

三维缝合复合材料研究进展

郭 勇 贾明皓 蒋 云* 钱 坤

(江南大学生态纺织教育部重点实验室, 无锡 214122)

摘 要 三维缝合复合材料是指使用缝合的方式在厚度方向上将织物连接成三维结构, 再通过树脂传递模塑等工艺浸渍固化缝合后得到的三维织物。介绍了宏观角度下三维缝合复合材料的拉伸、弯曲、层间剪切及冲击后压缩等力学性能的主要研究成果, 并对其湿热、机械连接性能进行探讨, 总结了三维缝合复合材料目前的应用现状, 对三维缝合复合材料的发展研究方向进行了展望。

关键词 三维缝合, 力学性能, 复合材料, 研究进展

Recent research progress in the property of 3D stitched composites

Guo Yong Jia Minghao Jiang Yun Qian Kun

(Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122)

Abstract The 3D stitched composite material refers to a composite material obtained by joining the fabrics into a three-dimensional structure in the thickness direction by stitching, and then impregnating and solidifying the stitched 3D fabric by a process such as RTM(resin transfer molding). The main research results of mechanical properties such as tensile, bending, layer shearing and post-impact compression of 3D stitched composites were reviewed under macroscopic and mesoscopic angles, and discussed the wet heat and mechanical joint properties, and summarized the application status of 3D stitched composites, the development direction of 3D stitched composites was prospected.

Key words 3D stitching, mechanical property, composite material, research progress

三维缝合复合材料是将织物铺层后, 使用高强度的缝线在厚度方向上进行缝合, 再通过树脂传递模塑工艺(RTM)工艺等浸渍固化后, 获得具有整体结构的纺织复合材料, 缝合复合材料厚度方向的增强纤维含量一般在 1%~5%(体积分数)^[1]。

与 2D 层合板相比, 缝合增强了复合材料 z 向性能, 使复合材料具有更好的层间性能和冲击损伤容限; 缝合也可以将二维织物连接起来构造成复杂的三维构件, 对制造大型的异型构件也有很大优势^[2-4]。与编织物相比, 编织一般比较适合做“工”字形等对称截面和矩形平板等相对规则形状, 而对于纵向和横向加筋织物, 编织的适用性较差或者成本很高。缝合预成型体具有成本低、适用性强的特点。三维缝合复合材料的研究始于 20 世纪 80 年代, 近年来在宏观上随着研究方法的改进、技术水平及仪器设备精度的提高, 国内外研究人员对三维缝合复合材料工艺参数、力学性能、工程实践等进行了广泛

研究, 并取得了大量的研究成果^[5-6]。在微观上, 随着细观力学理论的日趋成熟^[7-8], 通过对三维缝合复合材料纱线间距、几何结构参数、纱线弯曲度等信息采集与计算得到复合材料细观几何结构, 从而建立复合材料有限元模型, 采用有限元分析软件对复合材料的力学性能进行仿真分析, 有效预测了复合材料的各项力学性能。

1 三维缝合复合材料的发展历程

20 世纪 80 年代, 三维缝合复合材料主要用于航空领域。最早研究缝合/树脂膜渗透(RFI)技术的是美国航空航天局(NASA)和美国道格拉斯公司(Douglas Aircraft Company), 研究重点集中在缝合技术是否可以在厚度方向上对纤维增强聚合物材料进行连接。最初的研究主要以树脂为基体, 以碳纤维或玻璃纤维等高性能织物作为增强体制造三维缝合复合材料。经过不懈的努力, NASA 于 1995 年

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0810300);中央高校基本科研业务费专项资金资助(JUSRP51718A)

作者简介:郭勇(1994-),男,硕士研究生,研究方向为复合材料结构设计。

联系人:蒋云(1969-),男,教授,主要从事纺织复合材料研究工作。

成功研制出缝合/RFI 机翼壁板并通过了地面测试试验^[9-10]。

德国和法国的航空公司也对三维缝合复合材料进行了大量研究,并尝试使用三维缝合复合材料代替金属材料制造机身和机翼^[11]。缝合技术在德国和法国相继得到突破,法国空客 A350 开始使用三维缝合复合材料制造尾翼,德国的缝合技术达到世界先进水平。

