

DOI: 10.7652/xjtuxb201911014

嵌入式共固化缝合阻尼复合材料的力学性能

闫盛宇, 梁森, 郑长升, 陈新乐, 王玲
(青岛理工大学机械工程学院, 266520, 山东青岛)

摘要: 为了提高复合材料的层间结合性能,满足其三维力学性能可设计性的要求,提出了嵌入式共固化缝合阻尼复合材料结构,开发了嵌入式共固化缝合阻尼复合材料的制作工艺,其中阻尼材料的硫化温度和时间与预浸料内树脂的固化温度和时间相同。采用改进的锁式缝合方法缝合铺层后的预成型体,使用热压罐制备出嵌入式共固化缝合阻尼复合材料试件。对试件进行了层间剪切试验、自由衰减试验、拉伸破坏试验,结果表明:阻尼性能与最大拉伸力随着针距的增大而增大,层间结合性能随针距的增大而变差。其中,在阻尼层厚度为 0.1 mm 的情况下,改变针距,缝合后材料的相对阻尼比为 2.16%~2.92%,拉伸强度为 412.9~427.4 MPa,层间结合强度为 6.12~7.91 MPa。该研究可为对三向力学性能有要求的复杂受载大阻尼复合材料构件的广泛应用提供参考。

关键词: 缝合阻尼复合材料;层间结合性能;阻尼性能

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)11-0096-05

Mechanical Properties of Embedded Co-Cured Stitched Damping Composite

YAN Shengyu, LIANG Sen, ZHENG Changsheng, CHEN Xinle, WANG Ling
(School of Mechanical Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China)

Abstract: To improve the interlayer bonding performance and meet the design requirements of 3D mechanical properties of composite materials, an embedded co-cured stitched damping structure was presented. The fabrication process of the embedded co-cured stitched damping composites was developed. The vulcanization temperature and time of the damping material were the same as the curing temperature and time of the resin in the prepreg. The preformed structure was stitched by using an improved lock stitching method, and then the embedded co-cured stitched damping composite specimens were finally prepared in autoclave. Free decay test, interlaminar shear test and tensile test were conducted on the specimens. The results showed that the damping performance and maximum tensile stress were increased but the interlayer bonding performance was decreased with the increase of the stitch length. When the damping layer thickness was 0.1 mm and stitch length was changed, the damping ratio, tensile strength and interlayer bonding stress of the stitched structure were in the ranges from 2.16% to 2.92%, from 412.9 to 427.4 MPa, and from 6.12 to 7.91 MPa, respectively. This study may provide a basis for wide application of complexly stressed large damping composite component with three-dimensional mechanical property requirement.

Keywords: stitched damping composite; interlaminar bonding performance; damping performance

树脂基纤维增强复合材料由于具有很高的比刚度、比强度以及优良的阻尼特性,近年来在高速列车、航空、航天等领域得到了广泛应用^[1-5]。复合材料力学性能的可设计性又为其阻尼性能的进一步提高和结构的优化提供了广阔的空间。嵌入式共固化复合材料阻尼结构(ECCDS)是在传统树脂基纤维增强复合材料的基础上,把阻尼材料通过共固化的方式嵌入其中。目前的 ECCDS 有两种固化方式:一种是使用市售已硫化的橡胶片作为阻尼材料,并使用胶黏剂黏结,最后固化成型^[6-8]。该固化方式只是使用胶黏剂把两种材料黏结在一起,已硫化阻尼材料在固化时受到高温高压作用后会返原老化,导致树脂层与橡胶层开裂。梁森等针对上述问题,通过研究并配制阻尼材料,提出了一种新的固化方式,即使用未硫化的阻尼材料直接与复合材料预浸料发生共固化,阻尼材料通过物理融合、化学交联与复合材料形成互穿网络结构长在基体树脂上,大大提高了黏弹性材料与复合材料的层间结合性能^[9]。

然而,由于 ECCDS 层间剪切强度主要由阻尼层决定,在很多情况下阻尼层强度仍弱于基体树脂,导致该材料的应用范围受到限制。基于此,本文提出了一种嵌入式共固化缝合阻尼复合材料(ECS-DC)。ECSDC 是在 ECCDS 的基础上,用线状纤维对复合材料预成型体进行缝合,然后进行共固化而成。缝合后的复合材料进行共固化时,预浸料中的树脂会沿着缝合材料流动,待固化完成后,在复合材料板的法线方向上形成树脂和缝合材料的复合体,可有效增强复合材料的层间剪切强度和面外力学性能。本文还开发了 ECSDC 的制作工艺,完成了试件的加工,并对其进行了层间剪切试验、自由衰减试验和拉伸试验,得到材料的层间结合性能、阻尼性能与拉伸强度随针距的变化规律,可为对三向力学性能有要求的复杂受载大阻尼复合材料构件的广泛应用提供参考。

