

碳纤维/玻璃纤维混杂复合材料的力学性能研究

陈秋宇¹ 赫玉欣^{1*} 张丽² 吴东阳¹ 欧阳蔚¹ 徐世君¹

(1.河南科技大学化工与制药学院,洛阳 471023;

2.洛阳师范学院化学化工学院,洛阳 471022)

摘要 采用拉-挤成型法制备单向连续碳纤维/玻璃纤维(混杂体积比 1:1)层内混杂复合材料,研究了混杂方式对复合材料力学性能及破坏机制的影响。结果表明,不同层内混杂复合材料受混杂结构的影响表现出不同的拉伸强度,但拉伸模量几乎不受混杂结构的影响;层内混杂复合材料的在层间剪切强度方面呈现正向混杂效应,其剪切破坏是树脂、界面破坏和纤维断裂的综合作用造成的,属于多级破坏。

关键词 碳纤维,玻璃纤维,混杂,复合材料,性能

中图分类号 TB332

文献标识码 A

文章编号:1006-3536(2020)07-0134-05

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2020.07.031

Mechanical property of carbon/glass hybrid fiber composite

Chen Qiuyu¹ He Yuxin¹ Zhang Li² Wu Dongyang¹ Ouyang Wei¹ Xu Shijun¹

(1.College of Chemical Engineering and Pharmaceutics,Hennan University of Science and

Technology,Luoyang 471023;2.College of Chemistry and Chemical Engineering,

Luoyang Normal University,Luoyang 471022)

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 interlayer hybrid structure. The volume ratio of carbon fiber and glass fiber was fixed as 1:1 in the composites. The results shown that the tensile strength of hybrid composites varied with the hybrid structure, but the tensile modulus was almost independent of the hybrid structure. The interlaminar shear strength of hybrid composites in different layers shown a positive hybrid effect. The shear failure of hybrid composites was an integrated action of interface, resin and fiber, and belongs to multistage failure.

Key words carbon fiber, glass fiber, hybrid, composite, property

混杂纤维增强复合材料^[1-2] (HFRCs)是指在基体中使用两种或两种以上增强纤维的新型纤维增强复合材料。单向 HFRCs 是指混杂纤维(HF)在树脂基体中沿一个方向排列,根据单向 HF 在树脂基体中的排列方式,单向 HFRCs 可分为层间混杂、层内混杂和夹心混杂等。单向 HFRCs 的力学性能不但与树脂基体及成型工艺有关,还取决于 HF 组分的混杂比及混杂方式^[3]。通过改变 HF 混杂比和混杂方式,可以赋予 HFRCs 比单一纤维增强材料更优异的机械性能,即表现出正向混杂效应,如可提高

力学强度、破坏应变等。例如在碳纤维(CF)复合材料中掺入玻璃纤维(GF),可以在保证使用性能的前提下降低成本^[4-5]。相较单一纤维增强复合材料, HFRCs 具有更优异的综合性能和更高的设计选材自由度,能够满足各种结构材料的需求。但并不是所有类型的 HFRCs 都表现出正向混杂效应,除了混杂纤维的种类外,混杂比^[6]和混杂结构^[7-8]对复合材料的性能也有重要影响。因此必须研究 HFRCs 的混杂效应机制,合理设计复合材料,才能达到理想的混杂效应^[9-11]。

基金项目:河南省科技攻关项目(162102210052);河南科技大学 SRTF 项目(2019149)

作者简介:陈秋宇(1994-),男,硕士研究生,研究方向为纤维增强树脂基复合材料。

联系人: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。

Swolfs 等^[12]研究了在 GF 与 CF 体积比为 1:1 的条件下,纤维分散度对复合材料混杂效应的影响,研究表明,提高 CF 分散度有利于 GF 抑制微裂纹传播,进而增强混杂效应。Wang 等^[13]研究比较了 CF/GF 层内混杂与层间混杂复合材料的压缩性能,结果表明,层间混杂复合材料在使用较少 CF 的情况下即可获得较高的压缩性能。何小兵等^[14]研究了 CF/GF 混杂比、CF/GF 层间混杂铺设方式对复合材料拉伸性能的影响,研究结果表明,GF 层应充分利用自身较高的断裂韧性来抑制 CF 层中微裂纹的扩展和传播,使 HFRCs 表现出更高的失效应变和强度特性。Wang 等^[15]以 CF/芳纶纤维平纹复合材料为对象,研究了不同混杂比和铺层顺序对复合材料力学性能和阻尼性能的影响。研究发现,混杂比和铺层顺序是影响复合材料的阻尼性能的重要因素;混杂比是影响复合材料的抗拉强度的决定性因素,而抗弯性能主要取决于铺层顺序。

