

单向连续碳纤维-玻璃纤维层间混杂增强环氧树脂基复合材料的力学性能

邓富泉^{1,2}, 张丽⁴, 刘少祯⁵, 陈秋宇³, 杨松³, 赫玉欣^{*2,3}

(1. 陕西科技大学 设计与艺术学院, 西安 710021; 2. 浙江温州轻工研究院, 温州 325003; 3. 河南科技大学 化工与制药学院, 洛阳 471023; 4. 洛阳师范学院 化学化工学院, 洛阳 471022; 5. 黎明化工研究设计院有限责任公司, 洛阳 471000)

摘要: 为了研究连续单向纤维的层间混杂方式对复合材料力学性能及破坏方式的影响, 采用碳纤维-玻璃纤维体积比为 1:1, 以拉-挤成型法制备了具有不同层间混杂结构的连续单向纤维增强环氧树脂基复合材料, 并研究了不同层间混杂结构的连续单向碳纤维-玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的力学性能及破坏形式。结果表明: 具有层间混杂结构的复合材料抗拉强度处于纯碳纤维/环氧树脂复合材料和纯玻璃纤维/环氧树脂复合材料之间, 复合材料的拉伸断裂方式为劈裂; 具有层间混杂结构的复合材料的层间剪切强度均优于纯碳纤维/环氧树脂复合材料和纯玻璃纤维/环氧树脂复合材料, 复合材料的剪切断裂方式为层间断裂。

关键词: 碳纤维; 玻璃纤维; 混杂; 环氧树脂; 复合材料; 力学性能

中图分类号: TB382; TQ328.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)07-1857-07

Mechanical properties of unidirectional carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites in interlaminar layer

DENG Fuquan^{1,2}, ZHANG Li⁴, LIU Shaozhen⁵, CHEN Qiuyu³, YANG Song³, HE Yuxin^{*2,3}

(1. College of Art and Design, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. Zhejiang Wenzhou Research Institute of Light Industry, Wenzhou 325003, China; 3. College of Chemical Engineering and Pharmaceutics, He'nan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 4. College of Chemistry and Chemical Engineering, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China; 5. Liming Chemical Research and Design Institute Co. Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: In order to study the effect of interlayer hybrid type of unidirectional fiber on the mechanical properties and failure form of composites, the method of pultrusion process was adopted to prepare continuous unidirectional hybrid fiber reinforced epoxy composites with different interlaminar hybrid structure. The volume ratio of carbon fiber and glass fiber was 1:1 in the composites. The results show that the tensile strength of composites with interlaminar hybrid structure is between carbon fiber/epoxy composites and glass fiber/epoxy composites, and the tensile fracture mode is cleavage. The interlaminar shear strength of composites with interlaminar hybrid structure is better than carbon fiber/epoxy composites and glass fiber/epoxy composites, and the shear fracture mode is interlaminar fracture.

Keywords: carbon fiber; glass fiber; hybrid; epoxy; composites; mechanical properties

混杂纤维增强树脂基复合材料^[1-2]是指在同一基体中有两种或两种以上增强纤维的复合材料。根据混杂纤维在树脂基体中的分布, 主要分为层间混

杂、层内混杂和夹心混杂等形式。混杂复合材料常被要求高强度、低质量、低成本, 在日常生活中被广泛应用。玻璃纤维与碳纤维相比, 拥有较低的模

收稿日期: 2018-01-29; 录用日期: 2018-03-09; 网络出版时间: 2018-04-02 13:58

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180402.003>

基金项目: 河南省科技攻关项目(162102210052); 温州市重大科技专项项目(ZG2017028); 陕西科技大学博士启动项目(BJ13-22)

通讯作者: 赫玉欣, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为纤维增强树脂基复合材料 E-mail: heyx@haust.edu.cn

引用格式: 邓富泉, 张丽, 刘少祯, 等. 单向连续碳纤维-玻璃纤维层间混杂增强环氧树脂基复合材料的力学性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(7): 1857-1863.

DENG Fuquan, ZHANG Li, LIU Shaozhen, et al. Mechanical properties of unidirectional carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites in interlaminar layer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(7): 1857-1863 (in Chinese).

