

# 产业用纺织品隔声降噪研究进展

吴霖昀 张旺笋

立信门富士纺织机械(中山)有限公司, 广东 中山 528437

**摘要:**产业用纺织品的隔声降噪功能可通过改变织物结构、纤维特性及涂层后整理等方式实现。概述了材料降噪原理及种类,总结了影响产业用纺织品隔声降噪性能的因素,介绍了产业用纺织品不同降噪方法的研究现状,重点介绍了通过涂层方式以纳米材料作为填充物构建复合降噪结构体,制备隔声降噪产业用纺织品的研究进展。

**关键词:**产业用纺织品;降噪性能;吸声;隔声;涂层整理;纳米材料

中图分类号:TS 101

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2024)02-0013-06

## Research progress on sound insulation and noise reduction of technical textiles

Wu Linyun, Zhang Wangsun

Monforts Fong's Textile Machinery Co., Ltd., Zhongshan 528437, Guangdong, China

**Abstract:** The sound insulation and noise reduction function of technical textiles can be realized by changing textile structure, fiber characteristics and coating. The principle and types of material noise reduction were summarized, and the factors affecting the sound insulation and noise reduction performance of technical textiles were summarized. The research status of different noise reduction methods of technical textiles was introduced, and research progress of sound insulation and noise reduction technical textiles prepared by composite noise reduction structures constructed with nano materials as fillers by coating method was emphasized.

**Keywords:** technical textile; noise reduction performance; sound absorption; sound insulation; coating; nano material

### 1 概述

产业用纺织品作为纺织品的重要组成部分,是指经过专门设计的、具有工程结构特点的纺织品,其

能够达到某种功能,而不像普通服装用纺织品,仅作为美观装饰和满足穿着需要。国际上按用途将产业用纺织品分为十二大类,分别是工业用、医疗卫生用、安全防护用、运动休闲用、土木工程用、交通运输用、环保工业用、功能性服装用、建筑用、家用、包装

收稿日期:2023-09-12

作者简介:吴霖昀,女,1994年生,硕士,研究方向为隔声降噪产业用纺织品,wu\_linyun@126.com

通信作者:张旺笋,christian.zhang@monfongs.com

用、农业用纺织品。其中,家用类产业用纺织品是除功能性服装用产业用纺织品以外,日常生活中最常见的,其几乎涵盖所有用于家居的功能性纺织品,包括室内软装如地毯、墙布、窗帘布等。这些纺织品作为室内环境的重要组成部分,被广泛用于各类居家、办公、娱乐等室内场所。随着科技的发展,人们对这类产业用纺织品提出了更高的要求,如要求其具有防污防水性、阻燃性、抗菌性、紫外线防护性、防霉抗菌性等。窗帘的主要功能是在室内与室外形成一道屏障,起到保护隐私,阻隔光线和一定程度的装饰作用。随着技术的发展,具有阻燃、防水、抗紫外线、隔声降噪、调节室温等功能的窗帘受到人们的青睐。目前,市场上的窗帘布种类繁多,有卷帘布、直帘、罗马帘等。人们对窗帘的功能性要求也越来越高,具有隔声降噪功能的窗帘可以减少室外噪声对人体身心健康危害,符合人们对健康生活的追求。

室外噪声是通过空气传播进入室内的,其通过窗户时强度会得到一定程度的减弱,窗帘可进一步削弱噪声强度。隔声窗帘能降低声音透过织物的强度和经织物反射后的强度,改变声音的传播路线,其一方面可以阻隔外界噪声,另一方面能够吸收室内噪声,从而调节室内声环境,起到降噪作用<sup>[1]</sup>。墙纸不仅具有美化、个性化墙面的作用,而且能提高室内声音的清晰度,在现代家居装修中备受青睐。未经装饰处理的四面光滑的房间内,壁面和地面均为硬而密实的材料,容易对声波产生一次及多次的反射,因此这样的室内传声清晰度差。当室内采用了墙纸、窗帘和地毯等柔性纺织材料时,声波进入墙纸等纺织材料中,一方面可以减少室内回声,使传声更清晰,另一方面能够降低声音的传播效率,达到隔声的效果。

