

混杂比对碳/芳纶纤维混杂纬编 双轴向多层衬纱织物增强复合 材料力学性能的影响

Effect of hybrid ratio on mechanical properties
of carbon/aramid hybrid fiber multi-layered biaxial
weft knitted fabric reinforced composites

齐业雄^{1,2}, 姜亚明^{1,2}, 李嘉禄^{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 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387)

QI Ye-xiong^{1,2}, JIANG Ya-ming^{1,2}, LI Jia-lu^{1,2}

(1 School of Textile Science and Engineering, Tianjin Polytechnic University,

Tianjin 300387, China; 2 Key Laboratory of Advanced Textile Composites

(Ministry of Education), Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

摘要: 利用层内混杂的方式制备碳/芳纶纤维混杂纬编双轴向多层衬纱织物, 通过对材料进行拉伸、三点弯曲等实验研究该织物增强复合材料的力学性能及混杂比对其力学性能的影响。结果表明, 按照一定的混杂比加入芳纶纤维后复合材料的拉伸性能提高, 表现出积极的混杂效应。由于延伸性好的芳纶纤维的加入, 使复合材料的拉伸断裂伸长率明显提高, 材料破坏模式出现了完全脆性断裂模式(C12 材料破坏形式)和“扫帚”形纤维断裂模式(C8A4, C6A6 材料破坏形式)。此外, 按照一定的混杂比加入芳纶纤维也有效改善了碳纤维增强复合材料的破坏韧性, 碳/芳纶纤维混杂 MBWK 织物增强复合材料的弯曲强度和弯曲模量随混杂比的提高而呈下降趋势, 当复合材料中芳纶含量从 42% (体积分数, 下同)(C6A6)到 59.2% (C4A8)的变化过程中, 弯曲强度和弯曲模量的降低率较高。0°试样在混杂比为 59.2% (C4A8)时, 弯曲挠度最大, 达到 7.49 mm, 远高于纯芳纶纤维或纯碳纤维增强的复合材料。所有 90°混杂复合材料试样的弯曲挠度均高于纯芳纶纤维或纯碳纤维增强的复合材料, 表现出积极的混杂效应。

关键词: 混杂复合材料; 碳纤维; 芳纶纤维; 混杂比; 拉伸性能; 弯曲性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000611

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)02-0071-08

Abstract: Carbon/aramid fiber hybrid multi-layered biaxial weft knitted fabric was prepared in term of intraply hybridization. The mechanical properties and effect of hybrid ratio on mechanical properties were studied. Through uniaxial tension and three-point bending experiments, the tensile and bending properties and effect of hybrid ratio on mechanical properties were obtained. The results show that the tensile properties of composites are improved by adding aramid fibers according to a certain hybrid ratio, which shows a positive hybrid effect. Due to the addition of aramid fibers with good elongation, the tensile fracture elongation of the composites obviously increases, and the failure modes of the composites appear complete brittle fracture mode (C12 material failure mode) and “broom” fiber fracture mode (C8A4, C6A6 material failure mode). Besides, the fracture toughness of carbon fiber reinforced composites is effectively improved by adding aramid fibers at a certain hybrid ratio. The flexural strength and modulus of carbon/aramid hybrid MBWK fabric reinforced composites decrease with the increasing of hybrid ratio. With aramid content changing from 42% (volume fraction, the same below) (C6A6) to 59.2% (C4A8), the decreasing ratio of the bending strength and bending modulus are high. The bending deflection of 0° samples with a hybrid ratio of 59.2% (C4A8) is the

highest, the value is 7.49 mm, which is much higher than that of pure aramid fiber or carbon fiber reinforced composites. The bending deflection of all 90° samples is higher than that of pure aramid fiber or pure carbon fiber reinforced composites, which shows the positive hybrid effects.

Key words: hybrid composite; carbon fiber; aramid fiber; hybrid ratio; tensile property; bending property

近年来,复合材料已广泛应用于航空航天^[1-2]、防弹防护^[3]、车船交通^[4]、建筑^[5]等领域,提高产品的性能和实现产品的轻量化已成为研究重点。基于产品用途的复杂性,混杂复合材料迅速得到了应用,用来改善单一增强体所带来的性能局限^[6-8]。碳纤维作为高强高模材料,成为高科技领域复合材料使用的主要增强材料,然而其脆性大、断裂伸长率小等问题严重制约了其在复合材料中的应用^[9]。目前,将延展性好的高性能纤维与碳纤维共同作为复合材料的增强材料可有效避免由于碳纤维脆性大而导致的材料损伤问题^[10]。