目前对 HFRCs 的制备与混杂效应的研究主要以纤维织物混杂复合材料,以及短切纤维混杂复合材料为对象,关于单向连续 HFRCs 的混杂效应研究却鲜有报道。本研究采用拉-挤成型法制备了直径 9.0mm 的单向连续 CF/GF 层内混杂增强环氧树脂复合棒材,对不同层内混杂结构复合材料的力学性能和破坏机制进行了测试与分析。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

玻璃纤维无捻纱(310,单丝直径 $24\mu\text{m}$),中国巨石股份有限公司;碳纤维无捻纱(T300,单丝直径 $14\mu\text{m}$),河南永煤碳纤维有限公司;环氧树脂(EP, 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),山东摩尔化工有限公司;甲基四氢邻苯二甲酸酐(分析纯),广东翁江化学试剂有限公司。

微机控制电液伺服万能试验机(SHT4306-W),MTS(中国)公司;场发射扫描电子显微镜(SEM, Sigma 300),英国 ZEISS 公司。

1.2 样品的制备与表征

1.2.1 树脂的配制

称取 EP 100g 置于烧杯中,在 100°C 环境下加热 40min;然后在 EP 中先后充分溶解 1g 二甲基咪唑和 85g 甲基四氢苯酐固化剂,即得到环氧固化体

系,待用。

1.2.2 不同纤维混杂方式复合材料的制备

采用拉-挤成型法制备纯碳纤维增强环氧树脂(CF/EP)复合材料(记为 A)、纯玻璃纤维增强环氧树脂(GF/EP)复合材料(记为 B)和 3 种层内混杂结构的 HFRCs(分别记为 C1、C2 和 C3),不同结构复合材料的截面示意图详见表 1。

表 1 不同结构复合材料的截面示意图

标号	A	B	C1	C2	C3
截面示意图					

注:表中黑色表示 CF;白色表示 GF;C1、C2 和 C3 中 GF 与 CF 体积比均为 1:1。

采用如图 1 所示的拉-挤工艺流程制备直径 9.0mm 的单向连续 CF/GF 层内混杂增强 EP 复合棒材。牵引装置的牵引速度设置为 0.5m/min ,加热成型装置的温度设定为 280°C 。

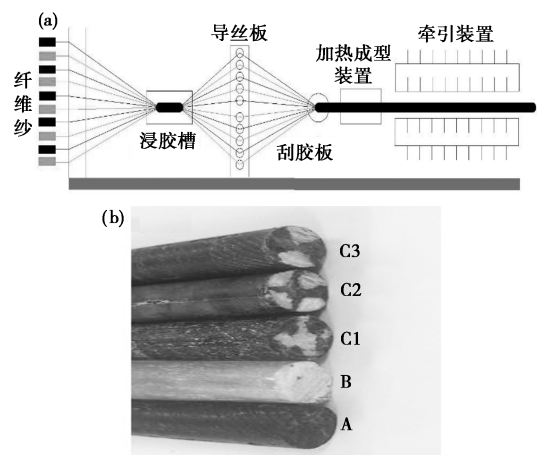


图 1 纤维增强 EP 拉挤工艺示意图(a)及不同结构 EP 复合材料横截面照片(b)

1.3 测试与表征

按照 GB/T 13096.1—1991 和 GB/T 14208.4—2009,采用微机控制电液伺服万能试验机(最大试验力 3000kN)来测试复合材料试样的拉伸强度及表观层间剪切强度。