量和较高的应变承受能力,当用一部分玻璃纤维代替碳纤维时,复合材料的弯曲性能有了明显提高。同时,由于玻璃纤维的成本较碳纤维的成本低的多,复合材料整体成本会下降,但是相比于纯碳纤维复合材料,其密度则会增加^[3-5]。因此,设计复合材料时,应充分考虑增强材料的性能,以及各个组分间的体积分数,从而得出具有最优混杂比的复合材料^[6-7]。

目前对混杂复合材料的研究多针对纤维织物的层内混杂及层间混杂,对单向连续混杂纤维的层间混杂研究较少。张大兴等^[8]研究了低断裂伸长纤维与高断裂伸长纤维碳纤维-玻璃纤维、碳纤维-Kevlar 纤维混杂增强环氧树脂基复合材料的混杂效应产生的机制,评估分析了混杂效应。李岩等^[9]研究了玻璃纤维和苧麻纤维以不同的混杂比和铺层顺序增强酚醛树脂基复合材料的性能,结果发现以玻璃纤维为芯可得到较好的拉伸性能,反之,以苧麻纤维为芯可得到较好的弯曲和剪切性能。何芳等^[10]制备了不同混杂比的三维超高分子量聚乙烯纤维-碳纤维混杂织物增强环氧树脂基复合材料,结果表明,增加复合材料中碳纤维的含量,其弯曲和压缩性能会增加,纵向剪切和冲击性能降低,材料的破坏机制由混杂纤维的混杂比决定。曹帅等^[11]用玻璃纤维和碳纤维单轴径向编织增强环氧树脂,研究了不同混杂下层内混杂比对复合材料力学性能的影响。

本文采用拉-挤成型法制备了单向连续碳纤维-玻璃纤维层间混杂增强环氧树脂基复合材料,并对单向连续纤维的层间混杂方式对复合材料力学性能的影响进行研究。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

玻璃纤维无捻纱(312T),中国巨石股份有限公司;碳纤维无捻纱(T300),河南永煤碳纤维有限公司;环氧树脂(E-51),中国石化集团公司巴陵石油化工有限公司;二甲基咪唑,分析纯,国药集

团化学试剂有限公司;甲基四氢邻苯二甲酸酐,分析纯,广州市旷轩化工有限公司。

1.2 实验过程

1.2.1 树脂的配制

称取 100 g 环氧树脂 E-51 置于烧杯中,放入烘箱中,100℃加热 40 min。称取 1 g 二甲基咪唑倒入盛有环氧树脂的烧杯中,充分搅拌,使二甲基咪唑充分溶解。然后称取 85 g 甲基四氢苯酐固化剂倒入烧杯中,并搅拌均匀,待用。

1.2.2 纤维的混杂方式及复合材料的制备

采用拉-挤成型法制备纯碳纤维、纯玻璃纤维及三种层间混杂结构的复合材料。成型过程中,在牵引力的作用下,充分浸润环氧树脂的混杂纤维先通过导丝板的导丝孔,然后经刮胶环挤出纤维上黏附的多余环氧树脂,最后进入模具中加热固化成型。通过控制碳纤维纱和玻璃纤维纱按照设定截面结构(如表 1 所示)经过导丝板上不同位置的导丝孔后进入固化模具来实现不同结构混杂复合材料的制备。复合材料的截面结构示意图如表 1 所示,层间混杂结构中碳纤维与玻璃纤维的体积比固定为 1:1 (质量比为 1:1.5)。所制备的混杂纤维增强树脂复合材料中混杂纤维的质量分数为 70wt%。

将碳纤维和玻璃纤维按照表 1 所示结构依次穿过浸胶槽、导丝板、刮胶环、成型加热装置和牵引装置,将配置好的树脂注入浸胶槽,启动牵引装置,设置牵引速度为 0.1 m/min。加热固化装置的温度设定为 260℃。制备的混杂碳纤维-玻璃纤维/环氧树脂复合材料为直径 9.0 mm 的棒材。图 1 为拉挤工艺示意图及所制备的复合材料的截面照片。

1.3 测试与表征

按照 GB/T 13096.1—1991^[12]和 GB/T 14208.4—2009^[13],采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的 WAW 系列电液伺服万能试验机(规格为 3 000 kN)来测量样条的抗拉强度及表层层间剪切强度。每一组试样共测试 6 次,然后取平均值。

样品的 SEM 分析采用日本 JSM-6701F 型场

表 1 不同结构纤维的截面示意图

Table 1 Schematic of cross section of different fibers structures

Number	A	B	C1	C2	C3
Schematic of cross section					

Notes: Black—Carbon fiber; White—Glass fiber.

