

DOI: 10.13475/j.fzxb.20171101307

废弃羊毛吸声复合材料的制备及其性能

李长伟, 吕丽华

(大连工业大学 纺织与材料工程学院, 辽宁 大连 116034)

摘要 为解决废弃羊毛再生循环利用问题, 开发吸声系数高且吸声频带宽的吸声材料, 以废弃羊毛为增强材料, 乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)为基体材料, 通过热压法制备了废弃羊毛/EVA吸声复合材料。选用传递函数法分析废弃羊毛/EVA吸声复合材料的热压温度、材料密度、废弃羊毛质量分数、材料厚度、后空气层厚度以及废弃羊毛的排列方式等对吸声系数的影响。结果表明: 用最优工艺制备的废弃羊毛/EVA吸声复合材料在低中高频都有优异吸声性能; 该材料的吸声性能在中低频区域表现突出, 在1 000 Hz处吸声系数达到0.9, 材料降噪系数达0.65, 平均吸声系数为0.6, 即该材料为高效吸声材料; 为吸声机制声波入射材料内部激发振动, 声能转化为动能及热能, 使废弃羊毛/EVA吸声复合材料具有优异吸声性能。

关键词 废弃羊毛; 乙烯-醋酸共聚物; 吸声复合材料; 吸声性能; 吸声机制

中图分类号: TS 102.9 文献标志码: A

Preparation and properties of sound absorption composites based on waste wool

LI Changwei, LÜ Lihua

(College of Textile and Material Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)

Abstract In order to solve the problem of regenerative recycling of waste wool and develop sound absorbing materials with high sound absorption coefficient and wide sound absorption frequency band, the waste wool/ethylene vinyl acetate copolymer(EVA) sound absorption composites were prepared by hot pressing method. Waste wool were used as reinforced material and EVA was taken as matrix material. The influence of hot-pressing temperature, density of composites, mass fraction of waste wool, thickness of composites, thickness of the air layer and waste wool arrangement on the sound absorption coefficient were measured by the transfer function method. The results show that the waste wool/EVA sound absorption composites have excellent sound absorption performance at low, medium and high frequencies. The sound absorption performance of the composites is prominent in the middle and low frequency region. The sound absorption coefficient reaches 0.9 at 1 000 Hz, the noise reduction coefficient is 0.65, and the average sound absorption coefficient is 0.6. The sound absorption mechanism of the waste wool/EVA sound absorption composites with excellent sound absorbing properties is that the acoustic energy is converted into kinetic energy and thermal energy by exciting the vibration by sound waves entering the interior of the material.

Keywords waste wool; ethylene-vinyl acetate copolymer; sound absorption composite; sound absorption property; sound absorption mechanism

中国是羊毛制品生产大国^[1-2], 在纺织企业中有很多羊毛废弃物及下脚料, 这些可再生的天然纤

维资源目前尚未得到合理利用^[3]。由于现代化和工业化进程的加快, 噪声污染已影响到人们的日常

收稿日期: 2017-11-07 修回日期: 2018-07-13

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(201602051)

第一作者简介: 李长伟(1993—), 女, 硕士生。主要研究方向为纤维材料的循环利用。

通信作者: 吕丽华, E-mail: lvlh@dlpu.edu.cn。

生活。作为以听说为主要用途的录音室、教室、电影院等声学建筑,环境隔声的效果与室内吸声材料有重要关系^[4],所以,开发具有吸声降噪功能的材料以控制噪声污染是目前亟待解决的课题之一。利用废弃羊毛制备吸声材料可以节约羊毛资源,降低生产成本,还可以解决资源浪费、环境污染等问题^[4],也符合我国循环经济、低成本加工及可持续发展的战略要求。

