

文章编号 1672-6634(2024)01-0046-06

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2023070001

三维角联锁机织铺层复合材料的开孔拉伸性能

吴宁^{1,2}, 孟影^{1,2}, 朱超^{1,2}, 侯琦琳^{1,2}

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 复合材料研究院
先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387)

摘要 为了研究孔径对三维角联锁机织铺层复合材料拉伸性能的影响, 制备了三种不同孔径的三维角联锁机织铺层复合材料并测试了其拉伸性能, 并利用非接触全场应变测试系统和显微图像分析技术对复合材料进行了表征。结果表明, 在拉伸过程中应变集中区域从孔的周边过渡到左右两侧, 应变累积分变化速率随着孔径的增大而增大。相比于开孔前样品, 6、10、14 mm 三种孔径样品的拉伸强度分别下降了 23.13%、44.47%、50.08%, 开孔试件的模量分别下降了 16.92%、14.93%、22.25%。拉伸破坏包含纱线断裂、纤维拔出、界面脱粘等形式, 其中较大孔径(14 mm)条件下, 断口处分层破坏现象不显著。

关键词 三维角联锁机织铺层复合材料; 孔径; 开孔拉伸性能; 失效模式

中图分类号 TB332

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Tensile Properties of Notched 3D Angle Interlock Woven Layup Composites

WU Ning^{1,2}, MENG Ying^{1,2}, ZHU Chao^{1,2}, HOU Qilin^{1,2}

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials, Institute of Composite Materials, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract In order to study the influence of pore size on the tensile properties of three-dimensional angle interlock woven laminated composites, three kinds of three-dimensional angle interlock woven laminated composites with different pore sizes were prepared and their tensile properties were tested, and the composite material was characterized using a non-contact full field strain testing system and microscopic image analysis technology. The results show that the strain concentration area transited from the periphery of the hole to the left and right sides, and the cumulative strain change rate increases with the increase of the hole diameter. Compared with the samples before the opening, the tensile strength of the samples with 6, 10, and 14 mm pore sizes decreased by 23.13%, 44.47%, and 50.08%, respectively, and the modulus of the

收稿日期: 2023-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802203); 天津市教委科研计划重点项目(2019ZD03); 天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5043)资助

通信作者: 吴宁, 男, 汉族, 博士, 副研究员, 博士生导师, 研究方向: 高性能纤维及织物成形加工中的损伤评价与改善、纺织结构复合材料, E-mail: wuning@tiangong.edu.cn

opened specimens decreased by 16.92%, 14.93%, and 22.25%, respectively. Tensile failure includes yarn breakage, fiber pull-out, and interfacial debonding. However, under larger pore sizes (14 mm), the phenomenon of delamination at the fracture surface was not significant.

Key words 3D angle interlocking woven layer composite material; aperture; tensile properties of opening; failure mode

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料以其强度高、质量轻而广泛应用于航空航天、国防及建筑等领域^[1-4]。由于单层织物厚度的限制(通常小于 0.3 mm),传统层合复合材料只能通过增加铺层层数达到结构件的设计厚度,从而增大了产生分层破坏的风险^[5, 6]。三维角联锁机织复合材料由于层层互连的增强骨架结构而克服了层合复合材料易分层等缺点,可显著增大材料的冲击损伤容限^[7-9]。然而,高厚度三维角联锁机织物的加工成本和整体成型的工艺实现难度也成为制约该方法大规模推广使用的瓶颈^[4]。

三维角联锁机织铺层复合材料(2.5DWLC)结合了立体机织物的整体结构优势和层合复合材料的高效制备特点,采用该方法制备复合材料结构件可显著减少织物层数,并改善整体力学性能。朱超等^[10]探讨了单层厚度对三维角联锁机织铺层复合材料拉伸性能的影响。结果表明,单层厚度的增加有利于材料拉伸性能的提升,2.5D 织物层内经纱吸收了分层能量,有效地阻碍了裂纹扩展。王盼乐等^[11]研究了 2.5D 和 2D 织物混杂铺层复合材料的拉伸性能,结果表明由于 2.5D 较高的单层厚度,拉伸过程中某一层或数层先发生破坏,其余各层仍能有效承受载荷。Song 等^[12]利用中间层短纤维网和三维针刺技术改善了三维角联锁机织铺层复合材料的层间强度,进而提高了整体力学性能。