目前大部分研究是在碳纤维复合材料中混杂玻璃纤维、石英纤维等延展性较好的纤维来提高碳纤维复合材料的延展性和韧性。马腾等^[11]研究了碳/玻璃纤维混杂复合材料的压缩性能和弯曲性能,探讨了混杂比对材料性能的影响,揭示出玻璃纤维的加入对复合材料的压缩和弯曲性能均有一定的改善。Dong 等^[12]和 Pandya 等^[13]通过分析混杂复合材料的基本力学性能,并利用显微镜对其破坏形貌进行分析,阐明对于碳纤维/玻璃纤维混杂复合材料来说,混杂比对该材料的性能影响很大。基于此,为了优化碳纤维/玻璃纤维混杂复合材料动态力学性能的混杂比,杨斌等^[14]对碳/玻璃纤维混杂复合材料的抗冲击性能进行了研究,研究结果表明在复合材料中加入 37%(体积分数,下同)的玻璃纤维与碳纤维进行混杂,材料的冲击韧性可得到改善,吸收的能量提高了 2 倍。

纬编双轴向多层衬纱(multi-layered biaxial weft knitted, MBWK)织物由于其衬纱的平行顺直状态,使该织物拥有优异的面内力学性能,因此在众多领域得到了广泛的应用。其中以姜亚明为主要负责人的研究团队通过力学建模探讨了织物拉伸^[15]、弯曲^[16]和面内剪切性能^[17],有力推动了该织物在航空航天、车船制造等领域的应用。李嘉禄等在 MBWK 织物研究已相当深入的基础上,通过树脂传递模塑成型(RTM)工艺制备了 MBWK 织物增强复合材料,研究了材料的拉伸^[18]、弯曲^[19]、压缩^[20]等基本力学性能,揭示出该复合材料平行顺直的高性能纱线的存在使其基本力学性能得到了明显改善,与机织物增强复合材料相比,其性能提高了 20%~30%^[21-22]。然而,到目前为止,碳纤维衬纱脆性大的缺点始终影响着 MBWK 织物增强

复合材料的应用。本工作利用层内混杂的方式制备了碳/芳纶纤维混杂纬编双轴向多层衬纱织物,通过 RTM 工艺制备了碳/芳纶纤维混杂复合材料,并对其力学性能进行了研究,探讨了混杂比对该材料弯曲和拉伸性能的影响。

1 实验材料与方法

1.1 原料

T300 碳纤维,由日本东丽公司生产,细度为 6 K;芳纶纤维为 Kevlar-49,由美国杜邦公司生产,细度为 1580 dtex;环氧树脂为 TDE-86,由天津津东化工助剂厂生产。材料性能参数见表 1。

表 1 材料性能参数

Table 1 Material performance parameters

Type	Tensile strength/ MPa	Elastic modulus/ GPa	Elongation at break age/%	Density/ (g·cm ⁻³)
T-300	3530	230	1.5	1.76
Kevlar-49	3260	102	2.4	1.44

1.2 试样制备

1.2.1 MBWK 织物织造

MBWK 织物是由天津工业大学复合材料研究所于 1999 年在横机设备上开发成功的专利产品,选取碳纤维、芳纶纤维作为衬纱,涤纶低弹丝(细度为 75D×2)作为捆绑纱,在复合材料研究所自主研发的纬编机上进行织造。在衬经纱层和衬纬纱层分别按照一定的比例衬入碳纤维和芳纶纤维,衬纱方式如图 1 所示。所织造的织物参数见表 2。

1.2.2 复合材料制备与测试

MBWK 织物增强复合材料的制备采用 RTM 工艺,将裁减后的 MBWK 织物铺覆在模具内,并将事先配置好的环氧树脂加入 RTM 注射机内,待注射完毕,加入烘箱内进行固化。制备好的复合材料如图 2 所示。在试样制备过程中,根据衬纱取向的不同制备了两种试样,分别是 0°试样和 90°试样,试样长度方向沿材料纬向的称为 0°试样,试样长度方向沿材料经向的称为 90°试样。

采用 AG-250KNE 万能材料试验机对材料的拉伸性能和弯曲性能进行测试。其中弯曲试样跨厚比为

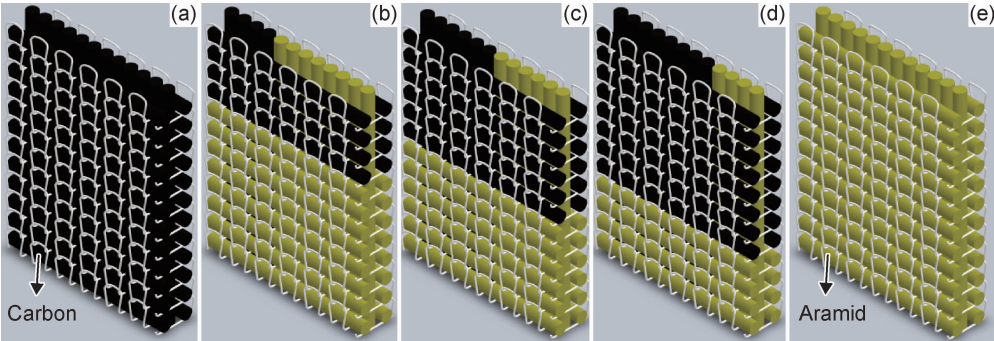


图 1 不同混杂比的 MBWK 织物结构

(a)纯碳纤维-C12;(b)碳纤维和芳纶衬入根数比 4 : 8-C4A8;(c)碳纤维和芳纶衬入根数比 6 : 6-C6A6;
(d)碳纤维和芳纶衬入根数比 8 : 4-C8A4;(e)纯芳纶纤维-A12

