

柔性吸声隔音降噪纺织复合材料

张春春^{1,2}, 巩继贤^{*1,2}, 范晓丹^{1,2}, 李辉芹^{1,2}, 李政^{1,2}, 张健飞^{1,2}

(1. 天津工业大学 纺织学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387)

摘要: 柔性吸声隔音降噪纺织复合材料由于能够提供比传统纺织品更宽的吸声域, 比传统降噪材料轻薄、柔软、透气和易加工而备受关注。开发基于纺织材料的聚合物复合材料是近年来噪声控制领域的热点研究方向之一。本文从新型纤维、降噪功能填料和柔性降噪纺织复合材料 3 个方面综述了国内外柔性吸声隔音纺织品的研究进展, 并归纳总结了柔性降噪纺织品的制备方法, 进一步对柔性吸声隔音降噪纺织品的发展趋势进行了展望。

关键词: 功能纺织品; 吸声; 隔音; 新型纤维; 填料; 阻尼材料

中图分类号: TE991.8;TB34

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2018)08-1983-11

Sound-absorbing and sound insulation soft composite materials of textile for noise reduction

ZHANG Chunchun^{1,2}, GONG Jixian^{*1,2}, FAN Xiaodan^{1,2}, LI Huiqin^{1,2},

LI Zheng^{1,2}, ZHANG Jianfei^{1,2}

(1. School of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. Key Laboratory of Advanced Textile Composites, Ministry of Education, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Soft composite materials of sound-absorbing and sound insulation textiles as a new-type noise reduction materials have drawn much attention because they can provide wider sound absorption band than traditional textiles and lighter, more softer, more breathable and easier to process than traditional noise reduction materials. Consequently, significant research interest in the field of noise control has been directed into the research of polymer composites based on textile materials. In this paper, a review of the research progress of soft textiles of sound-absorbing and sound insulation materials from three aspects of novel type fiber, functional fillers of noise reduction and soft noise reduction composites was presented. Furthermore, the preparation method and the developing trend of soft noise-reducing textiles were summarized.

Keywords: functional textiles; sound absorption; sound insulation; novel type fibers; fillers; damping material

随着城市化和生活方式的快速发展, 噪音无处不在。噪音污染已经是严重的环境污染且危害健康^[1]。据世界卫生组织(WHO)称, 噪音污染对健康和环境的影响仅次于空气污染。流行病学研究表明, 过度暴露在噪声污染中, 不仅会严重影响心理健康, 也会增加患心血管疾病的风险^[2-4]。巨大的噪声可能造成严重的疼痛或永久性的听力损伤^[5-8]。2017 年环保部发布的《中国环境噪声污染防治报告(2017)》中披露, 2016 年, 我国城市功能区环境昼

间检测点次数总达标率为 92.2%, 夜间监测点次数总达标率为 74.0%。可以说, 噪音污染的危害程度依然不能低估。因此, 如何有效地控制或解决噪音污染所带来的危害成为当前的首要任务。

纺织纤维材料以其疏松、多孔、轻薄、价格低廉和易加工等优良的性质, 被认为是良好的吸声隔音材料。机织物通常较薄且孔隙较大, 无法很好地反射入射声波, 也没有高度多孔的结构提供足够的曲折路径来消散声能。但在一些特殊场合仍需被开

收稿日期: 2018-03-29; 录用日期: 2018-03-31; 网络出版时间: 2018-04-11 11:04

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180410.002>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0400503-02); 新疆自治区重大专项(2016A03006); 中国纺织工业联合会科技指导性项目(2017011)

通讯作者: 巩继贤, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为功能纺织品 E-mail: gongjixian@126.com

引用格式: 张春春, 巩继贤, 范晓丹, 等. 柔性吸声隔音降噪纺织复合材料[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 1983-1993.

ZHANG Chunchun, GONG Jixian, FAN Xiaodan, et al. Sound-absorbing and sound insulation soft composite materials of textile for noise reduction[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 1983-1993 (in Chinese).

发利用,如装饰窗帘^[9-11],人们希望其具备一定的吸声性能。由于针织物本身的脱散性、卷边性等特性的影响,目前有关针织物类的吸声材料的研究相对较少。非织造布是由纤维网铺设而成的布状材料,纤维与纤维之间存在许多联通的空隙,满足多孔吸声的要求,是非常理想的吸声材料。它的工艺流程短,加工成型性好,且生产效率高,最主要的是易与其他的结构进行复合。复合结构大多是基于多层结构的设计,三明治结构^[12-13]通过改变不同层之间的相对位置来实现不同频率的吸声,多孔梯度结构^[14]是将具有不同孔隙度的各层按照梯度结构的方式排列来实现对低频吸声性能的提高。目前非织造材料已广泛应用在生活、汽车、航天和建筑等领域。以纤维材料为主体的纺织复合材料最大的特点是仍保持着纺织材料轻薄、柔软和易加工等特性,是一种很有发展前景的新型降噪材料。

“十三五”期间,随着生态环保意识提升、健康养老产业发展、新兴产业不断壮大和“一带一路”战略推进等,产业用纺织品行业仍将处于高速增长期。纺织复合材料中低频吸声隔音性能的提高成为了现代纺织吸声隔音材料研究领域关注的热点。本文主要阐述了新型降噪纤维材料和降噪功能填料在纺织品上的应用,介绍了柔性吸声隔音产品的设计和制备,并对柔性吸声隔音纺织复合材料的发展前景进行了展望。

1 新型降噪纤维

纺织材料作为多孔吸声材料的一种,在高频率范围内有很好的吸声效果,但在低频率范围内则表现较差。纤维是生产纺织材料的基本原材料,天然纤维具有易降解的特点,因此被广泛的应用到吸声降噪纺织品上,如一些植物类天然纤维,亚麻、龙舌兰、椰壳和动物类天然纤维,羊毛等^[15-18]。为了提高柔性吸声降噪材料的降噪性能,一些高性能的新型降噪纤维材料正在被不断的开发和使用。

1.1 异形纤维

异形纤维由于截面的特殊形状,增加了纤维间的蓬松性和硬挺性,故制成的产品普遍具有良好的三维立体结构和较高的孔隙率、蓬松度,因此相比于普通纤维有更好的吸声效果。异形纤维的吸声原理类似于亥姆霍兹共振腔,制成的织物能形成更多的不规则形状的孔隙,这些孔隙就是许多共振腔,不同形状的孔隙吸收不同频率的声波,并且异型纤

维的比表面积大,且异型纤维间的抱合力强,织物的摩擦系数大,能量消耗大,因此其吸音效果非常显著^[19]。

Harting^[20]将采用异形横截面的聚乙烯和聚丙烯(PP)纤维制成的针织物用于压缩空气装置时具有更好的消音效果。与相同旦尼尔的圆形横截面纤维(图1(c))相比,三叶形聚酯纤维(图1(a))和4DG形聚酯纤维(图1(b))制成的非制造布隔音性能更好^[21]。