复合材料结构件在实际使用过程中往往需要通过机械钻孔以满足实际装配的要求,开孔过程造成的层间损伤易导致结构件受力过程中在孔边区域形成应力集中而产生失效^[13-15]。与层合复合材料相比,三维角联锁机织铺层复合材料可通过增大单层织物设计厚度的方式显著减少铺层数量,降低由于开孔加工引起的分层失效的风险。然而,对于三维机织铺层复合材料的开孔拉伸性能及其损伤机制的研究尚未见文献报道。

采用 RTM 工艺制备了三维角联锁机织铺层复合材料,通过机械钻孔方法制备了三种不同孔径的试样,并进行了拉伸性能测试。采用非接触全场应变测试系统(DIC)获取了试样在拉伸过程中的全场应变分布,讨论了开孔试样在不同孔径条件下的孔边应变分布规律;通过显微镜观察,获取其失效后孔边断口区域的形貌,并结合开孔拉伸性能测试结果分析了其失效机制。

1 实验部分

1.1 实验材料及样品制备

织物增强体的原料采用 TG800HX-12K 碳纤维,由山西钢科碳材料有限公司提供,其性能参数见表 1,基体采用单组份 HE502RTM 环氧树脂。图 1 为三种不同孔径三维机织铺层复合材料样品的制备过程示意图。实验铺层采用的三维机织物为 2.5D 经向增强角联机织物,结构如图 1(a)所示,织物的单层厚度为 1.33 mm,记为 2.5DWL_{1.33}C,使用天津工业大学复合材料研究院自主研制织机制备。如图 1(b)所示,采用 RTM 复合成型工艺制备复合材料平板试验件,树脂注射温度设置为 75 ℃,注射时间 1 h,将试样在 180 ℃条件下固化 3 h 后,按照 ASTM-D5766 和 ASTM-D6484 标准切割成如图 1(c)所示尺寸为 300 mm(长)×36 mm(宽)×4 mm(厚)的试验件,并在试件中心钻孔,见图 1(d),孔径(*D*)分别为 6 mm、10 mm 和 14 mm,样品命名为 2.5DWL_{1.33}C-CHD_{*i*}(*i*=6,10,14)。完成钻孔后在试样的两端贴加强片,每种规格制备 5 个试样。最后,在实验开始前使用黑白漆在试样上表面进行喷斑处理,从而在试样上表面形成均匀分布的散斑,见图 1(e)。

表 1 碳纤维结构参数

Table 1 Structural parameters of carbon fiber

Fiber type	Density /(g · cm ⁻³)	Breakage elongation (%)	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa
TG800H-12K	1.79	2.28	5 810	289