Fig. 1 Structure of MBWK fabrics with different hybrid ratios

(a)pure carbon fibers-C12;(b)ratio of carbon fibers to aramid fibers is 4 : 8-C4A8;(c)ratio of carbon fibers to aramid fibers is 6 : 6-C6A6;(d)ratio of carbon fibers to aramid fibers is 8 : 4-C8A4;(e)pure aramid fibers-A12

表 2 织物参数						
Table 2 Fabrics parameters						
Type	Aramid/ carbon	Hybrid ratio/ %	Warp inserted layer	Weft inserted layer	Inserted yarns	Thickness/ mm
A12	Pure aramid	100	Kevlar 49 1580 dtex×5	Kevlar 49 1580 dtex×3	Polyester (75 D×2)	1.0
C4A8	8 : 4	59.2	<u>T300-12K carbon fiber</u> Kevlar 49 1580 dtex×3	<u>T300-12K carbon fiber</u> Kevlar 49 1580 dtex×3	Polyester (75 D×2)	0.9
C6A6	6 : 6	42.0	<u>T300-12K carbon fiber</u> Kevlar 49 1580 dtex×3	<u>T300-12K carbon fiber</u> Kevlar 49 1580 dtex×3	Polyester (75 D×2)	0.9
C8A4	4 : 8	26.6	<u>T300-12K carbon fiber</u> Kevlar 49 1580 dtex×3	<u>T300-12K carbon fiber</u> Kevlar 49 1580 dtex×3	Polyester (75 D×2)	0.9
C12	Pure carbon	0	T300-12K carbon fiber	T300-6K carbon fiber	Polyester (75 D×2)	0.9

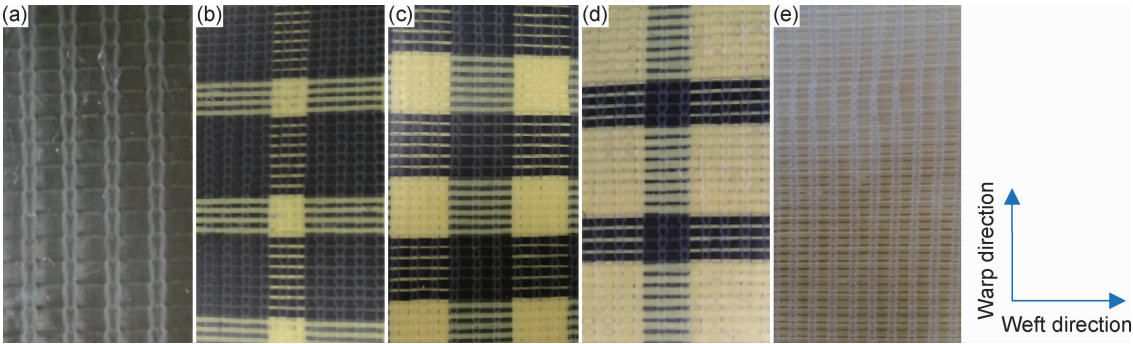


图 2 不同混杂比的 MBWK 织物增强复合材料试样 (a)C12;(b)C8A4;(c)C6A6;(d)C4A8;(e)A12

Fig. 2 Specimens of MBWK fabric reinforced composites with different hybrid ratios

(a)C12;(b)C8A4;(c)C6A6;(d)C4A8;(e)A12

16 : 1,十字压头的速率为 2 mm/min,压头半径和支座半径均为 5 mm。

2 结果与分析

2.1 混杂比对 MBWK 织物增强复合材料拉伸强度和模量的影响

图 3 为不同混杂比的 MBWK 织物增强复合材料

沿经向和纬向拉伸的强度和模量。由图 3(a)可以看出,不同混杂比的复合材料拉伸强度存在很大差异,随着衬入芳纶纤维的含量提高,复合材料的拉伸强度发生了剧烈变化,当芳纶纤维含量为 42%时,0°试样材料的拉伸强度为 682.8 MPa,拉伸强度最大。此时碳纤维和芳纶纤维的衬纱方式为 6 : 6,结构较稳定,可均匀承受载荷,从而出现了积极的混杂效应。而对于 90°试样,当加入不同比例的芳纶纤维时,材料的拉伸

强度均高于纯碳纤维和纯芳纶纤维的拉伸强度,表现出积极的混杂效应。由图 3(b)可以看出,C8A4,C6A6,C4A8 的拉伸模量均低于 C12 的拉伸模量,而高于 A12 的拉伸模量,表明随着芳纶纤维含量的提高,复合材料的拉伸模量降低,材料表现出消极的混杂效应。除此,由图 3 还可以看出,0°试样的拉伸强度和

模量均小于相同材料结构的 90°试样的拉伸强度和拉伸模量,这主要是由于两种类型的试样沿拉伸轴向承受载荷的纤维状态不同,对于 0°试样起主要承受拉伸载荷作用的衬纬纱分布于材料的上下表层,而 90°试样起主要承受弯曲载荷作用的衬经纱分布于材料的中间位置,纱线集束状态好,从而提高了材料的抗拉能力。

