

Kevlar 缝线捻度对缝合复合材料力学性能的影响

杨龙英 龚家谦

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都,610092)

摘要:缝合技术作为整体成型低成本制造技术已在航空领域得到广泛应用。缝合过程中使用的缝线需要加捻提高使用性能。缝线捻度对缝线自身的性能和缝合织物增强复合材料的力学性能均产生影响。本文以缝合中应用最多的 Kevlar 缝线为研究对象,通过实验研究不同捻度 Kevlar 缝线的渗透率和断裂强度,同时研究不同捻度缝线在链式和锁式两种不同缝合方式中对缝合复合材料拉伸性能、弯曲性能和层间剪切性能的影响。通过实验结果来确定缝合中使用的 Kevlar 缝线的最佳捻度。

关键词:Kevlar 缝线;捻度;复合材料;力学性能

中图分类号:TQ327;V267

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2017)S-0051-05

Effect of Twist Degree of Kevlar Stitch Threads on Mechanical Performance of Stitched Composites

YANG Longying, GONG Jiaqian

(AVIC Chengdu Aircraft (Group) Industrial Ltd. Co, Chengdu, 610092, China)

Abstract: The stitching technique as the monolithic molding and low-cost manufacture technique has been widely applied in aeronautics. The stitch threads used in stitching process are needed to be twisted in order to improve the characteristic of service. The degree of the twist affects the stitch threads and the stitched composites. The Kevlar stitch threads used popularly are studied here. The permeability and breaking strength of Kevlar stitch threads with different degrees of twist are investigated experimentally, whilst the effect of Kevlar stitch threads are discussed with different degrees of twist on the tensile property, bending property and interlaminar shear property of stitched composites by chained stitching and locking-type stitching. The Kevlar stitch threads with the best degree of the twist are confirmed by the experimental results.

Key words: Kevlar stitch threads; degree of twist; stitched composites; mechanical performance

缝合技术是指采用缝合线,使二维织物构成三维立体织物或使织物连接成整体结构的技术^[1]。缝合织物增强复合材料具有优良的层间性能和抗冲击损伤容限且成本低等特性,目前在国内外受到航空航天界的高度重视。缝合过程中使用的缝线不但要求具有高强度、一定的可延伸性和耐磨损性,而且其性能不受复合材料固化的影响。缝合常用的缝线有 Kevlar、玻璃、涤纶、热塑料和碳纤维线。其中 Kevlar 纤维由于其特殊的耐磨性、良好

的抗冲击韧性和较低的纤维密度,在缝合过程中应用最多^[2]。

纱线需要通过加捻成缝线,使其更紧密结合并成为圆形截面,这样就易于穿过针眼且具有良好的耐磨损性。但纱线加捻成缝线后,其渗透率、断裂伸长率和拉伸强度等均会受到影响。本文从实验出发主要研究了不同捻度的 Kevlar 缝线的渗透率,断裂伸长率及对缝合件复合材料力学性能的影响。

收稿日期:2017-05-15;**修订日期:**2017-06-20

通信作者:杨龙英,女,高级工程师,E-mail:yangly0818@163.com。

引用格式:杨龙英,龚家谦. Kevlar 缝线捻度影响缝合复合材料力学性能的研究[J]. 南京航空航天大学学报,2017,49(S):51-55. YANG Longying, GONG Jiaqian. Effect of degree of twist of Kevlar stitch threads on mechanical performance of stitched composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2017,49(S):51-55.

1 实验

1.1 不同捻度缝线渗透率测试

为研究不同捻度 Kevlar-29 缝线的渗透率,分别选取捻度为 20,50,80,150 捻/m 的缝线。Kevlar-29 缝线为美国杜邦公司生产,采用锁式缝合,缝合针距 5 mm,缝合行距 5 mm,在 T700-12 k 双轴向经编织物上进行缝合,缝合织物的铺层顺序为 [45/-45/0/90]₄s,制备不同捻度 Kevlar-29 缝线的缝合预成型体。采用以下方法测试不同捻度缝线预成型体渗透特性及压缩特性,将预成型体置于真空袋中,记录不同压力下的织物的厚度变化,从而表征织物的压缩特性;测量真空下 6421 双马树脂充模流动过程中,树脂浸润预成型体距离随时间的变化可以表征织物的渗透特性,由此确定缝线种类对渗透特性和压缩特性的影响规律。6421 双马树脂为中航复合材料有限公司生产,此外测试还使用了面密度为 260g/m² [45/-45]T700-12k 双轴向经编织物,为南京玻璃纤维研究院制。

