

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.04.018

二维三轴编织复合材料的开孔静力学性能及失效行为

苑晓洁^{1,2}, 陈旭^{1,2}, 肖志远¹, 蔡焯梦¹, 孙树凯¹, 马俊祥¹

[1. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300; 2. 中航复材(北京)科技有限公司, 北京 101300]

摘要: 为考察典型二维三轴编织复合材料(2DTBC)在开孔条件下的静力学性能及失效机理,采用机器人辅助二维三轴编织及真空树脂灌注工艺成型制备了2DTBC试样,并分别考察了其在开孔拉伸(OHT)、开孔压缩(OHC)、单钉单剪(SBS)及单钉双剪(SBD)四种典型开孔静力测试下的力学响应及失效行为。结果表明:较传统层合板而言,2DTBC的开孔性能保持率显著提高,轴向及横向开孔拉伸强度保持率分别达到94.77%和96.88%,轴向及横向开孔压缩强度保持率分别达到93.25%和82.74%。OHT试样的失效模式表现为纤维束断裂、纤维束拉拔损伤、基体破坏和界面分层损伤。OHC试样的失效模式表现为纤维束屈曲失效、分层损伤和基体破坏。SBS及SBD试样的失效模式主要表现为螺钉连接处的分层、纤维束开裂及基体破坏,且试样在达到载荷峰值后没有立即失效,表现出了较好的能量吸收能力。

关键词: 二维三轴编织复合材料; 开孔性能; 失效模式

中图分类号: TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)04-0119-06

Open-Hole Static Properties and Failure Behaviors of Two-Dimensional Triaxial Braided Composites

Yuan Xiaojie^{1,2}, Chen Xu^{1,2}, Xiao Zhiyuan¹, Cai Yemeng¹, Sun Shukai¹, Ma Junxiang¹

[1. AVIC Composite Co., Ltd., Beijing 101300, China; 2. ACC (Beijing) Science and Technology Co., Ltd., Beijing 101300, China]

Abstract : In order to investigate the statics properties and failure mechanism of typical two-dimensional triaxial braided composite (2DTBC) under open hole conditions, samples were prepared by robot-assisted two-dimensional triaxial braided composites and vacuum resin perfusion process. The mechanical responses and failure behaviors were investigated under four typical open-hole static tests, namely, open-hole tensile test (OHT), open-hole compression test (OHC), single bolted single shearing test (SBS) and single bolted double shearing test (SBD). Results show that compared with the traditional laminates, 2DTBC has significantly improved the retention rate of strength after opening hole. The retention rates of axial and transverse open hole tensile strength were 94.77% and 96.88%, and the retention rates of axial and transverse open hole compressive strength were 93.25% and 82.74%, respectively. The failure modes of OHT samples are fiber bundle fracture, fiber bundle pulling damage, matrix failure and interface delamination damage. The failure modes of OHC samples include buckling failure of fiber bundles, delamination damage and matrix failure. The failure modes of SBS and SBD samples are mainly manifested as delamination of screw joints, fiber bundle cracking and matrix destruction. Moreover, the sample does not fail immediately after reaching the peak load, showing good energy absorption capacity.

Keywords : two-dimensional triaxial braided composite ; performance after holing ; failure mode

对于提高结构损伤容限而言,纺织复合材料是一种具有巨大潜力的候选复合材料种类。随着飞机预期使用寿命的增加,对航空结构进行损伤设计变得尤为重要。相比于层合板复合材料而言,纺织复合材料特殊的结构增强了贯穿厚度,这有利于防

止损伤的扩展^[1-3]。除了预期的高损伤容忍度外,纺织复合材料结构还可以根据制件的几何形状及大小实现量身定制,以适应不同结构的强度和刚度要求。它们还在材料结构和净形状几何等方面提供了诸多选择,并提高了复合材料的可加工性。

通信作者: 苑晓洁, 硕士, 主要研究方向为树脂基复合材料

收稿日期: 2023-02-11

引用格式: 苑晓洁, 陈旭, 肖志远, 等. 二维三轴编织复合材料的开孔静力学性能及失效行为[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 119-124.

Yuan Xiaojie, Chen Xu, Xiao Zhiyuan, et al. Open-hole static properties and failure behaviors of two-dimensional triaxial braided composites [J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 119-124.