早在 20 世纪 90 年代,日本就已经研究了如何从羊毛中提取角蛋白^[5]。奚柏君等^[6]利用蛋白质纤维的下脚料研制出了性能优异的再生蛋白质纤维。陈莉萍等^[7]对羊毛角蛋白的溶解方法提出了一些新的研究思路及途径,采用氧化法和还原法溶解羊毛得到羊毛角蛋白,并分析了湿法纺丝的应用和溶液成膜性能。姚金波等^[8-10]通过羊毛角蛋白溶液的工艺优化实验,对羊毛角蛋白的溶解方法进行了总结,发现水解废弃羊毛提取角蛋白工业化生产的难度很大,而且成本高。21 世纪初日本京都女子大学采用加热和压缩的方法,将废旧羊毛制成性能像塑料一样的材料,其弯曲强度与通用塑料强度相近,开辟了废弃羊毛再利用的新道路^[11]。Alsewailem^[12]制备了废弃羊毛增强聚合物复合材料,与未加废弃羊毛的复合材料相比,含有废弃羊毛的复合材料拉伸强度和冲击强度都得到了很大的提高。Berardi 等^[13]通过机织、非织造及针织等加工方法制备不同厚度的羊毛样品,并对样品的吸声系数和静态流阻进行了测试。Li 等^[14]制备厚度为 2 mm 的薄微穿孔板,有效地拓宽微穿孔板的吸声频带。栾巧丽等^[15-16]和成钢^[17]采用非织造加工工艺制备废弃羊毛吸声材料,利用驻波管法测得材料的降噪系数达到 0.6 以上,但得到的吸声材料厚度较厚,产品附加值低,而且未能根本解决资源再利用难点。由此可知,国内外废弃羊毛再生循环利用大都集中于用水解废弃羊毛提取角蛋白领域,而用废弃羊毛开发高附加值的吸声材料研究较少,且废弃羊毛纤维吸声性能和各因素的关系,以及其声阻抗形成机制也需进一步明晰。

本文分析了羊毛吸声复合材料制备中的热压温度、材料密度、废弃羊毛质量分数、材料厚度、后空气层厚度以及废弃羊毛的排列方式等因素对废弃羊毛/乙烯-醋酸乙烯(EVA)吸声复合材料吸声性能的影响,得出了最优制备工艺条件;并用多孔吸声理论、阻尼吸声理论和共振吸声理论分析废弃羊毛/EVA 吸声复合材料的声阻抗产生机制。前期对废弃纤维、废弃鸭毛复合材料的吸声性能研究^[18-20],为本实验的顺利开展提供了理论参考。

1 实验部分

1.1 实验原料

废弃羊毛(山东临沂市罗庄区富迪毛纺厂);乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA);白色粉末(由苏州亿富塑化有限公司),熔点 77 °C,软化点 60 °C。

1.2 实验仪器

DSCa-01 型数字式小样梳棉机,天津市嘉诚机电设备有限公司;QLB-50D/Q 型 MN 压力成型机,江苏无锡中凯橡塑机械有限公司;SW477/SW422 型吸声测试系统,北京声望公司。

1.3 废弃羊毛/EVA 吸声复合材料的制备

1.3.1 废弃羊毛前处理

因废弃羊毛大都为扫地毛、回毛、短绒毛等,其中含有大量黑色杂质,对吸声性能影响较大。将废弃羊毛在梳棉机上进行梳理,去除杂质,并使不同种类的羊毛混合均匀,以减小误差。梳理后的废弃羊毛长度在 30 ~ 70 mm 之间。废弃羊毛梳理前后外观对比如图 1 所示。由图 1(b)可知,梳理后废弃羊毛洁净,基本无杂质。为消除杂质对吸声性能的影响,本文以水洗烘干后的废弃羊毛(无杂质)为原料制备吸声复合材料与仅进行梳理后的废弃羊毛为原料制备吸声复合材料进行对比,二者吸声性能差异很小(无差异),说明废弃羊毛经梳理后,其杂质基本去除。

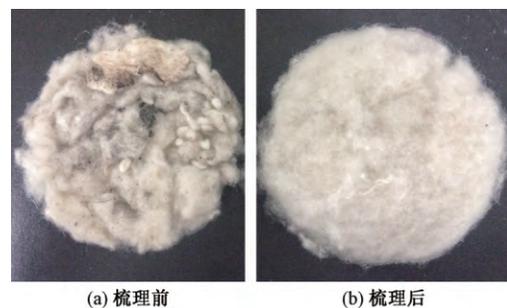


图 1 废弃羊毛梳理前后对比图

Fig. 1 Waster wools before (a) and after (b) being combed

1.3.2 复合材料的制备

废弃羊毛/EVA 吸声复合材料制备的工艺流程如图 2 所示。

将经过前处理后的废弃羊毛与 EVA 粉末放入小型混合器中,将混合好的物料放入圆形模具(规格 100 mm × 10 mm)中铺装。采用热压成型工艺,设定热压温度、热压压力及热压时间,最后冷却脱模制得废弃羊毛/EVA 吸声复合材料。热压压力及热压时间对材料吸声性能影响较小,因此在成型工艺