## 2 材料降噪原理及种类

声音是由物体的振动引起的,正常人耳可听到的声音频率为20~20 000 Hz。声音传播的原理是:当声音在介质中传播遇到某种材料时,一部分声波进入材料内被吸收消耗转化成热能,一部分声波被材料反射,还有一部分声波发生折射和衍射,剩余的声波透过材料继续传播。基于此,设计隔声降噪材料时,需综合考虑其对声音的吸收和反射效果。物

理学观点认为,噪声是指强弱和频率变化都无明显规律的杂乱无章的声音。生理学观点认为,一切影响人类生活和工作的、不被需要的、对人体有害的声音都可称为噪声<sup>[2]</sup>。按照频率,噪声分为低频、中频和高频噪声。其中,频率低于500 Hz的被称为低频声,500~2 000 Hz的为中频声;高于2 000 Hz的为高频声<sup>[3]</sup>。

材料的降噪方法分为吸声和隔声。吸声是指当声波入射到材料内部后,一部分声能被转化成热能而耗散掉,引起声波的衰减,从而减弱反射声,使总的噪声降低。材料的吸声效果用吸声系数( $\alpha$ ,  $0 < \alpha < 1$ )表征。 $\alpha$ 值越大,表示材料的吸声性能越好。常见的吸声材料可以分为多孔吸声材料和共振吸声材料2种。多孔吸声材料从表面至内部分布有许多细小敞开的通道,从而使声波衰减,其以吸收中高频声波为主,常见的多孔吸声材料有纺织品材料、开孔型泡沫塑料等。多孔吸声材料又可分为有机纤维材料(丙纶、锦纶、聚酯纤维)、无机纤维材料(石棉、岩棉、玻璃棉等)、有机泡沫材料(以树脂或橡胶为基体,添加一些辅助材料)、无机泡沫材料(泡沫玻璃、泡沫金属)和多孔复合材料(以树脂、橡胶、金属、陶瓷、水泥为基体,添加弹性体纤维颗粒作为填充物)等。共振吸声材料依靠共振作用即通过振动摩擦产生热能消耗声能,其主要吸收中低频声波。共振吸声材料主要有闭孔型泡沫塑料、膜状材料、板状材料和穿孔板等。共振吸声材料按结构可分为含单个共振器结构、穿孔板结构、微穿孔板结构和薄膜结构材料。用构件将噪声源与接收者分开,阻断声音的传播,从而达到降噪目的的措施称作隔声。材料的隔声能力通常用隔声量表征,隔声量越大,说明材料的隔声性能越好<sup>[4]</sup>。

材料吸声和材料隔声的区别在于,材料的吸声着眼于声源一侧反射声能的大小,目标是尽可能减小反射声能;材料的隔声着眼于入射声源另一侧透射声能的大小,目标是尽可能减小透射声能。一般情况下,噪声的频率越高,其波长越小,越不容易透过材料,因此随着频率的增大,吸声系数或隔声量呈增大趋势<sup>[5]</sup>。

## 3 产业用纺织品隔声降噪性能影响因素

纺织材料具有轻薄、柔软、疏松多孔的特性。在

针织物、机织物和非织造布结构的纺织品中,纤维间存在许多孔隙,多孔疏松透气的纺织材料对入射声能的反射较小,其主要是通过吸收声能来达到降噪效果<sup>[6]</sup>。声波进入纺织材料内部后,引起材料内部孔隙中空气和纤维振动,一部分声能转化为热能而耗散掉<sup>[7]</sup>。