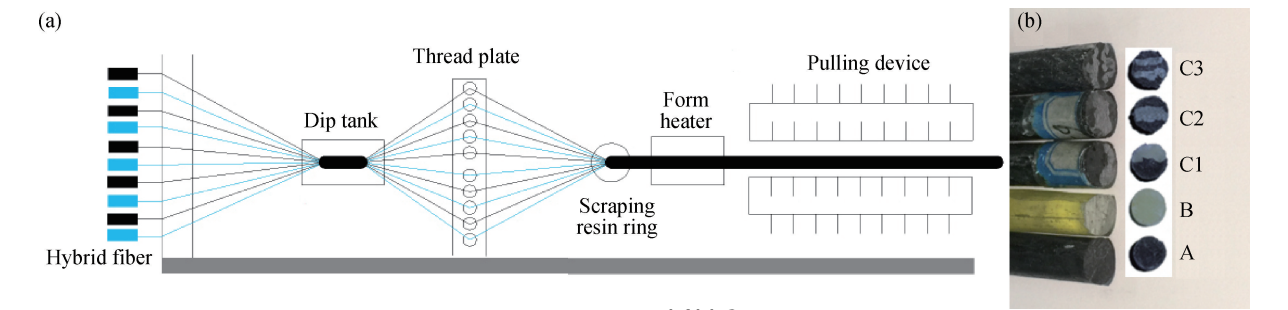


图 1 混杂纤维增强环氧树脂拉挤工艺示意图(a)及不同结构复合材料截面照片(b)

Fig.1 Schematic diagram of fiber reinforced epoxy resin with pulltrusion process (a) and photo of composites with different structures (b)

发射扫描电子显微镜测试, 加速电压为 10 kV。

2 结果与讨论

2.1 混杂纤维增强环氧树脂基复合材料拉伸性能

图 2 为纯碳纤维、纯玻璃纤维及混杂纤维增强环氧树脂基复合材料拉伸破坏时的断口形貌照片及拉伸强度。由图 2(a)可知, 复合材料试样在拉伸过程中, 所有复合材料试样均为劈裂。试样在拉伸过程中, 当荷载增大到极限荷载的 45% 时, 树脂与纤维开始剥离, 并发出清脆的劈裂声。此后, 随着荷载的不断增大, 劈裂声持续不断, 同时在劈裂的位置可以清晰看到白斑状裂纹出现。当接近破坏荷载时, 劈裂声增大并加密, 纤维由外向内持续发生断裂, 最后伴随一声巨响, 试样发生破坏^[14,16]。由图 2(b)可知, 纯碳纤维增强环氧树脂基复合材料的抗拉强度最高, 达到了 914.5 MPa。纯玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的抗拉强度最低, 仅为 745.3 MPa。三种结构复合材料的抗拉强度位于二者之间, 其中 C1 的抗拉强度最高, 达到了 858.6 MPa。C2 的抗拉强度稍逊于 C1, C3 的抗拉强度稍高于纯玻璃纤维。

试样在拉伸过程中, 外层纤维首先承受应力, 再经环氧树脂基体传递到内部纤维, 因此复合材料横截面上的应力并不是均匀等值分布, 而是从圆周向圆心逐渐递减呈倒梯形分布。随着应力增大, 外层纤维首先达到极限应力并发生断裂, 同时应力重新分布。随着应力继续增大, 纤维断裂由外层向内层逐渐过渡, 最后试样发生破坏, 破坏模式属于脆性破坏^[14,17]。纯碳纤维增强环氧树脂基复合材料为一整体, 碳纤维与环氧树脂基体界面作用强, 因此复合材料整体断裂。玻璃纤维/环氧树脂复合材料在拉伸过程中发生劈裂, 表明玻璃纤维与环氧树脂基体间界面作用弱, 在外力作用下, 微裂纹沿二者界面传播, 导致复合材料发生劈裂。在碳纤维和玻璃纤维体积比(1 : 1)相同的情况下, 三种混杂纤维增强环氧树脂基复合材料的劈裂面均出现在两种纤维的界面处。按照纤维束抑制裂纹传播理论, 当碳纤维周围有高延伸率的玻璃纤维存在时, 玻璃纤维较好的韧性能够抑制碳纤维断裂裂纹的继续传播, 使试样继续承担部分载荷, 碳纤维-玻璃纤维/环氧树脂复合材料将表现出更高的性能^[18-19]。但从试验中发现, C3 的抗拉强度不如 C1, 尽管 C3 中