1.2 捻度对缝线断裂伸长率的影响实验

缝合过程中对缝线进行加捻才能保证缝合工作的正常进行,避免起毛、脱针等现象,但捻度的增加不仅会导致缝合线纤维束浸润困难,还会对缝合线纤维束本身的断裂强力产生影响,进而影响复合材料力学性能,因而本研究捻度对缝线渗透率及断裂强力的影响^[3]。本实验采用捻度分别为 20,50,80,100,200,300 捻/m 的 1000 旦 Kevlar-29 纤维缝合线,测试其断裂强力。

1.3 缝线捻度对复合材料力学性能测试

缝合能提高复合材料的层间性能和抗冲击损伤等力学性能,但不同捻度的缝线对复合材料力学性能的影响不同。本文从拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度三方面研究缝线捻度对复合材料缝合制件力学性能影响。同时在试验中采用了锁式和

链式缝合两种缝合方式,研究不同捻度缝线对不同缝合方式力学性能的影响。

缝合试验件采用 T700-12 k 双轴向经编织物按铺层方式 [45/-45/0/90]₄s 铺叠成平板后,分别使用捻度为 20,50,80 的缝线对复合材料平板进行锁式和链式缝合。锁式和链式缝合方式参见图 1,两种缝合方式均采用面线和底线套扣,缝线不易拆散,不同的是锁式的结在缝合制件的中间,而链式缝合的结在缝合制件的反面,缝线在缝合制件的正反面不同,不对称。平板缝合的针距和行距均为 5 mm,完成缝合后,采用 VARI 工艺成型,树脂体系为 6421 双马树脂。

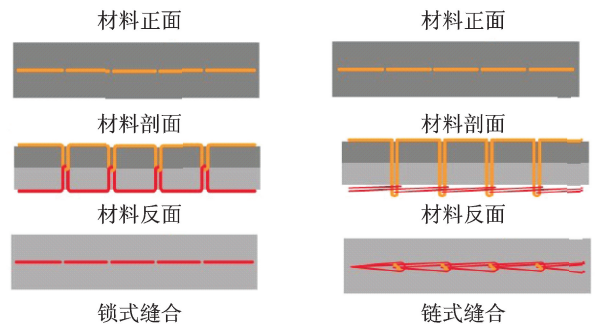


图 1 锁式和链式缝合方式比较

Fig. 1 Comparison of chained stitching and locking-type stitching

参照 ASTM 的测试标准对缝合复合材料进行拉伸、弯曲、层间剪切力学测试;拉伸试验测试参照测试标准 D3039;弯曲试验测试参照测试标准 D7264;层间剪切试验测试参照测试标准 D2344。

2 结果与讨论

2.1 不同捻度缝合线渗透率的研究

表 1 为不同捻度缝线的毛细渗透效应,从表中可以看出,捻度低于 80 捻/m 的缝合线浸润效果优于无捻碳纤维束,捻度高于 100 捻/m 的缝合线浸润效果明显不如无捻碳纤维束。

表 1 不同捻度对缝线(Kevlar-29)毛细渗透效应的影响

Tab. 1 Effect of Kevlar-29 stitch threads with different degrees of twist on permeability

时间/min	上升高度/mm						无捻碳纤维束
	20 捻 · m ⁻¹	50 捻 · m ⁻¹	80 捻 · m ⁻¹	100 捻 · m ⁻¹	200 捻 · m ⁻¹	300 捻 · m ⁻¹	
0	0	0	0	0	0	0	0
10	2	2	2	0	0	0	2
20	2	2	2	0	0	0	2
30	5	5	5	3	3	3	4
60	9	9	9	5	5	5	6
90	10	10	10	5	5	5	6
120	12	13	13	7	7	7	9
150	15	16	15	7	7	7	12
180	20	20	20	7	7	7	12

通过研究不同捻度缝线的浸润特性,结合 SEM 照片(图 2)观测,得出如下结论,捻度低于 80 捻/m 的缝合线毛细渗透效应较优;捻度低于 200 捻/m 的缝合线表面能较好地浸润树脂,而捻度高于 100 捻/m 时缝合线内部单丝浸润效果差;捻度的增加导致缝合线浸润效果变差,但缝合线捻度过低会在缝合过程中引起脱针、起毛现象。