1 试验材料与制作工艺

1.1 ECSDC 板制作材料的选择

本文选择的预浸料为玻璃纤维预浸料(型号 HFS10,中国兵器工业集团第五三研究所),以酚醛树脂(型号 93-68123,无锡欣叶豪化工有限公司)作为基体,E-玻璃纤维(型号 EW210F-120,宏达玻璃纤维布厂)作为增强体,酚醛树脂的固化温度为 165℃。黏弹性阻尼材料主要成分为丁腈橡胶(型号 1072,丰源橡胶制品厂)、炭黑、白炭黑、防老剂、促进

剂(型号分别为 N330、T40、防老剂 4020、橡胶促进剂 TMTD,青岛金兰化工有限公司)等,通过调节阻尼材料的组分使阻尼材料的硫化温度曲线与酚醛树脂的固化温度曲线相吻合,最终达到共固化的目的^[10-12]。缝合材料选择 1500 旦的 Kevlar49 纤维(型号 220dtex,常州高远化工有限公司),Kevlar49 纤维力学性能良好,并且具有耐高温性能。缝线为三股纤维编织而成,Kevlar49 纤维密度为 1.44 g/cm³,纤维横截面积为 0.12 mm²^[13-14]。

1.2 ECSDC 板的制备工艺

1.2.1 阻尼材料的制作 按照阻尼材料的预定组分量取材料,利用密炼机把所用材料混合均匀,混炼出胶料。为了方便阻尼材料的溶解,把混合好的胶料放在开炼机上压成厚度大约为 1 mm 的薄片。

1.2.2 阻尼材料的溶解 把炼制好的阻尼材料薄片剪成小碎片,然后把四氢呋喃(型号 109-99-9,国药集团化学试剂有限公司)与阻尼材料按照 7:1 的质量比放在烧杯中进行溶解。为了使阻尼材料溶解完全,使用玻璃棒多次搅拌,最后密封烧杯口放入阴凉处保存,期间每 4 h 搅拌一次,直至阻尼材料彻底溶解。图 1 为处理好的阻尼材料与制备完成的阻尼材料溶液。



图 1 阻尼材料与阻尼材料溶液

1.2.3 刷涂阻尼薄膜与复合材料的缝合 把溶解好的阻尼胶浆用齐头软毛刷均匀地刷涂在复合材料预浸料上。多次试验探索发现,由于阻尼材料与四氢呋喃的混合比例是固定的,只要控制好刷涂速度,每刷涂一层阻尼胶浆,晾干后的厚度即为 0.025 mm,本文制作的试件阻尼层厚度为 0.1 mm,需要刷涂 4 次。刷涂过程中采用双面刷涂的方法,每刷涂一次之后,需要等待 2~3 h,直至四氢呋喃完全挥发后再进行下一次刷涂。刷涂好的复合材料采用正交铺层合并在一起。

现有缝合方法主要分为单面缝合与双面缝合,其中双面缝合又分为锁式缝合、改进锁式缝合与链式缝合。结合现有试验条件与各种缝合法的特点,最终选择采用改进锁式缝合法。保持行距为 10

mm 不变,针距分别为 8、10、12、14、16 mm。图 2 为刷涂与缝合完成后的复合材料预成型体。

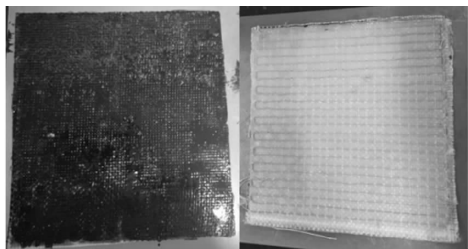
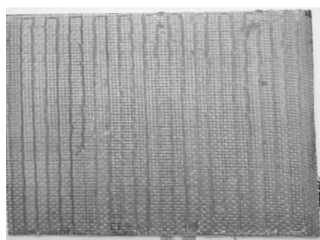
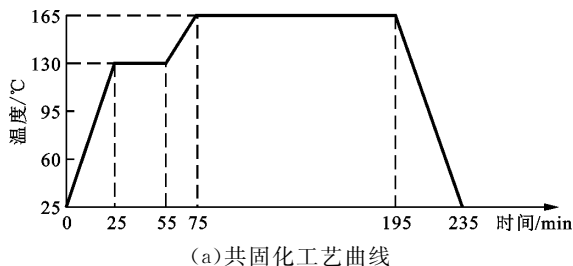