我国对三维缝合复合材料的研究始于 20 世纪末,研究重点主要集中在缝合方式、预制体复合工艺、三维缝合复合材料的力学性能等方面。目前国内在三维缝合复合材料预制体成型工艺和有限元仿真模拟等方面取得了一定的成果^[12-14]。

2 三维缝合复合材料性能研究

20 世纪 80 年代以来,三维缝合复合材料以优异的性能和成本较低等优势,受到国内外研究人员的高度关注并获得持续的发展^[15-16]。缝合参数的变化对三维缝合复合材料力学性能的影响一直是研究的热点,学者主要通过实验测试以及有限元软件分析研究三维缝合复合材料。目前开展了对三维缝合复合材料在湿热环境下的应用及其机械连接性能研究并取得一定进展。

2.1 三维缝合复合材料的力学性能

目前国内外对三维缝合复合材料力学性能的研究主要集中在拉伸、弯曲、层间及冲击性能方面^[17-18]。在宏观力学分析中,通常采用碳纤维缝合树脂基复合材料作为试件,通过改变缝线种类、缝合密度等参数,测试其力学性能从而得到相应的结论。

杨龙英等^[19]对不同捻度 Kevlar 缝线的树脂渗透率和断裂伸长率进行了研究,结合不同捻度缝线的特性,对比了在链式和锁式 2 种缝合方式中,不同捻度缝线对三维缝合复合材料拉伸、弯曲和层间剪切性能的影响。结果表明缝线存在最佳捻度,使用该捻度的三维缝合复合材料力学性能最好。王瑞等^[20]和张旭霞等^[21]分别研究了缝合密度对缝合层合板 I 型和 II 型层间断裂韧性的影响。结果表明:缝合可以显著提高三维缝合复合材料层间断裂性能且缝合密度对裂纹扩展有较大影响;随着缝合密度在一定范围增加,层间断裂韧性增强,超过此范围随着缝合密度增加,层间性能下降,因此缝合密度存在最佳值。梁倩因^[22]对 4 种三维缝合复合材料的低

速冲击性能进行了研究,使用体视显微镜观察材料的损伤分布与截面特征,分析了 4 种组成结构的三维缝合复合材料的破坏方式。结果表明,树脂基体的开裂是造成材料低速冲击损伤的主要原因。

Yudhanto 等^[23]和毛春见等^[24]以不同缝合密度的三维缝合碳纤维树脂基复合材料为研究对象,研究其拉伸性能及破坏机理。利用超声波检测、X 射线衍射和光学显微镜,详细探究三维缝合复合材料拉伸前后的变化情况,发现缝线使预制体内形成初始的横向斜裂缝。力学性能测试和微观分析表明,缝合密度的增加会使三维缝合复合材料的泊松比和弹性模量发生小幅度下降。Tan 等^[25]通过准静态压痕实验,结合超声波 C 扫描,X 射线检测等技术研究了缝合密度和缝合线细度对三维缝合复合材料性能的影响及材料损伤机理。研究结果表明,与未缝合复合材料的分层破坏相比,缝合抑制了能量的分层传播,这是由基体的破坏和面内纤维的断裂引起的。准静态压痕实验表明能量的吸收速率与缝合密度、缝线细度无关。

2.2 三维缝合复合材料的湿热性能

与金属材料相比,纺织复合材料对环境较敏感,特别是在湿热条件下力学性能下降明显,严重影响了复合材料的使用范围和结构效率^[26]。研究表明^[27-28],湿热条件不会改变缝合与未缝合层合板破坏机理,也不会降低缝合层合板的拉伸强度,但对缝合层合板的压缩强度影响较大。湿热环境会对三维缝合复合材料基体与增强体的界面性能产生较大影响,从而降低材料的压缩性能;同时铺层角度也对三维缝合复合材料的压缩性能有较大影响。因此,增强三维缝合复合材料湿热压缩性能的关键是界面性能的改善及铺层角度的优化。进一步研究表明^[29-31],在高温湿热环境下,缝合线强度大幅度下降且三维缝合复合材料的界面性能下降较明显。由此可知,缝合对增强三维缝合复合材料的冲击压缩性能效果微乎其微。