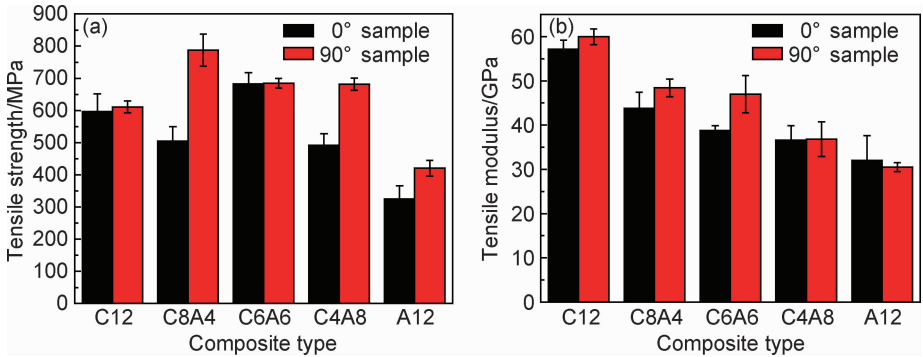


图 3 混杂比与 MBWK 织物增强复合材料拉伸性能的关系
(a)混杂比与拉伸强度的关系;(b)混杂比与拉伸模量的关系

Fig. 3 Relationship between hybrid ratios and tensile properties of MBWK fabrics reinforced composite

(a)relationship between hybrid ratios and tensile strength;(b)relationship between hybrid ratios and tensile modulus

2.2 混杂比对 MBWK 织物增强复合材料拉伸断裂伸长率的影响

不同混杂比的 MBWK 织物增强复合材料的断裂伸长率高于碳纤维 MBWK 织物增强复合材料,而低于芳纶纤维 MBWK 织物增强复合材料,如图 4 所示。随着芳纶/碳纤维混杂比的增加,0°试样和 90°试样的断裂伸长率增大。最主要的原因是不同混杂比的 MBWK 织物增强复合材料的拉伸断裂机理不同于纯碳纤维的 MBWK 织物增强复合材料。碳纤维复合材料的裂纹在拉伸载荷下可以迅速扩展到整个截面,从而发生突变破坏。在碳纤维 MBWK 织物增强复合材料中,由于芳纶纤维的加入,使碳纤维周围存在具有高断裂伸长率的芳纶纤维,将阻止裂纹扩展,从而延迟损伤的产生。另一个明显的现象是 0°试样的断裂伸长率低于 90°试样的断裂伸长率,差别较大。相对于 90°试样,0°试样分别降低了 5.7%,28.5%,28.9%,27.6%和 33.5%。其主要原因在于 0°试样和 90°试样沿长度方向的衬纱形式不同,其中 0°试样沿长度方向的衬纱为纬纱,90°试样为经纱。在 MBWK 织物织造过程中,衬经纱由于经纱轴张力的作用处于完全伸直状态,而衬纬纱通过喂纱装置引入捆绑组织内,从而存在微屈曲。在材料受到拉伸载荷时,衬纬纱由于具有微屈曲而不能有效阻止环氧树脂基体裂纹的扩展,从而造成材料发生破坏,降低了材料的拉伸断裂伸长率。

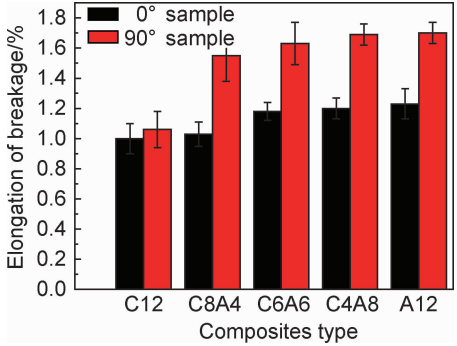


图 4 混杂比与 MBWK 织物增强复合材料断裂伸长率的关系

Fig. 4 Relationship between hybrid ratios and elongation at breakage of MBWK fabrics reinforced composites

2.3 碳/芳纶纤维混杂 MBWK 织物增强复合材料的拉伸失效模式

碳/芳纶混杂 MBWK 织物增强复合材料随纤维混杂比、拉伸轴向、纤维状态的不同,表现出不同的拉伸性能。图 5 为碳/芳纶混杂 MBWK 织物增强复合材料拉伸断裂形貌图。由于拉伸失效的形式一般为纤维、树脂的脆性断裂和纤维的抽拔等,因此在实验中材料的破坏模式主要分为完全脆性断裂模式(如图 5 中 C12 材料破坏形式)和“扫帚”形纤维断裂模式(如图 5 中 0°试样的 C8A4,C6A6 和 90°试样的 C6A6,C4A8 的破坏形式)。0°试样的 C8A4,C6A6 和 90°试样的 C6A6,C4A8 在破坏时,碳纤维突然断裂,断裂的碳纤维释放出来的巨大能量将两侧碳纤维扯成碎片向四周