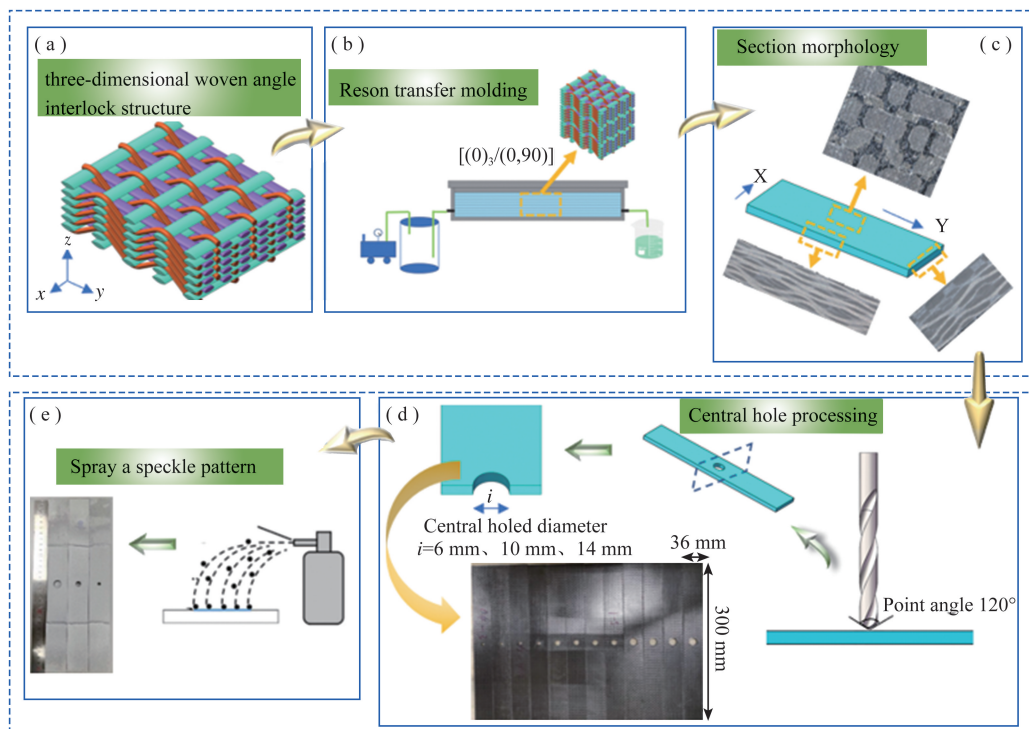


图1 三维角联锁机织铺层复合材料开孔试样制备过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the preparation process of three-dimensional angle interlocking woven laminated composite open-hole samples

1.2 拉伸性能测试

试样的拉伸性能采用岛津 AG-250KNE 万能材料试验机进行测试,图 2 为开孔试样拉伸实验过程示意图;DIC 测量系统主要用于采集开孔试样在拉伸过程中的全场应变分布云图。开孔试样拉伸实验的测试标准主要参照 ASTM-D5766/D5766M-2011,万能材料试验机的加载速度设置为 2 mm/min。

1.3 应力集中和抗拉强度计算

开孔试样在拉伸过程中孔周围局部区域的变形是由应力引起的,应力集中系数与应变集中系数呈正相关。因此,可以通过测量孔边应变集中程度来确定孔边应力集中程度,计算公式为

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma^{\max}}{\sigma^{\infty}}, \quad (1)$$

$$K_{\epsilon} = \frac{\epsilon^{\max}}{\epsilon^{\infty}}, \quad (2)$$

式中 K_{σ} 为应力集中系数, σ^{∞} 为无穷远处施加的应力,孔边缘处

的最大应力值为 $\sigma^{\max}$, K_{ϵ} 为应变集中系数, ϵ^{∞} 为无穷远处施加的应变, $\epsilon^{\max}$ 为孔边缘处的最大应变值。

开孔抗拉强度计算公式为

$$\sigma_t = \frac{F^{\max}}{W \times H}, \quad (3)$$

式中 σ_t 为抗拉强度(MPa), $F^{\max}$ 为最大拉伸载荷(N), W 为试件宽度(mm), H 为试件厚度(mm)。

2 结果与讨论

2.1 拉伸试验过程应变分析

图 3 为三种孔径(6、10、14 mm)三维机织铺层复合材料样品在不同平均应变下的拉伸过程全场应变分

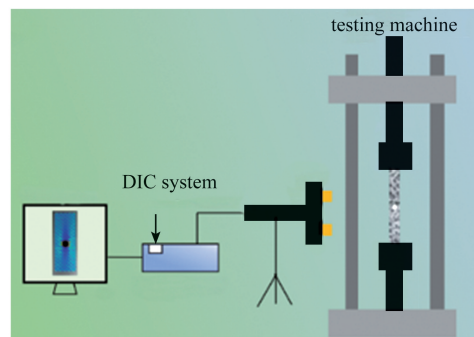


图2 三维机织铺层复合材料开孔拉伸实验过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental process of three-dimensional woven laminated composite with open-hole tension