样品破坏面的 SEM 分析采用场发射扫描电子显微镜测试,加速电压为 10kV 。

2 结果与讨论

2.1 复合材料拉伸性能

图 2 为 CF/EP 复合材料、GF/EP 复合材料和

HFRCs 试样拉伸力学性能,图 3 为拉伸破坏后的破坏形貌及其局部放大照片。从图 2 的拉伸测试结果可以得出 5 种复合材料的拉伸性能变化趋势为: $A > C3 > C2 > C1 > B$ 。GF 与 CF 体积比为 1:1 的情况下,3 种层内混杂结构棒材中,CF 最为集中的 C3 具有最高的拉伸强度 (879.9MPa),其次是 C2 (846.7MPa) 和 C1 (839.2MPa)。

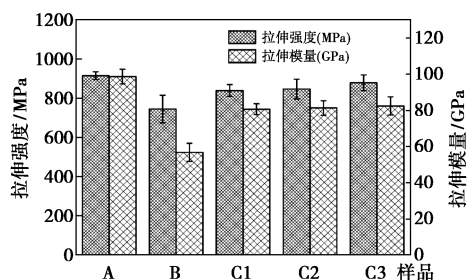


图 2 不同结构复合材料的拉伸力学性能

复合材料试样在拉伸过程中,由于 CF 和 GF 断裂伸长率的差异,拉伸正应力主要由 CF 承受,CF 首先达到极限应力并发生断裂;在横截面上,剪应力从外层纤维经由树脂基体传递给内层纤维,因此随着剪应力逐渐增大,外层纤维率先发生破坏,即纤维层内分层破坏和 CF/GF 界面分层破坏,最终导致材料失效。从复合材料拉伸的破坏全貌图 3 可以看出,复合材料的破坏方式均为层间劈裂与纤维断裂,属于脆性破坏^[16]。CF/EP 复合材料和 GF/EP 复合材料的破坏方式为纤维束断裂和纤维层内破坏,破坏过程迅速而突然。层内混杂的复合材料 HFRCs 破坏方式:纤维层内分层破坏、CF 断裂和 GF/CF 界面分层破坏,破坏过程渐进发展。HFRCs 经拉伸破坏后,GF 有少量断裂,未能在 CF

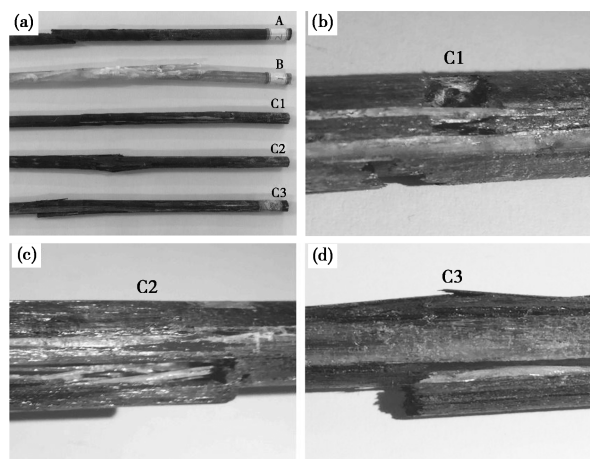


图 3 不同结构复合材料拉伸破坏时的破坏全貌(a)及局部放大照片(b、c、d)

断裂后继续承担载荷,导致复合材料拉伸强度并不理想。根据抑制裂纹传播理论,断裂伸长率低的 CF 首先产生裂纹并迅速传播,但周围的 GF 起到抑制裂纹传播的作用,避免了裂纹迅速增长,因此可以改善复合材料的力学性能。但在拉伸试验中,HFRCs 的 GF/CF 界面分层现象十分严重,导致 GF 对微裂纹的抑制作用减弱甚至丧失,微裂纹快速增长并扩展,使复合材料失效。