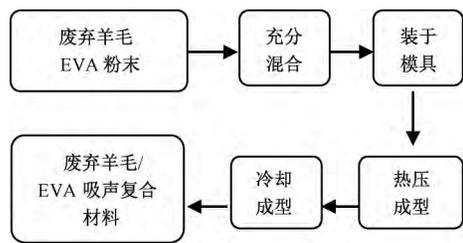


图 2 废弃羊毛/EVA 吸声复合材料的工艺流程
Fig.2 Process for preparation of waste wool/EVA sound absorption composites

中仅探究不同热压温度的影响。

制备不同材料密度的试样时,使用同一规格模具(试样的体积相同),分别称取 5 个质量梯度(12、15、18、21、24 g)的混合物料置于模具中,得到材料密度为 0.153、0.191、0.229、0.267、0.306 g/cm³ 的试样。

制备不同纤维质量分数的试样时,混合物料质量相同,分别称取混合物料总质量 30%、40%、50%、60%、70% 的废弃羊毛与 EVA 粉末混合。通过控制模具的厚度来制备不同厚度的试样。在后空气层厚度吸声测试时,用同一个试样,仅改变阻抗管刚性后盖板与材料背面之间空气层的距离(即后空气层厚度),来探究不同厚度后空气层对吸声性能的影响。

1.4 测试方法

采用传递函数法测试不同类型复合材料的吸声性能,测试过程参照 GB/T 18696.2—2002《声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第 2 部分:传递函数法》和 GB/T 18696.1—2004《声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第 1 部分:驻波比法》。所测频率范围为 80 ~ 6 300 Hz,测试过程均在大气温度为 24 ℃,相对湿度为 65%,声速为 345.6 m/s,空气的特征阻抗为 409.78 Pa·s/m 的环境中进行。

2 结果与讨论

2.1 热压温度对吸声系数的影响

热压温度对材料的成型有很大影响,热压温度选择的最低温度一定要高于 EVA 熔点。为使得材料有较好的成型性且材料不黄化,经过多次实验,热压温度选取 90、100、110、120、140 ℃,其他工艺参数为:热压压力 10 MPa,材料密度 0.191 g/cm³、废弃羊毛质量分数 50%、材料厚度 10 mm,废弃羊毛/EVA 吸声复合材料的吸声系数曲线如图 3 所示。

由图 3 可见,在 1 500 ~ 5 000 Hz 频率范围内热压温度对材料的吸声系数影响较大,吸声性能随着

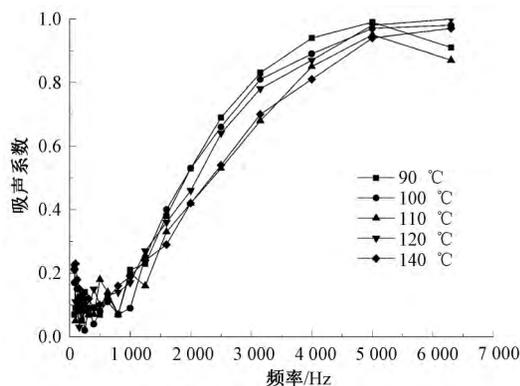


图 3 热压温度对吸声系数的影响
Fig.3 Effect of hot-pressing temperature on sound absorption coefficient

温度的升高而减弱。材料在热压温度为 110 ℃ 时,吸声系数相对较低,原因可能是废弃羊毛在 110 ℃ 时发生脱水,纤维产生溶胀,导致材料孔隙率减少,吸声系数降低。生产废弃羊毛/EVA 吸声复合材料时,应避免开此温度。当热压温度为 90 ℃ 时,复合材料的吸声效果最好(最大吸声系数可达 0.99,且吸声频带较宽)。因为在此热压温度下,EVA 完全软化熔融,增加了废弃羊毛之间的黏结牢度,导致材料之间形成较为稳定的孔隙结构,吸声系数随之增大。但当热压温度继续升高时,EVA 的黏结特性遭到破坏,反而减弱材料的吸声系数。