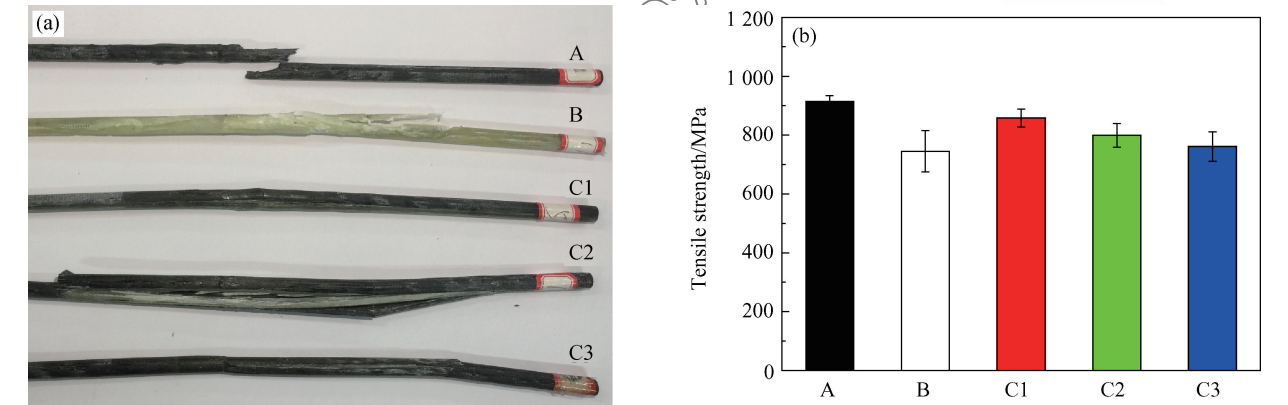


图 2 不同纤维结构增强环氧树脂复合材料拉伸破坏时的破坏形貌(a)及抗拉强度(b)

Fig. 2 Tensile failure morphology (a) and tensile strength (b) of fibers reinforced epoxy composites with different fiber structures

碳纤维周围分散有更均匀的玻璃纤维,却没有很好地抑制碳纤维裂纹传播。这说明在受力过程中,玻璃纤维很快对碳纤维减弱或失去了裂纹抑制作用,再加上碳纤维的分散,使 C3 的强度降低。表明混杂纤维的界面处是复合材料的“薄弱点”。混杂纤维增强环氧树脂复合材料中部分玻璃纤维被碳纤维所取代,增大了复合材料的抗拉强度,使混杂纤维增强环氧树脂复合材料的抗拉强度均大于纯玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料。

图 3 为具有不同结构的复合材料纵向拉伸破坏后的 SEM 图像。可知,复合材料断裂面不整齐,破坏发生在多个层面。碳纤维增强环氧树脂基复合材料在拉伸破坏时,碳纤维并没有从环氧树脂中拔出,环氧树脂与碳纤维仍紧紧的黏附在一起,树脂呈现波浪状^[20];玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料在拉伸破坏时,环氧树脂基体劈裂,且玻璃纤维表面比较光滑,只黏附了很少量的树脂^[21];具有 C1 结构的混杂纤维增强环氧树脂基复合材料在拉伸破坏时,纤维没有从环氧树脂基体中拔出,环氧树脂基体没有发生劈裂,环氧树脂仍与纤维紧紧粘接在一起,树脂呈现波浪状;具有 C2 和 C3 结构的混杂纤维增强环氧树脂基复合材料在拉伸破坏时,环氧树脂基体部分劈裂,纤维没有从环氧树脂基体中拔出。说明纯碳纤维及混杂纤维增强环氧树脂基复合材料在受力时,