此外还可以通过改变纤维和树脂的种类、比例和纺织单元结构来优化材料性能。典型的纺织复合材料包括缝合^[4]、针织^[5]、2D和3D编织^[6-7]、机织^[8]预制体等类型。其中,二维三轴编织(2DTBC)因其具有较高的自动化制造程度、灵活的可设计性、能够实现异型筒体结构的近净成型及低成本制造等优势,在F1赛车头锥、螺旋桨和GEnx发动机包容机匣等领域均取得了应用,有望在更多领域替代层合板复合材料^[9]。

关于2DTBC的性能表征国外学者在1993年就有相关报道,例如Master等^[10]对具有不同编织角2DTBC的轴向和横向拉伸性能进行了试验测试,但受限于当时的试验测试条件,并未对材料的失效模式和破坏机理展开深入研究。Naik等^[11]设计了2DTBC的剪切试验,对材料的剪切模量进行了测试。Falzon等^[12]对不同编织角的2DTBC进行了拉伸、压缩和剪切试验,并通过与纤维束拉伸测试结果的对比,分析了编织结构造成的纤维束弯曲以及成型过程造成的纤维损伤对材料强度的影响。国内方面,刘鹏等^[13]系统研究了二维三轴编织复合材料损伤演化过程及压缩破坏机理,提出了轴向及横向受载下不同的失效形式。张雄等^[14]研究了编织角、碳纤维混纱与混编对玻-碳纤混编2DTBC对复合材料力学性能影响。杨伟丽等^[15]对玄武岩纤维2DTBC的弹性性能进行了研究,并在汽车发动机罩外板进行了应用验证。朱露露等^[16]研究了不同层数二维三轴编织铺层复合材料进行机械开孔后的弯曲性能变化,并对其失效行为进行了分析,研究结果表明,材料弯曲破坏试验中表现的主要破坏模式为纤维断裂、基体开裂以及纤维脱黏,开孔对周围的影响范围主要为距孔边缘1~2 mm内。但针对2DTBC开展开孔拉伸/压缩及单钉剪切性能研究的文献较少。

在实际应用中,复合材料零部件需要与其他零部件连接,其中机械连接是使用最普遍的一种,机械连接需要开孔,而开孔会直接影响复合材料零部件的性能。因此,笔者在试验的基础上探究了国产碳纤维2DTBC在开孔前后轴向及横向拉伸及压缩力学性能变化,并同时考察了其单钉单剪及单钉双剪性能及其失效模式,讨论了其破坏机理,为后续2DTBC材料的结构设计提供了参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维:HF30 F, 12K及24K,拉伸强度4 900 MPa,拉伸弹性模量230 GPa,江苏恒神股份有限公司;

螺栓:30CrMnSi合金钢,河北峰领紧固件制造有限公司;

环氧树脂:Hansort 2128,密度1.204 g/cm³,浇注体拉伸强度82 MPa,杨氏模量3.5 GPa,天津汉硕高新材料有限责任公司。

1.2 仪器及设备

6轴机器人辅助二维编织系统:264锭,RF1-176型,德国HERZOG公司;

注胶机:Pistol型,树脂容量60L,法国ISO公司;

烘箱:G-9145 A型,容量145L,上海一恒科学仪器有限公司;

万能力学试验机:PLD250型,量程250 kN,美国INSTRON公司;

静态电阻应变仪:DH3815型,江苏东华测试技术有限公司。

1.3 试样制造工艺

2DTBC料预制体通过6轴机器人辅助二维编织系统完成编织,其中编织纱采用12K碳纤维,轴向纱采用24K碳纤维,控制编织角 $\alpha=68.5^\circ$,轴向纱所占比例为50%,预制体编织过程如图1所示。

