

DOI: 10.13475/j.fzxb.20210901708

废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料的制备与性能

吕丽华, 李 臻, 张多多

(大连工业大学 纺织与材料工程学院, 辽宁 大连 116034)

摘 要 为提高废弃秸秆的利用率, 拓宽其应用领域, 以废弃秸秆为增强原料, 聚己内酯为基体材料, 通过热压法制备废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料。在热压温度为 120 °C, 压力为 10 MPa, 热压时间为 20 min 的条件下, 通过实验探究秸秆质量分数、复合材料密度、复合材料厚度、后置空气层厚度等参数对吸声复合材料吸声性能的影响。结果表明: 当秸秆质量分数为 30%、复合材料密度为 0.450 g/cm³、复合材料厚度为 1.5 cm、后置空气层厚度为 3.0 cm 时, 废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料在 100~6 300 Hz 频率内吸声性能优异, 其平均吸声系数为 0.50, 降噪系数为 0.50, 最大吸声系数为 0.71, 吸声性能等级达到Ⅲ级, 吸声机制是多孔吸声原理。

关键词 废弃秸秆; 聚己内酯; 吸声性能; 复合材料; 吸声机制

中图分类号: TS 102.9 文献标志码: A

Preparation and properties of sound absorbing composites based on use of waste straw/polycaprolactone

LÜ Lihua, LI Zhen, ZHANG Duoduo

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

Abstract In order to improve the utilization rate of waste straws and broaden its application field, waste straw/polycaprolactone sound absorption composites were prepared by hot pressing with waste straw as reinforcement material and polycaprolactone as matrix material. Under the hot pressing temperature of 120 °C, pressure of 10 MPa and hot pressing time of 20 min, the influences of straw mass fraction, composite density, composite thickness and thickness of rear air layer on sound absorption performance of the composite were investigated by experiment. The results shows that when the straw mass fraction was 30%, the composite density was 0.450 g/cm³, the composite thickness was 1.5 cm, and the thickness of the rear air layer was 3.0 cm, the waste straw/polycaprolactone sound absorption composite demonstrates excellent sound absorption performance for 100~6 300 Hz frequency, with the average sound absorption coefficient of 0.50, the noise reduction coefficient of 0.50, and the maximum sound absorption coefficient 0.71, which indicate grade III of sound absorption performance. The research revealed that the sound absorption mechanism is based on porous structure of the composites.

Keywords waste straw; polycaprolactone; sound absorption performance; composite material; sound absorption mechanism

随着我国社会经济的快速发展, 环境污染问题越来越受到重视, 其中噪声污染问题受到人们的广泛关注。严重的噪声污染不仅会干扰到人们的正常工作和生活, 还会损害身体健康^[1], 因此, 开发具备吸声功能的材料来控制噪声污染, 对提高人们的生活质量与保持身体健康具有重要意义。数据显示, 我国玉米秸秆收获量可达到 2.16 亿 t, 预计在下一个

五年玉米秸秆资源量将会超过 2.5 亿 t^[3], 但秸秆的利用率较低, 未利用的秸秆占 65% 左右^[4]。秸秆焚烧治理成为一个棘手的问题: 一是秸秆焚烧对环境危害巨大, 各种农作物的秸秆在焚烧时都会排放二氧化碳、硫化氢、氮的氧化物等有害气体到大气中, 并产生 PM₁₀、PM_{2.5} 等悬浮颗粒物, 最终造成严重的雾霾, 而且硫化物形成的酸雨、氮氧化物造成的光化

收稿日期: 2021-09-06 修回日期: 2021-10-21

基金项目: 大连市科技创新基金项目(2019J12SN71)

第一作者: 吕丽华(1978—), 女, 教授, 博士。主要研究方向为纤维材料再生资源化利用技术。E-mail: lvlh@dlpu.edu.cn。

学污染等会对人体健康和生态环境产生威胁;二是秸秆焚烧对人类生产生活产生影响,秸秆焚烧引起火灾、大气能见度下降等问题给人们生产生活带来了安全隐患,为经济社会发展带来不利因素;三是秸秆焚烧后会破坏土壤结构,给焚烧场所周围的生态系统带来挑战^[5]。

废弃秸秆价格较低、来源广泛、密度较小、具有良好的中空结构,很适合做吸声材料。利用废弃秸秆制备吸声性能良好的吸声材料:一方面,解决了废弃秸秆资源的浪费,减轻环境污染的问题;另一方面,制备出吸声系数高的吸声材料可满足建筑声学等环境的要求,具有良好的经济效益,同时,也符合循环经济、可持续发展的战略要求。杨军等^[6]综述了废弃秸秆在复合材料上应用的方法和途径。肖力光等^[7]在利用秸秆等农业废弃物制作新型复合节能墙体材料时发现,在节能 50% 的前提下,材料还具有力学性能优良、导热系数低、回潮率低、防火等优点,这验证了利用废弃玉米秸秆制作建筑材料具有诸多优势。华亮等^[8]使用稻草秸秆制备吸声复合板材,其吸声频带为 1 000 ~ 4 000 Hz,且使用 60 mm 长秸秆进行 20 min 热压能够增强稻草秸秆板吸声性能,此时的板材密度为 200 kg/m³,厚度为 20 mm;这充分验证了秸秆作为增强体制备吸声材料的可能性,但吸声性能仍有进步发展的空间,且吸声机制需进一步明晰。李长伟等^[9]将废弃羊毛作为增强材料,将乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)作为基体材料,使用热压法制备得到了废弃羊毛/EVA 吸声复合材料,并研究了复合材料的吸声机制。Lyu 等^[10]利用废弃羽毛纤维和 EVA,采用热压法制备了具有良好吸声性能的羽毛纤维/EVA 吸声复合材料。Liu 等^[11]探讨了杨絮纤维的结构与其吸声性能的关系。文献[9-11]均表明,复合材料中的纤维质量分数、复合材料密度、复合材料厚度、后置空气层厚度等因素均会对吸声复合材料的吸声性能产生影响。