图 2 复合材料的刷涂与缝合

1.2.4 抽真空与材料的共固化 为保证共固化后的效果,首先利用真空泵把复合材料预成型体内的气体抽出,以减少固化后试件的缺陷。利用真空袋与密封胶把缝合好的复合材料预成型体密封好,通过三通管把真空袋内的气压保持在 -0.1 MPa 以下,把预成型体内的空气排出。

把抽完真空的复合材料预成型体取出放入热压罐内进行共固化,其共固化工艺过程如图 3a 所示,具体为:升、降温速率为 $3.5 \sim 4.5$ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,25 min 后从室温升温到 130 $^{\circ}\text{C}$,加压至 0.5 MPa,并在该温度和压力下保持 30 min;然后在 20 min 内升温到 165 $^{\circ}\text{C}$,维持当前温度和压力 2 h;结束后释放压力,并在 40 min 内降温到室温,取出试件。图 3b 为共固化后的 ECSDC 板。



(b) 共固化后的 ECSDC 板

图 3 共固化工艺曲线和共固化后的 ECSDC 板

1.3 层间剪切测试

为了检测 ECSDC 板的层间结合性能,设计双切口剪切试验试件,试件分为 5 组,针距分别为 8、10、12、14、16 mm,每组 5 个试件,并取试验数据的平均值作为评估剪切强度的依据。试件的规格为

$25\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 2.1\text{ mm}$,其中阻尼层厚度为 0.1 mm 。高铁拉力测试机 (GT-TCS-2000) 的拉伸速度为 $2\text{ mm}/\text{min}$,断裂敏感度设为 95%。图 4 为剪切试件及其装夹结构。

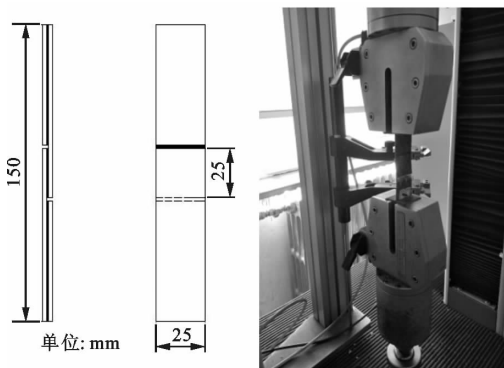


图 4 剪切试件及其装夹结构

1.4 自由衰减试验

为研究嵌入式共固化缝合复合材料结构阻尼性能随缝合参数的变化规律,采用自由衰减试验对其进行测试。主要试验仪器为 B&K 公司的激振力锤、pulse、数据处理软件 pulse-reflex 以及上海欧多公司的位移传感器,型号分别为 8206-002、4524-B004、3560B。边界条件为一边固支,在自由衰减测试系统中,缝合梁试件尺寸为 $25\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 2.1\text{ mm}$,缝合针距分别为 8、10、12、14、16 mm,每组 5 个试件,取平均值作为最终结果。

1.5 拉伸破坏试验

为了探究弹性模量与拉伸破坏应力随针距的变化规律,使用万能拉伸试验机对试件进行了拉伸测试。试件的规格与上述自由衰减试件规格相同。为了探索缝合后的试件与缝合前试件拉伸强度的关系,拉伸试验增加一组未缝合试件作为对比。试验所用仪器为 100 kN 微机控制电子式万能试验机,型号为 WDW-100E,分别对同一组的 5 个试件进行测试。

2 结果与分析

2.1 ECSDC 层间剪切试验测试结果及分析

图 5 为层剪破坏的应力应变图,图中实线是缝合针距为 16 mm 试件 A 的层间拉伸应力应变曲线,虚线为未缝合试件 B 的层间拉伸应力应变曲线。通过计算得知,试件 A 的层间结合强度为 6.12 MPa ,试件 B 的层间结合强度为 5.17 MPa 。由图可知:缝合后试件的层间最大剪切应力明显增大,而且有第二峰值,强度为 1.76 MPa 。缝合后的试件在共固化时,树脂会随着缝线填充针孔,最终固化形成树脂钉。树脂钉的存在导致了最大剪切应力的第一峰