纺织品具有较好的高频吸声性能,是因为随着声波频率的增大,材料孔隙内空气质点的振动速度加快,故而加快了热交换速度,使得纺织材料在高频段下具有良好的吸声效果。但由于其结构疏松,隔声性能较差,对中低频噪声的吸声效果不好,很难单独作为降噪材料使用。室外噪声经墙体阻隔后进入室内的多为中低频噪声<sup>[8]</sup>,因此需要突破纺织品对中低频噪声的降噪难关。将纺织材料与其他材料复合构建降噪结构体是其未来的发展方向之一。可以通过织造、复合及涂层整理等方式构建复合降噪结构体。

目前,在纺织品声学性能的研究中,非织造布因加工方便,纤维层网状分布且易与其他材料和结构体复合而广泛应用<sup>[9]</sup>;机织物结构较稳定,可通过功能性纤维的应用达到吸声隔声的效果;针织物则因成圈组织结构易脱散而较少用作降噪材料。

从纺织品的特性来看,影响纺织品吸声隔声性能的因素主要有:织物特性如织物组织结构、厚度、密度、孔隙率等,纤维特性如纤维种类、直径和横截面等。上述因素均无法单独用来衡量织物的降噪效果,因为各因素之间存在一定的联系,如织物组织结构的变化影响织物密度和孔隙率。因此,在研究纺织品降噪性能时,应综合考虑和设计这些参数,以达到良好的吸声隔声效果<sup>[10]</sup>。

### 3.1 织物组织结构、密度、厚度及孔隙率

纺织品尤其是机织物的组织结构对其隔声性能有很大的影响,改变组织结构意味着织物的密度和孔隙率也相应发生改变。织物的孔隙率过大,声波会直接穿透织物;孔隙率过小,大部分声波会被织物反射而无法起到吸声作用。材料厚度一直是隔声降噪领域研究的重点因素。一般情况下,降噪材料越厚,声音越难穿透材料,理论上隔声性能越好,但对纺织品而言并非完全如此。此外,对于家用类产业用纺织品如窗帘和墙布而言,其应用场景对织物厚度有也要求,通常以轻薄织物为主,因此,需要考虑

在一定织物厚度范围内提升织物的隔声降噪性能。

李想等<sup>[11]</sup>对不同组织结构及不同厚度涤纶机织物的隔声性能进行了测试,发现同一种涤纶织物在 1 000~10 000 Hz 频率范围内的声级衰减量随着声波频率的变化而变化,织物在 2 000、4 000、8 000 Hz 时的声级衰减量较大,在其他频率下的衰减量较小;平纹、斜纹、缎纹、方平及蜂巢这 5 种组织结构中,蜂巢组织涤纶织物的降噪性能最好,且随着织物层数的增加,降噪性能呈提升趋势并存在一个理想厚度。梁丽娟<sup>[2]</sup>对不同材质、厚度、组织结构的经编间隔织物的吸声和隔声性能进行研究,发现:经编间隔织物的密度越大,织物的吸声性能越好,且表面密实的经平绒结构织物比网眼结构织物的吸声性能更好;多层经编间隔织物层叠后,随着织物厚度的增加,织物的吸声峰值向低频方向移动;将经编间隔织物和海绵分别与同等规格的绒布复合后,对比其吸声效果发现,与绒布复合前,经编间隔织物较同厚度的海绵,吸声频带更宽,低频吸声性能更好,而频率相同时,吸声系数大于海绵,与绒布复合后,经编间隔织物的吸声性能相对复合前显著提升;两层经编间隔织物与绒布复合后,其吸声系数超过 0.2,达到吸声材料的标准要求。测试单层经编间隔织物的隔声性能发现,薄而密实的织物比厚而疏松的织物的隔声性能好很多,表明密度是影响纺织品隔声性能的重要因素;表面组织是经平绒的织物比表面是网孔结构的织物具有更好的隔声效果;经编间隔织物和海绵与绒布复合后,隔声量均显著增大,而不论是复合前还是复合后,经编间隔织物的隔声性能均优于海绵。总体而言,具有更好透气性、结构稳定、生产过程环保的经编间隔织物在降低噪声和抗压缓冲应用方面是海绵材料的优良替代品。温晓丹<sup>[12]</sup>织制了 7 种不同孔隙率的蜂巢组织与平纹组织机织物,构建不同的双层结构体,并对试样的表面粗糙度进行测试。该研究将 2 层织物叠在一起,构建了双层具有孔隙梯度的机织物结构体并对其进行声学测试,结果显示:当双层织物孔隙率差值小于 9.75% 时,大孔隙率织物面向声源侧时吸声效果较好;当双层织物孔隙率差值大于 9.75% 时,小孔隙率织物面向声源侧时吸声效果较好;当双层织物孔隙率差值等于 9.75% 时,不同孔隙率织物面向声源侧时的吸声性能相当;在 800~5 000 Hz 频段,随着