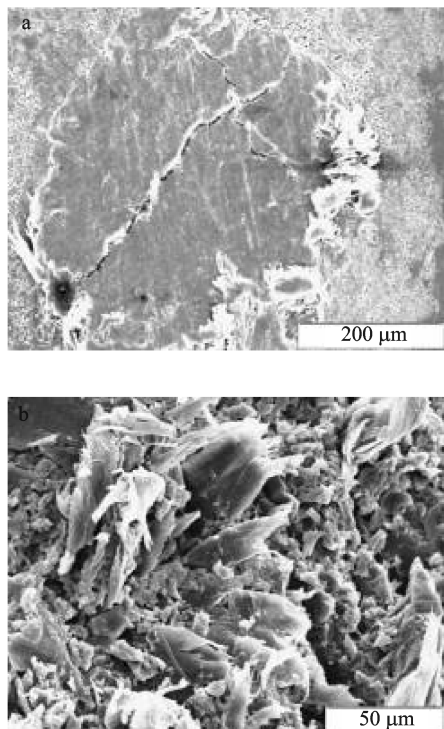


图 2 捻度为 100 捻/m 的 Kevlar-29 缝线纤维束及内部单丝 SEM 照片

Fig. 2 SEM pictures of Kevlar-29 stitch threads with 100 twist and the inside of yarn

2.2 捻度对缝线断裂强度的影响

不同捻度缝线的断裂强度值参见图 3。从图 3 可以看出,随着捻度的增加,缝合线断裂强度先上升后下降。当捻度低于 80 捻/m 时,缝合线断裂强度随着捻度的增加而上升。这是因为捻度低于 80 捻/m 时,当受到外力作用时,缝合线纤维束内单丝与单丝之间没有介质,缝合线纤维束外部单丝只是依靠较低的扭转缠绕传递很小的一部分力至内部单丝^[4]。随着捻度的增加,缝合线单丝扭转缠绕程度增加,表面单丝传递给内部单丝的力也随之增加,内部单丝承载作用增加,因而缝合线纤维束断裂强度随着捻度的增加而上升。当捻度大于 80 捻/m 时,随着捻度的增加,虽然缝合线纤维束内部单丝承载作用随之增加,但单丝与缝合线纤维束受力方向的夹角增加,这一副作用占主导作用,是影响缝合线断裂强度的主要因素,根据力的直角三角形分力原理,单丝与缝合线纤维束受力方向的

夹角增加,纤维有效承载能力降低,缝合线断裂强度下降^[5]。因而缝合线断裂强度随捻度的增加先上升后下降。

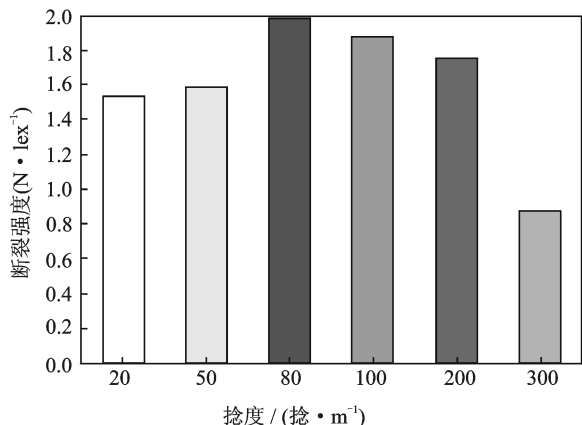


图 3 不同捻度缝合线断裂强度

Fig. 3 Breaking strength of stitch threads with different degrees of twist

2.3 缝线捻度对复合材料力学性能的影响

2.3.1 拉伸性能

不同捻度缝线在链式和锁式两种不同缝合方式中对缝合复合材料拉伸性能的影响如图 4 所示。

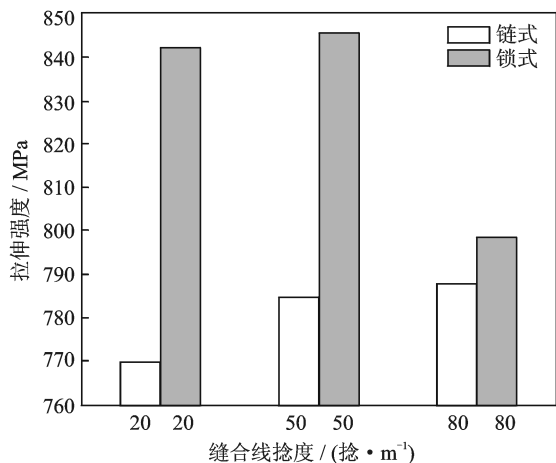


图 4 缝线捻度对复合材料拉伸性能的影响

Fig. 4 Effect of stitch threads with different degrees of twist on tensile property