Suvari等^[22]使用岛为尼龙-6聚合物、海为PP纤维聚合物制成了海岛双组分长丝,通过纺粘和水刺(图2)使长丝纤维原纤化。结果显示,在较高频率处长丝纤维原纤化成更细的纤维吸声系数明显提高。图3为经过水刺的非织造纤维网的横截面SEM图像^[22]。

中空纤维是指纤维横截面沿纤维轴向具有细管状空腔的一种重要的异形纤维。由于其内部存在空气腔,因此可以吸收更多的声波。入射声波可与空腔中的空气发生共振,从而大大地削减入射声能。Abdefattah等^[23]利用6(g/9 000 m)的聚酯纤维和中空聚酯纤维研制了可用于汽车内饰部件的非织造布,并对其吸声性能进行了研究。结果表明,由此两种纤维混合制备的非织造布具有更好的吸声性能,其中采用质量比为55%聚酯纤维-45%中空聚酯纤维混合并且织物质量为600 g/m²时制备的非织造布具备最佳的吸声效果。七孔中空聚酯纤维增强氯化聚乙烯吸声降噪复合材料在中低频范围内呈现出优异的降噪性能,并随着纤维含量的增加,复合材料的吸声系数有显著增加^[24]。

除此之外,一些天然中空纤维因其同样具有优良的吸声性能且易降解,受到了众多学者的关注。Xiang等^[25]对天然木棉纤维(图4(a))的吸声性能进行了研究。结果表明,相比于商业玻璃棉和脱脂棉纤维,木棉纤维因具有天然中空结构表现出了良好的吸声性能,吸声系数主要受其纤维体积密度、厚度和纤维排列的影响。Liu等^[26]以木棉纤维和中空聚酯纤维为原料制备了吸声非织造布复合材料,研究表明,该复合材料在低频区100~500 Hz具有优异的吸声性能。因此,Estabragh天然中空纤维(图4(b))可以预期具有优良的降噪性能。以Estabragh纤维和PP纤维为原料制备的吸声非织造布,其降噪系数(NRC)预测值与实测值的相关系数为0.98,证实了所建立回归模型的有效性,与仅由

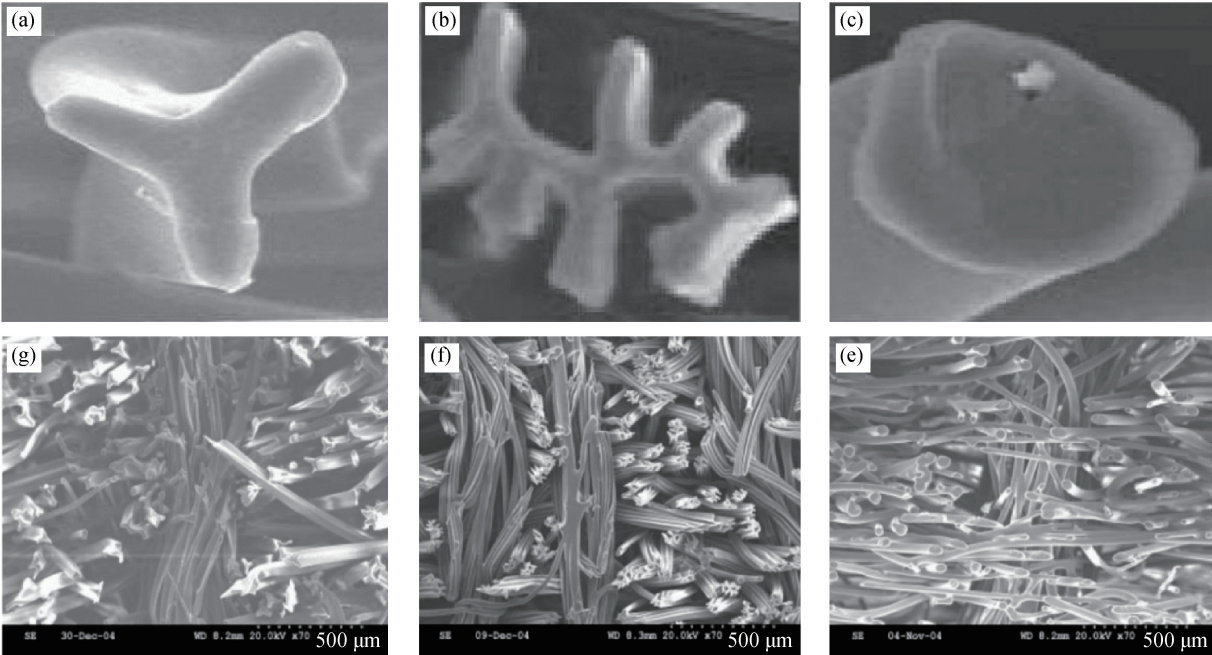


图 1 纤维横截面和由其针刺制成的非织造布的 SEM 图像

Fig. 1 SEM images of fiber cross-sections and three nonwoven fabrics made from the different shaped fibers^[21]

((a) Trilobal polyester fiber; (b) 4DG polyester fiber; (c) Round polyester fiber; (d) Non-woven fabric made by needle punching trilobal polyester fiber; (e) Non-woven fabric made by needle punching 4DG polyester fiber; (f) Non-woven fabric made by needle punching round polyester fiber)

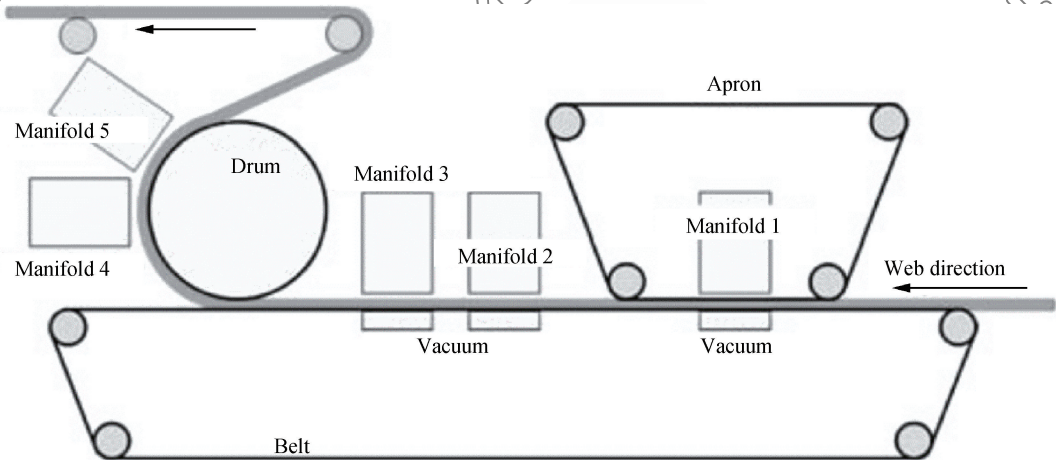


图 2 水刺过程示意图^[22]

Fig. 2 Schematic of hydroentangling process^[22]