图 4 示出废弃羊毛/EVA 吸声复合材料在热压温度为 90 ℃ 和 120 ℃ 下的样品照片。可知,热压温度为 120 ℃ 时,废弃羊毛/EVA 吸声复合材料发生黄化,颜色呈浅褐色,并伴有轻微烧毛发臭味,在实际生产中会影响环境。由于热压温度过高,使得废弃羊毛的内部结构发生改变,同样使吸声系数减弱。140 ℃ 时,废弃羊毛已黄化严重,且 EVA 在此温度下具有流动性,材料长时间热压后,出现质量损失,温度过高,无实际意义。

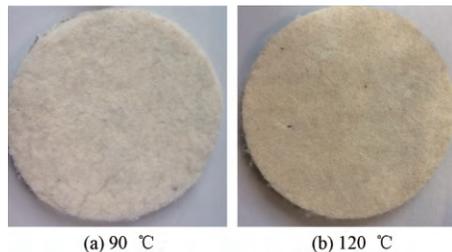


图 4 不同热压温度处理后样品照片
Fig.4 Sample treated at different hot pressing temperature

2.2 材料密度对吸声系数的影响

废弃羊毛/EVA 吸声复合材料在热压温度为 90 ℃,热压压力为 10 MPa,废弃羊毛质量分数为 50%,材料厚度为 10 mm 的工艺条件下,材料密度

为 0.153、0.191、0.229、0.267、0.306 g/cm^3 的吸声系数曲线如图 5 所示。可知,增大材料密度可提高废弃羊毛/EVA 吸声复合材料在中高频段的吸声系数。增大材料密度,单位体积内纤维的数量增多,材料内部孔隙减小,声波与纤维更加频繁接触,流阻变大,消耗的声能增多。但当材料密度大于一定值时,即材料密度达到 0.306 g/cm^3 时,吸声系数反而降低,这可能是由于材料密度过大,材料的空隙率降低,从而使吸声系数降低。

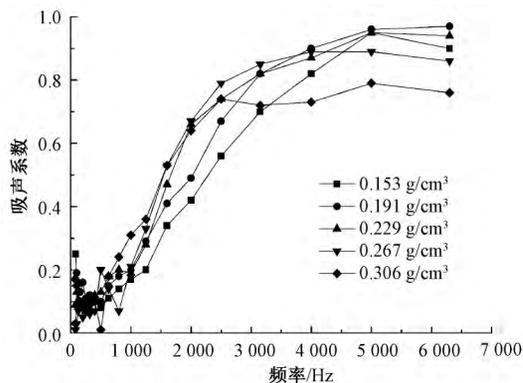


图 5 材料密度对吸声系数的影响

Fig. 5 Effect of density on sound absorption coefficient

2.3 纤维质量分数对吸声系数的影响

图 6 示出热压温度为 90 $^{\circ}\text{C}$,热压压力为 10 MPa,材料密度为 0.229 g/cm^3 ,材料厚度为 10 mm 的工艺条件下,废弃羊毛质量分数(废弃羊毛的质量占材料总质量的百分比)为 30%、40%、50%、60%、70% 的吸声系数曲线。

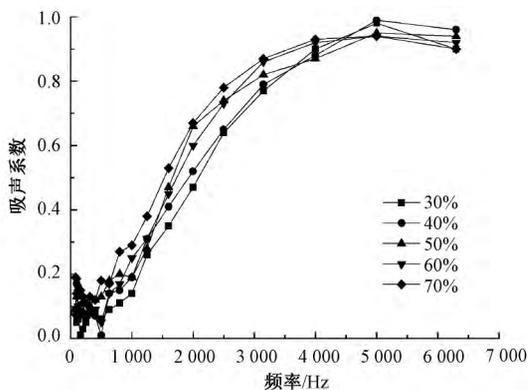


图 6 废弃羊毛质量分数对吸声系数的影响

Fig. 6 Effect of mass fraction of waste wool on sound absorption coefficient

由图可知:提高废弃羊毛质量分数,在 1 000 ~ 4 000 Hz 的频率范围内材料的吸声系数逐渐递增;但在 4 000 ~ 6 300 Hz 的频率范围内,材料的吸声系数变化不大。这可能是由于在一定范围内,随着废弃羊毛质量分数的增加,纤维间的孔隙增多,空气与孔隙壁更易产生摩擦,材料中多孔吸声机制占主导,