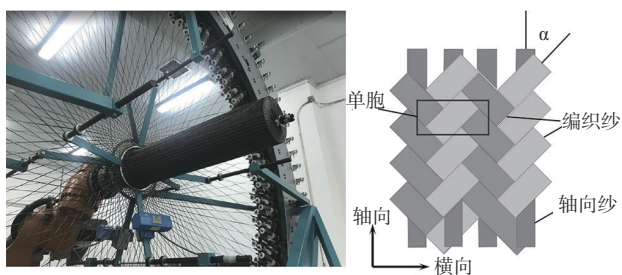


图1 2DTBC试样编织预成型过程及试样结构示意图

完成编织后的试样按照无嵌套方式6层堆叠到一起,通过真空辅助树脂灌注(VARI)工艺进行浸渍并最终在80℃下固化4 h成型,经脱模及后续机械加工及装配得到待测试样,记为 $[0_{24K}/\pm 68.5_{12K}]_6$,经对试样进行马弗炉烧蚀后,使用碳纤维密度1.78 g/cm³及树脂密度1.18 g/cm³计算得到复合材料的平均纤维体积分数为55.4%。

1.4 测试及表征方法

试样无缺口及开孔拉伸性能参考标准 ASTM

D3039-2017 及 ASTM D5766-2017 执行,试样无缺口及开口压缩性能参考标准 ASTM D6641-2017 及 ASTM D6484-2017 执行,由于二维三轴编织复合材料的单胞较大,在设计试样时为了保证宽度方向上至少具有两个单胞,直边拉伸及压缩试样的宽度取为 (36 ± 0.36) mm,开孔直径为 (6 ± 0.065) mm。单钉单剪及单钉双剪连接强度参考 ASTM D5961-2017 标准执行,其试样示意如图 2 及图 3 所示。其中灰色填充区域表示垫块, s 表示垫块的长度,垫块的尺寸取为 75 mm×36 mm×4.5 mm。为便于讨论,无缺口拉伸、压缩、开孔拉伸、压缩及单钉单剪和单钉双剪试样分别编号为 T, C, OHT, OHC, SBS 及 SBD,并用 1 和 2 代表试样的受力方向为轴向及横向。试样编号及对应长度见表 1、表 2。

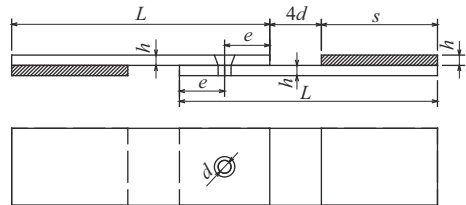


图2 SBS 试样示意图

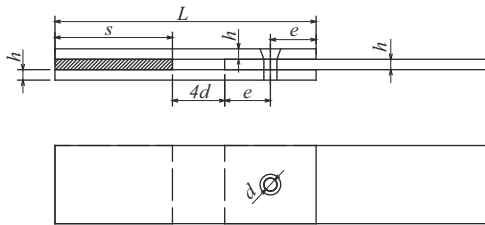


图3 SBD 试样示意图

表 1 2DTBC 试样编号及对应长度

试样编号	长度/mm	试样编号	长度/mm
T1	250±0.5	OHC1	250±0.5
T2		OHC2	
OHT1	300±0.5	SBS1	135±0.5
OHT2		SBS2	
C1	150±0.5	SBD1	
C2		SBD2	

注:所有试样的结构参数为铺层数 6;编织角 68.5±1°;宽度 36±0.36 mm;厚度 4.5±0.45 mm。

2 结果与讨论

2.1 开孔前后拉伸性能对比及失效形式分析

轴向及横向无缺口及开孔试样的拉伸载荷-位移曲线如图 4 所示,所有试样均表现出较为明显的脆性失效行为,在所有试样被破坏前,试样表面基本观察不到损伤,一旦达到峰值应力,试样迅速破坏。除此之外,可以看出在编织角为 68.5°的条件

表 2 2DTBC 开孔前后静力测试性能结果

序号	性能	平均值	标准差
1	无缺口轴向拉伸强度/MPa	339.50	4.06
2	开孔轴向拉伸强度/MPa	321.73	3.07
3	无缺口轴向拉伸弹性模量/GPa	30.59	1.02
4	开孔轴向拉伸弹性模量/GPa	28.79	1.19
5	无缺口横向拉伸强度/MPa	545.46	28.80
6	开孔横向拉伸强度/MPa	528.44	16.65
7	无缺口横向拉伸弹性模量/GPa	92.29	1.89
8	开孔横向拉伸弹性模量/GPa	90.10	1.30
9	无缺口轴向压缩强度/MPa	244.71	9.60
10	开孔轴向压缩强度/MPa	228.20	3.69
11	无缺口轴向压缩弹性模量/GPa	28.18	0.52
12	开孔轴向压缩弹性模量/GPa	17.99	0.23
13	无缺口横向压缩强度/MPa	342.84	19.89
14	开孔横向压缩强度/MPa	283.70	28.60
15	无缺口横向压缩弹性模量/GPa	81.02	6.79
16	开孔横向压缩弹性模量/GPa	28.49	7.06
17	轴向单钉单剪强度/MPa	558.86	25.87
18	横向单钉单剪强度/MPa	587.12	16.16
19	轴向单钉双剪强度/MPa	418.81	23.31
20	横向单钉双剪强度/MPa	385.20	9.48