平均粗糙度的增大,试样的吸声性能逐渐提高,原因是粗糙、凹凸不平的表面有助于增大织物与声波的接触面积,进而提高共振效应,使织物的吸声性能提升。

### 3.2 纤维横截面形态与线密度

除织物组织结构外,还可以通过改变织物的纤维规格参数实现降噪效果。如纤维横截面形态的不同对织物隔声性能有一定的影响,改变纤维横截面形态可以赋予织物不同的隔声性能。构成织物的纤维横截面通常为圆形或椭圆形,采用异形横截面的纤维可以增加声波的反射,从而赋予织物更好的隔声性能<sup>[5]</sup>。此外,织物中的纤维越细,纤维线密度越小,其隔声降噪性能越好。

范晓丹<sup>[5]</sup>对圆形截面和三角形截面纤维织制的平纹、斜纹和蜂巢结构织物进行隔声性能测试,发现三角形截面纤维织制的平纹织物比圆形截面纤维平纹织物具有更好的声学性能。研究还发现,织物的吸声隔声效果与孔隙率呈负相关关系;测量平纹、斜纹、蜂巢结构织物的孔径后发现,织物孔径越小,中低频吸声效果越好,而中低频隔声效果则随着孔径的增大而呈增加趋势<sup>[5]</sup>。张文韬<sup>[13]</sup>采用静电纺丝技术分别制备了聚酰胺6(PA6)和聚乳酸(PLA)纳米纤维膜,再以非织造布作为基材,非织造布选用聚酯再生纤维针刺毡和吸声棉,将纳米纤维膜和非织造布复合制成吸声材料,复合后的2种吸声材料相比复合前的基材,吸声性能表现出不同程度的提升;在0~1 600 Hz的低频段,PLA纳米纤维膜与基材复合后,材料的吸声系数比复合前的基材提高了0.1~0.5,在0~5 000 Hz频段内,复合后材料的隔声性能提高了10%~50%,且纤维层更蓬松的PLA复合材料的隔声效果比PA6复合材料的更好。纳米纤维直径小,比表面积大,纳米纤维膜孔隙小且孔隙率高,声波通过纤维膜时更易与之发生碰撞,使声能转化为热能,因而吸声隔声性能更好。

### 3.3 涂层整理方式

通过涂层整理的方式可赋予纺织材料各种功能,常见的涂层整理技术有防水、阻燃等。通过涂层整理的方式将聚合物浆液连续涂覆于纺织材料表面,改变织物厚度、面密度及粗糙度等因素,可综合改善纺织材料的声学性能。此外,涂层浆液中还可以添加不同的填料,以进一步改善纺织材料的性能。

纺织品涂层加工过程中,通常要求设备具有较大的灵活性,从而方便工艺参数的调整以达到不同的整理效果。目前常见的涂层整理方式主要有3种:(1)刮刀涂层,适用于黏度较大的涂料,常用于防水涂层、泡沫涂层、遮光涂层等方面,是市面上最常见的涂层方式;(2)磁辊涂层,特点是通过磁力大小精准控制上浆量,从而达到薄涂效果,适用于水状低黏度的浆料,常用于涂料染色、功能涂层、低渗透涂层等方面;(3)圆网印花涂层,通过不同的网孔形状将浆料印制到织物表面,适用于单色印花、3D涂层和针织材料涂层等方面。