但在实际生产应用中,随着废弃羊毛质量分数的增加,EVA 质量分数的减少,废弃羊毛纤维与 EVA 之间的黏附效果变差,因此,为保证材料的成型效果,选择质量分数为 50% 的废弃羊毛较好。

2.4 材料厚度对吸声系数的影响

为研究废弃羊毛/EVA 吸声复合材料吸声系数与厚度的关系,制备 4 块条件相同的材料(即热压温度为 90 $^{\circ}\text{C}$,热压压力为 10 MPa,材料密度为 0.229 g/cm^3 ,羊毛质量分数为 50%),选取不同厚度(10、20、30 和 40 mm)吸声材料,得出不同频率下的吸声系数曲线如图 7 所示。可知,随着材料厚度的增加,吸声系数曲线向低频移动,对高频段影响甚微,当材料厚度达到一定值后,吸声系数趋于稳定。在低频范围内,吸声系数随厚度的增加而不断增大。这是由于低频声波进入到材料深层被吸收,增大材料厚度,声波通过材料孔隙的通道增长,受到孔隙折曲的阻隔越多,声能损失也就越多,吸声系数也随之增大^[16]。当材料在低频段的吸声系数趋于平缓时,再提高材料厚度对提高材料吸声系数意义不大,且浪费室内空间。

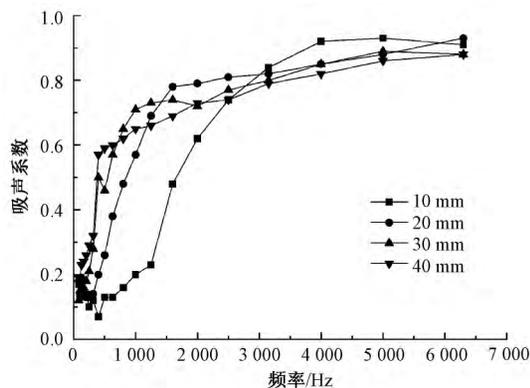


图 7 材料厚度对吸声系数的影响

Fig. 7 Effect of thickness on sound absorption coefficient

2.5 材料后空气层厚度对吸声系数的影响

废弃羊毛/EVA 吸声复合材料在热压温度 90 $^{\circ}\text{C}$,热压压力 10 MPa,材料密度 0.229 g/cm^3 ,废弃羊毛质量分数为 50% 的工艺条件下,后空气层厚度(材料背面离墙壁的距离,即材料背面与刚性后盖板间空气层的厚度)为 0、10、20、30、40 mm 的吸声系数曲线如图 8 所示。

由图 8 可知,随着后空气层厚度的增加,材料的吸声系数曲线向低频移动,即在材料背后增加空气层可显著提高材料在中低频段的吸声性能。在中低频段,后空气层的存在可达到提高材料厚度的效果,当声波通过材料到达吸声仪器的刚性后盖板时,声波在材料背面与刚性后盖板之间来回反射,声波产

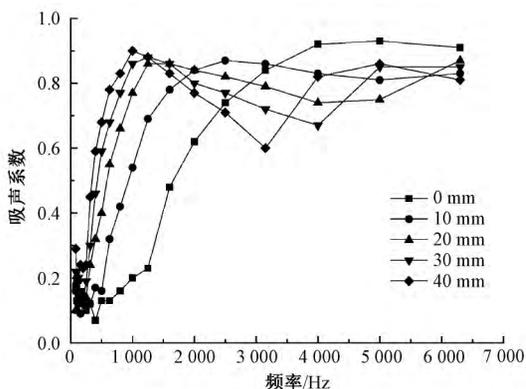


图 8 后空气层厚度对吸声系数的影响
Fig. 8 Effect of thickness of air layer on sound absorption coefficient

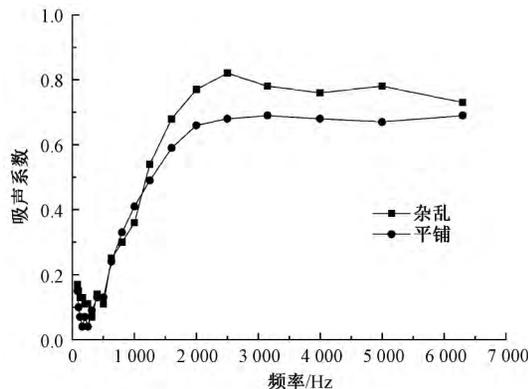


图 9 废弃羊毛排列方式对吸声系数的影响
Fig. 9 Effect of discarded wool fibers arrangement on sound absorption coefficient