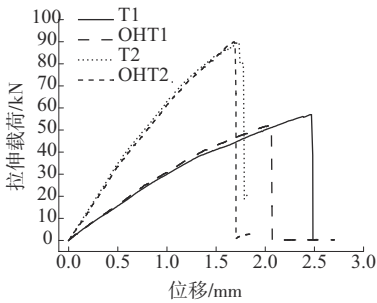
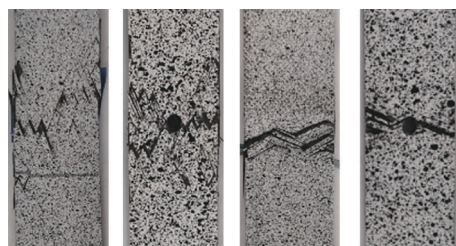


图 4 开孔前后 2DTBC 试样的拉伸载荷-位移曲线

下,无缺口及开孔试样横向方向上的拉伸强度及模量均高于对应轴向方向试样的结果,表明横向方向上两组偏轴纤维的承载能力更高。对比 T1 与 OHT1 及 T2 和 OHT2 试样,可以看出在试样断裂前其拉伸曲线重合程度较高,表明在文中 6 mm 的开孔尺寸并不会对该 2DTBC 的承载性能产生显著影响,对比表 2 所示的拉伸强度数据,轴向及横向方向 2DTBC 开孔后的拉伸强度保持率可达 94.8% 及 96.9%,拉伸弹性模量保持率则分别为 94.1% 和 97.6%。

图 5 所示的试样拉伸失效照片可以看出,对于无缺口试样,试样表面的裂纹沿偏轴纤维束方向扩展止于轴向纤维束,表明了该体系的复合材料具有良好的止裂性能,试样最终的破坏模式涉及纤维束断裂、基体失效和分层损伤。开孔试样拉伸试验的破坏区域都位于开孔槽附近,这是由于开孔造成的孔隙应力集中导致的;其裂纹扩展与无缺口平板试



a—T1;b—OHT1;c—T2;d—OHT2

图5 开孔前后2DTBC试样拉伸失效后的照片

样轴向拉伸基本一致,沿着偏轴纤维束扩展而止于轴向纤维束,在自由边界具有明显的纤维束拉拔失效行为,其最终的失效模式表现为纤维束断裂、纤维束拉拔损伤、基体破坏和界面分层损伤。

2.2 开孔前后压缩性能对比及失效形式分析

轴向及横向无缺口及开孔试样的压缩载荷-位移曲线如图6所示,该结果与拉伸测试结果类似,不论开孔与否,横向试样表现出更高的压缩强度及模量。

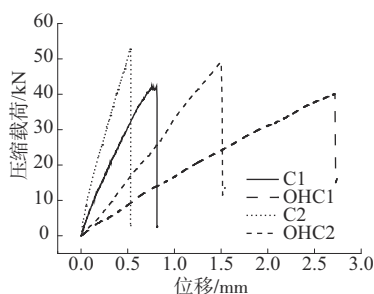
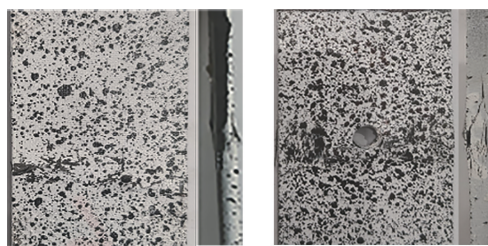


