

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.021

剑麻/碳纤维协同增强环氧树脂复合材料的力学与声学性能

田峰林^{1,2}, 张靠民^{1,2}, 夏海廷^{1,2}, 黄江³, 陈霄¹, 李金成⁴(1.昆明理工大学民航与航空学院,昆明 650500; 2.云南省低空经济和无人机技术创新中心,昆明 650500;
3.广西剑麻集团山圩剑麻制品有限公司,广西崇左 532200; 4.信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司,石家庄 050000)

摘要: 剑麻纤维具有天然的中空结构,同其他植物纤维相比,剑麻纤维兼具良好的力学和吸音性能,是设计力学-吸音结构功能复合材料良好的增强相。采用不同形态的剑麻纤维和碳纤维作为增强相,采用真空辅助树脂灌注成型工艺制备剑麻纤维和碳纤维混杂增强的环氧树脂夹芯结构复合材料,其中剑麻纤维层为芯层,碳纤维层为壳层,以期开发兼具力学和吸音性能的轻质高强功能性复合材料。研究表明,当使用连续剑麻纤维做芯层时,复合材料的力学性能表现最佳,弯曲强度为387.92 MPa;其次是使用短剑麻纤维做芯层时,弯曲强度为364.79 MPa,比使用连续剑麻纤维做芯层时复合材料弯曲性能下降了5.96%。但使用连续剑麻纤维作为芯层时复合材料吸音性能最低,在频率为1 600 Hz时吸音系数仅有0.03,相比于使用连续剑麻纤维作为芯层时复合材料吸音性能,使用短剑麻纤维作为芯层时复合材料在频率为1 600 Hz时吸音性能提升了78.57%,吸音系数达到0.14。所以当使用短剑麻纤维作为芯层的复合材料可在力学性能之间取得平衡,这使得它在保持有效吸音的同时实现轻量化结构。

关键词: 剑麻纤维;吸音性能;复合材料;吸音系数;夹芯结构

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0164-08

Mechanical and acoustic properties of sisal/carbon fiber synergy reinforced epoxy resin composites

TIAN Fenglin^{1,2}, ZHANG Kaomin^{1,2}, XIA Haiting^{1,2}, HUANG Jiang³, CHEN Xiao¹, LI Jincheng⁴(1. School of Civil Aviation and Aeronautics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Yunnan Low-Altitude Economy and Drone Technology Innovation Center, Kunming 650500, China;
3. Guangxi Sisal Group Shanxu Sisal Products Co., Ltd., Chongzuo 532200, China; 4. Information Industry Electronic Eleventh Design Research Institute Technology and Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract : Sisal fiber have a natural hollow structure. Compared with other plant fibers, sisal fiber has excellent mechanical and sound absorption property, making them as an important reinforcement materials for designing structural functional composites with integrated mechanical and acoustic performance. Different forms of sisal and carbon fiber as reinforcement materials were used, and a vacuum-assisted resin infusion molding process was employed to fabricate epoxy resin-based sandwich composites reinforced with sisal and carbon fiber. In this structure, using sisal fiber layer as the core, the carbon fiber layer as the shell, a lightweight, high-strength functional composite with mechanical and sound absorption property was developed. Research shows that when continuous sisal fiber is used as the core layer, the composite material exhibits the best mechanical performance, with a flexural strength of 387.92 MPa. The next best performance is achieved when short sisal fiber is used as the core layer, with a flexural strength of 364.79 MPa, which represents a 5.96% decrease in flexural performance compared to the composite with continuous sisal fiber as the core. However, when continuous sisal fiber is used as the core layer, the composite material has the lowest sound absorption performance, with a sound absorption coefficient of only 0.03 at a frequency of 1 600 Hz. In contrast, when short sisal fiber is used as the core layer, the composite material shows a 78.57% improvement in sound absorption performance at 1 600 Hz, with a sound absorption coefficient of 0.14. Therefore, composites with short sisal fiber as the core layer achieve a balance between mechanical and acoustic performance, allowing for a lightweight structure while maintaining effective sound absorption.

Keywords : sisal fiber ; sound absorption ; composite ; sound absorption coefficient ; sandwich structure

基金项目: 云南省重大科技专项(202402AG050005), 云南省低空经济和无人机技术创新中心项目(202505AK340006)

通信作者: 张靠民, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为纤维增强树脂基复合材料结构设计与性能分析

收稿日期: 2025-07-28

引用格式: 田峰林, 张靠民, 夏海廷, 等. 剑麻/碳纤维协同增强环氧树脂复合材料的力学与声学性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 164-171.

TIAN Fenglin, ZHANG Kaomin, XIA Haiting, et al. Mechanical and acoustic properties of sisal/carbon fiber synergy reinforced epoxy resin composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 164-171.