布图,其中 ϵ 表示全场应变。从图 3 可看出,开孔试样的应变状态呈均匀分布,在加载过程中,三组试样均沿宽度方向出现横纹现象(如图中红色虚线框所示),这是由于应变集中导致相邻纬纱间出现富树脂区,这类区域较易产生变形,且随着载荷的增加而增多。随着加载力的增大,开孔试样孔边开始产生应变集中(如图中黄色虚线框所示),且应变集中首先是从孔周围区域产生逐步聚焦到孔的左右两侧,并且区域越来越密集。试样应变分布主要受开孔尺寸的影响,在同一平均应变水平下,较大孔径的样品首先在孔的两侧产生应变集中,且其分布更加密集。此外,拉伸失效时的极限应变值也随着孔径的增大而减小。

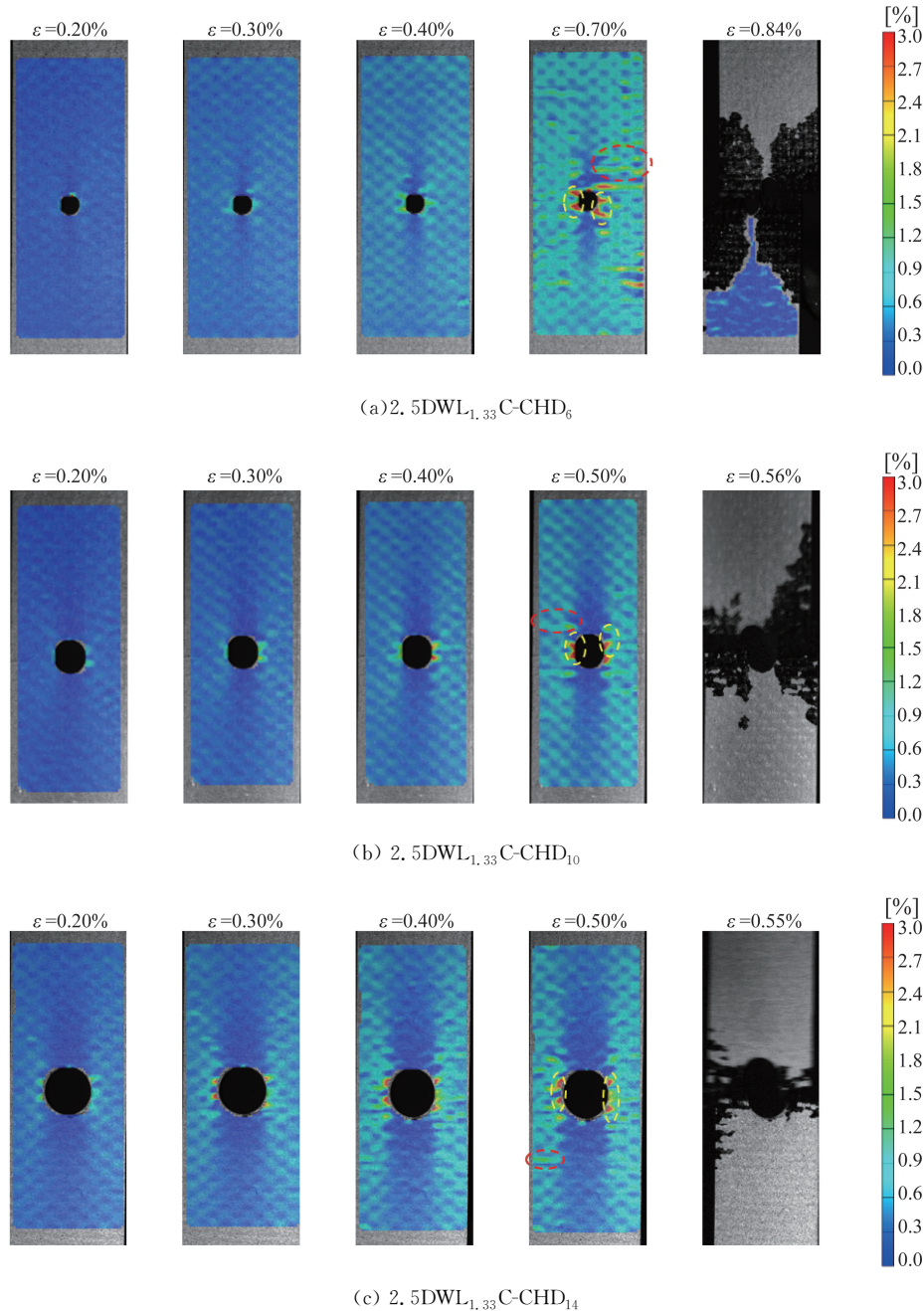


图 3 不同孔径三维机织铺层复合材料拉伸应变云图

Fig. 3 Nephogram of tensile strain of three-dimensional woven laminated composites with different apertures