图6 开孔前后2DTBC试样的压缩载荷-位移曲线

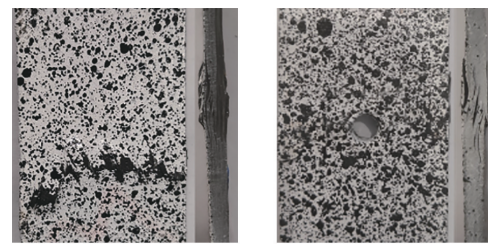
结合表2的测试数据,开孔后试样的轴向及横向压缩强度的保持率分别为93.3%和82.7%。与拉伸测试不同的是,开孔后试样的压缩弹性模量却出现了明显的降低,其轴向及横向的压缩弹性模量保持率分别为63.8%和35.2%,且开孔后试样在压缩破坏前的位移量较无缺口试样增加,这主要是由于开孔试样压缩过程中孔周边的纤维束在压缩载荷下首先产生屈曲,而后随载荷的不断增大,基体内部裂纹逐步扩展导致纤维分层及屈曲程度不断加深直至发生断裂破坏。这也可以从图7所示的试样失效照片中得到印证,可以观察到开孔试样破坏段的侧面出现了较为严重的分层失效行为,由此可以推测试样的失效模式主要表现为纤维束屈曲失效、分层损伤和基体开裂损伤,这主要是由开孔槽边缘孔隙应力集中导致。

2.3 单钉单剪性能及其失效形式分析

2DTBC试样的轴向及横向单钉单剪测试载荷-



a—C1;b—OHC1;c—C2;d—OHC2



a—C1;b—OHC1;c—C2;d—OHC2

图7 开孔前后2DTBC试样压缩失效后的照片

位移曲线如图8和图9所示,为便于分析其破坏趋势,图中的轴向及横向测试均列出了三个平行试样的测试数据。从图中可以看出,SBS1和SBS2对应的3个试样的测试重复性均良好。表2的强度测试结果表明试样的横向强度略高于轴向,对轴向测试的试样来说,力-位移曲线在初始阶段就存在一定非线性,试样在峰值前后,存在一个明显的平台段,平台段对应的位移量在2~5 mm范围内。从图10所示的试样失效后照片中可以看出,试样在螺钉连接处存在十分严重的分层和纤维束开裂现象,能明显观察到试样产生了较为显著的断裂和弯曲。对于横向测试的试样来说,在初始阶段存在较短的平台

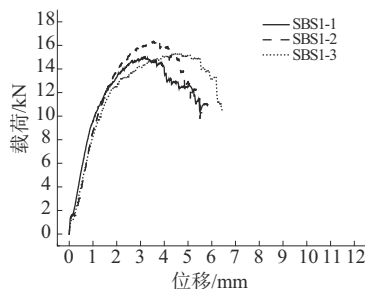


图8 2DTBC材料轴向单钉单剪测试载荷-位移曲线

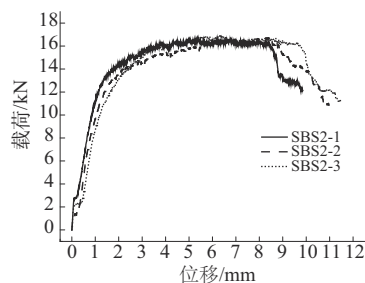


图9 2DTBC材料横向单钉单剪测试载荷-位移曲线

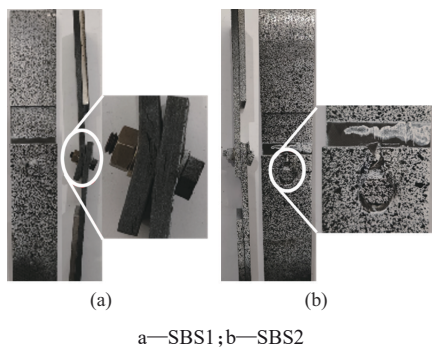


图10 2DTBC材料轴向及横向单钉单剪测试后试样照片

段,这是由于螺钉和试样之间的接触缝隙导致的,随后快速增大至峰值载荷,而在峰值载荷后存在与SBS1类似的平台区,但其位移量在更长的6~9 mm范围,表明在编织角 68.5° 条件下,与受力方向夹角更大的偏轴纤维束在横向拉伸剪切过程中产生的挤压变形量更大。从图9中可以观察到两片复合材料试样板材的端部出现纤维束开裂,其分层损伤并没有SBS1试样严重,结合力-位移曲线峰值后的损伤演化阶段来看,试样在峰值后还存在一定的承载能力,体现出了较好的能量吸收效果。