综合以上分析,本文以废弃秸秆为增强材料,聚己内酯为基体材料,采用单因素法从秸秆质量分数、复合材料密度、复合材料厚度、后置空气层厚度等因素,探究吸声复合材料吸声性能的变化规律,并借助扫描电镜分析揭示其吸声机制。

1 实验部分

1.1 实验材料

废弃玉米秸秆颗粒,长度为 1.5 mm,连云港苏锐秸秆加工厂;聚己内酯,白色粉末,熔点为 60 ℃,苏威(SOLVAY)中国集团。

1.2 实验仪器

MP2000D 型上海精科分析天平,常州市第一纺织设备有限公司;QLB-50D/Q 型平板硫化压力成型机,江苏无锡中凯橡塑机械有限公司;SW477/SW422 型吸声测试系统,北京声望声电技术有限公司;JSM-6460LV 型扫描电子显微镜,日本电子株式会社。

1.3 复合材料的制备

将废弃玉米秸秆颗粒和聚己内酯粉末按照表 1 所示实验方案设定质量配比并混合均匀,放置于准备好的模具中形成直径分别为 30、100 mm 的预成型体;然后将预成型体放入预热好的平板硫化压力成型机中,按照热压温度为 120 ℃、热压时间为 20 min、压力为 10 MPa 的条件进行热压成型、冷压定型后,脱模得到废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料。图 1 示出废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料的样品照片。

表 1 待优化的复合材料工艺参数

Tab. 1 Process parameters of composite materials to be optimized

秸秆质量分数/%	复合材料密度/(g·cm ⁻³)	复合材料厚度/cm	后置空气层厚度/cm
30	0.450	1.0	0.0
40	0.500	1.5	1.0
50	0.550	2.0	2.0
60	0.600	2.5	3.0



图 1 废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料

Fig. 1 Waste straw/polycaprolactone sound absorption composite

运用单因素法按照秸秆质量分数、复合材料密度、复合材料厚度、后置空气层厚度的顺序依次探究不同工艺参数对复合材料吸声性能的影响。其中制备不同密度的复合材料时,使用同一规格模具(使所有复合材料的体积相同),分别称取 4 个质量梯度(35、39、43、47 g)的混合物料放入模具中,得到密度为 0.450、0.500、0.550、0.600 g/cm³ 的复合材料试样;设置不同厚度的后置空气层时,将同一试样固定于吸声测试系统中,只改变阻抗管刚性后盖板到复合材料背面的距离(即后置空气层厚度),从而来探究后置空气层厚度分别为 0.0、1.0、2.0、3.0 cm 时复合材料吸声性能的变化。

1.4 吸声性能评价

本文采用传递函数法测试废弃秸秆/聚己内酯复合材料的吸声性能。按照 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》,在吸声测试系统中测试试样的吸声性能。所测频率范围为 80~6 300 Hz,测试时大气温度为 24 ℃,相对湿度为 65%,声速为 345.6 m/s,空气特征阻抗为 409.78 Pa·s/m。

1.4.1 平均吸声系数测试

平均吸声系数(α)是指材料在声波频率为 125、250、500、1 000、2 000、4 000 Hz 条件下吸声系数 α_{125} 、 α_{250} 、 α_{500} 、 $\alpha_{1\,000}$ 、 $\alpha_{2\,000}$ 、 $\alpha_{4\,000}$ 的算术平均值,用以表示材料的基本吸声性能。当 $\alpha > 0.20$ 时称该材料为吸声材料,使用吸声测试系统测试各声波频率下的吸声系数,按照下式^[12]计算平均吸声系数:

$$\alpha = \frac{\alpha_{125} + \alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1\,000} + \alpha_{2\,000} + \alpha_{4\,000}}{6}$$

1.4.2 降噪系数计算

降噪系数(NRC)是吸声材料在商业流通时的标称参数,为 250、500、1 000、2 000 Hz 频率下的吸声系数 α_{250} 、 α_{500} 、 $\alpha_{1\,000}$ 、 $\alpha_{2\,000}$ 的算术平均。降噪系数的计算值取小数点后两位,末位数取 0 或 5,计算公式^[13]为

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1\,000} + \alpha_{2\,000}}{4}$$