2.3 三维缝合复合材料的机械连接性能

三维缝合复合材料应用于汽车、飞机等结构件时,需要将复合材料与其他部件进行机械连接。研究表明^[32-33],影响三维缝合复合材料机械连接性能的主要因素是缝合针脚,针脚的存在使得复合材料内部纤维弯曲而且针脚附近会形成富树脂区;其次对缝合层合板开孔、订钉连接时,会对复合材料造成二次损伤。焦亚男等^[34]的研究表明:采用缝合方式

连接的编织复合材料,其弯曲强度和弯曲模量较未缝合复合材料提高了20%;缝合可以对编织物进行有效搭接。Perillo等^[35]、Raju等^[36]通过实验与仿真模拟发现,三维缝合复合材料的机械连接在厚度方向更具优势,可以提高整体结构的破坏强度,同时缝合可以有效地阻止损伤的扩展,延缓构件的失效破坏。

3 三维缝合复合材料的应用

三维缝合复合材料是在传统的2D铺层复合材料厚度方向加入缝线,虽然对复合材料面内力学性能造成了一定损伤,但显著提高了复合材料的层间性能,缝合后的复合材料仍具有比强度高、比模量高等优势。三维缝合复合材料可用于制造发动机传动轴、飞机舱门、机翼、汽车车身、发动机架^[37-38],广泛应用于航空航天、船舶、汽车等领域,为各类结构及功能件的轻量化做出了巨大贡献。目前国内中航复合材料有限责任公司已成功将缝合/RTM、缝合/RFI、缝合/真空辅助树脂成型(VARI)工艺技术应用用于各类复合材料结构件。随着研究的深入,用三维缝合复合材料制备的构件逐渐从次承力构件发展成为主承力构件,性能满足工业应用要求。

4 结语与展望

缝合能够提高复合材料的层间性能,有效地抑制损伤扩展,但不可避免地对复合材料面内力学性能造成一定损伤。三维缝合复合材料结构复杂,造成其损伤的因素众多,目前的研究未能充分揭示材料在使用过程中的性能变化,今后需要从以下几个方面对三维缝合复合材料进行更深层次研究:

(1)宏观力学分析中,三维缝合复合材料增强体与基体间的界面性能对其层间性能影响较大。目前在力学研究中多忽略界面性能的影响。

(2)细观有限元研究中,建立缝合复合材料细观模型时,对于缝线的模拟只是使用简单的工字型或用Z-pin模型代替,这样就难以模拟出缝线针脚及针脚处的树脂富集,应不断创新理论研究,建立符合实际应用要求的研究模型还需做更多工作。