生能量损失,并且声能通过不断转化成热能而损耗,使材料在低频段的吸声性能显著提高。然而当材料吸声系数到达峰值后,又出现下降的趋势,吸声系数在高频段又开始回升,随着后空气层厚度的减小,吸声系数的峰值向高频移动,且吸声曲线趋于平缓。这与纤维多孔材料出现吸声波峰和波谷的原理一致:材料背面距刚性后盖板为 $1/4$ 波长的奇数倍是吸声曲线的波峰处,该处声压为零,材料所引起的摩擦阻尼即转化成的热能最多,声能损耗最大,在相应的频率下可获得吸声系数的峰值。离后盖板 $1/2$ 波长处,声压是最大的,质点振动速率为零,在相应频率下,材料的吸声系数最小,高频区吸声性能下降^[21]。由分析可知,增加材料厚度与增加后空气层厚度均可提高材料在低频区的吸声性能,但通过增加后空气层厚度比单靠增加材料的厚度更加经济、合理。

2.6 纤维排列方式对吸声系数的影响

为研究废弃羊毛排列方式对材料吸声系数的影响,改变废弃羊毛的排列方式为沿测试管的径向(竖直)排列和直接随机排列 2 种,测试废弃羊毛平铺和杂乱 2 种成型方式对材料吸声系数的影响,结果如图 9 所示。可知,杂乱比平铺排列的材料吸声性能好,尤其是在中高频段。原因在于杂乱排列的方式产生相互贯通的孔隙比起平铺排列方式多,而且材料间的接触和缠结也增多了,增强了空气损耗和共振 2 方面的吸声机制^[22]。

2.7 复合材料吸声机制分析

根据上述分析,在工艺条件为:热压温度 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,材料密度 0.229 g/cm^3 ,废弃羊毛质量分数 50%,材料厚度 10 mm,后空气层厚度 40 mm 时,废弃羊毛/EVA 吸声复合材料的吸声频带宽,吸声系数高。废弃羊毛/EVA 吸声复合材料吸声系数曲线如图 10 所示。

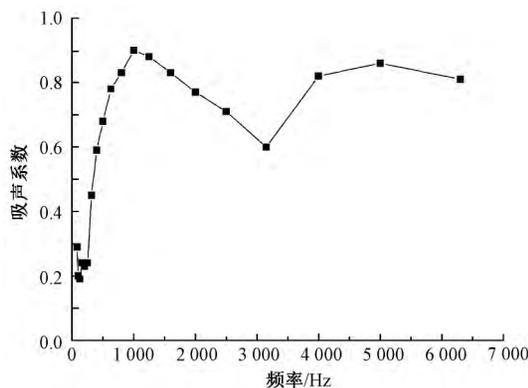


图 10 废弃羊毛/EVA 吸声复合材料吸声系数曲线
Fig. 10 Sound absorption coefficient curve of discarded wool/EVA sound absorption composites

由图 10 可知,该材料的吸声性能在中低频区域表现突出,在 1000 Hz 处吸声系数可达到 0.9,且材料降噪系数(在 250、500、1000、2000 Hz 频率时吸声系数的算术平均值)达 0.65,平均吸声系数(采用 125、250、500、1000、2000、4000 Hz 频率下吸声系数的算术平均值)为 0.6(通常认为平均吸声系数大于 0.2 的材料称为吸声材料,大于 0.56 的材料称为高效吸声材料^[23]),即该材料为高效吸声材料。废弃羊毛/EVA 吸声复合材料扫描电镜照片如图 11 所示。可见,废弃羊毛相互交错,形成大量孔隙。当声波入射到吸声材料表面后,便会沿着材料内部微孔或间隙进入,从而使微孔或孔隙中的空气振动被激发,当振动的空气接触到废弃羊毛的鳞片层后,带动鳞片层的振动,同时带动多孔吸声材料的固定筋络间产生相对的运动,激发废弃羊毛内部的空气振动。声能不停转换为热能而损耗,废弃羊毛纤维及黏合废弃羊毛的 EVA 的振动将声能转化为动能而衰减,整个材料在空气压缩绝热的情况时,热交换在孔壁与空气之间发生,使声能转换为热能。这种机