相比于其他植物纤维,剑麻纤维具有较高的力学性能、良好的吸音性能和绿色生态特性而成为重要的复合材料增强相,成为近年来研究关注的重点^[1]。剑麻纤维增强复合材料被广泛用于航空航天和交通运输等领域^[2]。目前对剑麻纤维增强复合材料的研究主要集中在纤维与基体的界面结合、力学性能、服役性能等方面^[3-4],而对于同时兼顾力学和声学性能的研究较少。

碳纤维具有优异的高强高模性能,碳纤维增强复合材料具有优异的力学性能。但碳纤维结构致密、孔隙率低,隔音性能较差^[5-6]。与之相比,剑麻纤维的力学性能相对较弱,且吸水性较强,导致纤维和树脂界面性能差^[7-8],但剑麻纤维的多孔疏松结构,使其具有良好的吸音性能^[9]。将碳纤维和剑麻纤维混合使用,碳纤维提供优异的力学性能,剑麻纤维在提供增强吸能作用的同时,还能赋予复合材料良好的吸音性能,有望得到力学性能和吸音性能兼具的结构功能一体化复合材料。

Tesfay等^[10]采用剑麻纤维、碳纤维以不同铺层顺序、取向和体积分数进行混杂,制备纤维增强聚酯复合材料。研究发现与纯剑麻纤维制备的复合材料相比,当复合材料中加入体积分数为8%的碳纤维时其拉伸强度提高了130%。Liu等^[11]将碳纤维织物和苧麻纤维织物进行混杂铺层,研究碳纤维分别作为壳层和芯层对混杂增强复合材料力学性能的影响。结果表明,碳纤维作为壳层的混杂增强复合材料的力学性能稍高于其作为芯层的复合材料,但无论何种混杂铺层结构,其性能均高于苧麻纤维增强复合材料,且与碳纤维增强复合材料性能接近。

Dhandapani等^[12]研究剑麻纤维和棕榈纤维增强复合材料的吸音性能,发现植物纤维的加入使复合材料的吸音性能有显著提高。Silva等^[13]评估剑麻、椰子壳、甘蔗纤维三种天然纤维的低频吸音系数,与剑麻和椰壳纤维相比,甘蔗纤维虽然具有较好的吸声系数,但其力学性能较差。Prabhu等^[14]研究剑麻等纤维增强复合材料的吸音性能,并分析这些材料作为环保替代品的潜力。

本课题组的研究^[15]表明,成型压力对剑麻纤维和碳纤维混杂增强复合材料的力声性能有重要影响,在前期研究基础上,笔者以不同形态的剑麻和

碳纤维作为增强相,采用-0.045 MPa的真空压力辅助树脂灌注成型工艺,制备剑麻/碳纤维增强环氧树脂夹芯结构复合材料,以期开发兼具力学和吸音性能的轻质高强复合材料,为低空飞行器机身和机翼制备提供新材料和工艺途径。

1 实验部分

1.1 主要原材料

剑麻纤维丝束和剑麻纤维丝束梳理过程中产生的边角废料:密度为1.26 g/cm³,广西剑麻集团山圩剑麻制品有限公司;

E51 环氧树脂:环氧当量为184.00 g/mol,25 °C时黏度为13 000 mPa·s,南通星辰合成材料有限公司;

三乙烯四胺:国药化学试剂有限公司;

T700 单向布:面密度200 g/m²,丝束规格12 k,拉伸强度4 900 MPa,拉伸弹性模量230 GPa,江苏天鸟高新技术股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

电子万能力学试验机:CMT1104,量程10 kN,深圳万测试验设备有限公司;

数显简支梁冲击试验机:QJBCJ,冲击能量7.5 J,上海倾技仪器仪表科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Sigma300,德国Carl Zeiss AG公司;

传递函数吸声系数测试系统:Type4206,丹麦Brüel& Kjaer公司。

1.3 试样制备

碳纤维单向织物(尺寸200 mm×200 mm),质量8.33 g,用C表示。三种不同形态剑麻纤维:连续剑麻纤维丝束,平均长度(200±0.1) mm,用符号S1表示;短剑麻纤维丝束,平均长度(50±0.1) mm,用S2表示;剑麻纤维废料,平均长度(15±3) mm,用S3表示。图1为成型工艺和复合材料整体结构示意图。

共设计六种不同铺层结构的复合材料,每种铺层结构由五层不同的碳纤维和剑麻纤维构成,具体铺层方式见表1。连续剑麻纤维在铺层时纤维束会产生不同的曲屈现象,故将连续剑麻纤维短切为(50±0.1) mm的短剑麻纤维,以减少剑麻纤维的曲屈现象。复合材料铺层结构中剑麻纤维丝束取向方向和碳纤维单向织物相同,均为单轴取向;剑麻纤维废料为随机取向。具体铺层形式见图2。

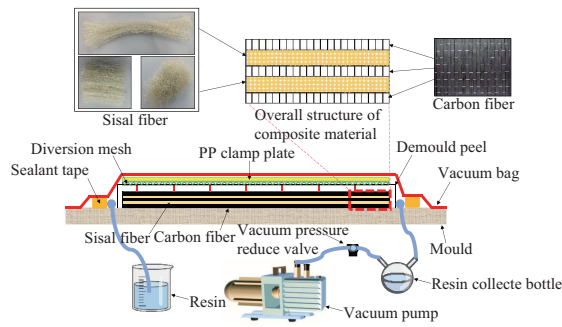


图1 成型工艺和复合材料整体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of forming process and overall structure of composite materials