涂层可以是单面覆涂,也可采用双面覆涂方式。对于为实现隔声功能的涂层整理而言,单面涂层织物需考虑涂层面和织物面对声波不同的吸声效果。常用的涂层聚合物有丙烯酸酯、聚氨酯和聚氯乙烯(PVC)等,其中PVC在目前的研究中常被用作隔声降噪涂覆材料。林希宁<sup>[14]</sup>将玄武岩短纤维和玄武岩织物分别与PVC黏结剂复合,制备隔声复合材料。他先用醋酸、氢氧化钠、有机硅烷对纤维表面进行改性处理,以增加玄武岩纤维与PVC之间的亲和力,再将纤维加入PVC黏结剂中,测试所得含玄武岩纤维的复合材料试样的隔声性能,结果发现,试样隔声性能随玄武岩纤维添加量的增加而提升,不同纤维含量隔声复合材料的平均隔声量达30~40 dB,但吸声性能未得以明显改善。随着纤维直径增大,吸声性能改善,平均吸声系数为0.06~0.07;纤维长度越短,所得复合材料的吸声性能越好,平均吸声系数为0.06~0.09。对于不同层数玄武岩织物与PVC复合得到的隔声复合材料,随着织物层数的增加,复合材料试样的隔声性能明显提升,平均隔声量达35~40 dB。通过对比将玄武岩短纤维加入PVC黏结剂中和将玄武岩织物与PVC复合这2种隔声复合材料的隔声性能,发现短纤维加入PVC黏结剂中并分布于材料内部制得的复合材料,隔声效果比织物与PVC复合制得的复合材料的更好。将短纤维作为填料加入聚合物浆液中是一种创新的降噪复合体构建方式,添加短纤维可使聚合物材料的硬度和密度增大,且短纤维呈长条状,相比常见的粉末填料与颗粒填料,其能以更大的表面积接触进入材料内部的声波,进而起到相互碰撞并消耗声能的作用。

在织物与聚合物复合而成的复合材料中,织物

与聚合物的用量占比对材料的隔声降噪性能有较大影响。以织物为基体材料、聚合物为薄层覆涂材料时,织物的多孔吸声占主导作用;以聚合物为基体材料或聚合物涂层厚度大于织物厚度时,密封性好的聚合物涂层膜起主要的隔声作用。杨天兵<sup>[15]</sup>采用棉纤维织制具有不同组织循环数的蜂窝织物,并以颗粒改性 PVC 树脂为基体、蜂窝织物为增强材料,制备不同组织循环数与排列的蜂窝织物/PVC 隔声复合材料。研究发现,复合前蜂窝织物的厚度和透气性随着组织循环数增大而增加,隔声性能则随之下降;双面涂覆改性 PVC 树脂后,所得复合材料在 100~8 000 Hz 频段的平均隔声量比复合前的蜂窝织物增大了 5.8~7.0 倍,且双面覆涂 PVC 的复合材料的隔声量随着织物组织循环数增大呈现先增大后减小的趋势。另外,杨天兵<sup>[15]</sup>还采用双面浇注 PVC 溶液的方法制备了蜂窝织物/PVC 隔声复合材料,与双面覆涂法相比,双面浇注法的 PVC 基体材料用量增加,PVC 的阻尼性能在隔声方面起主导作用,蜂窝织物起辅助作用,所得双面浇注复合材料在中低频段的隔声性能比双面覆涂复合材料的好。温晓丹<sup>[12]</sup>在聚氨酯溶液中分别加入二氧化硅、三氧化二铁、氧化锌 3 种不同填料,并用其对机织物进行涂层处理。研究发现,添加了填料的 3 种涂层织物的表面粗糙度大,吸声性能好。温晓丹还在蜂巢织物表面覆涂糯米胶,然后与 0~5 mm 厚的空气层复合,结果显示:在 1 000~5 000 Hz 频段,空气层的引入对未涂糯米胶的织物吸声性能影响显著,空气层厚度越大,结构体的吸声性能越好;在 1 000~5 000 Hz 频段,涂胶织物与空气层复合后结构体的吸声性能也随着空气层厚度的增大而增大;涂胶处理还额外增大了结构体的厚度,空气层对涂胶织物吸声性能的提升效果大于对未涂胶织物吸声性能的提升效果,结构体吸声系数峰值对应的频率随空气层厚度的增大而减小,共振频率向低频移动<sup>[2]</sup>。