环氧树脂基体有效地将应力传递给碳纤维,使更多碳纤维承载应力,在破坏时树脂发生拉扯牵引,破坏发生在树脂层。

2.2 混杂纤维增强环氧树脂基复合材料的剪切性能

图 4 为纯碳纤维、纯玻璃纤维及混杂纤维增强环氧树脂复合材料层间剪切破坏形貌照片及层间剪切强度。由图 4(a)可知,不同结构纤维增强环氧树脂复合材料的剪切破坏形式均为层间剪切破坏,破坏试样存在层间裂纹,裂纹基本存在于试样的中部或底部。由图 4(b)可知,纯玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的层间剪切强度最低,仅为 65.9 MPa。纯碳纤维增强环氧树脂基复合材料的层间剪切强度稍高,为 69.3 MPa。三种混杂结构复合材料的层间剪切强度稍高于纯复合材料,其中 C1 的层间剪切强度最高,达到了 74.6 MPa。C2 的层间剪切强度稍逊于 C1, C3 的层间剪切强度稍高于纯碳纤维复合材料。

复合材料在剪切试验中,接触压头处的部分受到的是压缩力,而在复合材料中下部的纤维则受到的是垂直于试验力的力,即沿纤维方向的拉力^[22]。混杂纤维复合材料在剪切试验初期,试样受到一定载荷时,在碳纤维与玻璃纤维界面所形成的薄弱点处出现微裂纹,但此时并没有纤维崩裂,随着试验力的增加,裂纹加深增多,最终在复合材料底部垂

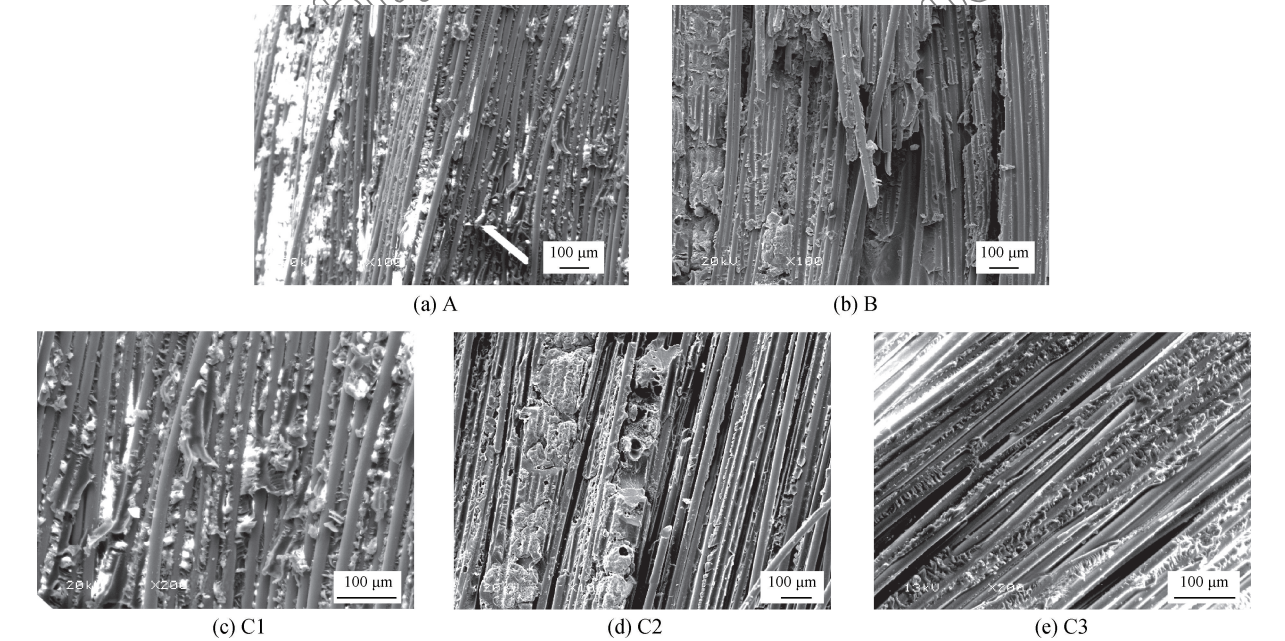


图 3 不同纤维结构纤维增强环氧树脂复合材料纵向拉伸破坏后断面形貌的 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of tensile fracture for fiber/epoxy composites with fiber different structures

直于试验力方向的纤维最终断裂, 材料失效^[23]。C1 结构的复合材料由于“薄弱点”数目少, 测试时玻璃纤维富集区处于上方承受压缩力, 碳纤维富集区处于下方承受拉伸力, 碳纤维富集区可以有效的抑制微裂纹的扩散, 而玻璃纤维良好的延展性可使复合材料上部承受更大的压力, 从而使具有 C1 结构的复合材料具有最高的层间剪切强度。C2 相对于 C1, “薄弱点”稍多, 因此层间剪切强度稍逊于 C1。混杂结构中 C3 的“薄弱点”最多, 其层间剪切强度在三种混杂结构中最弱的。