表1 复合材料铺层方式和材料组成

Tab. 1 Composite material layup sequence and composition

Samples	Layup sequence	Composition of composite materials
CS1CS1C	C-S1-C-S1-C	A total of 25 g of carbon fibers and 20 g of sisal fibers were used, along with 96 g of polymerization epoxy resin.
CS2CS2C	C-S2-C-S2-C	
CS3CS2C	C-S3-C-S2-C	
CS3CS1C	C-S3-C-S1-C	
CS2CS1C	C-S2-C-S1-C	
CS3CS3C	C-S3-C-S3-C	

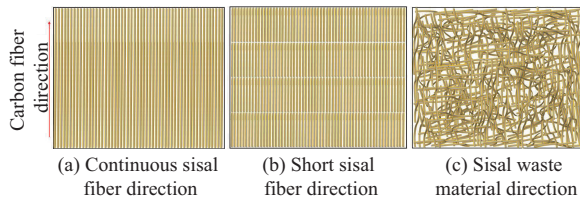


图2 剑麻纤维取向

Fig. 2 Sisal fibers direction

在模具上涂抹脱模剂,按照表1的铺层结构依次铺放碳纤维单向织物、剑麻纤维、碳纤维单向织物、剑麻纤维、碳纤维单向织物,其中剑麻纤维层为芯层,碳纤维层为壳层,每层剑麻纤维的质量为10 g,每层碳纤维质量为8.33 g。然后依次铺放脱模布、导流网、真空袋等辅助材料,在铺层结构末端放置吸胶棉,最后进行真空封装并进行密封性测试。成型时采用真空减压阀控制成型过程中的真空压力。在-0.045 MPa的真空压力下,将树脂均匀注入层压板中并保持-0.045 MPa的真空压力,然后在烘箱中进行固化。固化后,复合材料平均厚度为3.46 mm,层合板中纤维质量分数为32%。

1.4 测试与表征

1.4.1 弯曲试验

采用电子万能力学试验机,弯曲试验按照 ASTM D790-2010 进行测试。样品尺寸为60 mm×13 mm,位移加载速率为2.00 mm/min。加载鼻和支架半径为6 mm,跨度为51.2 mm。

1.4.2 冲击试验

数显简支梁冲击试验机,冲击试验按照 ASTM D256-2010 进行测试。样品尺寸为80 mm×10 mm,跨度为62 mm,摆锤冲击能力为7.5 J。

1.4.3 吸音试验

吸音试验按照 ASTM E2611-2017 进行测试。样品尺寸为直径99.5 mm的圆形,在温度为25℃,湿度为50%的环境下,使用4206阻抗管进行测量。采用吸音系数、平均吸音系数和总声能三者综合表征复合材料的吸音性能。

1.4.4 形态表征

用SEM观察复合材料的微观结构和纤维层间形貌。

2 结果与讨论

2.1 弯曲性能

图3为复合材料的弯曲强度及其模量。从图3可以得出CS1CS1C复合材料表现出最高的强度和模量,弯曲强度为387.92 MPa,弯曲模量为20.16 GPa。CS2CS2C复合材料的弯曲强度和模量仅次于CS1CS1C复合材料,为364.79 MPa和18.35 GPa。表明CS1CS1C复合材料在断裂前能承受较大的应力-应变,具有更好的抗变形能力。而CS2CS1C复合材料表现出最差的强度和模量,相较于CS1CS1C复合材料,其强度和模量分别下降41.07%和70.19%。

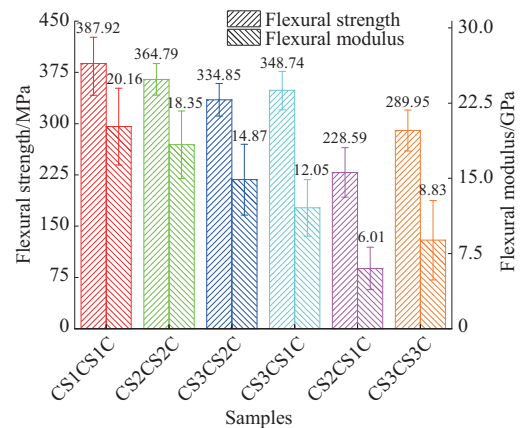


图3 复合材料的弯曲强度和弯曲模量

Fig. 3 Flexural strength and modulus of composite

CS1CS1C, CS2CS2C, CS3CS3C 复合材料仅采用三种形态剑麻纤维的一种作为芯层,随着芯层剑麻纤维长度的变短,复合材料的弯曲性能也随之下降。CS2CS2C复合材料的强度仅比CS1CS1C复合材料下降5.96%,降低23.13 MPa,而弯曲模量较

CS1CS1C 仅下降 8.98%,降低 1.81 GPa,CS3CS3C 复合材料的弯曲强度相较于 CS1CS1C 与 CS2CS2C 复合材料分别下降了 25.26% 和 20.52%。另外三组复合材料 CS3CS2C,CS3CS1C,CS2CS1C 采用的是将三种不同形态的剑麻纤维两两混合制备的芯层,未发现明显规律。