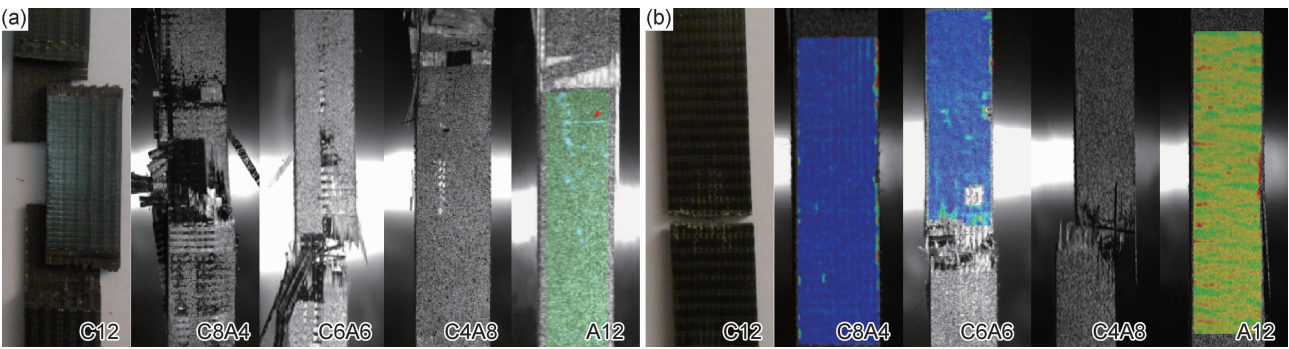


图 5 碳/芳纶混杂 MBWK 织物增强复合材料拉伸断裂形貌
(a)0°试样;(b)90°试样

Fig. 5 Tensile fracture morphologies of carbon/aramid hybrid MBWK fabric reinforced composites
(a)0° sample;(b)90° sample

飞溅,完全脆性断裂,同时由于芳纶纤维和环氧树脂的界面结合力较小,造成芳纶纤维出现了纤维抽拔现象。

2.4 弯曲载荷-挠度曲线

图 6 为不同混杂比 MBWK 织物增强复合材料弯曲载荷-挠度曲线。由图 6 可知,C12 复合材料试样具有最高的破坏载荷,并出现脆性断裂,破坏挠度较小等

现象,这主要是由于碳纤维的脆性大,断裂伸长率小等原因造成的。按照一定的混杂比加入芳纶纤维后,复合材料的破坏载荷下降。达到破坏载荷时,材料没有出现瞬间破坏,而是随着挠度的不断增加逐步破坏,表明芳纶纤维的加入有效提升了碳纤维增强复合材料的破坏韧性,改变了复合材料的破坏形式,改善了碳纤维

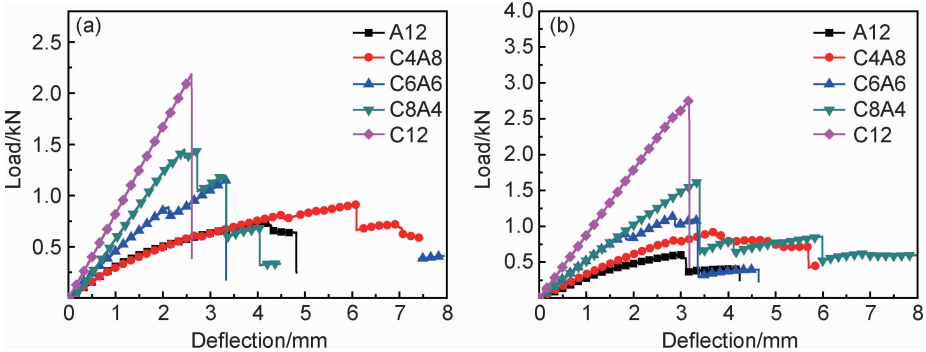


图 6 MBWK 织物增强复合材料弯曲载荷-挠度曲线 (a)0°试样;(b)90°试样

Fig. 6 Bending load-deflection curves of MBWK reinforced composites (a)0° sample;(b)90° sample

脆性断裂带来的材料瞬间破坏问题。

2.5 混杂比对 MBWK 织物增强复合材料弯曲强度和弯曲模量的影响

图 7 为不同混杂比的 MBWK 织物增强复合材料两种试样类型的弯曲强度和弯曲模量。由图 7 可以看出,不同混杂比的复合材料弯曲强度和弯曲模量存在很大差异,随着衬入芳纶纤维的含量提高,复合材料的弯曲强度和弯曲模量降低,当所有衬纱全部是芳纶纤维时,弯曲强度和弯曲模量最低,碳纤维和芳纶纤维混杂后表现出明显的混杂效应。随着混杂比的增加,0°试样的弯曲强度比碳纤维作为衬纱时分别降低了 12.6%,26.5%,20.6%和 26.4%,弯曲模量比碳纤维作为衬纱时分别降低了 9.1%,8.1%,20.8%和 12.2%,90°试样的弯曲强度比碳纤维作为衬纱时分别