图 5 为具有不同结构的复合材料层间剪切破坏后的 SEM 图像。可知, 复合材料中纤维与树脂基体均发生断裂, 断裂面不整齐, 破坏发生在多个层

面, 破坏形式表现为界面、树脂和纤维三种破坏方式的综合作用^[24]。碳纤维增强环氧树脂基复合材料的剪切断面中纤维和树脂紧紧黏附在一起, 纤维上都黏附了树脂, 这表明碳纤维增强环氧树脂基复合材料剪切破坏时, 由于纤维与树脂的界面粘接较强, 破坏不仅发生在环氧树脂基体及界面处, 碳纤维本身也被破坏; 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的断面较碳纤维复合材料的平整, 树脂基体劈裂, 可看到部分纤维被拔出, 且纤维表面较光滑, 黏附的树脂量较少, 表明玻璃纤维与树脂基体的界面黏接力较弱; 三种混杂复合材料的剪切断面形貌较为相似, 断面不整齐, 破坏发生在多个层面, 树脂基体及纤维均被破坏^[25]。

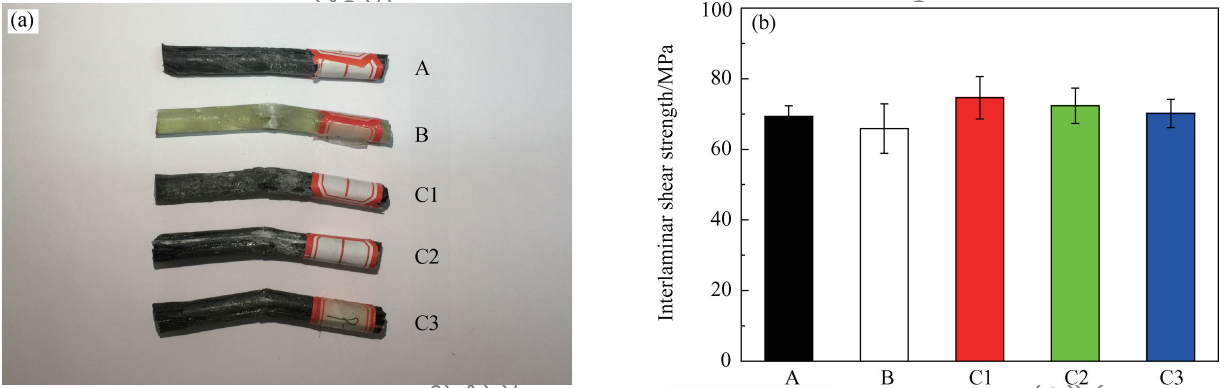


图 4 不同纤维结构纤维增强环氧树脂复合材料剪切破坏时的破坏形貌(a)及层间剪切强度(b)

Fig. 4 Shear failure morphology (a) and interlaminar shear strength (b) of fiber/epoxy composites with different fiber structures