弯曲应力-应变曲线如图 4 所示。从图中可以看出加载初期应力-应变曲线斜率较大,这可能是由于复合材料的高模量壳层承受大部分应力,而芯层只承受相对较少的应力^[16]。复合材料的高刚度和高强度主要体现在初始弹性模量和屈服强度,这得益于壳层的高模量和高强度。

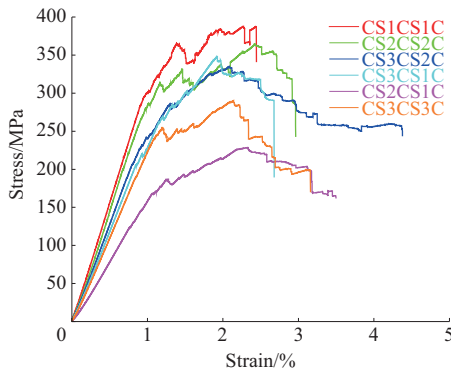


图 4 复合材料的弯曲应力-应变曲线

Fig. 4 Flexural stress-strain curve of composite

图 5a 和图 5b 为 CS1CS1C 复合材料的弯曲测试的断裂面微观图,从图 5a 可以看出,壳层中的碳纤维和树脂结合良好。从图 5b 可以看出,断裂面没有明显的层间分离现象,使用连续剑麻纤维作为芯层时

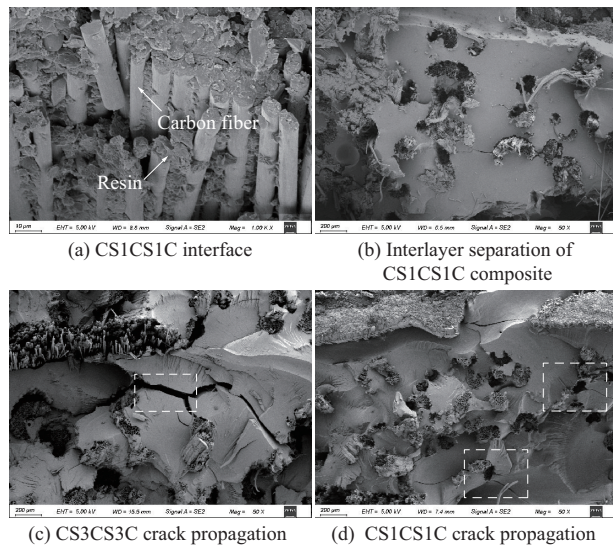


图 5 复合材料弯曲断裂截面的微观形貌

Fig. 5 Microscopic morphology of fracture section of composite under flexural deformation

可有效增强复合材料的韧性。

图 5c 和图 5d 分别为 CS3CS3C 和 CS1CS1C 复合材料的断裂面微观图,图 5c 可以看出裂纹扩展明显。图 5d 可以看出裂纹扩展小,这是由于采用连续剑麻纤维作为芯层时,连续剑麻纤维通过塑性变形吸收载荷,纤维的变形也可以有效地传递载荷,减少应力集中,延缓裂纹扩展,增强复合材料的塑性变形能力,从而提高材料屈服后的延展性^[17-18]。这使得复合材料不仅具有较高的弯曲强度和模量,同时还保持良好的韧性和延展性,表现出更好的弯曲性能^[19]。

2.2 冲击性能

不同复合材料的冲击强度测试结果如图 6 所示。在六种复合材料中,CS1CS1C 复合材料的冲击强度最高,为 94.65 kJ/m²,误差为 20.4%。误差大的原因可能是较长的剑麻纤维因张力不均出现局部缠绕团聚,从而导致纤维取向度偏差较大,材料内部结构均匀性下降,使得冲击测试时应力传递效率在不同试样中差异较大;最终导致测试数据离散度大,误差棒显著大于其他样品。CS2CS2C 复合材料的冲击强度比 CS1CS1C 低 25.31%,降低 23.96 kJ/m²;CS2CS1C 复合材料的冲击强度表现最差,相比于 CS1CS1C 复合材料降低 65.56%。

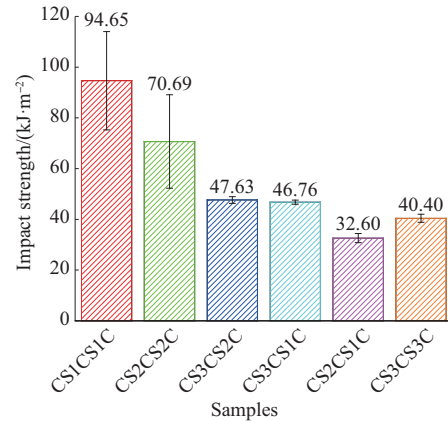


图 6 复合材料的冲击强度

Fig. 6 Impact strength of composite

图 7 为复合材料的冲击测试的断裂面微观图,图 7d 可以看出,CS2CS1C 复合材料断裂面发现大量基体裂纹和纤维拔出遗留的孔洞,表明纤维和环氧树脂之间界面黏结强度较低,导致纤维断裂和拔出,纤维的增强作用不能充分发挥^[20]。由图 7a 可以看出,CS2CS2C 复合材料断裂面有基体裂纹和纤维拔出遗留的孔洞,相较于 CS2CS1C 复合材料的缺陷