在纺织材料涂层整理中,不同特性填料的加入对材料隔声性能的影响不同。玻璃微珠属于一种塑料类黏弹性阻尼材料,可通过降低物体的机械振动来减小噪声,其通常以纳米级填料的形式加入涂层液并均匀分布在溶液中,实现对织物的隔声降噪处理。空心微珠是一种含中空腔体的微小圆形球体颗粒,内壁厚度和粒径是衡量其性质的主要指标,微珠

粒径通常为几微米到几毫米不等<sup>[16]</sup>。中空玻璃微珠具有密度小、质轻、压缩强度高、分散性好、加工性能优异等特点,同时还具有保温隔热、隔声、吸能缓冲、电绝缘强度高、耐磨、防辐射、电磁屏蔽性好、吸水率低等特性,能够赋予聚合物优良的性能,因此常用作填充材料来制备复合材料,在防撞减震及防爆抗震的汽车、航空航天、军事装备及船舶等工业领域具有广阔的应用前景。

中空微珠(HGM)目前较多应用于提高复合材料的力学性能方面。李旦<sup>[17]</sup>探讨了中空玻璃微珠作为填充材料对泡沫塑料性能的影响,结果发现:中空玻璃微珠能起到成核剂的作用,有助于增加材料单位体积内泡沫孔的数量,且中空玻璃微珠的存在使气体的存在空间受到压缩,能限制气泡的增大,减小泡沫孔的尺寸,而单位体积内泡沫孔数量越多,尺寸越小,分布越均匀,泡沫塑料的密度越小,力学性能越好;中空玻璃微珠分布在泡沫孔壁周围,能够对泡沫孔壁起支撑作用,进而提高泡沫塑料的压缩强度和拉伸性能。

在产业用纺织品隔声降噪领域,HGM 也有很大的探索和应用空间。普丹丹等<sup>[18]</sup>以聚 PVC 为基体材料、HGM 为填充材料、涤纶织物为增强材料,采用接触成型技术将 HGM 混入 PVC 浆料中,再浇注到涤纶织物上制备涤纶/PVC-HGM 复合材料,并测试材料的隔声性能。研究结果显示,在 100~630 Hz 低频段,复合材料试样的隔声量随频率的变化较小;在 630~10 000 Hz 中高频段,隔声量随频率的增大而显著增大,最大隔声量达 28~30 dB,但增大 HGM 的体积分数后,试样的隔声量与低体积分数 HGM 试样的隔声量基本相当,即 HGM 体积分数的增大不能显著提高涤纶/PVC-HGM 复合材料试样的隔声性能。另外,普丹丹等<sup>[18]</sup>还将不同粒径的 HGM 加入 PVC 中,结果发现,随着复合材料试样中填充的 HGM 粒径的增大,试样的隔声性能提高。张伟程等<sup>[19]</sup>以聚氨酯为基体,中空玻璃微珠和偶氮二甲酰胺(商品名 AC 发泡剂)为填料,并加入一定量增塑剂,采用熔融共混法制备了一种软质复合材料。研究结果表明:随着 HGM 添加量的增加,复合材料的最大吸声系数降低,吸声系数峰值向入射声波的高频段方向移动,即 HGM 的加入并不能有效提升该复合材料的吸声性能,但可使材料在高频段的吸