PP 纤维制备的非织造布相比, 添加有中空纤维的非织造布吸声性能更高^[27]。

1.2 纳米纤维

纤维的各项参数影响着纺织品的降噪性能, 其中, 纤维的直径是最主要的参数之一。纳米纤维因其比表面积大, 制成的织物较常规纤维能提供更多的纤维表面和曲折路径^[28-30], 从而增加了声波的能量转换。作为纳米纤维的生产技术, 静电纺丝因能

够控制纤维细度、表面形态、取向和横截面形状, 已经成为制造连续纳米纤维最广泛的技术^[31]。纳米纤维制成的纳米纤维膜^[32] 是很好的吸声材料, 对于低频声音的吸收, 采用基于共振原理的结构, 使其中一些共振元件将声能转换成热能消散达到降噪效果。

纳米纤维膜通常较薄, 单独使用时吸声效果不佳, 因此通常将纳米纤维膜与其他吸声材料进行复

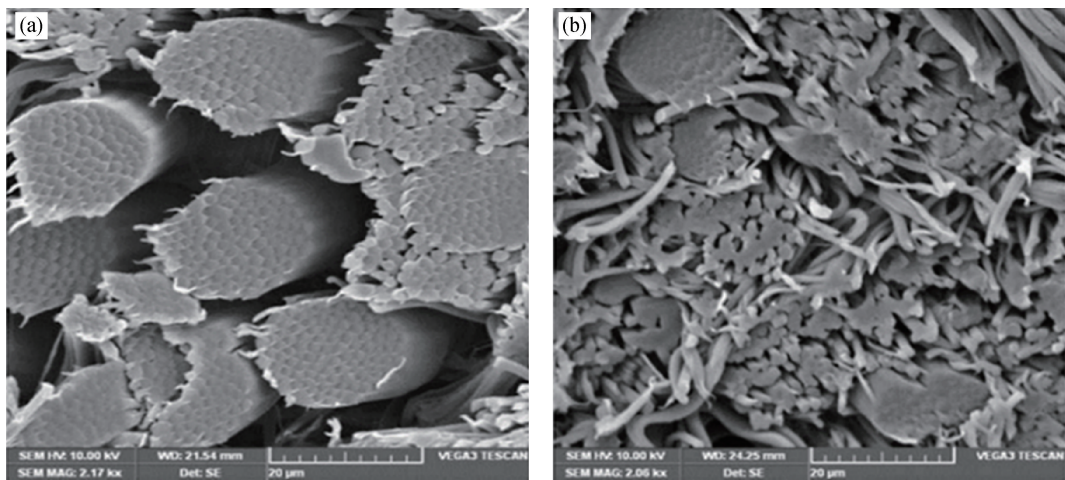


图3 经过水刺的非织造纤维网的横截面 SEM 图像^[22]
Fig. 3 SEM images of cross-sections of the nonwovens webs after hydroentanglements^[22]
(a) One pass; (b) Three passes

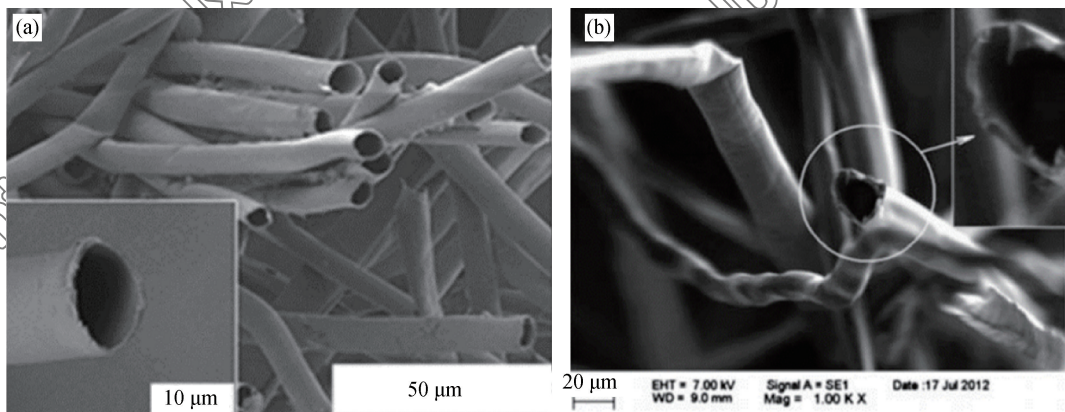


图4 天然木棉纤维(a)和 Estabragh 纤维(b)的 SEM 图像^[25]
Fig. 4 SEM images of kapok fibers (a) and Estabragh fibers (b)^[25]

合,从而改善其吸声效果。Kalinova 等^[32]用直径为 600 nm 的纳米纤维制备了表面质量为 0.1~5.0 g/m² 的共振膜层,将膜放置在 2~3 层普通梳理网之间,这种设计可以用于汽车、航空和建筑等领域。进一步的研究表明^[33-36],采用静电纺丝技术纺制的聚乙烯醇纳米纤维共振膜(图 5)的共振频率随着单位面积重量的增加而降低,随着纳米纤维直径的减小而增加。声波使共振纳米纤维系统振动(图 6),共振频率下的声能部分转换为动能,其余部分则为其频率下的声能。纳米纤维制成的纳米纤维膜可以制备出分层卡片纤维网结构^[37]。Na 等^[38]对多层纳米纤维网的吸声性能进行了研究。将其与不同织物质量的微纤维材料进行了比较,同时研究了纳米纤维网层对普通纤维针织物吸声性能的影响。结果表明,在 1 000~4 000 Hz 频率范围

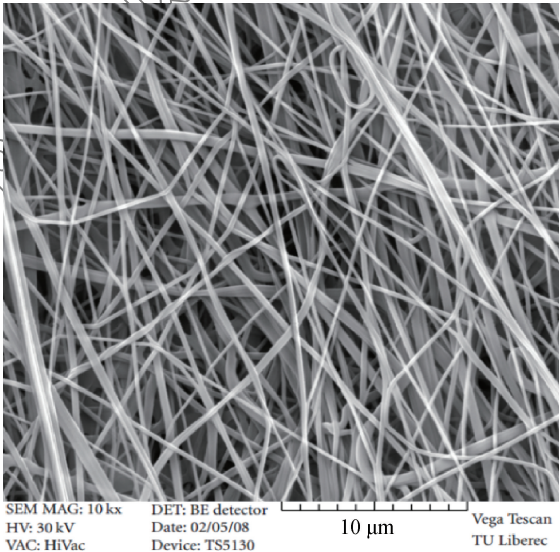


图5 静电纺纳米纤维共振膜的 SEM 图像^[35]
Fig. 5 SEM image of electrospun nanofiber resonant membrane^[35]



图 6 在第一共振频率处的纳米纤维膜振动^[35]

Fig. 6 Nanofibrous membrane vibration at the first resonant frequency^[35]

内, 纳米纤维网的吸音系数随着层数的增加而提高。

1.3 金属纤维

金属纤维多孔材料具有强度高、耐高温、抗氧化、纤维之间缠结力强及性能稳定等优点, 是一种新型的高效多孔吸声材料, 在腐蚀和氧化等恶劣环境中, 也可呈现良好的吸声性能^[39-40]。常被用于水声低频吸声、高声压下的航空航天技术等领域。