1.4.3 吸声性能等级评价

以降噪系数 NRC 为评价指标,参照 GB/T 16731—1997 《建筑吸声产品的吸声性能分级》对所制得样品吸声性能进行评级,如表 2 所示。

表 2 吸声性能等级

Tab. 2 Sound absorption performance grade

降噪系数 NRC	吸声性能等级
[0.8, +∞)	I
[0.6, 0.8)	II
[0.4, 0.6)	III
[0.2, 0.4)	IV

1.4.4 表面形貌观察

用胶水将样品固定于样品台上,冷却干燥后在扫描电子显微镜下,对废弃玉米秸秆和废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料表面形貌进行观察。

2 结果与讨论

2.1 秸秆颗粒的结构与性能

玉米秸秆的物理形态包括 2 个部分,即秸秆皮

和秸秆芯,二者具有不同特征。图 2 示出废弃秸秆不同部分形态结构的扫描电镜照片。

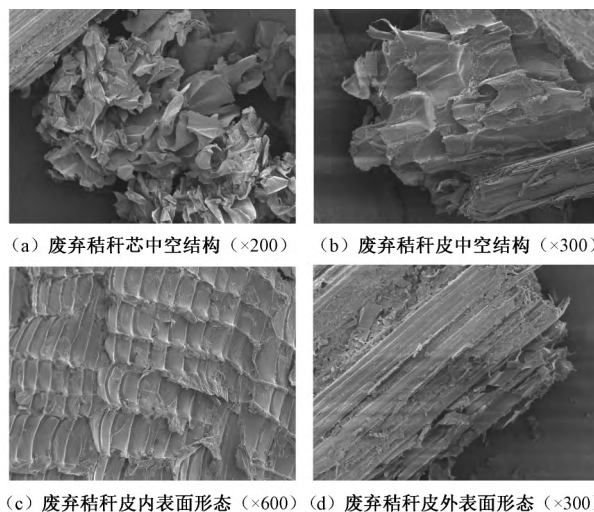


图 2 废弃玉米秸秆的形态结构 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of morphological structure of waste corn straw.

- (a) Hollow structure of abandoned corn straw core (x200);
- (b) Hollow structure of abandoned corn straw skin (x300);
- (c) Microstructure of inner surface of abandoned corn straw skin (x600);
- (d) Microstructure of outer surface of abandoned corn straw skin (x300)

由图 2(a)、(b) 可看出:废弃秸秆芯的中空结构呈现出规则连通状,声波在其内部成发散状传递;秸秆皮中空结构呈现纵向线性的中空结构,且内部存在横节,在无破损的情况下声波在其内部沿纵向传递。二者孔洞之间的生物质壁较薄,较易产生振动、压缩和膨胀,因此,废弃秸秆可以很好地将声能转化为热能和机械能,最终达到吸声降噪效果。

由图 2(c)、(d) 可知:废弃秸秆皮内表面布满横向沟槽和纵向竖纹,呈现棋盘格效果;外表面存在较为细密的纵向竖纹,比表面积较大,竖纹由中空管壁接合形成。二者均能将声波引起的振动向秸秆皮内部空腔传递,对声波产生衰减效果,因此,本文选择废弃秸秆颗粒作为增强材料,制备废弃秸秆/聚己内酯复合材料。

2.2 秸秆质量分数对复合材料吸声性能影响

当复合材料密度为 0.500 g/cm³,复合材料厚度为 1.0 cm,后置空气层厚度为 0.0 cm 时,秸秆质量分数对废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料吸声系数的影响如图 3 所示。

由图 3(a) 可知,在 1 000 Hz 以下的低频区段,秸秆质量分数对复合材料吸声系数的影响程度不大,无明显规律,而在 1 000~6 300 Hz 的中高频区段中,不同秸秆质量分数的复合材料吸声系数均远优于低频段。这是由于低频声波的波长较长,而吸

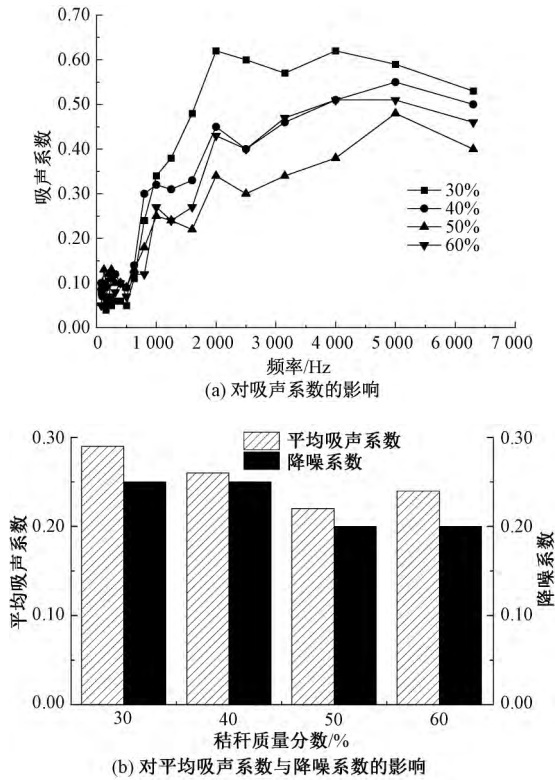


图 3 秸秆质量分数对废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料吸声性能的影响

Fig. 3 Effect of straw mass fraction on sound absorption property of waste straw/polycaprolactone sound absorption composites. (a) Influence on sound absorption coefficient; (b) Influence on average sound absorption coefficient and noise reduction coefficient