(3)目前对三维缝合复合材料的性能研究多在常温常压下进行,应逐步探究其在高温高湿等恶劣环境下的性能变化,扩大三维缝合复合材料的应用范围。

(4)有关三维缝合复合材料机械连接性能的研究

很少,应深入开展该材料连接方式设计及其损伤模式研究。

参考文献

- [1] 程小全,酆正能,赵龙.缝合复合材料制备工艺和力学性能研究[J].力学进展,2009,39(1):89-102.
- [2] 李朝光,矫桂琼,黄涛,等.Z向增强复合材料层压板冲击后压缩性能试验研究[J].机械强度,2010,32(2):373-377.
- [3] 严柳芳,陈南梁,罗永康.缝合技术在复合材料上的应用及发展[J].产业用纺织品,2007(2):1-5.
- [4] 于倩倩,陈刚,郑志才.缝合技术在复合材料上的应用及研究进展[J].工程塑料应用,2009,37(5):85-88.
- [5] 王春敏.三维缝合复合材料力学性能的研究进展[J].材料导报,2010,24(S1):204-206.
- [6] 尹昌平,李建伟,刘钧,等.缝合/RTM复合材料层合板的力学性能研究[J].材料导报,2007,21(11):136-138.
- [7] Verpoest I, Lomov S V. Virtual textile composites software WiseTex: integration micro-mechanical permeability and structural analysis[J]. Composites Science and Technology, 2005,65:2563-2574.
- [8] 李望南,蔡洪能,郑杰.基于宏观分析的碳纤维增强高分子复合材料强度性能表征[J].复合材料学报,2013,30(1):244-251.
- [9] 艾涛,王汝敏.Kevlar缝合复合材料研究进展[J].材料导报,2005,19(1):64-67.
- [10] Dow M B, Dexter H B. Development of stitched braided and woven composite structures in the ACT program and at Langley Research Center: NASA/TP-97-206234 [R]. USA: NASA, 1997.
- [11] Ingd, Witting I. Recent development in robotic stitching technology for textile structural composites[J]. JTATM, 2001, 2(1):1-8.
- [12] 朱炜焱,许希武.复合材料层合板低速冲击损伤的有限元模拟[J].复合材料学报,2010,27(6):200-207.
- [13] 邵青,何宇廷,张腾.复合材料加筋板低速冲击损伤及剩余压缩强度试验研究[J].复合材料学报,2014,31(2):200-206.
- [14] 许昌,许希武.复杂载荷下缝合层板面内强度研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
- [15] Carcea S C, Sinclair I, Spearinc S M. Fiber failure assessment in carbon fiber reinforced polymers under fatigue loading by synchrotron X-ray computed tomography[J]. Composites Science and Technology, 2016,133:157-164.
- [16] Pegorin F, Pingkarawat K, Daynes S, et al. Mode II interlaminar fatigue properties of z-pinned carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. Composites: Part A, 2014,67:8-15.
- [17] 徐建新,王春水,李强,等.缝合复合材料层合板面内拉伸强度的分析[J].中国民航大学学报,2010,28(1):18-21.
- [18] 裴晓园,李嘉禄.复合材料剪切性能的研究进展[J].科技创新导报,2010(3):211.

- [19] 杨龙英, 龚家谦. Kevlar 缝线捻度对缝合复合材料力学性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(S1): 91-95.
- [20] 王瑞, 王广峰, 郭兴峰, 等. 缝合层复合板的 I 型层间断裂韧性研究[J]. 无机材料学报, 2004, 19(5): 1123-1128.
- [21] 张旭霞, 杨彩云. 玄武岩纤维增强缝合复合材料力学性能研究[J]. 西部皮革, 2012(24): 33-34.
- [22] 梁倩囡. 缝合编织复合材料低速冲击及冲击后弯曲性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [23] Yudhanto A, Watanabe N, Iwahori Y. Effect of stitch density on tensile properties and damage mechanisms of stitched carbon/epoxy composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 46: 151-165.
- [24] 毛春见, 许希武, 郑达. 缝合复合材料层板低速冲击及冲击后压缩实验研究[J]. 复合材料学报, 2012, 29(2): 160-166.
- [25] Tan K T, Yoshimura A, Watanabe N, et al. Effect of stitch density and stitch thread thickness on damage progression and failure characteristics of stitched composites under out-of-plane loading[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 74: 194-204.
- [26] 王迎芬, 彭公秋, 谢富原. 国产 T700 级碳纤维/BMI 复合材料湿热性能[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(3): 16-22.
- [27] Chen Gang, Cheng Xiaoquan, Li Zhengneng, et al. The effect of environment on tensile properties of stitched and unatched laminates(with a hole)[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2005, 24(17): 1883-1889.
- [28] Alessi S, Pitarresi G, Spadaro G. Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behavior of CFRP composites[J]. *Composites: Part B*, 2014, 67(11): 145-153.
- [29] Liu L S, Wu F, Yao H W, et al. Investigation of surface properties of pristine and γ -irradiated PAN-based carbon fibers: effects of fiber instinct structure and radiation medium[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 337(11): 241-248.
- [30] 张晓云, 曹东, 陆峰, 等. T700/5224 复合材料在湿热环境和化学介质中的老化行为[J]. 材料工程, 2016, 44(4): 82-88.
- [31] 马少华, 王勇刚, 回丽, 等. 湿热环境对碳纤维环氧树脂复合材料弯曲性能的影响[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 81-87.
- [32] 梁祖典, 燕瑛, 张涛涛, 等. 复合材料单搭接胶接头试验研究与数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(12): 1786-1792.
- [33] Binnur G K. Effect of the clearance and interference-fit on failure of the pin-loaded composites[J]. *Materials and Design*, 2010, 31: 85-93.
- [34] 焦亚男, 李嘉禄, 孙其永. 缝合连接三维编织复合材料弯曲破坏形式分析[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(1): 104-107.
- [35] Perillo G, Vedivik N, Echemever A. Damage development in stitch bonded GFRP composite plates under low velocity impact: experimental and numerical results[J]. *Journal of Composites Material*, 2014, 49(5): 601-615.
- [36] Raju K P, Bodjona K, Lim G H, et al. Improving load sharing in hybrid bonded/bolted composite joints using an interference-fit bolt[J]. *Composite Structures*, 2016, 149: 329-338.
- [37] 吴扬, 段跃新. 缝合参数对缝制平纹玻璃纤维织物复合材料弯曲性能的影响研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(6): 24-27.
- [38] 谈昆伦, 刘黎明, 刘千, 等. 缝合对复合材料力学性能的影响[J]. 江苏纺织, 2012(S1): 32-40.

