为 50%粗纤维 A+50%细纤维 B 下,纸张的导热系数达到最小值,保温性能最优。

(3)随着细玻璃纤维 B 含量的增加,纸张的隔音量先升高后降低。在纤维配比为 50%粗纤维 A+50%细纤维 B 下,纸张的隔音量达到最大值,纸张的隔音性能最佳。

#### 参考文献:

- [1] 陈照峰,吴操,杨勇,等.航空级超细玻璃纤维棉毡的制备及隔音隔热性能研究[J].南京航空航天大学学报,2016,48(1):10-15.  
CHEN Zhaofeng, WU Cao, YANG Yong, et al. Preparation of super fine glass fiber cotton blanket and noise insulation performance study[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1): 10-15.
- [2] 王瑞乾.高速列车地板结构隔声及隔声提高方法探究[D].成都:西南交通大学,2014.  
Wang Ruiqian. Study on the sound insulation of floor of high-speed train and its improvement methods [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [3] MILLER A. The heat and sound insulation of buildings[J]. Journal of the Society of Chemical Industry. 1983, 57(43): 981-982.
- [4] 宋杰光,刘勇华,陈林燕,等.国内外绝热保温材料的研究现状分析及发展趋势[J].材料导报,2010,24(S1):378-380.
- [5] SONG Jieguang, LIU Yonghua, CHEN Linyan, et al. Current research status and development of thermal insulating materials in the world[J]. Materials Review, 2010, 24(S1): 378-380.
- [5] LI Yanming, CHEN Zhaofeng. The influence of different cross-sectional structure of glass fiber felt on its thermal conductivity and heat transfer mechanism [C]// Proceeding of 12th International Vacuum Insulation Symposium. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015.
- [6] YANG Y, CHEN Z. Research on dry process for making glass fiber core material of vacuum insulation panel[C]// Proceeding of 12th international vacuum insulation symposium. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015.
- [7] 张耀明,李巨白,姜肇中.玻璃纤维与矿物棉全书[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [8] YANG Yong, CHEN Zhaofeng, CHEN Zhou, et al. Processing technique and uniformity affecting tensile strength and hydrophobicity properties of glass wool felt[J]. Fibers and Polymers, 2015, 16(7): 1587-1594.
- [9] 祖群,陈士洁,孔令.高强度玻璃纤维研究与应用[J].航空制造技术,2009(15):92-95.  
ZU Qun, CHEN Shijie, KONG Ling. Research and application of high-strength glass fiber[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(15): 92-95.
- [10] FRANCL J, KINGERY W D. Thermal conductivity: IX, experimental investigation of effect of porosity on thermal conductivity[J]. Journal of The American Ceramic Society, 2011, 37(2): 99-107.
- [11] 李倩,曹璇,李晨玉,等.玻璃纤维保温纸导热系数的理论计算与实验研究[J].中国造纸,2013,32(1):35-41.  
LI Qian, CAO Xuan, LI Chenyu, et al. Theoretical calculation and experimental study of thermal conductivity coefficient of glass fiber heat insulation paper [J]. China Pulp & Paper, 2013, 32(1): 35-41.
- [12] 郑新苗,王海毅,田耀斌.纤维直径对玻璃棉纤维纸结构和性能的影响[J].中国造纸,2016,35(5):16-21.  
ZHENG Xinmiao, WANG Haiyi, TIAN Yaobin. Effect of fiber diameter on the structure and properties of glass fiber paper[J]. China Pulp & Paper, 2016, 35(5): 16-21.
- [13] 何红梅,王海毅,李杰,等.玻璃棉纤维纸导热性能的研究[J].中国造纸,2015,34(7):70-73.  
HE Hongmei, WANG Haiyi, LI Jie, et al. Study on the influencing factors of thermal conductivity of mi-

- cro-fiber glass wool paper[J]. *China Pulp & Paper*, 2015, 34(7): 70-73.
- [14] MO Jicheng, FAN Yumin, YU Gang. Manufacture of heat insulation paper based on furnish of fly ash fiber and plant fiber[J]. *Paper Chemicals*, 2012, 24(2): 11-14.
- [15] DELANY M E, BAZLEY E N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials[J]. *Applied Acoustics*, 1970, 3(2): 105-116.
- [16] CASTAGNEDE B, AKNINE A, BROUARD B, et al. Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials[J]. *Applied Acoustics* 2000, 61(2): 173-182.
- [17] KIM B S, CHO S J, MIN K D, et al. Sound absorption structure in helical shapes made using fibrous paper[J]. *Composite Structures*, 2015, 134(15): 90-94.
- [18] LI SHAN, XU Ying. Exploring sound absorption performance of hybrid fiber porous materials [J]. *Technical Acoustics*, 2015, 34(6): 379-382.
- [19] 徐颖, 李珊, 王常力, 等. 不锈钢纤维多孔材料吸声性能的研究[J]. *西北工业大学学报*, 2015, 33(3): 401-405.
- XU YING, LI SHAN, WANG Changli, et al. Exploring sound absorption performance of stainless steel fiber porous materials[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2015, 33(3): 401-405.
- [20] 刘培生. 多孔材料孔径及孔径分布的测定方法[J]. *钛工业进展*, 2006, 23(2): 29-34.
- LIU Peisheng. Determining methods for aperture and aperture distribution of porous materials[J]. *Titanium Industry Progress*, 2006, 23(2): 29-34.
- [21] 曲波, 朱蓓丽. 驻波管中隔声量的四传感器测量法[J]. *噪声与振动控制*, 2002(6): 44-46.
- QU BO, ZHU Beili. Four microphone method of sound transmission in the standing wave tube[J]. *Noise and Vibration Control*, 2002(6): 44-46.
- [22] ZHAO J, WANG X M, CHANG J M, et al, Sound insulation property of wood-waste tire rubber composite [J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(14): 2033-2038.