图 4(a~c)为不同孔径试样最小截面处的应变累积变化示意图,具体测试位置如图 4(d)所示。由图 4(a~c)可知,孔左右两侧的应变差随着加载过程的进行而逐渐增大,应变从开孔边缘向试件外侧扩展呈近似“波浪”状,应变波峰逐渐减小。随着孔径的增大,左右两侧的应变差趋于一致,表明承载更加均匀,且较大孔径样品的应变累计变化速率较快。

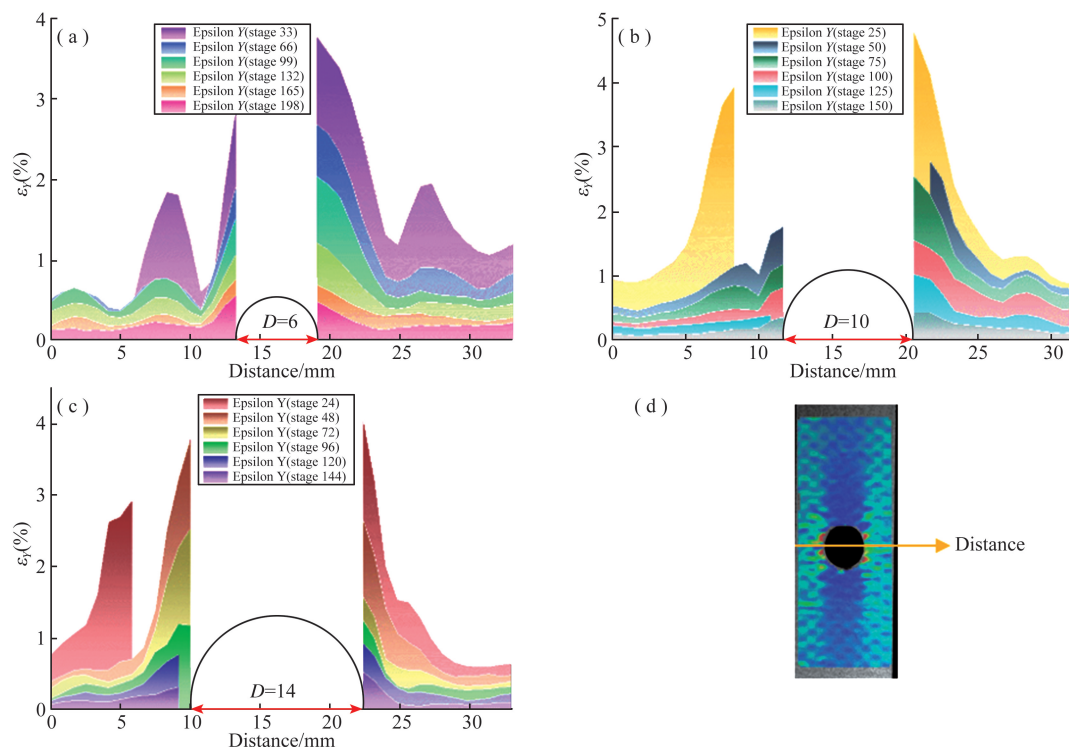


图4 不同孔径 2.5DWL_{1.33}C 最小截面处的应变累计变化

Fig. 4 Cumulative strain changes at the minimum section of 2.5DWL_{1.33}C with different apertures