以 FeCrAl 纤维、钛纤维和不锈钢纤维制成的金属纤维多孔材料内部呈梯度结构, 是一种适用于多种特殊环境的吸声降噪体, 材料的厚度、孔隙度和丝径对吸声性能影响较大^[41-43]。由于脆性陶瓷在高疲劳载荷下会开裂, 聚合物材料在高温下不能使用, 因此金属纤维多孔材料是航空发动机吸声衬垫的理想候选材料。Lippitz 等^[44]研究了金属纤维毡作为喷气发动机消声器的适用性, 有效地解决了高热、腐蚀性攻击及高疲劳负荷下传统吸收器无法使用的问题。

1.4 活性碳纤维(ACF)

ACF 具有较大的表面积和相互联通的微孔, 是理想的吸音材料。为了降低低频噪声, 可以使用如引入气腔、将机织结构和非织造结构复合等方法来构建多层结构, 从而得到趋于低频且更加宽广的吸声域。

Chen 等^[45-46]使用阻抗管对具有两个表面层(玻璃纤维或 ACF)和三个基层(棉、苧麻或 PP)的非织造复合材料的吸声隔音性能进行了测试和分析。结果表明, 在低频范围(100~1 600 Hz)和高频范围(1 600~6 400 Hz), ACF 和苧麻、ACF 和棉及 ACF 和 PP 非织造复合材料的吸声系数和平均隔声量均高于玻璃纤维作为表面层的复合材料。但是, 在 500 Hz 频率下, ACF 复合材料的隔声性能次于玻璃纤维复合材料, 而其吸声性能仍表现良好, 吸

收系数保持在 0.5 以上。

Shen 等^[47]阐述了使用针刺而成的粘胶非织造织物制成的吸音碳纤维毡。将粘胶非织造布干燥后放入 5% 磷酸二氢铵溶液中 30 min, 在 300℃ 的烘箱中进行预氧化, 然后在 N₂ 气氛中进一步加热到 800℃ 进行碳化, 利用阻抗炉中的蒸气活化 8 min 后自然冷却, 得到吸音碳纤维毡。该项研究对碳纤维毡的空气腔和背衬材料进行了探讨, 表明在低频区域气腔的作用非常显著。同时毛毡的厚度、体积密度及纤维直径对吸声性能也有很大的影响^[48]。Shen 等^[49]进一步详述了生产碳纤维毡的工艺参数, 及其与吸声性能的关系。结果表明, 碳化温度、活化温度和活化时间的增加可提高吸声性能。

2 降噪功能填料在纺织品上的应用

吸声材料有穿孔板、薄膜和薄板吸声材料, 通过共振吸声的原理吸声; 最常见的是多孔纤维吸声材料利用多孔吸声机制吸声。隔声材料也可有效地防止噪声传播, 材料的隔声性能与材料本身的刚性、质量、阻尼性能及声波的性质等有很大的关系^[50]。传统的隔声材料一般都重而密实, 多用砖墙、金属板等, 对可加工和使用范围有很大的局限性。纺织材料轻薄、柔软且加工性好, 可以满足不同场合的需要。但由于轻薄材料的低阻尼量及低自身重量, 使其隔声效果不佳。因此可以将纺织材料与黏性阻尼材料结合获得高性能、应用广泛的复合材料。阻尼材料通过将运动的动能转化成热能来减小材料的振动, 也可以有效地抑制材料的共振频率和吻合频率^[51]。对涂层型吸声材料来说, 不仅基体树脂对吸声性能有影响, 降噪功能填料也有很大的影响。填料能够有效地提高聚合树脂的力学性能和阻尼性能^[52], 填料的加入能使材料的黏弹性发生很大的改变, 主要作用是能增加黏弹性材料的弹性模量、面密度、应变及损耗能, 可进一步限制分子长链相互转换过程中的运动, 增加应变、应力之间的相对滞后, 从而增加了能量的转换, 降噪功能填料在纺织品的降噪加工方面的应用前景广泛, 因此受到了众多学者的关注。

2.1 金属及非金属填料

重质的惯性负载, 如 Pb、Fe、Cu 颗粒及其氧化物是有效提高纺织材料吸声隔音性能的填料。在入射声压一定的条件下, 金属粒子受声波作用的振动幅度因惯性而减小, 最终导致振幅减小, 因此声

波通过这种纤维材料后声能有明显的降低^[53]。罗以喜等^[54]以丙纶纤维和 Pb、Cu、Fe 粉末为原料,采用纺丝成网、挤出与化学粘结复合工艺研制出一种质轻且吸声隔音效果较好的降噪非织造复合材料,具有良好的隔声性能,隔声量达到 19 dB。

为了提高材料的内损耗,也可在材料中混入含有大量空腔的填料。漂珠作为空心微珠的一种,具有轻质、强度高、不燃烧和价格低廉等优点,特别是漂珠的中空微球结构使其在隔声和减噪等方面具有潜在的应用价值。姚跃飞等^[52]将漂珠加入聚氯乙烯(PVC)树脂中,用常压浇注的工艺制备了漂珠-玻璃纤维织物/PVC 复合材料,与未填充漂珠的复合材料相比,其刚度、阻尼性和隔声量均有所提高。

氧化石墨烯(GO)作为一种纳米片层填料,因其具有高的比表面积和高刚度,能有效提高材料的刚度,又由于其含有大量的含氧官能团,如羟基、羰基和羧基等,与高分子材料具有良好的结合性能^[55]。因此将其作为隔声填料,既可以获得一种轻质的隔声材料,又可以提高材料低频区域的隔音效果^[56]。

在剪切增稠流体(STF)中同时加入纳米 SiO₂和具有三维网络结构的四针状 ZnO 晶须(图 7),浸渍后的织物孔隙率和面密度增加,隔声量也大大提高^[57]。

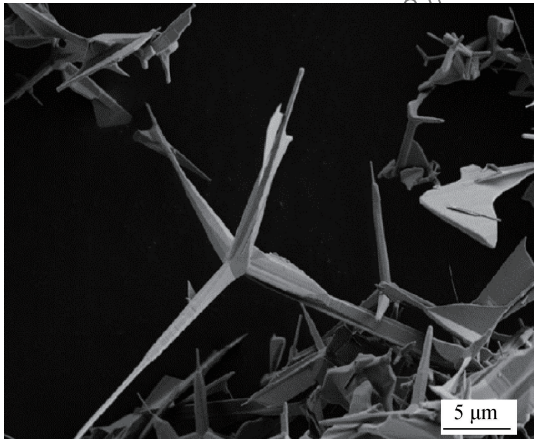


图 7 四针状 ZnO 晶须的微观结构^[57]

Fig. 7 Microstructure of the tetrapod ZnO whiskers^[57]

2.2 天然矿物质填料

天然矿石如云母粉、蛭石和黏土等是一种硅铝酸盐类的矿物质,呈片状层间结构,主要成分是 SiO₂。云母和蛭石的作用相似,用作填料填充 PVC 基隔声材料主要是由于云母的片状结构增加了声波