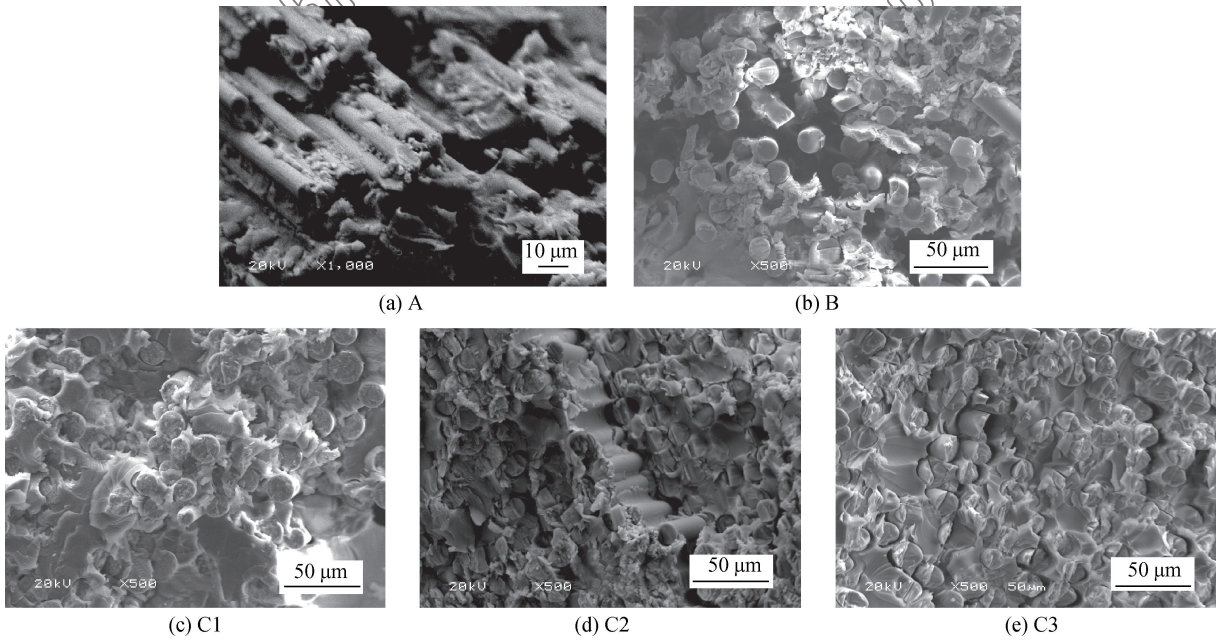


图 5 不同纤维结构纤维增强环氧树脂复合材料层间剪切破坏形貌的 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of interlaminar shear fracture for fiber/epoxy composites with different fiber structures

3 结 论

(1) 采用拉-挤成型法制备了具有不同层间混杂结构的连续单向碳纤维-玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料。

(2) 拉伸性能测试表明, 碳纤维增强环氧树脂基复合材料的抗拉强度为 914.5 MPa, 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的抗拉强度为 745.3 MPa, 具有不同层间混杂结构的碳纤维-玻璃纤维/环氧树脂复合材料的抗拉强度处于二者之间, 复合材料的拉伸断裂方式为劈裂。

(3) 层间剪切测试表明, 碳纤维增强环氧树脂基复合材料的层间剪切强度为 69.3 MPa, 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的层间剪切强度为 65.9 MPa, 具有不同层间混杂结构的碳纤维-玻璃纤维/环氧树脂复合材料的层间剪切强度均大于二者, 复合材料的剪切断裂方式为层间断裂。

参考文献:

- [1] RAFIQ A, MERAH N, BOUKHILI R, et al. Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay composite[J]. *Polymer Testing*, 2017, 57: 1-11.
- [2] HUNG P Y, LAU K T, CHENG L K, et al. Impact response of hybrid carbon/glass fibre reinforced polymer composites designed for engineering applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 133: 86-90.
- [3] DONG C, RANAWEERA-JAYAWARDENA H A, DAVIES I J. Flexural properties of hybrid composites reinforced by S-2 glass and T700S carbon fibers[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(2): 573-581.
- [4] GIANCASPRO J W, PAPAKONSTANTINO C G, BALAGURU P N. Flexural response of inorganic hybrid composites with E-glass and carbon fibers[J]. *Journal of Engineering Materials & Technology*, 2010, 132(2): 179-181.
- [5] DONG C, DAVIES I J. Flexural and tensile moduli of unidirectional hybrid epoxy composites reinforced by S-2 glass and T700S carbon fibres[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 893-899.
- [6] KUREEMUN U, RAVANDI M, TRAN L Q N, et al. Effects of hybridization and hybrid fibre dispersion on the mechanical properties of woven flax-carbon epoxy at low carbon fibre volume fractions[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 134: 28-38.
- [7] HENRY J, PIMENTA S. Modelling hybrid effects on the stiffness of aligned discontinuous composites with hybrid fibre-types[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 152: 275-289.
- [8] 张大兴, 张佐光. CF/GF、CF/KF 混杂纤维复合材料混杂效

应实验与分析[J]. *新型炭材料*, 1997, 12(3): 46-51.

ZHANG D X, ZHANG Z G. Experiment and analysis of hybrid effect for CF/GF, CF/KF hybrid fiber composite material[J]. *New Carbon Materials*, 1997, 12(3): 46-51 (in Chinese).