2.2 孔径对拉伸性能的影响

图 5(a)为不同孔径 2.5DWL_{1.33}C 试样的应力-应变曲线,从曲线的形状来看,材料展现出脆性特征,材料的断裂应力和应变均随孔径增大而减小,这与层合复合材料较为相似。图 5(b)为不同孔径开口板的拉伸模量和强度变化趋势,可以看出,随着孔径的增大,强度几乎呈线性下降,对比于开孔前样品,分别下降 23.13%、44.47%、50.08%,这与开孔后材料有效截面面积成反比。而开孔试件的模量分别下降 16.92%、14.93%、22.25%,表明开孔过程也导致了材料抵抗变形能力的下降,但并未随孔径的增大呈现出线性变化规律。

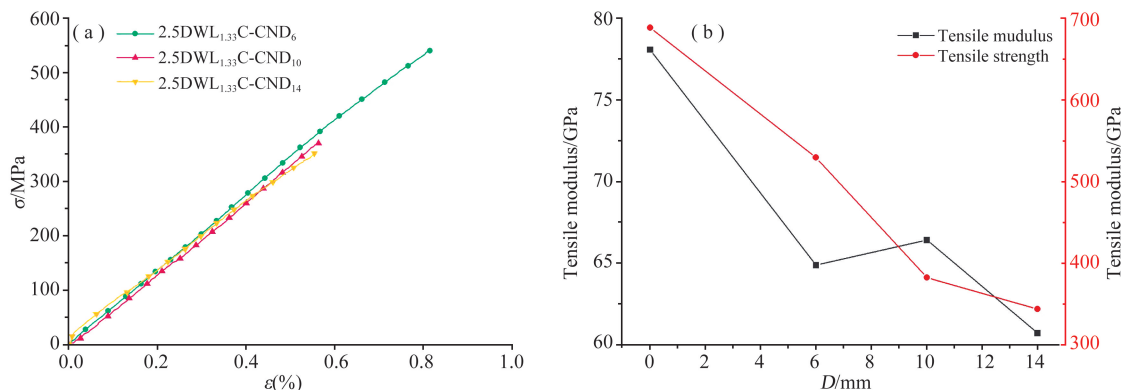


图5 2.5DWL 开孔试样的拉伸力学性能: (a) 应力应变曲线; (b) 拉伸强度及模量

Fig. 5 Tensile mechanical properties of 2.5DWL open-hole specimens: (a) stress-strain curves; (b) tensile strength and modulus

2.3 开孔三维机织复合材料拉伸失效模式

图 6 为不同孔径复合材料样品拉伸失效后的断裂形貌。由图 6 可知,开孔样品的主要破坏形式为纱线断裂、纤维拔出、界面脱粘等。开孔样品的断裂基本上位于孔的中心线位置,符合 2.1 所述应变集中位置。不同开孔尺寸试样断口的宏观形貌相近,主要破坏模式均表现为衬经纱的断裂并伴随着部分纱线的抽拔、接结经纱断裂以及层间开裂等。由于 2.5DWL_{1.33}C-CHD₆ 失效应变最大,在远离孔中心位置仍观察到较大的

基体开裂现象,这种现象在 $2.5\text{DWL}_{1.33}\text{C-CHD}_{10}$ 和 $2.5\text{DWL}_{1.33}\text{C-CHD}_{14}$ 中明显减弱,断口也相对齐整,这表明经纱和衬经纱的断裂较为同步。从侧向断面形貌可观察到,三维机织铺层复合材料出现了明显的分层现象,且随着孔径的增大,分层现象逐渐减弱。