的折射与反射,使声速减小,传播时间增长,声能耗增大^[58]。

范晓瑜等^[59]以 PVC 为基体,填充蛭石,制得的蛭石/PVC 复合材料表现出了良好的隔声性能。在相近的面密度下,其隔声性能高于 BaSO₄/PVC 复合隔声材料。如图 8 为蛭石的 SEM 图像。膨胀珍珠岩呈蜂窝结构,同蛭石的性能相似,可以使声波发生多次的折射和反射,是一种高效的吸声隔音填料,同时也可以作为良好的保温隔热材料使用^[60]。Canbolat 等^[61]用粘合工艺制备了三层结构的复合材料,其中,中间层经过了不同浓度和粒径的浮石粉处理。结果表明,吸声系数随着浮石粉浓度的增加和浮石粉粒径的减小而增加。

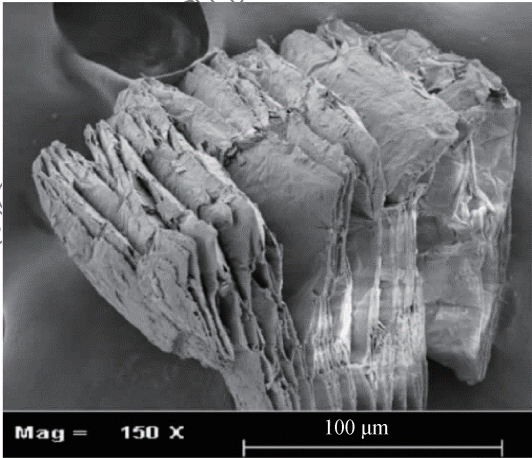


图 8 蛭石形貌的 SEM 图像^[59]

Fig. 8 SEM image of vermiculite^[59]

Jun 等^[62]使用溶液共混方法成功将黏土纳米填料填入 PP 中制备纳米复合隔声片材。用阻抗管测定隔声量(STL)表征其隔音性能,与纯 PP 试样相比,单一填料复合隔声片材试样在整个频段上 STL 均显著提高。在此基础上,Kim 等^[63]将黏土和碳纳米管混合纳米填料填入 PP 中制备出纳米复合隔声片材并对其隔声性能进行了测试和分析。结果表明,混合填料复合隔声片材试样比单一填料复合隔声片材试样的 STL 有明显的提高,且在均匀分散体的结构和强的界面黏合力之间建立了对 STL 的协同效应。

2.3 废固回用材料

我国产钢量位于世界之首,每年产生大量的钢渣粉(SSP)。炉渣、粉煤灰和煤矸石也是工业发展排量较大的固体废弃物,这些废弃物的主要成分是 Al₂O₃、SiO₂、Fe₂O₃ 和 CaO。由于这些废弃物本

身具有结构多孔和质量大的特点,根据多孔吸声机制及上述所提到的重质填料降噪机制实现良好的降噪效果,因此可以废固回用,将其作为重质填料可有效的提高材料的吸声隔音性能,同时也可以保护环境,节约资源^[64]。

程乐利等^[65]以钢渣粉、云母粉、废旧橡胶粉、废旧压电陶瓷粉末或 BaSO_4 为填料,以 PVC 为基体制得相应的隔声复合材料。经过对复合材料的隔声、阻尼及加工成本等综合分析发现,钢渣粉的最优填充比为 70%,此时能提高复合材料的有效阻尼温域。当更高密度的废旧压电陶瓷粉或 BaSO_4 为主填料时,制备的复合材料更柔软。孙朋^[66]采用高湿烧结的方法制备钢渣多孔吸声材料,与其他常用的多孔吸声材料对比,相同厚度条件下,钢渣多孔吸声材料的吸声性能优于多数常用的吸声材料,且具有更好的力学性能。

3 柔性高性能吸声隔音降噪纺织复合材料

随着社会的发展和科技的进步,低成本、轻量化及吸收频带宽的材料受到了更多研究者的关注。为了克服纺织材料低频降噪性能较低的缺点,可以采用将两种或多种材料组合的方法,将不同性能、材质或结构的材料复合起来,拓宽材料的吸声频段,开发出具有柔软、质轻和薄型隔声等特点优良的复合材料,使柔性纺织复合材料在生活噪音、交通噪音等领域具有广阔的发展前景。

3.1 柔性降噪纺织复合材料层合法制备

由于纺织材料较薄且多孔,不能很好的反射声波,因此纺织品不能作为良好的隔音材料使用。因此,可将纺织品与其他材料层合使用,通过构建多层结构、三明治结构或者功能梯度结构,使层与层之间形成空气层,通过空气层来减弱传递到下一层的振动,从而提高总结构的 STL,同时厚度的增加也大大提高了系统的吸声性能。

将铝箔、穿孔铝箔、玻璃纤维薄毡和喷涂橡胶等贴面材料分别与离心玻璃棉板贴合可以防止玻璃棉板中的纤维散落,同时制成的复合材料具有很好的吸声性能^[67]。王建忠等^[68]将制成的不锈钢纤维多孔材料与穿孔板、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。结果表明,在梯度金属纤维多孔材料层间添加金属薄板可进一步提高材料的吸声系数。

Liang 等^[69]介绍了制造黏弹性阻尼薄膜的新工

艺,根据玻璃纤维织物/环氧树脂的复合固化循环,探索出了复合材料嵌入黏弹性阻尼膜的共固化工工艺。发现与没有阻尼层的复合材料进行比较,嵌入式和共固化复合阻尼结构具有很强的隔音效果。简单的双层材料往往达不到理想的效果,因此,国内外许多学者利用经典的多层隔音理论设计出了多层结构,从而实现了降噪性能的提高。将填充有埃洛石纳米管的 PVC/蜂窝织物复合材料作为芯层,制备的三明治结构复合材料具有良好的隔音性能,不同的组织循环数织物在不同频段表现出各自的隔声特性^[70]。利用黏弹性阻尼材料的降噪特性,将丁腈橡胶与纯苧麻胚布层合制成的多层复合材料,中间层的层数增加,吸声系数和 STL 均提高^[71]。

3.2 柔性降噪纺织复合材料涂层整理法制备

纺织材料的涂层整理是一种非常成熟的加工技术,已经得到了广泛的应用。通过将完全连续的聚合物涂层涂于纺织品的一面,层与层之间通过外加的黏合剂或材料自身的黏性紧密地黏合在一起,赋予了纺织品不同的风格和功能。涂层织物的吸声机制:一方面由于阻尼材料自身的黏性内摩擦和材料的弹性弛豫过程把机械能转化为热能消耗掉;另一方面增大了织物的面密度使低频隔音性能提高。涂层织物各层材料的特性阻抗不同,会造成声波在不同界面产生多次反射,阻抗梯度越明显其反射声能就越多,隔声性能就越好。