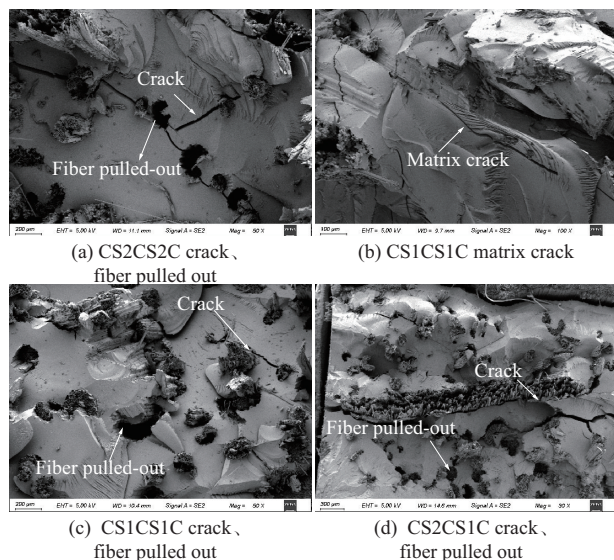


图7 复合材料冲击断裂截面的微观形貌

Fig. 7 Microscopic morphology of fracture section of composite under impact deformation

少;相较于CS1CS1C复合材料的裂纹扩展大。这也反映了CS2CS2C复合材料的冲击性能仅次于CS1CS1C复合材料。

图7c可以看出,CS1CS1C复合材料在冲击载荷下,基体表面裂纹少,纤维拔出遗留的孔洞少。CS1CS1C复合材料采用连续剑麻纤维作为芯层有助于提高材料在冲击载荷下的抗裂纹扩展能力,减缓材料的裂纹扩展速率^[10]。连续剑麻纤维作为芯层增强了复合材料界面处的韧性,特别是纤维与基体之间界面的韧性^[21],从图7b中可以看出剑麻纤维和基体之间并无大面积裂纹和明显的缺陷。良好的层间界面黏结保证不同纤维之间的协同作用,减少界面脱黏或滑移的可能性,增强吸能和塑性变形能力,有效提高抗冲击性能。Liang等^[22]制备连续剑麻纤维增强复合材料,并与短剑麻纤维增强复合材料进行比较,结果表明,短剑麻纤维增强复合材料的最大冲击强度为8.216 kJ/m²,而连续剑麻纤维增强复合材料具有优异的力学性能,其最大冲击强度为54.47 kJ/m²。

通过上述对不同复合材料弯曲和冲击性能的分析可知,无论连续剑麻纤维还是短剑麻纤维的增强作用均优于剑麻纤维废料,可能的原因主要有两方面:一是剑麻废料的表面较为光滑,而剑麻纤维的表面则呈现鱼鳞状结构,这种结构有利于提高纤维和树脂的界面啮合作用,从而提高界面强度;二是从纤维取向来看,短纤维和连续纤维均为单一取

向,而剑麻纤维废料是随机取向,单一取向比随机分布具有更好的增强效果^[23-24]。

2.3 吸音性能

材料的吸音系数是指被复合材料吸收的声能与入射声能的比值,吸音系数的值越高表明材料吸音性能越好^[25]。剑麻纤维横截面上具有中空结构,这种中空结构能够为声波传播提供多条传播路径。声波在这些空腔中传播时,会经历多次反射、折射和散射,声波的能量最终转化为热能,从而提高复合材料的吸音能力。

图8为200~1 600 Hz频率范围内复合材料吸音系数随频率变化的关系。由图8可知,在200~1 030 Hz范围内,复合材料的吸音系数极低,表明复合材料对低频声波的吸收能力极弱;当频率超过1 030 Hz时,复合材料的吸音系数出现跃升,在1 600 Hz时出现一个峰值,其中CS2CS2C样品的吸音系数最高达到0.14,而CS1CS1C样品吸音系数最低,仅为0.03。CS2CS2C的吸音性能比CS1CS1C的吸音性能上升78.57%。Taban等^[26]研究了红麻纤维和聚乙烯醇复合材料,复合材料厚度为10 mm,密度为150 kg/m³,复合材料在1 600 Hz时吸音系数为0.16。Dhandapani等^[12]采用质量分数为20%剑麻纤维、15%棕榈纤维和65%的环氧树脂制备复合材料,在1 600 Hz时的吸音系数为0.06。

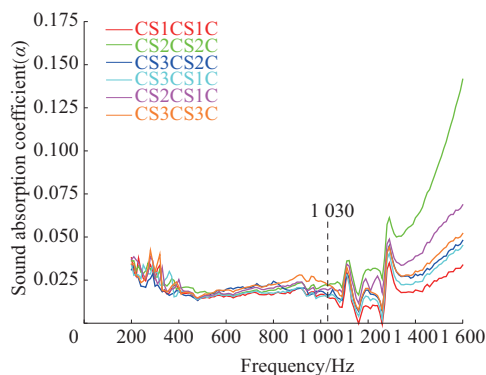
图8 复合材料的吸音系数(α)Fig. 8 Sound absorption coefficient (α) of composite