制主要吸收中高频段的声波,即该材料在中高频段有优异的吸声性能。该材料在中低频区域,吸声性能优异,主要靠提高后空气层厚度来实现。

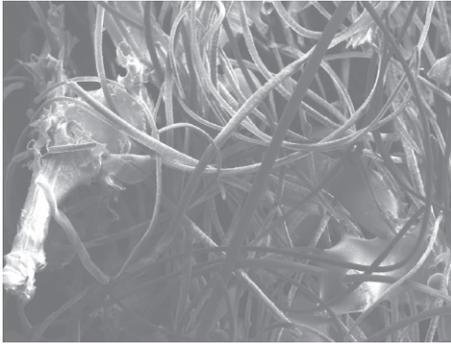


图 11 废弃羊毛/EVA 吸声复合材料扫描电镜照片(×100)

Fig. 11 SEM image of waste wool/EVA sound absorption composites (×100)

3 结 论

以废弃羊毛和 EVA 为原料,采用热压成型法制备的废弃羊毛/EVA 吸声复合材料在低、中、高频都有优异吸声性能,吸声频带宽。在 1 000 Hz 处吸声系数可达到 0.9,材料降噪系数达 0.65,平均吸声系数为 0.6,为高效吸声材料。其中热压温度对材料在 1 500 ~ 5 000 Hz 频率范围内的吸声系数影响较大。材料在 110 °C 时发生脱水,吸声性能下降明显。适当提高材料密度,可提高材料在中、高频段的吸声系数,但对低频吸声系数的提高无明显效果。随着废弃羊毛质量分数增加,材料吸声系数在 1 000 ~ 4 000 Hz 的频率范围内递增,但在 4 000 ~ 6 300 Hz 的频率范围内,材料的吸声系数无明显变化。随着材料厚度的增大,材料吸声系数曲线向低频移动,但材料厚度达到某一定值后,吸声曲线趋于平缓。提高后空气层厚度,材料的吸声曲线向低频移动,显著提高材料在中低频段的吸声性能。相比于增加材料厚度,通过增加后空气层厚度的方法来提高材料在中低频的吸声性能,更加符合实际生产需求。废弃羊毛杂乱排列的方式比以平铺排列的方式产生更多相互贯通的孔隙,提高了材料在中高频段的吸声性能。

FZXB

参考文献:

[1] 汤燕伟,于伟东. 羊毛溶液和角蛋白膜的实用制备技术与基本问题[J]. 膜科学与技术,2007,27(2): 80-84.
TANG Yanwei, YU Weidong. Practical preparation techniques and basic problems of wool solution and

keratin membrane [J]. Membrane Science and Technology, 2007, 27(2): 80-84.

- [2] 肖海峰,黄小曦,孙致陆,等. 中国羊毛国际竞争力及其影响因素研究[J]. 农业经济与管理,2014(3): 80-89.
XIAO Haifeng, HUANG Xiaoxi, SUN Zhilu, et al. Study on international competitiveness of China's wool and its influencing factors [J]. Agricultural Economics and Management, 2014(3): 80-89.
- [3] 田春英,王峰,荣威恒. 内蒙古细毛羊产业可持续发展对策探讨[J]. 畜牧与饲料科学,2005,26(4): 48-50.
TIAN Chunying, WANG Feng, RONG Weiheng. Discussion on sustainable development of fine wool sheep industry in inner [J]. Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2005, 26(4): 48-50.
- [4] 项端祈. 实用建筑声学: 建筑声学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1992: 220.
XIANG Duanqi. Practical Building Acoustics: Architectural Acoustics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992: 220.
- [5] 王飞飞. 羊毛粉末制备及在纺织上应用的探讨[D]. 上海: 东华大学,2006: 2-3.
WANG Feifei. Research on the preparation and application in textile of wool power [D]. Shanghai: Donghua University, 2006: 2-3.
- [6] 奚柏君. 再生蛋白纤维的研制及性能分析[D]. 苏州: 苏州大学,2003: 39-40.
XI Bojun. Development and performance analysis of regenerated protein fiber [J]. Suzhou: Soochow University, 2003: 39-40.
- [7] 陈莉萍,于伟东. 羊毛角蛋白的再生利用技术[J]. 毛纺科技,2003,31(4): 3-7.
CHEN Liping, YU Weidong. Regeneration technique of wool keratin [J]. Wool Textile Journal, 2003, 31(4): 3-7.
- [8] 姚金波,何天虹. 羊毛角蛋白质溶液的制备[J]. 毛纺科技,2003,31(4): 16-19.
YAO Jinbo, HE Tianhong. Preparation of wool keratin solution [J]. Wool Textile Journal, 2003, 31(4): 16-19.
- [9] 姚金波,何天虹,何美劲,等. 还原 C 法制备羊毛角蛋白质溶液的工艺优化[J]. 毛纺科技,2003,31(5): 10-13.
YAO Jinbo, HE Tianhong, HE Meijin, et al. Optimization technology of preparing the solution of wool keratin with method of reduction-C [J]. Wool Textile Journal, 2003, 31(5): 10-13.
- [10] 孙艳丽,姚金波,李博,等. 羊毛角蛋白溶液在毛织物定型中的应用[J]. 纺织学报,2015,36(4): 97-101.
SUN Yanli, YAO Jinbo, LI Bo, et al. Application of wool keratin solution in wool fabric shaping [J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(4): 97-101.