收稿日期: 2018-10-16

(上接第 32 页)

- [21] Rangkupan R, Reneker D H. Electrospinning process of molten polypropylene in vacuum[J]. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 2003, 12(2): 81-87.
- [22] Zhmayev E, Cho D, Joo Y L. Nanofibers from gas-assisted polymer melt electrospinning[J]. *Polymer*, 2010, 51(18): 4140-4144.
- [23] Nayak R, Kyratzis I L, Truong Y B, et al. Melt-electrospinning of polypropylene with conductive additives[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(17): 6387-6396.
- [24] Ogata N, Lu G, Iwata T, et al. Effects of ethylene content of poly(ethylene-co-vinyl alcohol) on diameter of fibers produced by melt-electrospinning[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 104(2): 1368-1375.
- [25] Malakhov S N, Khomenko A Y, Belousov S I, et al. Method of manufacturing nonwovens by electrospinning from polymer melts[J]. *Fibre Chemistry*, 2009, 41(6): 355-359.
- [26] Hutmacher D W, Dalton P D. Melt electrospinning[J]. *Chemistry, An Asian Journal*, 2011, 6(1): 44-56.
- [27] Shimada N, Tsutsumi H, Nakane K, et al. Poly(ethylene-co-vinyl alcohol) and Nylon 6/12 nanofibers produced by melt electrospinning system equipped with a line-like laser beam melting device[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 116(5): 2998-3004.
- [28] Fang J, Zhang L, Sutton D, et al. Needleless melt-electrospinning of polypropylene nanofibres[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 7(1): 1-9.
- [29] Komarek M, Martinova L. Design and Evaluation of melt-electrospinning electrodes[C]. *Proceedings of 2nd NANOCON International Conference*, 2010: 72-77.
- [30] 杨卫民, 李好义, 吴卫逢, 等. 熔体静电纺丝技术研究进展[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 1-13.
- [31] Li H Y, Chen H B, Zhong X F, et al. Interjet distance in needleless melt differential electrospinning with umbellate nozzles[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(15): 338-347.
- [32] 杨涛, 何雪涛, 丁玉梅, 等. 无针熔体静电纺丝的研究进展[J]. 塑料科技, 2018, 46(3): 134-139.

收稿日期: 2018-10-29