从图 4 可以看出,随着缝合线捻度增加,链式缝合复合材料板拉伸性能有所提高,但提高幅度不显著;而锁式缝合复合材料拉伸性能降低。缝合线捻度的变化对拉伸性能的影响不规律,主要由两个因素竞争导致。首先,缝合线捻度增加,缝合线自身回缩的张力增加,对外部牵引力抵抗增加。因而随着缝合线捻度的增加,缝合线受到的实际张力降低,这也会降低缝合织物的变形程度,富树脂区尺寸降低^[6]。从拉伸失效原理推断,富树脂区尺寸的降低会使拉伸性能有一定程度的提高。其次,缝合

线捻度增加,浸润效果下降,缝合线纤维束内部大量单丝没有被浸润,复合材料内部存在着未被充分浸润的区域,当复合材料受到拉伸载荷时,这些缺陷会降低复合材料力学性能^[7]。因而缝合线捻度增加,会产生两个相互竞争的因素。对于链式缝合复合材料,前者是主要因素,因而性能提高;而对于锁式缝合复合材料,后者是主要因素,因而性能下降。

2.3.2 弯曲性能

采用链式缝合,锁式缝合两种不同缝合方式,不同捻度对缝合复合材料弯曲性能的影响结果如图5所示。

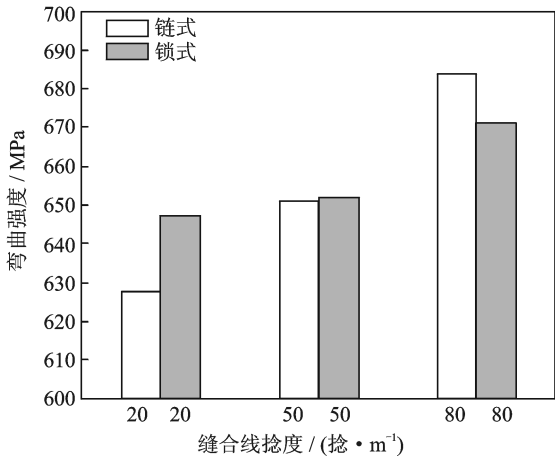


图5 缝合线捻度对复合材料弯曲性能的影响

Fig. 5 Effect of stitch threads with different degrees of twist on bending property

从图5可以看出,随着织物缝合线捻度的增加,缝合复合材料弯曲性能上升。从前期实验工作不难看出,当试样受到弯曲载荷时,这些在受压表面及受拉表面存在的,由缝线张力导致的复合材料富树脂区首先产生裂纹并向其他富树脂区扩展,直至最后失效。缝合线捻度增加,缝合线自身回缩的张力增加,对外部牵引力抵抗增加,因而随着缝合线捻度的增加,缝合线受到的实际张力降低,这也会降低缝合织物的变形程度,富树脂区尺寸降低,从弯曲性能破坏模式可以看出,富树脂区尺寸降低,缝合织物弯曲性能必然升高^[8]。因而缝合线捻度增加,弯曲性能上升。

2.3.3 层间剪切强度

图6显示了链式缝合和锁式缝合两种不同缝合方式,捻度对缝合复合材料层间剪切强度的影响结果。从图6可以看出,与捻度对复合材料弯曲性能影响规律相反,缝合复合材料层间剪切强度随缝合线捻度的增加而降低。这是由以下原因导致,缝合线捻度增加,浸润效果下降,缝合线纤维束内部大量单丝没有被浸润,复合材料内部存在着大量未