声材料或结构与低频声波之间的相互作用较弱,造成复合材料的低频吸声性能较差^[14]。

由图 3 可知,复合材料的吸声系数随着秸秆质量分数的增加先降低后升高。这是由于秸秆具有较大的中空结构,且与聚己内酯粉末存在密度差,即在相同质量下秸秆体积大于聚己内酯粉末。在复合材料的体积、密度均相同的情况下,当复合材料中秸秆的质量分数较低,原料未成型时体积较小,成型后复合材料中的秸秆没有受到过度挤压,中空结构得以保留,使复合材料中的有效孔隙率较高。当复合材料中秸秆质量分数增大时,在聚己内酯仍占据复合材料较大体积的情况下,秸秆在成型过程中受到挤压,中空结构被破坏,复合材料内部无法形成相互连通的孔隙,有效孔隙率降低,使复合材料的吸声系数明显下降。复合材料中秸秆质量分数继续增大,复合材料的主体会转为秸秆,体积密度较大的聚己内酯融化后作为基体,此时秸秆的有效孔隙率回升,因此,复合材料的吸声系数升高,吸声性能变好,但秸秆含量过高也会使复合材料成型效果变差。综合考虑,秸秆质量分数选取 30% 为宜。

2.3 复合材料密度对复合材料吸声性能影响

当秸秆质量分数为 30%,材料厚度为 1.0 cm,后置空气层厚度为 0.0 cm 时,复合材料密度对废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料吸声性能的影响如图 4 所示。

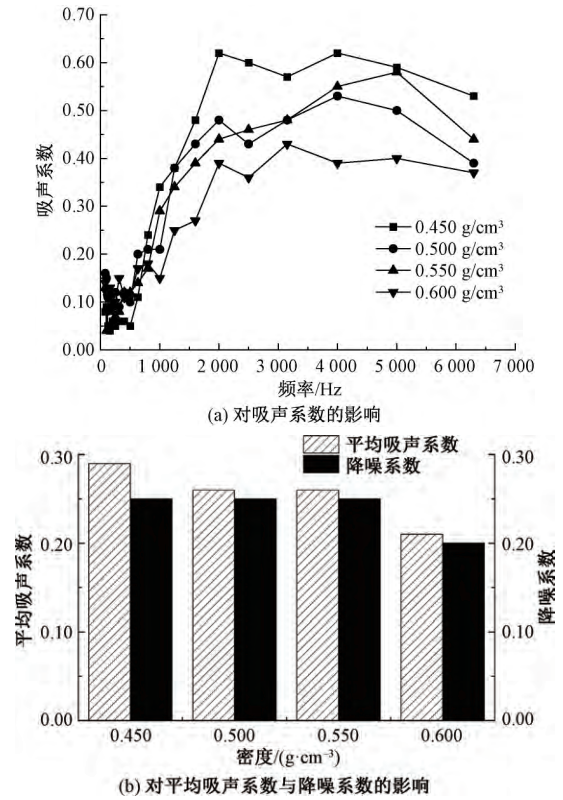


图 4 复合材料密度对废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料吸声性能的影响

Fig. 4 Effect of composite density on sound absorption property of waste straw/polycaprolactone sound absorption composites. (a) Influence on sound absorption coefficient; (b) Influence on average sound absorption coefficient and noise reduction coefficient

由图 4 可知,当复合材料密度增加时,其吸声系数整体变低,吸声性能变差,主要原因是密度影响了复合材料的有效孔隙率和孔隙连通率。

介质的特性阻抗是固有常数,其值影响着声音的传播,在声学中具有特殊的地位,计算公式^[15]为

$$Z = \rho c$$

式中: Z 为介质的特性阻抗, $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$; ρ 为材料某一点的密度, kg/m^3 ; c 为声速, m/s 。

根据特性阻抗公式可知,特性阻抗的值会随着复合材料密度的增加而增大;而当复合材料的密度增加时,复合材料中秸秆颗粒的接触面积和接合紧密程度也会在热压过程中不断提升^[16],使复合材料内部变得更加紧实,空隙中的空气流阻变大。这二者的增大,使复合材料内部空气与纤维间的摩擦及其各自的振动均减弱,从而减弱了复合材料对声能

的消耗,造成其吸声性能降低;同时复合材料密度增大说明其单位体积内的秸秆和聚己内酯的含量增加,二者容易过度接合,使复合材料的表面孔隙通道减少,阻止声波进入复合材料内部传播,反射声波增多,透射声波减小,造成复合材料的吸声性能变差。综合考虑,复合材料密度定为 0.450 g/cm^3 。

2.4 复合材料厚度对吸声性能影响

当秸秆质量分数为 30%,密度为 0.450 g/cm^3 ,后置空气层厚度为 0.0 cm 时,复合材料厚度对废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料吸声系数的影响如图 5 所示。