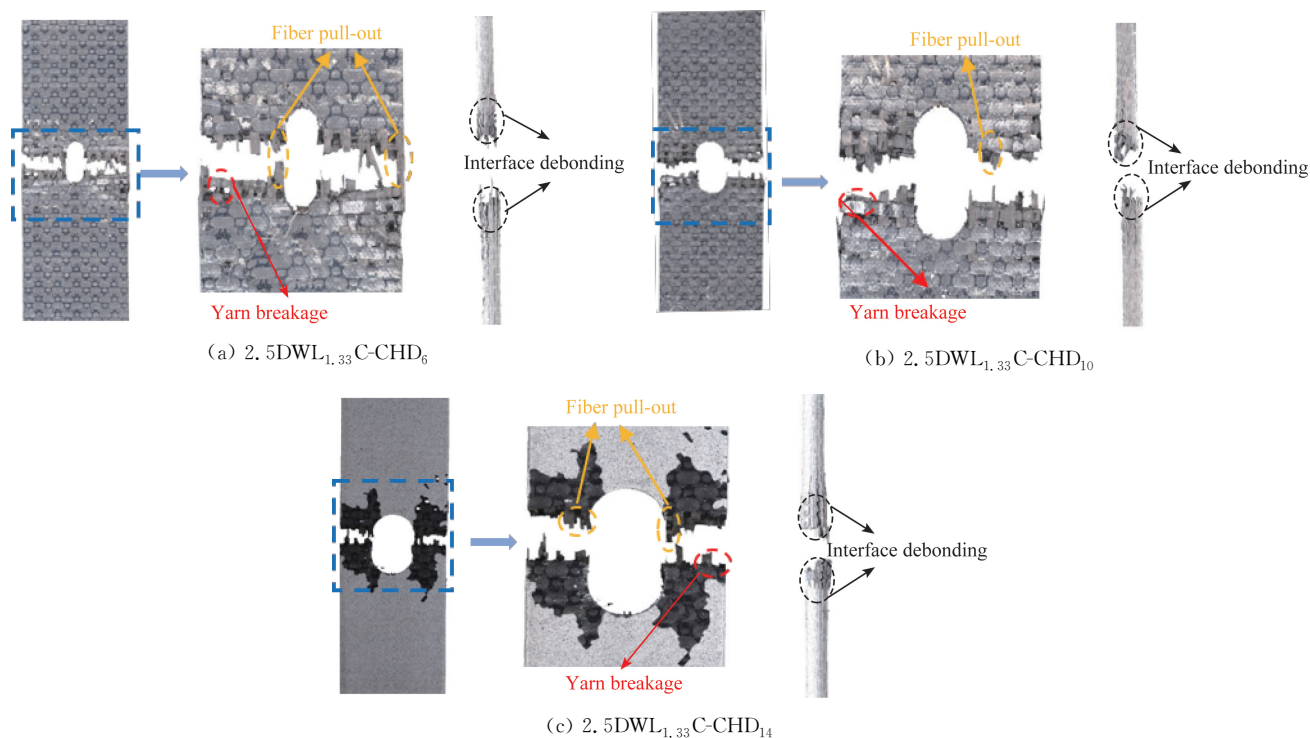


图6 2.5DWL 开孔试样的拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture morphology of 2.5DWL open-hole specimen

3 结论

探讨了孔径对三维角联锁机织铺层复合材料开孔拉伸性能及其失效模式的影响,结论如:(1) 随着加载力的增大,开孔试样孔边开始产生应变集中,且应变集中是从孔周围区域逐步过渡到孔的左右两侧,较大孔径样品的应变累计变化速率较快。(2) 三维角联锁机织铺层复合材料开孔后的拉伸应力—应变曲线呈线性特征,其抗拉强度随着孔径的增大逐渐降低,拉伸模量变化规律不显著。(3) 开孔三维角联锁机织铺层复合材料拉伸断裂的失效模式主要有基体断裂、纱线断裂和纤维拔出。拉伸断裂位于开孔两侧区域,随着孔径的增加断口趋于齐整。

参 考 文 献

- [1] CHAND S. Carbon fibers for composites[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(6): 1303-1313.
- [2] YAO S, JIN F, RHEE K Y, et al. Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: a review[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 142: 241-250.
- [3] SOUTIS C. Fibre reinforced composites in aircraft construction[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(2): 143-151.
- [4] KORKMAZ M, OKUR A, LABANIEH A R, et al. Investigation of the mechanical and forming behaviour of 3D warp interlock carbon woven fabrics for complex shape of composite material[J]. Journal of Industrial Textiles, 2022, 51(3_suppl): 5427S-5465S.
- [5] WICKS S S, DE VILLORIA R G, WARDLE B L. Interlaminar and intralaminar reinforcement of composite laminates with aligned carbon nanotubes[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(1): 20-28.
- [6] BALASUBRAMANIAN M, MADHU S. Evaluation of delamination damage in carbon epoxy composites under swirling abrasives made by modified internal threaded nozzle[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 53(6): 819-833.