2.4 单钉双剪性能及其失效形式分析

较单钉单剪而言,单钉双剪没有面外弯曲载荷的作用,可视为孔边纯挤压受力模式,2DTBC单钉双剪载荷-位移曲线如图11和图12所示,为便于分析其破坏趋势,图中的轴向及横向均列出了三个平行试样的测试数据。可以看出,对于SBD1试样而言,其载荷-位移曲线在初始阶段就存在明显的非线性,在达到峰值后,载荷均立即大幅下降,失效位移在3 mm左右。而SBD2试样在初始阶段存在很短的线性段,在线性段后力-位移曲线存在较长的非线性上升段;试样的峰值强度在379 MPa和396 MPa之间,略低于横向试样;在载荷达到峰值后试样载荷有小部分降低,但随后保持稳定并维持0.5~1.5 mm位移范围的高应力平台段,说明该试样吸能效果良好。对比SBD1及SBD2的试样破坏形貌(图13),可看出轴向受载的试样在螺钉连接处存在滑移段,但其滑移距离小于横向拉伸试样。中间的复合材料板材破坏导致滑移产生,同时中间板材的侧边和端部都观察到损伤出现,其分层损伤没有横向受载的试样严重,结合载荷-位移曲线断裂后载荷急剧下降来分析,轴向拉伸试样破坏主要是中间板材的纤维断裂导致的;而在外部的两个复合材料板材几乎观察不到损伤。

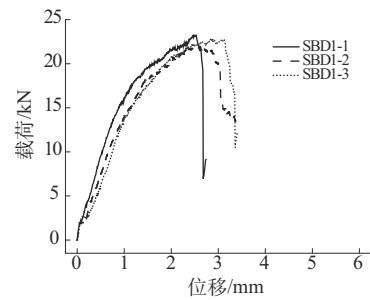


图11 2DTBC材料轴向单钉双剪测试载荷-位移曲线

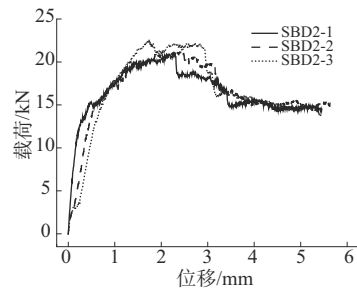


图12 2DTBC材料横向单钉双剪测试载荷-位移曲线

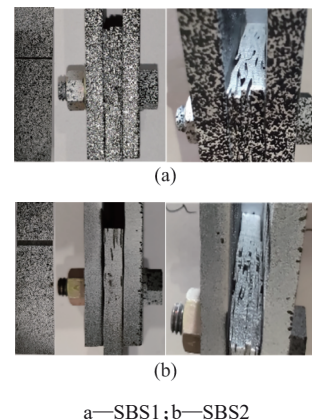


图13 2DTBC材料轴向及横向单钉双剪测试后试样照片

3 结论

(1) 2DTBC复合材料 $[0_{24K}/\pm 68.5_{12K}]_6$ 在6 mm的开孔条件下其轴向与横向拉伸强度及弹性模量保持率均可达94%以上,压缩强度保持率可达80%以上,表现出了较低的缺口敏感性。开孔后的2DTBC试样拉伸失效模式表现为纤维束断裂、自由边纤维束拉拔损伤、基体破坏和界面分层损伤。开孔后的2DTBC试样压缩失效模式为纤维束屈曲失效、分层损伤和基体开裂损伤。

(2) 2DTBC复合材料 $[0_{24K}/\pm 68.5_{12K}]_6$ 在轴向及横向单钉单剪受载过程中都出现了载荷的线性增加段、非线性增加段及较长的平台段,试样在峰值后还存在一定的承载能力,体现出了较好的能量吸收效果。