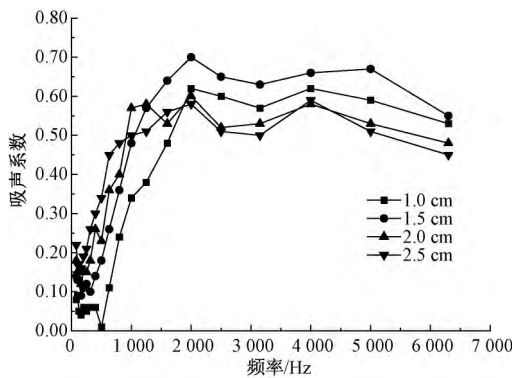


图 5 复合材料厚度对吸声复合材料吸声系数的影响

Fig. 5 Effect of composite thickness on sound absorption coefficient of sound absorption composites

由图 5 可知,复合材料厚度对其吸声性能的影响主要集中在中低频段,其中在 2000 Hz 以下的低频段上,随着复合材料厚度的增加,其吸声性能明显提升,但对复合材料的高频吸声效果影响不大。这是由于高频声波的波长较短,在复合材料内部传播时会加剧复合材料中空气的振动,增大声波与纤维之间的摩擦,使更多的声能被转化成热能而耗散;而低频声波的波长较长,更易穿透复合材料,声损耗小,增加复合材料的厚度则相当于增大复合材料的弹性,使复合材料的声容增大,声波在复合材料中传播距离变长,摩擦损耗增加,因此,复合材料的吸声性能提高较明显^[17]。声波垂直于复合材料的吸声界面入射时,其吸声系数的计算公式^[18]为

$$\alpha = \frac{4A\gamma}{(1 + A\gamma)^2 + B^2\gamma^2}$$

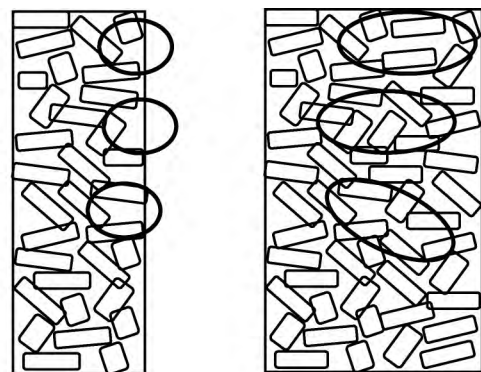
$$A = \frac{\sinh 2\alpha_0 l}{\cosh 2\alpha_0 l - \cos 2kl}$$

$$B = \frac{-\sinh 2kl}{\cosh 2\alpha_0 l - \cos 2kl}$$

式中: γ 为材料与介质的特性阻抗比; α_0 为吸收系数 $L/(g \cdot \text{cm})$; k 为波数 cm^{-1} ; l 为材料厚度 cm 。

由吸声系数计算公式可知,当复合材料的厚度

$l = \lambda/4$ (λ 为材料的波长) 时,复合材料的吸声系数会出现一个极大值,此时的吸声效果最好。与图 5 所示的吸声规律相符,即随着复合材料厚度的增加,其吸声系数曲线先上升后下降。这是由于在一定范围内,当复合材料厚度增加时,复合材料内部的孔隙通道变得 longer,声波的传播途径变长,声能消耗的这个动程增加,声能损耗累积更多;同时孔隙通道变长,声波与孔壁的碰撞时间和次数会有较大的增加,动能损耗明显增加,复合材料吸声性能得到提升,如图 6 孔隙变化示意图所示。当复合材料厚度过大时,会降低其内部的空气流阻,影响空气在复合材料内部的流动,同时复合材料过厚还会导致其内部的孔隙通道密闭,降低有效孔隙率,影响复合材料的吸声性能^[19]。



(a) 截面厚度改变前 (b) 截面厚度改变后

图 6 复合材料截面厚度改变前后的孔隙变化示意图

Fig. 6 Pore variation of composite before (a) and after (b) cross-section pores thickness change

图 7 示出平均吸声系数和降噪系数随复合材料厚度的变化趋势。可知, 1.5 、 2.0 、 2.5 cm 厚度的复合材料的平均吸声系数和降噪系数明显优于 1.0 cm 厚度的复合材料,且三者相差较小。综合考虑,吸声复合材料的厚度优选 1.5 cm 。

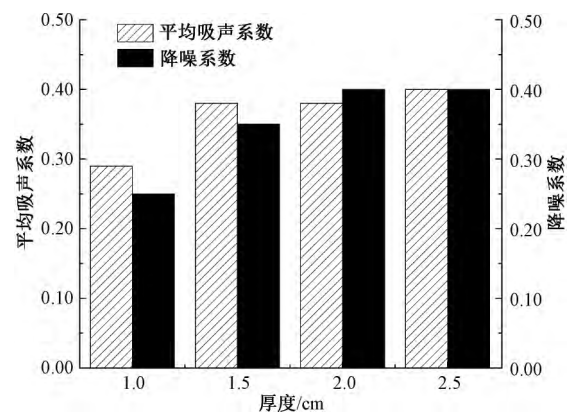


图 7 复合材料厚度对平均吸声系数与降噪系数的影响

Fig. 7 Effect of composite thickness on average sound absorption coefficient and noise reduction coefficient