SiO_2 气凝胶以其质轻、孔隙率高、耐受温度高著称,是一种具有纳米三维网络结构的多孔材料。由于硅气凝胶的低声速特性,它可以作为一种理想的声学延迟或高温隔音材料。Venkataraman 等^[72]结合 SiO_2 气凝胶和非织造布各自的特点,将气凝胶嵌入非织造布中制造出了具有高吸声系数的复合材料,结果表明,气凝胶涂布的非织造布厚度对材料的吸声性能影响最大。以纺织材料为基材,将金属铅或铁镍合金采用化学镀的方法与织物结合,从而获得一种新的吸声隔音复合材料,利用金属材料密度大、惯性负载大等优点有效的提高了织物的降噪效果^[73]。

3.3 柔性降噪纺织复合材料浸渍整理法制备

纺织品本身有良好的透气性,部分入射声波会随空气透过,从而影响其降噪性能。对纺织材料进行浸渍整理,整理液能够渗透到织物中去,附着在纤维的表面和纤维间的间隙中,增加了织物中丝丝、束束和层层之间的联系,使织物保持本身柔软

性的同时增加了面密度；而织物面密度的增加可以使空气流阻增大，空气流阻是影响多孔材料吸音隔音性能的重要因素之一，空气流阻的增大，可以延长声波在材料内部的时间，吸收更多的声能^[74]。低频声波入射到织物表面时，不易发生反射，大部分能够进入织物的内部，因此，可以通过增加材料的面密度来提高其低频隔音性能。

傅雅琴等^[50]采用常压浇注工艺，制备了一种超薄、轻量且柔韧的玻璃纤维织物/PVC 复合材料，厚度仅为 0.5 mm，面密度为 0.678 kg/m²，且在中低频的降噪效果显著。在此基础上，姚跃飞等^[75]利用在 PVC 基体中填充炼钢炉渣粉的方法制备出玻璃纤维织物/PVC 复合材料，其隔声性能在中低频段随着面密度的增加而增加，炼钢炉渣粉的填充对 PVC 隔声材料的阻尼性能和力学性能也有一定的影响。

STF 是在冲击载荷下变硬的黏性液体，在这个过程中它可以吸收大量的能量，因此被广泛应用于防穿刺服上。近些年研究人员对 STF 在织物隔音性能的作用进行了大量的研究。经过 30% SiO₂ 和聚乙二醇制成的 STF 处理后的织物，纱线之间缝隙减小的同时也会使针织物的表面密度提高，与未经处理的针织物相比，经 STF 处理的针织物透射损失提高近 10 倍^[76]。在另一项研究中^[51]，研究人员制备了一种基于四针状 ZnO 晶须和纳米 SiO₂ 的复配 STF。用无水乙醇稀释后分别对单层和双层玻璃织物整理测试隔声性能发现，复配 STF 的剪切增稠效果优于 SiO₂ 单分散 STF。

4 结论及展望

过去几十年来，纺织品已经在吸声降噪领域得到广泛应用。在中低频段纺织材料对噪音的控制仍处于较低水平。一般来说，较厚和较密的材料对于吸收中低段的噪音是有利的，但在许多应用场合对降噪材料的厚度和密度是有一定限制的。开发薄型柔性的纺织吸声隔音材料成为研究人员的研究重点，目前已经开发了新型降噪纤维材料、纳米纤维膜和纳米材料整理纺织品等。

与织造相比，非织造布仍然占降噪材料的主导地位，且发现将非织造布与聚合物复合是制备吸声隔音材料最常用的技术，高效降噪功能填料的加入效果更佳。此外兼顾成本、环保及产品性能等各方面要求，研制新型降噪纤维和新的复合工艺，如将

吸声材料与隔声材料相结合，利用吸声机制与隔声原理的协同作用获得更好的降噪效果，及开发更高效的降噪功能填料均是新型吸声降噪复合材料的发展方向。

参考文献：

- [1] ANDERSEN Z J, SRAM R J, ACASNY M, et al. Newborns health in the danube region: Environment, biomonitoring, interventions and economic benefits in a large prospective birth cohort study[J]. *Environment International*, 2016, 88: 112-122.
- [2] HUANG J, DENG F, WU S, et al. The impacts of short-term exposure to noise and traffic-related air pollution on heart rate variability in young healthy adults[J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2013, 23 (5): 559-564.
- [3] HOFFMANN B, MOEBUS S, STANG A, et al. Residence close to high traffic and prevalence of coronary heart disease [J]. *European Heart Journal*, 2006, 27(22): 2696-2702.
- [4] SORENSEN M, HVIDBERG M, ANDERSEN Z J, et al. Road traffic noise and stroke: A prospective cohort study[J]. *European Heart Journal*, 2011, 32(6): 737-744.
- [5] FRANSSEN E A, VAN WIECHEN C M, NAGELKERKE N J, et al. Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use [J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2004, 61 (5): 405-413.
- [6] THAKUR N, BATRA P, GUPTA P. Noise as a health hazard for children, time to make a noise about it [J]. *Indian Pediatr*, 2016, 53(2): 111-114.
- [7] BUXTON R T, MCKENNA M F, MENNITT D, et al. Noise pollution is pervasive in U. S. protected areas [J]. *Science*, 2017, 356(6337): 531-533.
- [8] GUPTA A, GUPTA A, JAIN K, et al. Noise pollution and impact on children health [J]. *Indian Journal of Pediatrics*, 2018, 85(4): 1-7.
- [9] PIEREN R, HEUTSCHI K. Predicting sound absorption coefficients of lightweight multilayer curtains using the equivalent circuit method [J]. *Applied Acoustics*, 2015, 92: 27-41.
- [10] PIEREN R, SCHAFFER B, SCHOENWALD S, et al. Sound absorption of textile curtains-theoretical models and validations by experiments and simulations [J]. *Textile Research Journal*, 2016, 88(1): 36-48.
- [11] DEMIRYUREK O, AYDEMIR H. Sound absorbing properties of roller blind curtain fabrics [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2016, 47(1): 3-19.
- [12] LIU J, BAO W, SHI L, et al. General regression neural network for prediction of sound absorption coefficients of sand-