声性能提高;AC发泡剂的加入可使材料产生的泡沫孔数量增加,有效提高材料的吸声系数,但AC发泡剂添加量过大时,泡沫孔内气压过大,泡沫孔易发生合并和坍塌,吸声系数反而有所下降。

## 4 结束语

纺织品作为良好的柔性多孔吸声材料,在吸声、隔声降噪方面有着其他降噪材料不可替代的优势。在实现室内隔声降噪方面,应考虑在不影响室内装饰材料原本功能的基础上,从改变纤维特性、织物结构及复合具有降噪功能的结构体或填料等方面着手,提高室内隔声降噪产业用纺织品的降噪效果。未来,随着技术的发展,与纺织材料复合的多功能轻薄降噪结构体有望广泛应用于室内环境中。



期刊采编平台



中国知网下载

## 参考文献

- [ 1 ] 徐石勇,应伟伟,苏盼盼,等. 提花窗帘织物隔音性能及影响因子分析[J]. 现代纺织技术,2014(4):1-5.
- [ 2 ] 梁丽娟. 经编间隔织物的声学性能研究[D]. 上海:东华大学,2010.
- [ 3 ] 闫志鹏,靳向煜. 聚酯纤维针刺非织造材料的吸声性能研究[J]. 产业用纺织品,2006,24(12):13-16.
- [ 4 ] 黄伟. 纺织材料的吸声机理与吸声研究进展[J]. 国际纺织导报,2021,49(9):35-38.
- [ 5 ] 范晓丹. 机织物结构与吸声隔音性能关系研究[D]. 天津:天津工业大学,2018.
- [ 6 ] 倪昭玉,万明,王瑄,等. 纺织材料吸声性能研究[J]. 棉纺织技术,2016,44(3):1-4.
- [ 7 ] 徐泉智. 纺织材料的吸声隔声原理[J]. 信息记录材料,2018(8):31-32.
- [ 8 ] 李辉芹,张楠,温晓丹,等. 纤维材料降噪结构体的研究进展[J]. 纺织学报,2020,41(3):175-181.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] GULHANE S S. 纺织品声学性能研究进展[J]. 高宇,译. 国际纺织导报,2019,47(4):36-38.
- [ 11 ] 李想,陈金静,张一风. 涤纶机织物降噪声性能的研究[J]. 纺织导报,2013(10):74-78.
- [ 12 ] 温晓丹. 纤维基贴壁复合结构吸声性能研究[D]. 天津:天津工业大学,2021.
- [ 13 ] 张文韬. 高效吸音纤维材料结构及性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.
- [ 14 ] 林希宁. 玄武岩纤维制备吸音/隔音复合材料的研究[D]. 广州:广东工业大学,2012.
- [ 15 ] 杨天兵. 蜂窝织物/聚氯乙烯复合材料的制备及其隔音性能研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2011.
- [ 16 ] 潘利文,饶德旺,杨超,等. 空心微珠/金属基复合泡沫制备方法与其吸能性能的研究进展[J]. 复合材料学报,2020,37(6):1370-1382.
- [ 17 ] 李旦. 中空玻璃微珠在塑料泡沫中的应用研究[J]. 粉煤灰,2013(1):29-33.
- [ 18 ] 普丹丹,傅雅琴. 涤纶织物/聚氯乙烯-中空微珠复合材料的制备及其隔声性能[J]. 纺织学报,2021,42(11):77-83.
- [ 19 ] 张伟程,胡祥,罗鸿兴,等. 中空玻璃微珠填充聚氨酯发泡材料的吸声性能与动态力学性能研究[J]. 中国塑料,2023,37(1):38-45.

欢迎投稿《产业用纺织品》

<https://cyyf.cbpt.cnki.net>    [techtex@dhu.edu.cn](mailto:techtex@dhu.edu.cn)