- [9] 李岩, 孙震. 玻璃/苧麻纤维混杂复合材料力学性能研究[J]. *材料工程*, 2009(s2): 70-74.
- LI Y, SUN Z. Study on the mechanical properties of glass/ramie fiber reinforced hybrid composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009(s2): 70-74 (in Chinese).
- [10] 何芳, 王玉林, 万怡灶, 等. 三维编织超高分子量聚乙烯纤维/碳纤维/环氧树脂混杂复合材料力学行为及混杂效应[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(6): 52-58.
- HE F, WANG Y L, WAN Y Z, et al. Mechanical properties and hybrid effect of 3D braided UHMWPE fiber/carbon fiber/epoxy resin hybrid composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(6): 52-58 (in Chinese).
- [11] 曾帅, 贾智源, 侯博, 等. 碳纤维-玻璃纤维层内混杂单向增强环氧树脂复合材料拉伸性能[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(2): 297-303.
- ZENG S, JIA Z Y, HOU B, et al. Tensile properties of unidirectional carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites in layer[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(2): 297-303 (in Chinese).
- [12] 中国建筑材料工业协会. 拉挤玻璃纤维增强塑料杆拉伸性能试验方法: GB/T 13096.1—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- China Building Material Federation. Test method for tensile properties of pultruded glass fiber reinforced plastic rods: GB/T 13096.1—1991[S]. Beijing: China Standards Press, 1992 (in Chinese).
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 纺织玻璃纤维增强塑料 无捻粗纱增强树脂棒机械性能的测定 第4部分: 表观层间剪切强度的测定: GB/T 14208.4—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Textile-glass-reinforced plastics: Determination of mechanical properties on rods made of roving-reinforced resin Part 4: Determination of apparent inter laminar shear strength: GB/T 14208.4—2009[S]. Beijing: China Standards Press, 2010 (in Chinese).
- [14] YAN X F, CAO S B. Structure and interfacial shear strength of polypropylene-glass fiber/carbon fiber hybrid composites fabricated by direct fiber feeding injection molding[J]. *Composite Structures*, 2018, 185: 362-372.
- [15] 武军. 拉挤/缠绕 GFRP 筋力学性能试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
- WU J. Experimental study on the mechanical properties of pultrusion/winding GFRP bars[D]. Jiaozuo: He'nan Polytechnic University, 2015 (in Chinese).

- [16] 周翔. 连续纤维增强聚丙烯复合片材及复合蜂窝板的制备及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- ZHOU X. Study of preparation process and performance of continuous fiber polypropylene laminated sheet and composite honeycomb panel[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015 (in Chinese).
- [17] GOH G D, NAGALINGAM A P, GOH G L, et al. Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics[J]. *Materials & Design*, 2018, 137: 79-89.
- [18] HUA Y, LI F, HUANG G W, et al. Positive synergistic effect of graphene oxide/carbon nanotube hybrid coating on glass fiber/epoxy interfacial normal bond strength[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 149: 294-304.
- [19] ONWUDILI J A, MISKOLCZI N, NAGY T, et al. Recovery of glass fibre and carbon fibres from reinforced thermosets by batch pyrolysis and investigation of fibre re-using as reinforcement in LDPE matrix[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 91: 154-161.
- [20] LI J W, WU Z X, HUANG C J, et al. Multiscale carbon nanotube-woven glass fiber reinforced cyanate ester/epoxy composites for enhanced mechanical and thermal properties[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 104: 81-88.
- [21] HE Y X, YANG S, LIU H, et al. Reinforced carbon fiber laminates with oriented carbon nanotube epoxy nanocomposites: Magnetic field assisted alignment and cryogenic temperature mechanical properties[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 517: 40-51.
- [22] ASLAN M, TUFAN M, KÜÇÜKÖMEROĞLU T. Tribological and mechanical performance of sisal-filled waste carbon and glass fibre hybrid composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 140: 241-249.
- [23] HE Y X, CHEN Q Y, YANG S, et al. Micro-crack behavior of carbon fiber reinforced Fe_3O_4 /graphene oxide modified epoxy composites for cryogenic application[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 108: 12-22.
- [24] DICKSON A N, BARRY J N, MCDONNELL K A, et al. Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 16: 146-152.
- [25] XIN H H, CHU Y Q, MOSALLAM A S, et al. Evaluation on material behaviors of pultruded glass fiber reinforced polymer (GFRP) laminates[J]. *Composite Structure*, 2017, 182: 283-300.