- wich structure nonwoven absorbers[J]. *Applied Acoustics*, 2014, 76: 128-137.
- [13] YANG Y, CHEN Z, CHEN Z, et al. Sound insulation properties of sandwich structures on glass fiber felts[J]. *Fibers and Polymers*, 2015, 16(7): 1568-1577.
- [14] 汤慧萍, 朱纪磊, 葛渊, 等. 纤维多孔材料梯度结构的吸声性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(12): 2220-2223.
- TANG H P, ZHU J L, GE Y, et al. Sound absorbing characteristics of fibrous porous materials gradient structure[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(12): 2220-2223 (in Chinese).
- [15] NAYAK R, PADHYE R, FERGUSON S. Identification of natural textile fibres. In: *Handbook of natural fibres*, vol 1. Types, properties and factors affecting breeding and cultivation[M]. Wiley: Woodhead Publishing Ltd., 2012: 314.
- [16] MVUBU M, PATNAIK A, ANANDJIWALA R D. Process parameters optimization of needle-punched nonwovens for sound absorption application [J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2015, 10(4): 47-54.
- [17] PATNAIK A, MVUBU M, MUNIYASAMY S, et al. Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 92: 161-169.
- [18] 梁巧丽, 邱华, 成钢, 等. 羊毛及其混合纤维非织造材料的吸声性能[J]. *纺织学报*, 2017, 38(3): 67-71.
- LUAN Q L, QIU H, CHENG G, et al. Sound absorption properties of nonwoven material based on wool and its hybrid fibers[J]. *Journal of Textile*, 2017, 38(3): 67-71 (in Chinese).
- [19] 杨文娟, 焦晓宁. 非织造布汽车吸音隔音材料的研制[J]. *纺织导报*, 2005(11): 92-94.
- YANG W J, JIAO X N. Development of sound absorption material for nonwoven fabric automobiles[J]. *Textile Herald*, 2005(11): 92-94 (in Chinese).
- [20] HARTING H. Fibre for an acoustic insulating material, especially for sound dampers compressed air devices. U. S. Patent Application: 11/658291[P]. 2008-07-03.
- [21] TASCAN M, VAUGHN E A. Effects of total surface area and fabric density on the acoustical behavior of needlepunched nonwoven fabrics[J]. *Textile Research Journal*, 2008, 78(4): 289-296.
- [22] SUVARIA F, ULCAI Y, MAZEC B, et al. Acoustical absorptive properties of spunbonded nonwovens made from islands-in-the-sea bicomponent filaments[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2013, 104(4): 438-445.
- [23] ABDELFAHATTAH M A, IBRAHIM G E, et al. Using nonwoven hollow fibers to improve cars interior acoustic properties[J]. *Life Science Journal*, 2011, 8(1): 344-351.
- [24] JIANG S, XU Y, ZHANG H, et al. Seven-hole hollow polyester fibers as reinforcement in sound absorption chlorinated polyethylene composites[J]. *Applied Acoustics*, 2012, 73(3): 243-247.
- [25] XIANG H, WANG D, LIU H, et al. Investigation on sound absorption properties of kapok fibers[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2013, 31(3): 521-529.
- [26] LIU X T, LI L, YAN X, et al. Sound-absorbing properties of kapok fiber nonwoven composite at low-frequency [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 821-822: 329-332.
- [27] HASSANZADEH S, HASANI H, ZARREBINI M. Analysis and prediction of the noise reduction coefficient of lightly needled estabragh (milkweed)/polypropylene[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2014, 105(3): 256-263.
- [28] NA Y, LANCASTER J, CASALI J, et al. Sound absorption coefficients of micro-fiber fabrics by reverberation room method[J]. *Textile Research Journal*, 2007, 77(5): 330-335.
- [29] TASCAN M, D P, VAUGHN E A, et al. Effects of fiber denier, fiber cross-sectional shape and fabric density on acoustical behavior of vertically lapped nonwoven fabrics[J]. *Journal of Engineered Fabrics & Fibers*, 2008, 3(2): 1136-1139.
- [30] YILMAZ N D, BANKS-LEE P, POWELL N B, et al. Effects of porosity, fiber size, and layering sequence on sound absorption performance of needle-punched nonwovens [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 121(5): 3056-3069.
- [31] NAYAK R, PADHYE R, KYRATZIS I L, et al. Recent advances in nanofibre fabrication techniques [J]. *Textile Research Journal*, 2012, 82(2): 129-147.
- [32] KALINOVA K, SANETRIK F, JIRSAK O, et al. Layered sound absorptive non-woven fabric. U. S. Patent Application: 11/911135[P]. 2006-10-19.
- [33] MOHROVA L, KALINOVA K. Different structures of pva nanofibrous membrane for sound absorption application[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 2012(2): 2449-2464.
- [34] KALINOVA K, OZTURK M K, KOMAREK M. Open and closed tube method for determination of resonance frequencies of nanofibrous membrane [J]. *Journal of the Textile Institute*, 2016, 107(8): 1068-1078.
- [35] KALINOVA K. Nanofibrous resonant membrane for acoustic applications[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2011: 1-6.
- [36] KALINOVA K. Sound absorptive light comprising nanofibrous resonant membrane applicable in room acoustics[J]. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2017: 014362441773340.
- [37] STRANSKA D, MARES L, JIRSAK O, et al. Production method of layered sound absorptive non-woven fabric. U. S. Patent Application: 12/522410[P]. 2008-07-17.
- [38] NA Y, AGNHAGE T, CHO G. Sound absorption of multiple layers of nanofiber webs and the comparison of measuring

- methods for sound absorption coefficients[J]. *Fibers and Polymers*, 2012, 13(10): 1348-1352.
- [39] WANG C, TORNG J. Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials[J]. *Applied Acoustics*, 2001, 60(4): 447-459.
- [40] 张波, 陈天宇, 冯凯, 等. 烧结金属纤维多孔材料的高温吸声性能[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(11): 1327-1331. ZHANG B, CHEN T N, FENG K, et al. Sound absorption properties of sintered fibrous metals under high temperature conditions[J]. *Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(11): 1327-1331 (in Chinese).
- [41] 敖庆波, 汤慧萍, 朱纪磊, 等. 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 Q B, TANG H P, ZHU J L, et al. Study on sound absorption performance of FeCrAl fibrous porous materials gradient structure[J]. *Functional Materials*, 2009, 40(10): 1764-1766 (in Chinese).
- [42] 刘世锋, 汤慧萍, 刘波, 等. 钛纤维多孔材料孔径分布与吸声性能研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2014, 51(1): 160-164. LIU S F, TANG H P, LIU B, et al. Studies of sound absorption properties and pore size distribution for titanium fiber porous materials[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2014, 51(1): 160-164 (in Chinese).
- [43] 敖庆波, 王建忠, 李爱君, 等. 金属纤维多孔材料的吸声性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(2): 387-391. AO Q B, WANG J Z, LI A J, et al. Sound absorption properties of fibrous porous metals[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(2): 387-391 (in Chinese).
- [44] LIPPITZ N, ROSLER J, HINZEB. Potential of metal fibre felts as passive absorbers in absorption silencers[J]. *Metals*, 2013, 3(1): 150-158.
- [45] CHEN Y, JIANG N. Carbonized and activated non-wovens as high-performance acoustic materials: Part I—Noise absorption[J]. *Textile Research Journal*, 2007, 77(10): 785-791.
- [46] CHEN Y, JIANG N. Carbonized and activated non-woven as high performance acoustic materials: Part II—Noise insulation[J]. *Textile Research Journal*, 2009, 79(3): 213-218.
- [47] SHEN Y, JIANG G. Sound absorption properties of composite structure with activated carbon fiber felts[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2014, 105(10): 1100-1107.
- [48] SHEN Y, JIANG G. Effects of different parameters on acoustic properties of activated carbon fiber felts[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2013, 105(4): 392-397.
- [49] SHEN Y, JIANG G. The influence of production parameters on sound absorption of activated carbon fiber felts[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2015, 107(9): 1144-1149.
- [50] 傅雅琴, 倪庆清, 姚跃飞, 等. 玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料隔声性能[J]. *复合材料学报*, 2005, 22(5): 94-99. FU Y Q, NI Q Q, YAO Y F, et al. Sound insulation performance of a glass fabric/PVC composite material[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(5): 94-99 (in Chinese).
- [51] 何琳, 朱海潮. 声学理论与应用工程[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 196. HE L, ZHU H C. *Acoustic theory and application engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2006: 196 (in Chinese).
- [52] 姚跃飞, 高磊, 杨琼丽, 等. 漂珠填充聚氯乙烯基复合材料的隔声性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2009, 25(11): 61-64. YAO Y F, GAO L, YANG Q L, et al. Sound insulation property of pvc matrix composite material filled with cenosphere fly ash[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2009, 25(11): 61-64 (in Chinese).
- [53] 程文彬. 纺织材料隔声性能的研究[D]. 上海: 中国纺织大学, 1997. CHENG W B. *Research on sound insulation of textile materials*[D]. Shanghai: China Textile University, 1997 (in Chinese).
- [54] 罗以喜, 奚柏君. 非织造降噪复合材料的研究[J]. *纺织学报*, 2004, 25(4): 64-66. LUO Y X, XI B J. Research on non-woven noise reduction composites[J]. *Journal of Textile*, 2004, 25(4): 64-66 (in Chinese).
- [55] STANKOVICH S, DIKIN D A, DOMMETT G H B, et al. Graphene-based composite materials[J]. *Nature*, 2006, 442(7100): 282-286.
- [56] 傅强, 蔡俊, 傅雅琴, 等. 氧化石墨烯/丁腈橡胶-聚氯乙烯复合材料的隔声性能[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(7): 1401-1407. FU Q, CAI J, FU Y Q, et al. Sound insulation performance of graphene oxide/NBR-PVC composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(7): 1401-1407 (in Chinese).
- [57] WANG Y, ZHU Y, FU X, et al. Effect of TW-ZnO/SiO₂-compounded shear thickening fluid on the sound insulation property of glass fiber fabric[J]. *Textile Research Journal*, 2014, 85(9): 980-986.
- [58] 刘慧. 填充物对聚氯乙烯基柔性隔音复合材料性能影响的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012. LIU H. *Study on performance impact of filler to PVC flexible insulation composite material*[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [59] 范晓瑜, 姚跃飞, 虞华东, 等. 蛭石/PVC 复合材料的隔声性能研究[J]. *浙江理工大学学报*, 2014, 31(6): 647-650. FAN X Y, YAO Y F, YU H D, et al. Research on sound insulation property of vermiculite/PVC composite[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2014, 31(6): 647-650 (in Chinese).