(3) 2DTBC复合材料 $[0_{24K}/\pm 68.5_{12K}]_6$ 在轴向及横

向单钉双剪受载过程中产生了不同的破坏响应,横向受载的试样由于与受载方向夹角更大的偏轴纤维束在横向拉伸剪切过程中产生的挤压变形量更大,表现出更好的吸能效果。

参考文献

- [1] Bogdanovich A. E. An overview of three-dimensional braiding technologies[J]. *Advances in Braiding Technology*, 2016: 3 – 78. DOI: 10.1016/B978-0-08-100407-4.00001-6.
- [2] Johnston J P, Pereira J M, Ruggeri C R, et al. High-speed infrared thermal imaging during ballistic impact of triaxially braided composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52(25): 3 549–3 562.
- [3] Chiu C H, Tsai K H, Huang W J. Effects of braiding parameters on energy absorption capability of triaxially braided composite tubes [J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 32(21). DOI: 10.1177/002199839803202105.
- [4] Malek, Habak, Kamel, et al. Experimental investigation of drilling damage and stitching effects on the mechanical behavior of carbon/epoxy composites[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture Design Research & Application*, 2014. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2014.06.004.
- [5] 韩帅,段跃新,李超,等.不同针织结构经编碳纤维复合材料弯曲性能[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(5):52–57.
Han Shuai, Duan Yuexin, Li Chao, et al. Bending properties of non-crimp stitched carbon fabric reinforced composites of different knit patterns[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(5):52–57.
- [6] Monnot P, Lévesque J, Laberge Lebel L. Automated braiding of a complex aircraft fuselage frame using a non-circular braiding model [J]. *Compos Part A Appl Sci Manuf*, 2017, 102. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.07.011.
- [7] 吴亚波,江小州,刘帅,等.三维编织复合材料力学性能研究进展[J]. *科技与创新*, 2021(13). DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2021.13.048.
Wu Yabo, Jiang Xiaozhou, Liu Shuai, et al. Research progress on mechanical properties of three-dimensional braided composites[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2021(13). DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2021.13.048.
- [8] 陈利,焦伟,王心淼,等.三维机织复合材料力学性能研究进展[J]. *材料工程*, 2020, 48(8):62–72.
Chen Li, Jiao Wei, Wang Xinmiao, et al. Research progress on mechanical properties of 3D woven composites[J]. *Journal of Material Engineering*, 2020, 48(8):62–72.
- [9] 罗维,程勇,杨永忠,等.基于二维三轴编织的中空筒体复合材料制造技术研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(10):56–60.
Luo Wei, Cheng Yong, Yang Yongzhong, et al. Research on hollow composites fabricated by 2D triaxial braiding technology[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(10):56–60.
- [10] Masters J E. Mechanical Properties of triaxially braided composite experimental and analytical results[J]. *Diseases of the Chest*, 1993, 47(89):167–169.
- [11] Naik R A, Ifju P G, Masters J E. Effect of fiber architecture parameters on deformation fields and elastic moduli of 2D braided composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 1994, 28(7): 656–681.
- [12] Falzon P J, Herszberg I. Mechanical performance of 2D braided carbon/epoxy composites[J]. *Composites Science & Technology*, 1998, 58(2):253–265.
- [13] 刘鹏,郭亚洲,赵振强,等.二维三轴编织复合材料压缩失效行为的细观有限元模拟[J]. *航空学报*, 2019, 40(7):119–133.
Liu Peng, Guo Yazhou, Zhao Zhenqiang, et al. Meso-scale finite element simulation of compressive failure behavior of two-dimensional triaxially braided composite[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(7):119–133.
- [14] 张雄.二维编织结构对复合材料性能影响[D].天津:天津工业大学, 2021.
Zhang Xiong. Effect of two-dimensional braided structure on properties of composites[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2021.
- [15] 杨伟丽.二维三轴编织复合材料宏细观建模及力学性能分析[D].长春:吉林大学, 2021.
Yang Weili. Analysis on macro-micro modeling and mechanical properties of 2D triaxial braided composites[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [16] 朱露露,阎建华,顾海麟.二维三轴编织铺层复合材料开孔前后弯曲性能[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2015, 41(5):589–595.
Zhu Lulu, Yan Jianhua, Gu Hailin. Bending properties of 2-D triaxial braded laminated composites with and without open-holes [J]. *Journal of Donghua University(Natural Science)*, 2015, 41(5): 589–595.