降低了 8.9%,15.1%,33.5%和 13.9%,弯曲模量比碳纤维作为衬纱时分别降低了 8.9%,3.6%,27.7%和 17.6%。当复合材料中芳纶含量从 42%(C6A6)到 59.2%(C4A8)的变化过程中,弯曲强度和弯曲模量的降低率较高,材料性能变化程度较大,因此在使用该混杂复合材料时应注意混杂比在 42%(C6A6)至 59.2%(C4A8)范围内的使用条件。此外,由图 7 还可以看出 0°试样的弯曲强度和弯曲模量均低于 90°试样,分别降低了 12.5%,16.2%,27.4%,13.3%和 25.9%,这主要是由于两种类型的试样弯曲破坏模式不同,对于 0°试样起主要承受弯曲载荷作用的衬纬纱分布于材料的上下表层,分别受到压缩和拉伸的作用,而 90°试样起主要承受弯曲载荷作用的衬经纱分布于材料的中间位置,基本以受拉作用为主,从而提高了材料的抗弯能力。

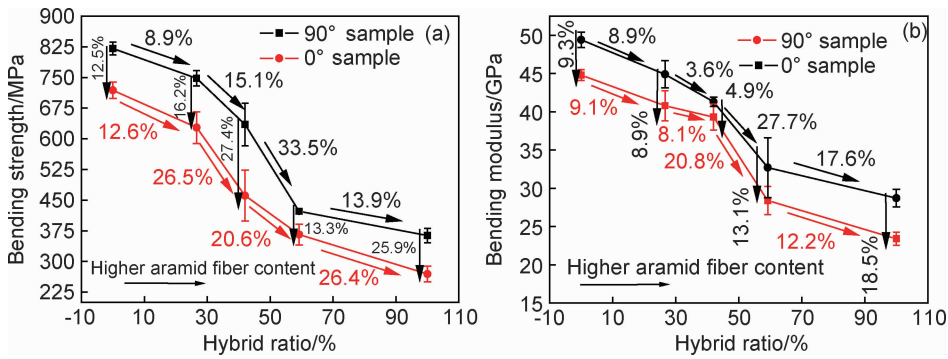


图 7 混杂比与 MBWK 织物增强复合材料弯曲强度(a)和弯曲模量(b)的关系

Fig. 7 Relationship between bending strength(a) and bending modulus(b) of MBWK fabrics reinforced composite and hybrid ratios

2.6 混杂比对 MBWK 织物增强复合材料弯曲挠度的影响

图 8 为不同混杂比的 MBWK 织物增强复合材料两种试样类型的弯曲挠度与碳/芳纶混杂比的关系。由图 8 可以看出,加入芳纶纤维的复合材料弯曲挠度明显高于纯碳纤维增强的复合材料,碳纤维和芳纶纤维混杂后表现出明显的混杂效应。对于 0°试样,当混杂比为 59.2% (C4A8) 时,弯曲挠度最大,达到 7.49 mm,混杂复合材料的弯曲挠度高于纯芳纶纤维和纯碳纤维增强的复合材料,表现出积极的混杂效应。对于 90°试样,所有混杂复合材料的弯曲挠度均高于纯芳纶纤维和纯碳纤维增强的复合材料,也表现出积极的混杂效应,当混杂比为 26.6% (C8A4) 时达到最大挠度 7.96 mm。由于芳纶纤维的延展性明显高于碳纤维,可以看出混杂后复合材料的失效位移均显著高于纯碳纤维增强的复合材料。因此,可通过在碳纤维复合材料中加入芳纶纤维来改善碳纤维的断裂韧性,提高材料整体的延展性,使材料的失效过程趋于平缓,而不是脆性失效。

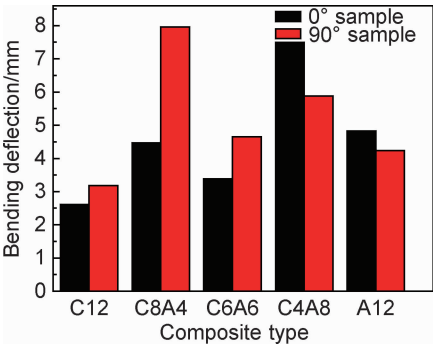


图 8 混杂比与 MBWK 织物增强复合材料弯曲挠度的关系

Fig. 8 Relationship between bending deflection of MBWK fabrics reinforced composite and hybrid ratios