- [60] LIN J, LI T, HSU Y, et al. Preparation and property evaluation of sound-absorbing/thermal-insulating PU composite boards with cushion protection[J]. *Fibers and Polymers*, 2014, 15(7): 1478-1483.
- [61] CANBOLAT S, KUT D, DAYIOGLU H. Investigation of pumice stone powder coating of multilayer surfaces in relation to acoustic and thermal insulation[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2013, 44(4): 639-661.
- [62] JUN Y, KIM M, KANG K, et al. Evaluation of PP/clay composites as soundproofing material[J]. *Polymers & Polymer Composites*, 2014, 22(1): 65-72.
- [63] KIM M, YAN J, KANG K, et al. Soundproofing properties of polypropylene/clay/carbon nanotube nanocomposites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 130(1): 504-509.
- [64] 何冬林, 郭占成, 廖洪强, 等. 多孔吸声材料的研究进展及发展趋势[J]. *材料导报*, 2012, 26(s1): 303-306.
- HE D L, GUO Z C, LIAO H Q, et al. Research progress and development trend of porous absorption materials[J]. *Material Guide*, 2012, 26(s1): 303-306 (in Chinese).
- [65] 程利乐. 高填充(SSP)等材料的PVC基柔性隔声复合材料的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2010.
- CHENG L L. Study on PVC-based flexible sound insulation composites filled with SSP and other materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010 (in Chinese).
- [66] 孙朋. 钢渣多孔吸声材料的制备及吸声性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- SUN P. Preparation of porous sound-absorbing material using steel slag and its sound absorption properties[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2015 (in Chinese).
- [67] 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(4): 41-43.
- ZHONG X Z, LUO X H, DONG L. Effect of overlay layer on sound absorbing property of glass wool[J]. *Applied Acoustics*, 1998(4): 41-43 (in Chinese).
- [68] 王建忠, 汤慧萍, 敖庆波, 等. 金属纤维多孔材料复合结构的声学性能[J]. *中国材料进展*, 2017, 36(7-8): 550-556.
- WANG H Z, TANG H P, AO Q B, et al. Acoustic performance of complex structure made by porous metal fibers materials[J]. *Progress of Chinese Materials*, 2017, 36(7-8): 550-556 (in Chinese).
- [69] LIANG S, XIU Y, WANG H. A research on sound insulation characteristics and processing of the embedded and co-cured composite damping structures[J]. *Journal of Composite Materials*, 2013, 47(9): 1169-1177.
- [70] 杨天兵, 傅雅琴. 蜂窝织物增强聚氯乙烯复合材料的隔音性能[J]. *纺织学报*, 2011(6): 65-70.
- YANG T B, FU Y Q. Sound insulation of honeycomb weave fabric reinforced polyvinyl chloride composite[J]. *Journal of Textile*, 2011(6): 65-70 (in Chinese).
- [71] 李康. 层合多孔吸声隔音复合材料[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- LI K. Sound absorption and insulation of laminated porous nitrile rubber-based composite materials [D]. Shanghai: Donghua University, 2011 (in Chinese).
- [72] VENKATARAMAN M, MISHRA R, ARUMUGAM V, et al. Acoustic properties of aerogel embedded nonwoven fabrics [C]. 6th International Conference on Nanomaterials-Research & Application November 5th-7th, Hotel Voronez I, 2014.
- [73] 赖冬志, 姚跃飞, 陈文兴, 等. 化学镀铁镍合金织物的隔音性能的研究[J]. *浙江工程学院学报*, 2003, 20(4): 12-15.
- LAI D Z, YAO Y F, CHEN W X, et al. On sound insulation property of textile electroless plating with Fe-Ni alloy[J]. *Journal of Zhejiang Institute of Engineering*, 2003, 20(4): 12-15 (in Chinese).
- [74] 李闪. 剪切增稠流体处理织物对复合材料低频隔音性能的影响[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.
- LI S. Effect of fabric treated with shear thickening fluid on low-frequency sound insulation property of composites[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [75] 姚跃飞, 罗勇波, 高磊, 等. 聚氯乙烯基隔声材料中填充炼钢熔渣粉[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(2): 74-79.
- YAO Y F, LUO Y B, GAO L, et al. PVC sound insulation material filled with steel-smelting scoria[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(2): 74-79 (in Chinese).
- [76] LI S, WANG Y, DING J, et al. Effect of shear thickening fluid on the sound insulation properties of textiles[J]. *Textile Research Journal*, 2013, 84(9): 897-902.