- [11] 江镇海. 日本开发利用废羊毛和羽毛[J]. 中国资源综合利用, 2002(2): 11.
JIANG Zhenhai. The development and utilization of waste wool and feathers in Japan [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2002(2): 11.
- [12] AISEWAILEM F D. Efficient polymer composites based on natural wool: 8754152B2 [P]. 2014 - 06 - 17.
- [13] BERARDI U, LANNACE G, GABRIELE M D. Characterization of sheep wool panels for room acoustic applications [C]//22nd International Congress on Acoustics. Buenos Aires: ICA, 2016: 5 - 9.
- [14] LI C, YING X, LI D. Effect of wool fiber on widening sound absorption spectrum of thin microperforated panel [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(2): 263 - 267.
- [15] 栾巧丽, 邱华, 成钢, 等. 利用废旧羊毛制备多孔吸声材料[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 6081 - 6086.
LUAN Qiaoli, QIU Hua, CHENG Gang, et al. Preparation of porous sound absorbing material based on discarded wool fiber [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(10): 6081 - 6086.
- [16] 栾巧丽, 邱华, 成钢, 等. 废旧羊毛非织造布的制备及其吸声性能[J]. 纺织学报, 2016, 37(7): 77 - 81.
LUAN Qiaoli, QIU Hua, CHENG Gang, et al. Preparation and sound absorption properties of waste wool nonwoven material [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(7): 77 - 81.
- [17] 成钢. 羊毛吸声绝热制品的性能及应用[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(5): 63 - 66.
CHENG Gang. Performance and application of wool absorbing insulation products [J]. New Building Materials, 2009, 36(5): 63 - 66.
- [18] LÜ Lihua, BI Jihong, YU Xiang, et al. Sound absorption properties of composites made of discarded duck feathers [J]. Tekstil ve Konfeksiyon, 2016, 26(2): 153 - 158.
- [19] BI Jihong, LV Lihua, QIAN Yongfang, et al. Sound absorption properties of discarded feathers/ethylene vinyl acetate copolymer thermoplastic composite materials [J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2016, 3(4): 540 - 544.
- [20] 吕丽华, 毕吉红, 于翔. 废弃纤维吸声复合材料的制备及其吸声性能[J]. 纺织学报, 2016, 37(2): 39 - 43.
LÜ Lihua, BI Jihong, YU Xiang. Fabrication and sound absorption properties of waste fiber composite materials [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(2): 39 - 43.
- [21] 张新安. 聚酯机织物吸声性能研究[J]. 高分子通报, 2006, 84(10): 52 - 58.
ZHANG Xinan. Study on sound absorbing properties of polyester woven fabrics [J]. Polymer Bulletin, 2006, 84(10): 52 - 58.
- [22] 杨树. 纤维集合体的结构特征及其吸声性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2011: 31 - 32.
YANG Shu. Study of structural characteristics and acoustic properties of fiber assembly [D]. Shanghai: Donghua University, 2011: 31 - 32.
- [23] 卢红斌. 吸声隔声技术在冲压降噪工程中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 15 - 17.
LU Hongbin. The application investigations of noise absorbent and insulation materials in a pressing & stamping workshop [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 15 - 17.