2.7 混杂比对 MBWK 织物增强复合材料弯曲断裂形貌的影响

碳/芳纶混杂 MBWK 织物增强复合材料在弯曲载荷下的失效模式主要包括压缩、拉伸、剪切等。其中,压缩失效和拉伸失效最常见,一般为树脂碎裂、脆性断裂和纤维抽拔等,剪切失效一般出现在中间层附近,发生材料层与层之间的分层破坏。然而,由于碳纤维和芳纶纤维与环氧树脂的界面结合力不同,其破坏形式也存在很大的差异。图 9 给出了碳纤维和芳纶纤维复合材料在弯曲载荷下的破坏形式,可以看出,碳纤维增强部分材料发生了纤维断裂、树脂碎裂,分层现象不明显;而芳纶纤维增强部分则纤维抽拔现象明显,并伴随明显的分层现象。由于碳纤维失效位移较小,并与环氧树脂界面结合力较大,表现为脆性断裂,在受到弯曲载荷作用时出现了明显的纤维断裂。芳纶纤维具有较好的断裂伸长率和延展性,随着弯曲载荷的增加,基体或界面缺陷处会产生微裂纹,当微裂纹逐渐扩展尚未达到芳纶纤维的断裂伸长率时,芳纶纤维会阻止裂纹的继续扩展,从而延缓材料的失效,此处材料并不是发生脆性失效。

3 结论

(1)碳/芳纶混杂有效改善了 MBWK 织物增强复合材料的拉伸性能。当芳纶纤维含量为 42% 时,0°试样材料的拉伸强度为 682.8 MPa,拉伸强度最大,出现了积极的混杂效应。当加入不同比例的芳纶纤维时,90°试样材料的拉伸强度均高于纯碳纤维和纯芳纶纤维的拉伸强度,表现出积极的混杂效应。

(2)在拉伸实验中碳/芳纶混杂 MBWK 织物增强复合材料的破坏模式主要分为完全脆性断裂模式 (C12 材料破坏形式) 和“扫帚”形纤维断裂模式 (0°试

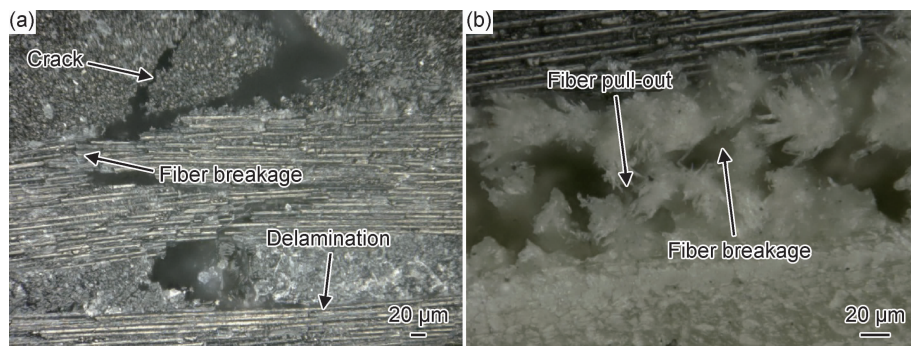


图 9 碳/芳纶混杂 MBWK 织物增强复合材料弯曲破坏形貌

(a)碳纤维;(b)芳纶纤维

Fig. 9 Bending failure morphologies of carbon/aramid hybrid MBWK fabric reinforced composites

(a)carbon fiber;(b)aramid fiber

样的 C8A4 和 C6A6 以及 90°试样的 C6A6 和 C4A8 的破坏形式)。

(3)碳/芳纶纤维混杂 MBWK 织物增强复合材料的弯曲强度和弯曲模量随混杂比的提高呈下降趋势,复合材料中芳纶含量从 42% (C6A6) 到 59.2% (C4A8) 的变化过程中,弯曲强度和弯曲模量下降较快。

(4)由于两种类型的复合材料在承受外部弯曲载荷时,其主承载作用的衬纱不同,使得 0°试样的弯曲强度和弯曲模量均低于 90°试样,分别降低了 12.5%, 16.2%, 27.4%, 13.3% 和 25.9%。

(5)0°试样在混杂比为 59.2% (C4A8) 时,弯曲挠度最大,达到 7.49 mm,混杂复合材料的弯曲挠度高于纯芳纶纤维或纯碳纤维增强的复合材料,表现出积极的混杂效应。所有 90°混杂复合材料试样的弯曲挠度均高于纯芳纶纤维或纯碳纤维增强的复合材料,也表现出积极的混杂效应,当混杂比为 26.6% (C8A4) 时达到最大挠度 7.96 mm。

参考文献

- [1] VERMA D, FORTUNATI E, JAIN S, et al. Biomass, biopolymer-based materials, and bioenergy [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019.
- [2] 张丹丹,沈洪雷,曹霞,等. 石墨烯增强金属基航空复合材料研究进展[J]. 材料工程, 2019, 47(1): 1-10.
ZHANG D D, SHEN H L, CAO X, et al. Research progress in graphene reinforced aeronautical metal matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(1): 1-10.
- [3] 许国栋,李地红,吴昊宇,等. 模糊评价法表征复合材料层合板低能量冲击行为[J]. 材料导报, 2018, 32(32): 573-576.
XU G D, LI D H, WU H Y, et al. Characterization of low energy impact damage behavior for composite laminates by fuzzy evaluation[J]. Materials Reports, 2018, 32(32): 573-576.
- [4] 刘强,马小康,宗志坚. 斜纹机织碳纤维/环氧树脂复合材料性能

及其在电动汽车轻量化设计中的应用[J]. 复合材料学报, 2011, 28(5): 83-88.