图 4 为具有不同结构的复合材料纵向拉伸破坏后劈裂面的 SEM 图。由图 4(b)可知,GF/EP 复合材料在拉伸破坏后,劈裂面上裸露着大量 GF,GF 表面光滑,只粘附了很少量的树脂^[17-18];而且 GF 之间的应力传递效率差,破坏发生在界面处,为脱粘破坏。由图 4(a)可知,CF/EP 复合材料在拉伸破坏后,一些 CF 从树脂基体中断裂和脱粘,CF 表面树脂基体残留较多,树脂呈现波浪状^[13]。而层内混杂结构复合材料 HFRCs 在拉伸破坏后[图 4(c)、(d)、(e)],HF 既没有从基体中拔出,也没有断裂,HF 之间树脂基体分布较多,有利于应力向 CF 传递。纤维表面粘附树脂多少在一定程度上反映了纤维与纤维之间的粘结强度,因此可以得出复合材料中纤维与纤维间的粘结强度强弱为:CF/CF > CF/GF > GF/GF。这说明 CF/EP 复合材料及 HFRCs 在受

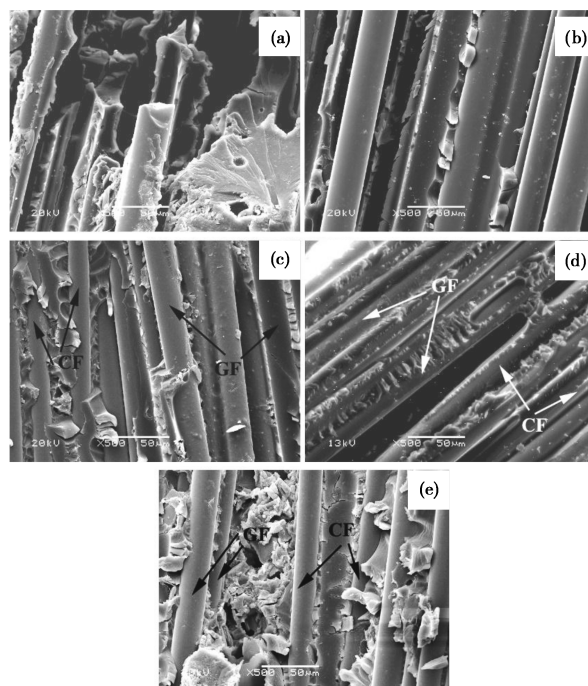


图 4 不同结构复合材料纵向拉伸破坏后劈裂面的 SEM 图

[(a)A;(b)B;(c)C1;(d)C2;(e)C3]

力时,纤维与树脂交错缠结的 CF/CF 界面和 CF/GF 界面能有效传递应力,使更多的 CF 承载应力,从而使复合材料破坏发生在 CF/EP 区域;而在 CF/EP 破坏时树脂基体会发生拉扯牵引,使 CF-EP-GF 中的树脂层开裂,进而导致 HFRCs 层间劈裂。

2.2 复合材料的剪切性能研究

图 5 为 CF/EP 复合材料、GF/EP 复合材料和 HFRCs 试样层间剪切破坏形貌照片及层间剪切强度图。由图 5(b)可知,在剪切实验中,试样上部主要受压缩力,而底部纤维主要承受沿纤维轴向的拉力^[19]。复合材料在剪切试验时,不断产生层间裂纹,裂纹基本位于试样的下半部分,并伴有部分纤维断裂。

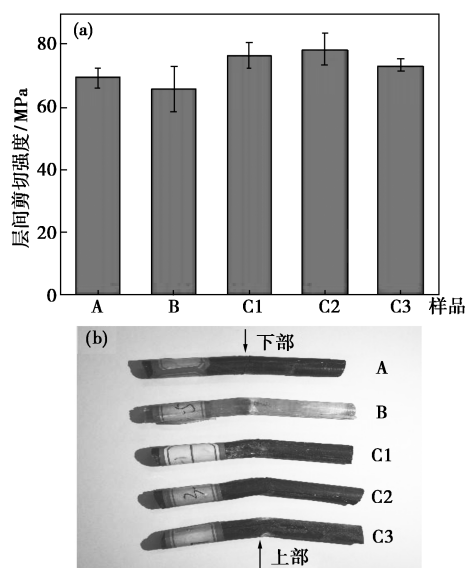


图 5 不同结构复合材料剪切破坏时的层间剪切强度(a)及破坏形貌(b)