值增大,而缝线本身则形成曲线的第二峰值,该特性可以保证零件在彻底发生层间破坏之前存在破坏预警,有重要的实际意义。

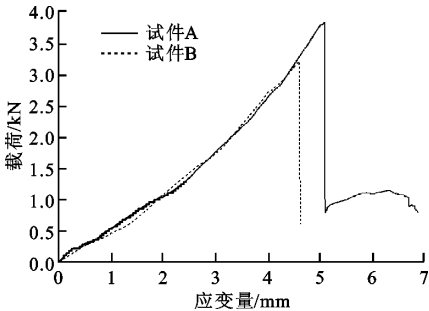


图 5 层剪破坏的应力应变图

图 6 为层间结合强度随针距的变化曲线。由试验数据可得,ECSDC 试件的层间结合强度为 6.12~7.91 MPa。随针距增大,试件的层间最大剪切强度减小,即缝合后形成树脂钉的密度影响了 ECSDC 试件层间剪切强度。从图中误差可看出,试验数据波动并不大。当针距为 8 mm 时,平均层间结合强度最大为 7.91 MPa,比未缝合的试件增加了 2.74 MPa,性能高于国内外同类阻尼复合材料的层间结合强度。文献[7]中未缝合橡胶夹芯层合板的最大层间结合强度为 2.41 MPa;文献[15]中缝合的复合材料泡沫夹层结构的层间结合强度为 0.898~1.133 MPa。

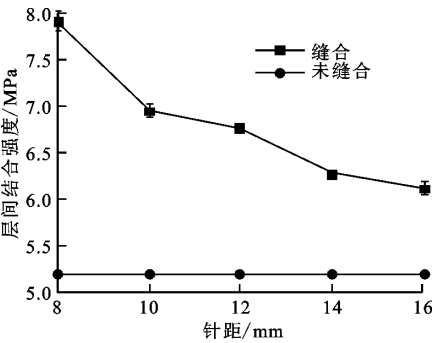


图 6 层间结合强度随针距的变化曲线

2.2 ECSDC 阻尼测试结果及分析

在自由振动衰减试验中使用最小二乘法对离散时域信号进行拟合,从而使试验精度更高。

图 7 为相对阻尼比随针距的变化曲线,当阻尼层厚度为 0.1 mm 时,ECSDC 的相对阻尼比在 2.16%~2.92%,试验数据的标准差小于 0.093。从图 7 可知,ECSDC 的相对阻尼比要小于 ECCDS 的,未缝合试样相对阻尼比为 3.25%,缝合针距为 8 mm 时相对阻尼比为 2.16%,缝合针距为 16 mm 时相对阻尼比为 2.92%。随着针距增大,相对阻尼比

增大。其原因在于缝针穿过阻尼层,在阻尼层留下针孔,导致阻尼层的黏弹性材料相对面积减小和相对阻尼比降低。在实际应用时,应综合考虑工作环境对 ECSDC 的性能要求,以确定合适的针距。与国内外其他橡胶夹芯复合材料相比,该结构有着较为优越的阻尼性能。文献[16]以丁苯橡胶为夹芯、以玻璃纤维为上下面板进行缝合,橡胶夹芯层厚度为 2 mm,最大阻尼比为 2.72%,而本文中橡胶层厚度为 0.1 mm,最大阻尼比为 2.92%。

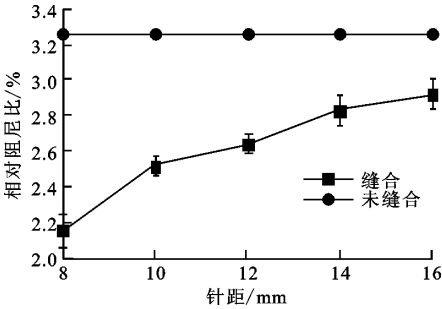


图 7 相对阻尼比随针距的变化曲线

2.3 ECSDC 拉伸破坏试验结果与分析

图 8 为 ECSDC 结构拉伸强度随针距的变化曲线,由试验数据得到 ECSDC 的拉伸强度为 412.9~427.4 MPa,图中误差棒所代表的标准差小于 7.9 MPa。

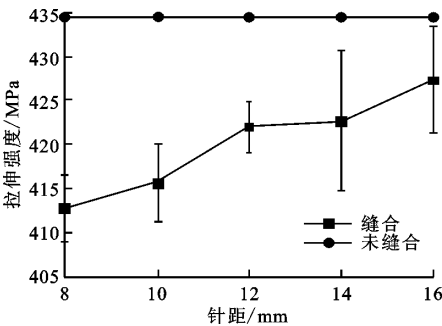


图 8 不同针距下 ECSDC 的拉伸强度

从图 8 可知,缝合后的 ECSDC 试件与未缝合试件相比,最大破坏应力有一定程度减小,随着针距增大,ECSDC 的最大破坏应力增大。这是因为缝针会少量破坏复合材料中的纤维,因此在不改变缝线行数的情况下,针距越大被破坏的纤维数量越少,拉伸最大破坏应力越大。