(下转第 61 页)

- lytic performance for ciprofloxacin[J]. *Optical Materials*, 2023, 136: 113420.
- [22] JATAV N, SHRIVASTAVA A, KUMAR DE A, et al. Experimental and molecular dynamics investigations on Z-scheme visible light Ag₃PO₄/CuWO₄ photocatalysts for antibiotic degradation[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107975.
- [23] WANG X, CAO Y, JIN Z. Cuboidal Cu₂O nanoparticles dispersed granular Mn_{0.05}Cd_{0.95}S form a p-n heterojunction for efficient photocatalytic hydrogen evolution[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(10): 14959-14970.
- [24] J Ruiz-Fuertes, M N Sanz-Ortiz, J González, et al. Optical absorption and Raman spectroscopy of CuWO₄[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 215(1): 12048.
- [25] YU L, ZHAO X, HE J, et al. High efficient and stable Z-scheme g-C₃N₄/Zn_{0.5}Cd_{0.5}S photocatalyst driven by visible light for hydrogen evolution[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2022, 286: 116062.
- [26] LIU N, YU H, LIU Y, et al. A novel hierarchical S-scheme heterojunction of 0D/3D Zn_{0.5}Cd_{0.5}S nanoparticles/hollow micro-flower MoS₂ for improved photocatalytic hydrogen evolution[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 632: 157579.
- [27] ZHANG K, ZHANG R, XIA W, et al. Photocatalytic performance for palm-fiber-like SnS₂ nanoflakes with full solar spectrum light response[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 605: 154642.
- [28] SHI Y X, LI L L, XU Z, et al. Construction of full solar-spectrum available S-scheme heterojunction for boosted photothermal-assisted photocatalytic H₂ production[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 459: 414549.
- [29] KONG D Z, FAN H H, YIN D, et al. AgFeO₂ nanoparticle/ZnIn₂S₄ microsphere p-n heterojunctions with hierarchical nanostructures for efficient visible-light-driven H₂ evolution[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(7): 2673-2683.

(责任编辑:赵海军)

(上接第 51 页)

- [7] PERERA Y S, MUWANWELLA R M H W, FERNANDO P R, et al. Evolution of 3D weaving and 3D woven fabric structures[J]. *Fashion and Textiles*, 2021, 8: 11.
- [8] POTLURI P, HOGG P, ARSHAD M, et al. Influence of fibre architecture on impact damage tolerance in 3D woven composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2012, 19(5): 799-812.
- [9] HUANG T, WANG Y, WANG G. Review of the mechanical properties of a 3D woven composite and its applications[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2017, 57(8): 740-756.
- [10] 朱超,吴宁,张一帆,等. 三维角联锁机织铺层复合材料的拉伸性能与失效机制[J]. *复合材料学报*, 2021, 39(7): 3167-3177.
- [11] 王盼乐,周光明. 2.5D 与 2D 织物混杂铺设复合材料力学性能实验研究[J]. *科技信息*, 2011 (22): 463-465.
- [12] ALMEIDA J H S, BITTRICH L, SPICKENHEUER A. Improving the open-hole tension characteristics with variable-axial composite laminates: Optimization, progressive damage modeling and experimental observations[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 185: 107889.
- [13] DAVIM J, Reis P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments[J]. *Composite Structures*, 2003, 59: 481-487.
- [14] SKET F, ENFEDAQUE A, DiAZ LÓPEZ C, et al. X-ray computed tomography analysis of damage evolution in open hole carbon fiber-reinforced laminates subjected to in-plane shear[J]. *Composites Science and Technology*, 2016, 133: 40-50.
- [15] SONG L, LI J, ZHAO Y, et al. Improvement of interlaminar shear strength of 2.5D fabric laminated composites with short-cut web interlayer[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2017, 37(3): 261-269.

(责任编辑:蒲锡鹏)