由图 5(a)可知,层内混杂结构在层间剪切强度方面呈现正向混杂效应。C1、C2 和 C3 这 3 种层内混杂结构复合材料的层间剪切强度分别为 76.5MPa、78.7MPa 和 73.2MPa,均高于 CF/EP 复合材料(69.3MPa)和 GF/EP 复合材料(65.9MPa)。CF/EP 复合材料的抗拉性能、刚度和界面性能均优于 GF/EP 复合材料,所以 CF/EP 复合材料的层间剪切强度优于 GF/EP 复合材料。在剪切实验过程中,5 种复合材料均发生树脂断裂的细微声响,而且层内混杂复合材料 HFRCs 逐渐出现层间裂纹,随着实验力的增大,最终在 HFRCs 试样底部垂直于实验力方向的 HF 断裂,材料失效^[20]。在剪切实验中,GF 对 CF 中微裂纹传播的抑制作用可以得到发

挥,因此 HFRCs 的层间剪切性能取决于 GF 相对 CF 的分布位置。由复合材料横截面结构可知,虽然 C1 和 C2 的结构相似,但 C2 中 CF 富集区基本处在试样中部,且周围均匀分布 GF 富集区,剪切测试时 CF 承受压缩力,而 CF 周围分布的 GF 良好的延展性可有效抑制微裂纹的扩散,使试样继续承担应力,从而使 C2 具有最好的层间剪切强度。相对于 C1 和 C2, C3 中 GF 相对集中,抑制 CF 中微裂纹传播的效率较低,致使 C3 的层间剪切强度稍低于 C1。

图 6 为具有不同结构的复合材料层间剪切破坏后的 SEM 图。由图可知,CF 的直径约为 $13\mu\text{m}$, GF 的直径约为 $20\mu\text{m}$ 。CF/EP 复合材料[图 6(a)]剪切破坏后,CF 间散布有大量碎块状的树脂基体,树脂、界面破坏和部分 CF 断裂导致复合材料失效^[21]。GF/EP 复合材料剪切破坏面中[图 6(b)],GF 表面光滑平整,与树脂间存在微小缝隙。这种缝隙最终在剪切力下形成以弱界面剥离为主的界面剥离,剪切破坏主要发生在树脂基体内部。因此,GF/EP 复合材料的剪切性能低于 CF/EP 复合材料。HFRCs 试样[图 6(c)、(d)、(e)]的剪切断面形貌较为相似,HF 之间树脂基体紧密分布,界面粘结强度较高,因而表现出较高的剪切性能。HFRCs 剪切破坏是树脂、界面破坏和纤维断裂的综合作用造成的^[22],属于多级破坏。

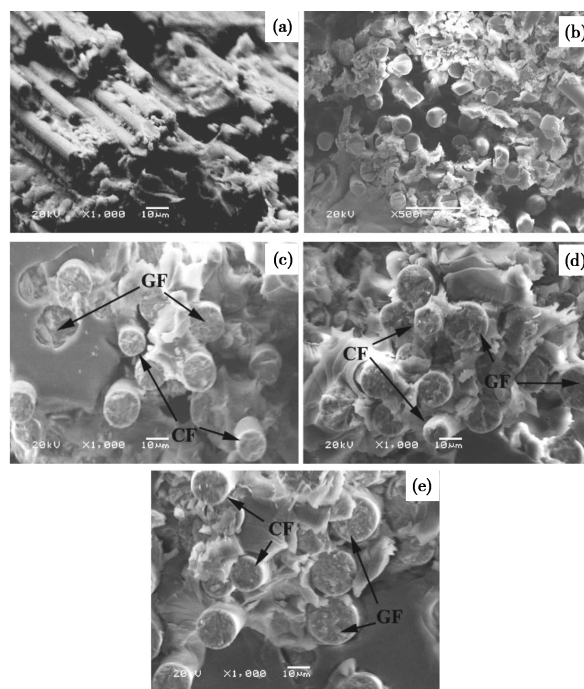


图 6 不同结构复合材料层间剪切破坏后的 SEM 图
[(a)A;(b)B;(c)C1;(d)C2;(e)C3]

3 结论

采用拉-挤成型法制备了直径 9.0mm 的单向连续 CF/GF 层内混杂增强 EP 复合棒材,研究了相同混杂比、不同层内混杂结构棒材的力学性能与破坏方式。

(1)力学性能测试结果表明,层内混杂复合材料 HFRCs 在拉伸强度方面没有表现出正向混杂效应,但在层间剪切强度方面呈现正向混杂效应,其层间剪切性能取决于 GF 相对 CF 的分布位置。