2.5 后置空气层厚度对复合材料吸声性能影响

后置空气层即指吸声复合材料与刚性壁之间的空气层,通过调整后置空气层厚度,能够使声波穿过复合材料后的反射距离变长,反射面积增大,有利于声波能量的衰减。当秸秆质量分数为 30%,复合材料密度为 0.450 g/cm^3 ,复合材料厚度为 1.5 cm 时,后置空气层厚度对废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料吸声系数的影响如图 8 所示。

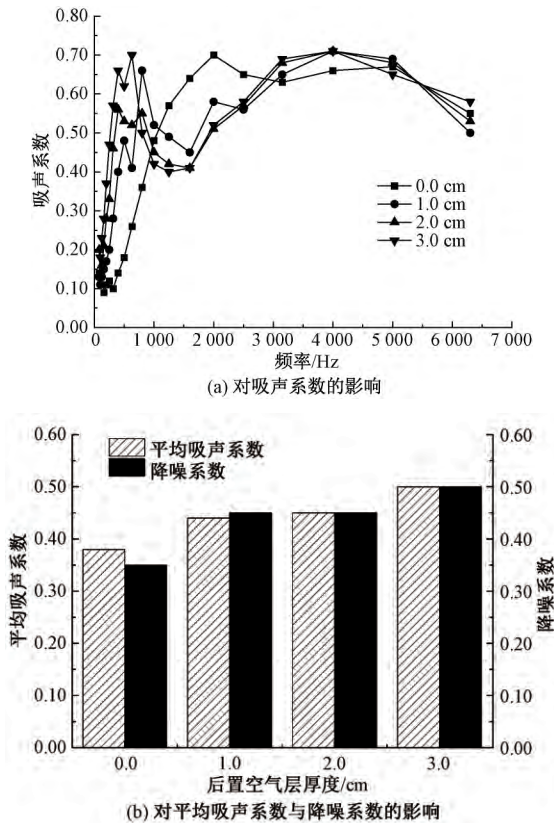


图 8 后置空气层厚度对废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料吸声性能的影响

Fig. 8 Effect of air layer thickness on sound absorption property of waste straw/polycaprolactone sound absorption composite. (a) Influence on sound absorption coefficient; (b) Influence on average sound absorption coefficient and noise reduction coefficient

由图 8(a) 可知,后置空气层厚度对复合材料吸声性能的影响规律与复合材料厚度对其吸声性能的影响规律相似,对复合材料的低频吸声性能来说影响规律较为明显。随着后置空气层厚度的递增,复合材料在低频区段吸声系数的峰值依次向左移动一定频段;不同后置空气层厚度对复合材料在高频区段吸声性能的影响较弱,其吸声曲线基本重合;中频区段在加入后置空气层后复合材料的吸声性能则明显变差。造成这种情况的主要原因是后置空气层的存在相当于增加了复合材料的厚度,使得传播距离更长的低频声波在复合材料内壁有充足的空间反复

折射、反射,从而使复合材料正反两面充分吸收低频声波能量,将更多的声波转化成热能消散,使复合材料的吸声性能得到改善;对于高频声波由于其在复合材料内部的传播距离不足,后置空气层的存在并不能产生较大的影响;而中频声波的能量与传播距离均处于中间位置,由于复合材料/后置空气层界面的声阻抗差异大于复合材料/刚性壁界面的声阻抗差异,使中频声波更多的以反射声波的形式回到声源桶而非继续向复合材料内部透射,从而造成了加入后置空气层的复合材料的吸声性能在中频区段明显下降。

由图 8(b) 可知,后置空气层的增加有利于复合材料平均吸声系数和降噪系数的提升,这与复合材料吸声曲线的规律相吻合,因此选择后置空气层厚度为 3.0 cm 作为最佳因素。

综上所述,经单因素分析得到废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料的最优制备工艺参数为:秸秆质量分数 30%,复合材料密度 0.450 g/cm^3 ,复合材料厚度 1.5 cm ,后置空气层厚度 3.0 cm 。

2.6 最优工艺样品的吸声性能分析

按照最优工艺参数制备了废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料,其吸声系数曲线如图 9 所示。可知:废弃秸秆/聚己内酯复合材料的吸声系数 α 达到了 0.50,说明该复合材料属于吸声材料;根据 1.4.2 中计算出降噪系数达到了 0.50,该复合材料的吸声性能等级为 III 级。

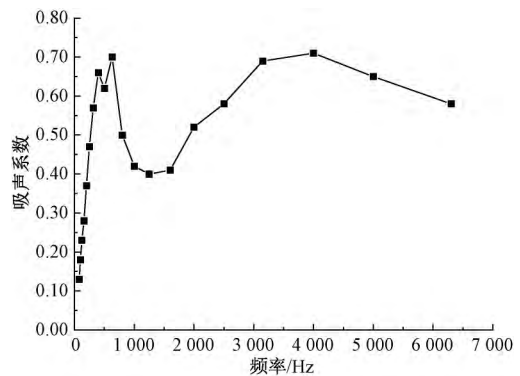


图 9 废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料的吸声系数曲线

Fig. 9 Sound absorption coefficient curve of waste straw/polycaprolactone sound absorption composite