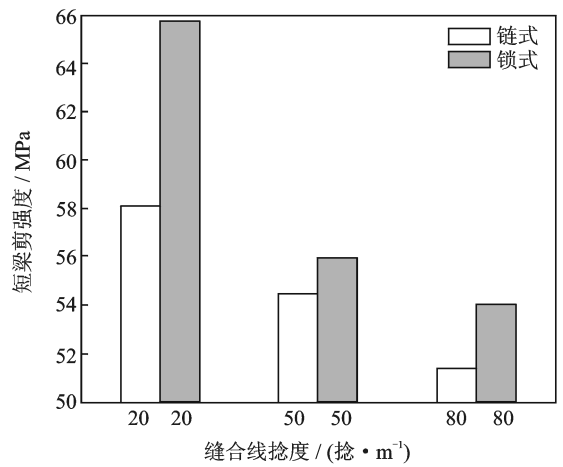


图6 缝合线捻度对复合材料层间剪切强度的影响

Fig. 6 Effect of stitch threads with different degrees of twist on interlaminar shear property

被充分浸润的区域,且缝合线准直度降低,当复合材料受到层间载荷时,层间传递载荷效率降低,这些区域成为复合材料失效的起始点,降低了复合材料层间剪切强度。

3 结 论

通过上述实验结果与讨论,得出以下结论:

- (1) Kevlar 缝线的渗透率随着捻度的不同发生变化,捻度小于 80 捻/m 的缝线渗透率较佳。
- (2) 80 捻/m 的 Kevlar 缝线的断裂强度最高。
- (3) 在链式缝合中,使用 80 捻/m 的 Kevlar 缝线制备的复合材料试验件具有最高的拉伸强度和弯曲强度,而 20 捻/m 的 Kevlar 缝线对复合材料层间剪切强度影响最大。
- (4) 在锁式缝合中,50 捻/m 的 Kevlar 缝线对复合材料拉伸强度影响最大,80 捻/m 的 Kevlar 缝线制备的复合材料试验件具有最高弯曲强度,而 20 捻/m 的 Kevlar 缝线能最大程度提高复合材料层间剪切强度。

综上所述,在缝合过程中使用 80 捻/m 的 Kevlar 缝线缝合效果最佳,并且能最大程度地提高复合材料的力学性能。

参考文献:

- [1] 陈绍杰,梁晶红. 三维编织复合材料结构的发展与应用[J]. 航空制造工程,1994(4):33-34.
CHEN Shaojie, LIANG Jinghong. The development and application of three-dimensional woven composite structure[J]. The Engineering of Aeronautical Manufacture, 1994(4):33-34.
- [2] 焦亚兰,李嘉禄. 三维编织复合材料的制造工艺和性能特点[J]. 产业用纺织品,1998,16(2):26.

- JIAO Yalan, LI Jialu. The manufacture technique and characteristic of three-dimensional woven composite[J]. *The Textile in Industry*, 1998, 16(2):26.
- [3] 简抗抗,张佐光,顾轶卓,等. 不同纤维堆积状态下饱和和渗透率实验研究[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(1):32-36.
- JIAN Kangkang, ZHANG Zuoguang, GU Yizhou, et al. Experimental research of saturated permeability with different fiber satching states[J]. *Acta Material Composite Sinica*, 2006, 23(1):32-36.
- [4] 李野,郭稳学,郑锡涛,等. 复合材料缝合结构的力学性能及湿热效应[J]. *结构强度研究*, 2002, 15(2):9-13.
- LI Ye, GUO Wenxue, ZHENG Xitao, et al. Mechanical properties and hygrothermal effects of stitched composites[J]. *Structure and Strength Research*, 2002, 15(2):9-13.
- [5] 王春敏,董娟,董孚允,等. 缝合复合材料的力学性能[J]. *纤维复合材料*, 2001, 19(1):18-20.
- WANG Chunmin, DONG Juan, DONG Fuyun, et al. Mechanical properties of stiched composites[J]. *Fiber Composites*, 2001, 19(1):18-20.
- [6] 吴得隆,沈怀荣. 纺织结构复合材料的力学性能[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1998.
- WU Delong, SHEN Huairong. The mechanical properties of woven structure composites[M]. Changsha: Journal of National University of Defense Technology, 1998.
- [7] 张佐光,李敏,孙志杰,等. 单向纤维集束的树脂浸润影响因素[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(10):934-938.
- ZHANG Zuoguang, LI Min, SUN Zhijie, et al. Factors affecting the wicking of epoxy resin in capillaries of unidirectional fiber[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(10):934-938.
- [8] 程小全,赵龙. 缝合复合材料可用性-简单层合板的基本性能[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003(11):1002.
- CHEN Xiaoquan, ZHAO Long. The availability of stitched composites-the properties of simple lamination[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003(11):1002.