(2)层内混杂结构复合材料 HFRCs 的破坏过程是渐进发展的多级破坏,不同混杂结构复合材料的损坏机制不尽相同,因此可以通过对损坏机制的控制来制备具有不同性能的 HFRCs。

参考文献

- [1] Czel G, Jalalvand M, Wisnom M R. Demonstration of pseudo-ductility in unidirectional hybrid composites made of discontinuous carbon/epoxy and continuous glass/epoxy plies[J]. Composites Part A, 2015, 72: 75-84.
- [2] Dong C S, Davies I J. Flexural strength of bidirectional hybrid epoxy composites reinforced by E-glass and T700S carbon fibres[J]. Composites Part B, 2015, 72: 65-71.
- [3] Swolfs Y, Gorbatiikh L, Verpoest I. Fibre hybridisation in polymer composites: a review[J]. Composites Part A, 2014, 67: 181-200.
- [4] Hine P J, Bonner M, Ward I M, et al. Hybrid carbon fibre/nylon 12 single polymer composites[J]. Composites Part A, 2014, 65: 19-26.
- [5] Wu G P, Li D H, Yang Y, et al. Microvoid evolution in carbon fibers during graphitization for the preparation of carbon/carbon composites[J]. New Carbon Materials, 2014, 29: 41-46.
- [6] 徐欢欢, 古兴瑾, 李晨. 混杂纤维复合材料的拉伸刚度[J]. 复合材料学报, 2016, 33(2): 394-398.
- [7] 徐珍珍, 汪浩, 杨莉, 等. 混杂复合方式对聚丙烯复合材料性能的影响[J]. 中国塑料, 2018, 32(3): 27-28.
- [8] 马腾, 李炜. 单向碳/玻璃纤维层内-层间混杂复合材料拉伸破坏模式研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(12): 87-93.
- [9] Chikhradze N M, Marquis F D S, Abashidze G S. Hybrid fiber and nanopowder reinforced composites for wind turbine blades[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2015, 4: 60-67.
- [10] Lifshitz M J, Rotem A. Longitudinal tensile failure of unidirectional fibrous composites[J]. Journal of Materials Science, 1972, 7: 861-869.
- [11] Swolfs Y, McMeeking R M, Verpoest I. Matrix cracks around fibre breaks and their effect on stress redistribution and failure development in unidirectional composites[J]. Composites Science and Technology, 2015, 108: 16-22.
- [12] Swolfs Y, McMeeking R M, Verpoest I, et al. The effect of fibre dispersion on initial failure strain and cluster development in unidirectional carbon/glass hybrid composites[J]. Composites Part A, 2015, 69: 279-287.
- [13] Wang Q, Wu W, Li W. Compression Properties of Interlayer and Intralayer carbon/glass hybrid composites[J]. Polymers, 2018, 10(4): 343.
- [14] 何小兵, 曹勇, 严波, et al. GFRP/CFRP 层间混杂纤维复合材料极限拉伸性能[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 1153-1156.
- [15] Wang T T, Song B, Qiao K, et al. Influence of the hybrid ratio and stacking sequence on mechanical and damping properties of hybrid composites[J]. Polymer Composites, 2018, 40(6): 2368-2380.
- [16] Aslan M, Tufan M, Küçükömeroğlu T. Tribological and mechanical performance of sisal-filled waste carbon and glass fibre hybrid composites[J]. Composites Part B, 2018, 140: 241-249.
- [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 and Design, 2018, 137: 79-89.
- [18] Bhagwat P M, Ramachandran M, Raichurkar P. Mechanical properties of hybrid glass/carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4: 7375-7380.
- [19] 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, 2018, 133: 86-90.
- [20] Pathak A K, Borah M, Gupta A, et al. Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites[J]. Composites Science and Technology, 2016, 135: 28-38.
- [21] Xin H H, Liu 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.
- [22] 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.

收稿日期: 2019-03-04

修回日期: 2020-05-03