由最优工艺参数下吸声复合材料的吸声系数曲线可知,复合材料的低频吸声性能优化程度显著,这是由复合材料本身厚度和后置空气层厚度的增加决定的。低频声波在复合材料内部传播距离变长,较大的厚度在其传播路径上提供了有效的介质,后置空气层也为声波在刚性壁和复合材料之间的反复折射、反射创造了条件。复合材料优良的高频吸声性

能则是由其本身的厚度和增强体质量分数决定的,而这两者又决定了复合材料的有效孔隙率和孔隙连通率,复合材料的孔隙率及连通率高,使得高频声波能够充分引起分子振动和能量转换。在以后的研究中优化复合材料的中频性能可以利用的方式有:对复合材料进行穿孔,设置密度梯度等。这些方式能够进一步改善复合材料的物理结构,最终达到最佳吸声性能。

3 吸声机制分析

废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料的扫描电镜照片如图 10 所示。

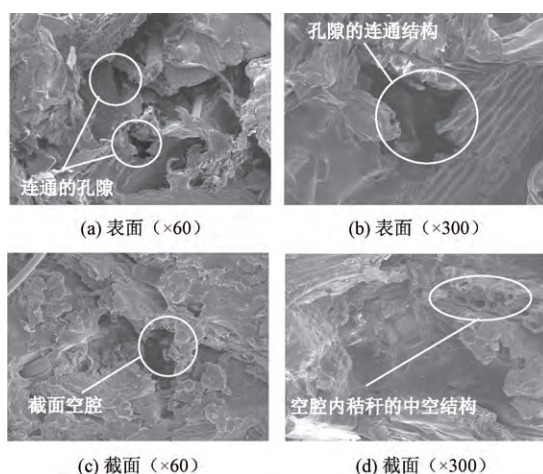


图 10 废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料的扫描电镜照片

Fig. 10 SEM images of waste straw/polycaprolactone sound absorption composite. (a) Surface ($\times 60$); (b) Surface ($\times 300$); (c) Cross section ($\times 60$); (d) Cross section ($\times 300$)

从图 10(a) 较小放大倍数电镜照片可观察到复合材料表面存在较多连通的孔隙;而由图 10(b) 可看出,复合材料内部的孔隙呈现出连通结构,且在材料内部形成一定程度的空腔。由图 10(c)、(d) 和复合材料截面照片可看到,由于样品切割,材料截面上的聚己内酯产生剪切形变但仍然保留空腔,空腔内壁由于秸秆的中空结构能够与其他空隙相连。图 10 表明,在复合材料内部及表面均存在大量分散的孔隙,且各孔隙间可形成连通结构,有效提升了孔隙连通率。当声波垂直入射至废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料的表面时,一部分声波与复合材料外表面接触后被反射出去,而剩下的声波则沿着复合材料表面的孔隙透射进入其内部继续传播。在声波传播过程中,会与复合材料产生接触,此时秸秆皮的特殊结构能将声波引起的振动向秸秆皮内部空腔传递,空腔中的空气和材料各自产生振动,同时二者间

还会产生摩擦;而由于空气与复合材料之间存在摩擦力、黏滞阻力,使得孔隙中的空气受到声波影响后进行压缩,造成了复合材料温度的升高,即复合材料将一部分入射声波的能量转化成热能而消耗,从而减弱透射的声波的能量,使声波总能量降低,达到吸声的目的。

基于废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料的扫描电镜照片,以及不同工艺参数下复合材料的吸声特性分析可知,该吸声复合材料的吸声机制主要为多孔吸声机制。

4 结 论

以废弃农作物玉米秸秆和聚己内酯为原料,通过热压法制备得到的废弃秸秆/聚己内酯吸声复合材料在低、高频均具有良好的吸声性能,且吸声频带宽。研究表明:复合材料的最大吸声系数可达到 0.71,平均吸声系数和降噪系数均可达到 0.50,吸声性能等级达到 III 级。随着秸秆质量分数的增加,复合材料的吸声系数在频率范围 1 000~6 300 Hz 内先降低后升高,但在 1 000 Hz 以下的低频区段吸声系数没有明显改变。适当降低复合材料的密度,可提高其整体的吸声性能;随着复合材料厚度的增加,吸声系数先上升后下降;后置空气层厚度的增加使复合材料平均吸声系数和降噪系数均有所提升,且相对于增加复合材料的厚度,增加后置空气层的厚度来改善复合材料的吸声性能更符合实际生产的需要。最终确定的复合材料最佳吸声工艺参数为:秸秆质量分数 30%,复合材料密度 0.450 g/cm^3 ,复合材料厚度 1.5 cm,后置空气层厚度 3.0 cm。复合材料的吸声频带为 100~6 300 Hz,其吸声机制符合多孔材料的吸声原理。

FZXB

参考文献:

- [1] 孙雪,龚宏健. 噪声污染监测现状及对策探讨[J]. 资源节约与环保, 2021(7): 57-58.
SUN Xue, GONG Hongjian. Current situation and countermeasures of noise pollution monitoring [J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2021(7): 57-58.
- [2] 霍丽丽,赵立欣,姚宗路,等. 中国玉米秸秆草谷比及其资源时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 227-234.
HUO Lili, ZHAO Lixin, YAO Zonglu, et al. Difference of the ratio of maize stovers to grain and spatiotemporal variation characteristics of maize stovers in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(21): 227-234.
- [3] 王立新. 玉米秸秆综合利用现状和发展前景[J]. 农业开发与装备, 2021(1): 66-67.