图9为在200~1 600 Hz频率范围内复合材料试样的总声能,该值代表的是实验过程中复合材料试样吸收的总声能。本文中的总声能由计算图8曲线下的面积得到。面积越大,表明材料在测试频率范围内的整体吸音能力越强。由图9可以看出,CS2CS2C复合材料的总声能最高,为51.00,而CS1CS1C复合材料的值最低,为27.30,两者相差近

一倍。当使用短剑麻纤维作为芯层时,复合材料在200~1 600 Hz 范围内整体吸音效果最好。

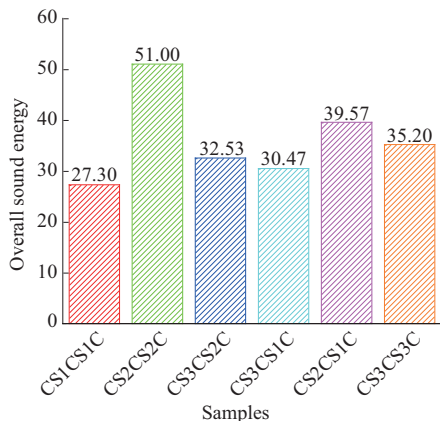


图9 200~1 600 Hz 频率范围内复合材料的总声能

Fig. 9 Overall sound energy of composite within 200-1600 Hz frequency

表2为复合材料的平均吸音系数,计算200~1 600 Hz 频率范围吸音系数的平均值得到平均吸音系数。可以看出,在200~1 600 Hz 频率范围内,CS2CS2C复合材料的平均吸音系数最高,也从侧面反映出CS2CS2C复合材料的吸音性能最好。

表2 200~600 Hz 内复合材料的平均吸音系数

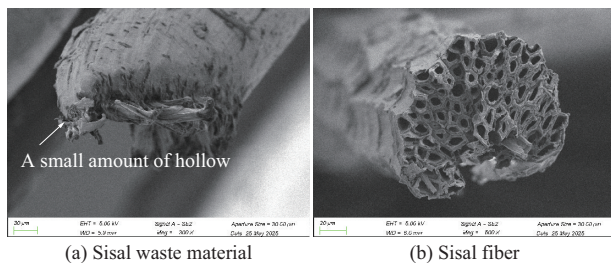
Tab. 2 Average sound absorption coefficient of composite within 200-1600 Hz frequency

Samples	Average sound absorption coefficient
CS1CS1C	0.018 9
CS2CS2C	0.036 3
CS3CS2C	0.022 8
CS3CS1C	0.021 3
CS2CS1C	0.027 8
CS3CS3C	0.025 4

吸音系数反映材料对特定声波频率的吸音能力,表示材料对声波能量的吸收程度。平均吸音系数提供了一个对不同频率范围内材料吸音能力的综合评估,可以帮助了解材料在不同声波频段下的平均吸音性能;总声能代表复合材料在某一频率范围或多个频率范围内所能吸收的总声能的量,提供了材料在给定环境中的实际吸音效果。这三者综合使用,能够全面而系统地反映复合材料吸音性能和基本特征,有利于对复合材料吸音性能进行全面表征。如图5a所示,壳层与环氧树脂之间的界面黏结良好,但吸音能力不强。但高模量的壳层有助于提高复合材料的力学强度和耐久性,降低外部环境或机械载荷对复合材料吸音性能的影响^[27]。此外,壳层也可以少量反射和散射声波,这对吸音有少量

的帮助。相比之下,芯层中的剑麻纤维具有天然的中空结构,这些微小的中空结构尺寸虽然不大,但层次多、分布广,有助于声波的散射和吸收。

材料的声阻尼性能通常受其孔隙率、孔隙形状、孔隙内入射空气的摩擦系数和总表面积的影响^[28-29]。短剑麻纤维的特点是短而松散,具有较高的比表面积和更多的摩擦接触点,具有优越的阻尼性能^[30]。这种结构使短剑麻纤维能够通过纤维弯曲、摩擦和变形^[31],有效地将声波的振动能转化为热能。这种能量转换过程大大减少声波的传播,增强声波的吸收。图10为单根剑麻纤维样品的微观形貌。短剑麻纤维横截面中空结构完整且纵向表面呈现鱼鳞状结构图,见图10b,当短剑麻纤维平行排列时,减少无序排列的孔隙或重叠,纤维总表面积增大,与纤维表面孔壁接触次数增多,通过黏性耗散造成的能量损失就会增大。这种散射扩展声波的路径,增加能量在孔隙内的停留时间,从而提高吸音效果,吸音效果最好。剑麻废料为剑麻纤维束梳理过程中产生的边角废料,其本身中空结构不明显,见图10a,纤维内部孔隙分布也不均匀,导致局部吸音不充分,从而降低整体吸声效率^[32]。同时,剑麻废料部分杂乱堆积导致孔隙少且不规则,断面多、排列不完全,但暴露表面积最大,具有一定的吸音优势,吸音效果居中。