LIU Q, MA X K, ZONG Z J. Properties of twill-weave carbon fabric/epoxy composites and its application on light-weight design for electric vehicles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(5): 83-88.

- [5] 王春红,支中祥,任子龙,等. 稻壳纤维粒径和掺量分数对水泥复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1582-1589.

WANG C H, ZHI Z X, REN Z L, et al. Effect of rice husk fiber particle size and content on the properties of cement composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1582-1589.

- [6] SUBAGIA I, KIM Y. Tensile behavior of hybrid epoxy composite laminate containing carbon and basalt fibers[J]. Science & Engineering of Composite Materials, 2014, 21(2): 211-217.

- [7] DEHKORDI M T, NOSRATY H, SHOKRIEH M M, et al. Low velocity impact properties of intraply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics[J]. Materials & Design, 2010, 31(8): 3835-3844.

- [8] 倪楠楠,夏璐,张文字,等. 苧麻纤维布和玻璃纤维布混杂铺层复合材料的力学性能[J]. 材料工程, 2019, 47(2): 153-159.

NI N N, XIA L, ZHANG W Y, et al. Mechanical properties of ramie fiber cloth and glass fiber cloth hybrid laminated composite [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(2): 153-159.

- [9] PAIVA J M F D, SANTOS A D N D, REZENDE M C. Mechanical and morphological characterizations of carbon fiber fabric reinforced epoxy composites used in aeronautical field[J]. Materials Research, 2009, 12(3): 367-374.

- [10] SUBAGIA I D G A, KIM Y, TIJING L D, et al. Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers[J]. Composites: Part B, 2014, 58(3): 251-258.

- [11] 马腾,贾智源,关晓方,等. 混杂比对单向碳-玻层间混编复合材料 0°压缩和弯曲性能的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(4): 758-765.

MA T, JIA Z Y, GUAN X F, et al. Effects of hybrid ratio on the axial compressed and flexural properties of unidirectional inter-layer carbon-glass hybrid composites [J]. Acta Materiae

- Compositae Sinica, 2017, 34(4): 758-765.
- [12] DONG C, RANAWEERA-JAYAWARDENA H A, DAVIES I J. Flexural properties of hybrid composites reinforced by S-2 glass and T700S carbon fibres[J]. Composites: Part B, 2012, 43(2): 573-581.
- [13] PANDYA K S, VEERRAJU C, NAIK N K. Hybrid composites made of carbon and glass woven fabrics under quasi-static loading [J]. Materials & Design, 2011, 32 (7): 4094-4099.
- [14] 杨斌, 章继峰, 周利民. 玻璃纤维-碳纤维混杂增强 PCBT 复合材料层合板的制备及低速冲击性能[J]. 复合材料学报, 2015, 32 (2): 435-443.
- YANG B, ZHANG J F, ZHOU L M. Preparation and low-velocity impact properties of glass fiber-carbon fiber hybrid reinforced PCBT composite laminate[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 435-443.
- [15] HU J L, JIANG Y M, KO F. Modeling uniaxial tensile properties of multiaxial warp knitted fabrics[J]. Textile Research Journal, 1998, 68(11): 828-834.
- [16] JIANG Y M, HU J L, KO F. Characterizing and modeling bending properties of multiaxial warp knitted fabrics[J]. Textile Research Journal, 1999, 69(9): 691-697.
- [17] 张卓. 纬编双轴向多层衬纱织物增强复合材料面内力学性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2003.
- ZHANG Z. The analysis of in-plane mechanical properties of multilayered biaxial weft-knitted fabric reinforced composite[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2003.
- [18] QI Y X, LI J L, LIU L S. Tensile properties of multilayer-connected biaxial weft knitted fabric reinforced composites for carbon fibers[J]. Materials & Design, 2014, 54(2): 678-685.
- [19] QI Y X, LI J L, LIU L S. Bending properties of the multilayer-connected biaxial weft knitted fabrics-reinforced composites made with carbon fibers[J]. Polymer Composites, 2015, 36 (12): 2291-2302.
- [20] PEI X Y, SHANG B, CHEN L, et al. Compression properties of multilayer-connected biaxial weft knitted carbon fiber fabric reinforced composites[J]. Composites: Part B, 2016, 91(4): 296-305.
- [21] DAI S, CUNNINGHAM P R, MARSHALL S, et al. Influence of fibre architecture on the tensile, compressive and flexural behaviour of 3D woven composites[J]. Composites: Part A, 2015, 69(2): 195-207.
- [22] ULLAH H, HARLAND A R, SILBESCHMIT V V. Experimental and numerical analysis of damage in woven GFRP composites under large-deflection bending[J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(5): 769-783.

基金项目: 天津市自然科学基金项目(18JCQNJC73300, 18JCZDJC10020)

收稿日期: 2019-06-27; 修订日期: 2019-10-11

通讯作者: 齐业雄(1985—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为复合材料结构设计、复合材料力学, 联系地址: 天津市西青区宾水西道 399 号天津工业大学纺织科学与工程学院(300387), E-mail: qiyexiong@tjpu.edu.cn

(本文责编: 宗希宽)