3 结 论

嵌入式共固化缝合阻尼复合材料能提高 ECSDS 的层间结合性能与拉伸性能,并实现阻尼各向异性,具体结论如下。

(1)从层间剪切试验结果可知,缝合后的 ECS-DC 试件其层间结合性能与未缝合的相比有明显的提高,且缝合后的试件有二次剪切峰值。随着针距的增大,ECSDC 的层间结合性能变差。

(2)从 ECSDC 的自由衰减试验可知,缝合后 ECSDC 的相对阻尼比要小于未缝合的,随着针距的增大,其相对阻尼比随之增大。

(3)从材料的拉伸破坏试验结果可知,缝合后 ECSDC 试件的拉伸强度要比未缝合的小,随着针距的增大,其拉伸强度随之升高。

参考文献:

- [1] 马立敏,张嘉振,岳广全,等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用 [J]. 复合材料学报, 2015(2): 317-322.
MA Limin, ZHANG Jiazhen, YUE Guangquan, et al. Application of composite in new generation of large civil aircraft [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015(2): 317-322.
- [2] 方宜武,王显峰,孙成,等. 复合材料机翼翼梁的制造及应用概况 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(2): 69-74.
FANG Yiwu, WANG Xianfeng, SUN Cheng, et al. The manufacture and application of composite wing spars [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(2): 69-74.
- [3] 董博. 复合材料及碳纤维复合材料应用现状 [J]. 辽宁化工, 2013(5): 552-554.
DONG Bo. Application status of composites including carbon fiber composites [J]. Liaoning Chemical Industry, 2013(5): 552-554.
- [4] 倪楠楠,温月芳,贺德龙,等. 结构-阻尼复合材料研究进展 [J]. 材料工程, 2015, 43(6): 90-101.
NI Nannan, WEN Yuefang, HE Delong, et al. Process on the research of structure-damping composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(6): 90-101.
- [5] 梁森,梁磊,米鹏. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构的新进展 [J]. 应用力学学报, 2010, 27(4): 767-771.
LIANG Sen, LIANG Lei, MI Peng. New development of the embedded and co-cured composite damping structures [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(4): 767-771.
- [6] 罗晰旻,罗益锋. 国外高性能纤维及其复合材料在高速列车的应用 [J]. 高科技纤维与应用, 2011, 36(5): 33-37.
LUO Ximin, LUO Yifeng. The application of several

high performance fibers and composite materials in high speed train both in abroad and home [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2011, 36(5): 33-37.

- [7] BIGGERSTAFF J M. Vibrational damping of composite materials [D]. San Diego, USA: University of California San Diego, 2006: 79-86.
- [8] 潘利剑. 粘弹阻尼层共固化复合材料的性能研究与优化设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 24-29.
- [9] 李雪. 嵌入式共固化阻尼复合材料结构力学性能研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015: 14-19.
- [10] UNGAR E E, KERWIN E M. Loss factors of viscoelastic systems in terms of energy concepts [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(7): 954-957.
- [11] ZHANG S H, CHEN H L. A study on the damping characteristics of laminated composites with integral viscoelastic layers [J]. Composite Structures, 2006, 74(1): 63-69.
- [12] 米鹏. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构动力学性能的数值模拟与试验研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011: 1-5.
- [13] 王辉. 嵌入式共固化穿孔阻尼薄膜复合材料结构动力学性能及其优化 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013: 10-17.
- [14] 燕瑛,韩凤宇,杨东升,等. 缝合复合材料弹性性能的三维有限元细观分析与试验验证 [J]. 航空学报, 2004, 25(3): 267-269.
YAN Ying, HAN Fengyu, YANG Dongsheng, et al. Finite element micromechanical analysis and experimental confirmation of the elastic properties of stitched composite materials [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(3): 267-269.
- [15] 杨慧,刘兴宇,张弛. 缝合复合材料泡沫夹层结构层间剪切性能研究 [J]. 应用力学学报, 2016, 33(1): 105-109.
YANG Hui, LIU Xingyu, ZHANG Chi. Experimental study on interlaminar shear strength of stitched foam-core composite sandwich structures [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(1): 105-109.
- [16] 罗涵,王翔,王钧,等. 三维缝合夹层结构复合材料的阻尼性能研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(21): 40-43.
LUO Han, WANG Xiang, WANG Jun, et al. Research on the damping of three-dimensionally sewed sandwich structural composite material [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(21): 40-43.

(编辑 荆树蓉)