(a) Sisal waste material (b) Sisal fiber

图10 单根剑麻纤维样品的微观形貌

Fig. 10 Microscopic morphology of a single sisal fiber sample

3 结论

以不同形态的剑麻和碳纤维单向织物作为增强相,采用-0.045 MPa的真空压力辅助树脂灌注成型工艺制备纤维增强环氧树脂夹芯结构复合材料,其中碳纤维为壳层,剑麻纤维为芯层。在增强结构中,芯层主要承担吸能和吸音的功能,壳层则承担主要的机械负荷。研究结论如下。

(1)以连续剑麻纤维为芯层的复合材料力学性能最好,弯曲和冲击强度分别为387.92 MPa, 94.65 kJ/m²。而以短剑麻纤维为芯层的复合材料力

学性能仅次于连续剑麻纤维,弯曲和冲击强度分别为364.79 MPa和70.69 kJ/m²。

(2)在吸音性能方面,提出用吸音系数、平均吸音系数和总声能三者综合表征复合材料的吸音性能。研究表明,连续剑麻纤维作为芯层、碳纤维为壳层增强复合材料在1 600 Hz时的吸音系数为0.03,而以短剑麻纤维代替连续剑麻纤维作为芯层时,所制备的复合材料在频率为1 600 Hz时吸音系数达到0.14。

(3)连续剑麻纤维在铺层时纤维束会产生不同的曲屈现象,将连续剑麻纤维短切为短剑麻纤维,可减少剑麻纤维的曲屈现象。结果发现,短剑麻纤维作为芯层时,相比于连续剑麻纤维作为芯层时,其弯曲性能仅下降了5.96%;而吸音性能在1 600 Hz时却上升了78.57%。

(4)综合考虑力学和吸音性能,使用单向短剑麻纤维作为复合材料的芯层可在力声性能之间取得平衡,这使得它在保持有效吸音的同时实现轻量化结构,这为低空飞行器机身和机翼制备提供新材料和工艺途径。

参考文献

- [1] 孙金鹏,张靠民,李如燕,等. 剑麻/含红土聚乙烯基复合材料制备与性能[J]. 化工进展,2020,39(5):2 009-2 016.
SUN Jinpeng, ZHANG Kaomin, LI Ruyan, et al. Fabrication and properties of sisal/laterite polyethylene film composites[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(5): 2 009-2 016.
- [2] WU B, LIU Y Q, UNLUER C, et al. Hybrid synthetic/natural fiber-reinforced strain-hardening magnesia-based composites[J]. Construction and Building Materials, 2024, 451. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138760.
- [3] 刘钰馨,熊君妹,苏南雄,等. 木薯淀粉/剑麻纤维复合材料的性能研究[J]. 现代塑料加工应用,2019,31(6):1-4.
LIU Yuxin, XIONG Junmei, SU Nanxiong, et al. Properties of cassava starch/sisal fiber composites[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2019, 31(6): 1-4.
- [4] 胡黄飞,王凯,江舒,等. 回收碳纤维/剑麻增强聚丙烯复合材料的力学性能[J]. 工程塑料应用,2024,52(7):1-7.
HU Huangfei, WANG Kai, JIANG Shu, et al. Mechanical properties of recycled carbon fiber/sisal reinforced polypropylene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 1-7.
- [5] WU X, WISNOM M R. Compressive failure strain of unidirectional carbon fibre composites from bending tests[J]. Composite Structures, 2023, 304. DOI:10.1016/j.compstruct.2022.116467.
- [6] ZHAO X, ZHANG Z Y, PANG J Y, et al. Preparation of carbon fibre-reinforced composite panels from epoxy resin matrix of nano lignin polyol particles[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 428. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.139170.
- [7] ERANA L A. Mechanical characterization of sisal fiber reinforced PP composite panels[J]. Journal of Natural Fibers, 2024, 21(1). DOI:10.1080/15440478.2024.2385563.
- [8] 赵鑫,孙占英. 超支化聚合物对聚丙烯/剑麻纤维复合材料性能影响[J]. 工程塑料应用,2021,49(1):120-124.
ZHAO Xin, SUN Zhanying. Effect of hyperbranched polymer on properties of polypropylene/sisal fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1): 120-124.
- [9] SU J H, YANG X, YAO Y, et al. Advanced three-dimensional textile technique for fabrication of sisal/flax hybrid fiber green biocomposite with enhanced mechanical, thermal, and sound isolation properties[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 223. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.120174.
- [10] TESFAY A G, KAHSAY M B, SENTHIL KUMAR P S. Effects of chemical treatment, hybridization, and hybrid fiber stacking sequence and orientation on tensile and impact strength of continuous sisal fiber reinforced polyester composites[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(7):2 619-2 631.
- [11] LIU J W, CAI M, GUO Y W, et al. The static and dynamic mechanical properties analysis of ramie/carbon fiber-reinforced composites[J]. Polymer Composites, 2024, 45(7):6 575-6 587.
- [12] DHANDAPANI N, MEGALINGAM A. Mechanical and sound absorption behavior of sisal and palm fiber reinforced hybrid composites[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(12): 4 530-4 543.
- [13] DA SILVA C C B, TERASHIMA F J H, BARBIERI N, et al. Sound absorption coefficient assessment of sisal, coconut husk and sugar cane fibers for low frequencies based on three different methods[J]. Applied Acoustics, 2019, 156:92-100.
- [14] PRABHU L, KRISHNARAJ V, GOKULKUMAR S, et al. Mechanical, chemical and acoustical behavior of sisal-tea waste-glass fiber reinforced epoxy based hybrid polymer composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 16:653-660.
- [15] ZHANG K M, YANG X Y, TIAN F L, et al. Effects of molding pressure on mechanical and sound insulation of sisal fiber/carbon fiber hybrid reinforced composites with sandwich structure[J]. Polymer Composites, 2025:1-11.
- [16] 杨康,张子傲,杨丽,等. 泡沫夹芯厚度对碳纤维复合材料夹层板冲击性能的影响[J]. 材料导报,2021,35(S2):579-582.
YANG Kang, ZHANG Ziao, YANG Li, et al. Influence of foam core thickness on impact performance of carbon fiber composite sandwich panel[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 579-582.
- [17] DA GLORIA M Y R, TOLEDO FILHO R D. Innovative sandwich panels made of wood bio-concrete and sisal fiber reinforced cement composites[J]. Construction and Building Materials, 2021, 272. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121636.
- [18] MIRAOU I, JABALLI S, RABEH S. Analysis of long unidirectional sisal fibers reinforced plaster: An experimental investigation [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 52:152-157.