- WANG Lixin. Present situation and development prospect of comprehensive utilization of corn straw [J]. Agricultural Development and Equipment, 2021 (1): 66-67.
- [4] 吴瑕,徐伯翰,王景立. 玉米秸秆收获技术与装备发展现状分析[J]. 农业与技术, 2018, 38(21): 72-74.
WU Xia, XU Bohan, WANG Jingli. Analysis of maize straw harvesting technology and equipment development status [J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(21): 72-74.
- [5] 李涛,卓海峰,王文富,等. 探讨秸秆焚烧的危害与秸秆的综合利用[J]. 科技信息(科学教研), 2008(20): 35-37.
LI Tao, ZHUO Haifeng, WANG Wenfu, et al. Discussion on the harm of straw burning and comprehensive utilization of straw [J]. Science and Technology Information (Science Teaching and Research), 2008(20): 35-37.
- [6] 杨军,余木火,陈惠芳. 秸秆纤维复合材料的发展概况[J]. 材料导报, 1999(6): 50-51, 18.
YANG Jun, YU Muhuo, CHEN Huifang. The development of straw fiber composite materials [J]. Materials Reports, 1999(6): 50-51, 18.
- [7] 肖力光,赵露,陈景义. 利用秸秆制造新型复合节能墙体材料的可行性研究[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2004(2): 1-6, 13.
XIAO Liguang, ZHAO Lu, CHEN Jingyi. Feasibility study on making new composite energy saving wall material with straw [J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 2004(2): 1-6, 13.
- [8] 华亮,黄银娣. 汽车用新型吸声材料: 稻草秸秆板吸声性能的测定[J]. 生物质化学工程, 2007(6): 29-31.
HUA Liang, HUANG Yindi. Determination of sound absorption performance of straw straw board as a new sound absorption material for automobile [J]. Biomass Chemical Engineering, 2007(6): 29-31.
- [9] 李长伟,吕丽华. 废弃羊毛吸声复合材料的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2018, 39(10): 74-80.
LI Changwei, LÜ Lihua. Preparation and properties of sound absorption composites based on waste wool [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(10): 74-80.
- [10] LYU L H, LIU Y J, BI J H, et al. Sound absorption properties of DFs/EVA composites [J]. Polymers (Basel), 2019, 11(5): 811-827.
- [11] LIU Y J, LYU L H, XIONG X Q, et al. Structural characteristics and sound absorption properties of poplar seed fibers [J]. Textile Research Journal, 2020, 90(21/22): 2467-2477.
- [12] 苗中在. 吸声材料在高速公路声屏障中的应用[J]. 中国公路, 2018(9): 86-87.
MIAO Zhongzai. Application of sound absorbing material in sound barrier of highway [J]. China Road, 2018(9): 2467-2477.
- [13] MANISH R, SHAHAB F, NARESH T. A study of areca nut leaf sheath fibers as a green sound-absorbing material [J]. Applied Acoustics, 2020, 169: 107490-107503.
- [14] 敖庆波,王建忠,李焯,等. 低频吸声材料的研究进展[J]. 功能材料, 2020, 51(12): 12045-12050.
AO Qingbo, WANG Jianzhong, LI Ye, et al. Research progress of low frequency sound absorption materials [J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(12): 12045-12050.
- [15] XIE S, YANG S, YANG C, et al. Sound absorption performance of a filled honeycomb composite structure [J]. Applied Acoustics, 2020, 162: 107202-107210.
- [16] 李伟,赵芙蓉. 常用室内吸声材料吸声性能实验研究[J]. 城市住宅, 2019, 26(12): 117-120.
LI Wei, ZHAO Furong. Experimental study on sound absorption properties of several commonly used sound-absorbing materials [J]. Town House, 2019, 26(12): 117-120.
- [17] 彭敏,赵晓明. 纤维类吸声材料的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3669-3677.
PENG Min, ZHAO Xiaoming. Advances in the fiber-based sound-absorbing materials [J]. Materials Reports, 2019, 33(21): 3669-3677.
- [18] 何琳,朱海潮,邱小军,等. 声学理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 79-104.
HE Lin, ZHU Haichao, QIU Xiaojun, et al. Acoustic theory and engineering applications [M]. Beijing: Science Press, 2006: 79-104.
- [19] 吕丽华,田媛媛,李洪伟. 废弃苕麻纤维吸声复合材料的制备及其性能分析[J]. 毛纺科技, 2020, 48(4): 7-11.
LÜ Lihua, TIAN Yuanyuan, LI Hongwei. Fabrication and properties of sound-absorbing composites based on waste ramie fibers [J]. Wool Textile Journal, 2020, 48(4): 7-11.