- [19] ZUCCARELLO B, MILITELLO C, BONGIORNO F. Fatigue behaviour of high-performance green epoxy biocomposite laminates reinforced by optimized long sisal fibers[J]. *Polymers*, 2024, 16(18). DOI:10.3390/polym16182630.
- [20] DU Y T, KELLER T, ZHU Y F, et al. Mechanical behavior and failure of carbon fiber-reinforced composite sandwich structure inspired by curved-crease origami[J]. *Composite Structures*, 2023, 316. DOI:10.1016/j.compstruct.2023.117033.
- [21] SAKTHIVEL P B, BALASARAVANAN N. Impact energy absorption of sisal fiber reinforced ferrocement slab elements and its statistical relationship with composite compressive strength[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2023, 27(11):4 708–4 727.
- [22] LIANG Z F, WU H W, LIU R P, et al. Preparation of long sisal fiber-reinforced polylactic acid biocomposites with highly improved mechanical performance[J]. *Polymers*, 2021, 13(7). DOI:10.3390/polym13071124.
- [23] PHEYSEY J, MAZANCOVA N, DE COLA F, et al. Experimental study on the vibrational response and damping of short fibre/unidirectional PEEK hybrid composites[J]. *Composite Structures*, 2024, 343. DOI:10.1016/j.compstruct.2024.118264.
- [24] SENTHIL KUMAR K, SIVA I, JEYARAJ P, et al. Synergy of fiber length and content on free vibration and damping behavior of natural fiber reinforced polyester composite beams[J]. *Materials & Design (1980–2015)*, 2014, 56:379–386.
- [25] KHANKHAJE E, SALIM M R, MIRZA J, et al. Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockleshell[J]. *Applied Acoustics*, 2017, 122:113–120.
- [26] TABAN E, SOLTANI P, BERARDI U, et al. Measurement, modeling, and optimization of sound absorption performance of Kenaf fibers for building applications[J]. *Building and Environment*, 2020, 180. DOI:10.1016/j.buildenv.2020.107087.
- [27] ZHANG Z, DU Y. Sound insulation analysis and optimization of anti-symmetrical carbon fiber reinforced polymer composite materials[J]. *Applied Acoustics*, 2017, 120:34–44.
- [28] LAPČÍK L, VAŠINA M, LAPČÍKOVÁ B, et al. Investigation of advanced mica powder nanocomposite filler materials: Surface energy analysis, powder rheology and sound absorption performance[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 77:304–310.
- [29] BENALLEL A, TILIOUA A, GAROUM M. Development of thermal insulation panels bio-composite containing cardboard and date palm fibers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.139995.
- [30] SENTHILRAJAN S, VENKATESHWARAN N, NARESH K. Parametric study of different fiber parameters and their influence on acoustics and vibration behavior of jute fiber/polyester resin composites[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2022, 19(16): 13 063–13 075.
- [31] ALYOUSEF R, MOHAMMADHOSSEINI H, ABDEL K E A, et al. Enhanced acoustic properties of a novel prepacked aggregates concrete reinforced with waste polypropylene fibers[J]. *Materials*, 2022, 15(3). DOI:10.3390/ma15031173.
- [32] SEGURA J, MONTAVA I, JULIÁ E, et al. Acoustic and thermal properties of panels made of fruit stones waste with coconut fibre [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 426. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2024.136054.