

引用格式:高军鹏,王婷婷,李伟东,等.高刚度混杂碳纤维复合材料的制备与性能[J].材料工程,2024,52(11):35-40.
GAO Junpeng, WANG Tingting, LI Weidong, et al. Preparation and properties of high stiffness hybrid carbon fibers composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(11): 35-40.

高刚度混杂碳纤维复合材料的 制备与性能

Preparation and properties of high stiffness
hybrid carbon fibers composites

高军鹏^{1*},王婷婷¹,李伟东²,蒋诗才¹,许 虎¹,张宝艳¹

(1 中国航空制造技术研究院复合材料技术中心,北京 101300;
2 中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

GAO Junpeng^{1*}, WANG Tingting¹, LI Weidong²,
JIANG Shicai¹, XU Hu¹, ZHANG Baoyan¹

(1 AVIC Manufacturing Technology Institute Composite
Technology Center, Beijing 101300, China; 2 AVIC
Composite Co., Ltd., Beijing 101300, China)

摘要:以国产高强中模 CCF800H 碳纤维为基础增强材料,以 CCM40J 及 CCM55J 高模量碳纤维为混杂增强体、AC631 高温双马来酰亚胺树脂为基体,制备不同纤维比例的面内混杂预浸料。结合热压罐成型工艺,制备并表征五组不同碳纤维混杂比例的复合材料的力学性能。根据测试结果,分析了不同混杂复合材料体系的力学性能变化,得到 CCF800H/CCM40J(5:5)、CCF800H/CCM40J(4:6)、CCF800H/CCM55J(5:5) 三组典型混杂配比的复合材料体系,均表现出较好的力学性能。这可为飞机复合材料结构件的研制提供参考的基础材料性能数据。

关键词:碳纤维;混杂预浸料;复合材料;力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000879

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2024)11-0035-06

Abstract: With domestic high-strength medium modulus CCF800H carbon fiber as the basic reinforcement material, CCM40J and CCM55J high modulus carbon fibers as the hybrid reinforcements, and AC631 high-temperature bismaleimide resin as the matrix, the in-plane hybrid prepregs with different fiber ratios were prepared. Combined with the autoclave molding process, the mechanical properties of five groups of composite materials with different carbon fiber hybrid ratios were prepared and characterized. According to the test results, the changes in the mechanical properties of different hybrid composite systems were analyzed, and three groups of typical hybrid ratio composite systems, CCF800H/CCM40J (5:5), CCF800H/CCM40J (4:6), and CCF800H/CCM55J (5:5), were obtained, all of which showed good mechanical properties. This can provide reference basic material performance data for developing aircraft composite structural parts.

Key words: carbon fiber; hybrid prepreg; composite; mechanical property

树脂基纤维增强复合材料具有高比强度、高比模量、耐疲劳性能好、可设计性强等特点,在航空航天、舰船、兵器、轨道交通及体育器械等方面得到广泛应用。随着研究者在原材料、复合工艺、界面理论、复合效应等方面实践和理论研究的深入,研究者和工程师有了更大的空间去选择不同的增强材料(颗粒、片状

物、纤维及其织物等)与基体进行合理的性能(功能和力学)设计(如宏观的铺层设计、微结构设计等),采用多种特殊的工艺使其复合或交叉结合,从而制造出高于原先单一材料的性能或开发出单一材料所不具备的性质和使用性能,如优异的力学性能、具有特殊功能或生物效应的各类高级复合材料。

1972年,日本的Hayashi提出了混杂纤维复合材料的概念^[1],观察到混杂复合材料中低伸长率纤维的破坏应变高于单一纤维增强复合材料中的破坏应变。因此,学者开始对混杂纤维复合材料开展了大量的研究^[2-13],包括层间混杂复合材料和层内混杂复合材料,其目的是采用混杂纤维制备复合材料,弥补单一纤维增强复合材料的不足,在满足使用要求的前提下降低材料成本。层间混杂复合材料是由两种不同的纤维复合材料单层以不同的比例及方式交替铺设构成,层内混杂复合材料是由两种纤维按比例分散在单层中。复合材料具有可设计性强的特点,不管是层内混杂还是层间混杂,均可通过层内纤维比例设计及层间铺设设计进行混杂纤维复合材料力学性能设计,得到一种兼顾模量、强度及韧性,满足使用要求的复合材料体系。

王小萌等^[14]对层内混杂纤维增强复合材料的力学性能进行了理论分析,提出了反映层内混杂纤维增强复合材料混杂效应的力学性能的理论模型和计算方法,并通过实验验证了公式的有效性,研究成果可为纤维混杂复合材料的过程应用提供设计指导。混杂效应的机理主要受热效应、束缚效应和断裂理论三个方面的影响。孙志杰等^[15]通过力学和热性能实验分析得出层间和夹芯混杂复合材料的热膨胀量随碳纤维相对含量的增加而减少。单一纤维复合材料在受到载荷作用时,初始破坏发生在材料薄弱部位,并形成应力集中,达到纤维破坏的临界点时,纤维断裂形成裂纹发生扩展,导致材料被破坏。所以,单一纤维增强复合材料的破坏应变和极限破坏应变相差不大。在低伸长率纤维和高伸长率纤维混杂形成的复合材料中,某部位的低伸长率纤维发生断裂时,破坏产生的裂纹收到相邻高伸长率纤维约束而不能扩展,从而降低了应变能释放速率,这种效应成为“束缚效应”^[16]。Fariborz等^[17]建立了混杂复合材料的破坏应变模型,研究结果表明,高模量纤维的断裂受到低模量纤维的限制,混杂复合材料断裂后释放的应变能高于单一纤维增强复合材料。

本工作采用中等模量CCF800H碳纤维与高等模量CCM40J和CCM55J碳纤维分别进行层内混杂,以高温双马来酰亚胺树脂为基体,制备出不同纤维混杂比例的层内混杂预浸料。分别对不同纤维混杂比例的复合材料进行了力学性能表征。

1 实验

1.1 原材料

碳纤维:CCF800H(6K),CCM40J(6K),CCM55J

(6K),威海拓展纤维有限公司;AC631树脂:中国航空制造技术研究院;表1为纤维的基本性能。

表1 纤维基本性能

Table 1 Basic properties of fiber

Material	Tensile strength, X_t /MPa	Tensile modulus, E_t /GPa	Density/ ($g \cdot cm^{-3}$)	Elongation at break/%
CCF800H	5400	290	1.80	1.97
CCM40J	4400	380	1.78	1.20
CCM55J	4020	540	1.90	0.80

1.2 混杂纤维复合材料层合板制备

将预浸料裁剪下料,按照力学性能测试实验项目的参考标准进行预浸料铺放和实验件加工。复合材料成型采用热压罐成型工艺,其成型工艺过程及工艺参数如下:制备过程中存在两个温度折点(俗称两个台阶)。初始,从室温加热3h升至 $(180 \pm 5)^\circ C$,到第一个温度折点后保温 (2 ± 0.5) h,并在室温至 $80^\circ C$ 期间热压罐开始加压,压力保持在 $0.4 \sim 0.7$ MPa,且袋内真空度不低于 0.092 MPa。待第一阶段保温结束后,继续升温,并在1h内加热至最高温度 $190 \sim 210^\circ C$,到达第二温度折点后需要保温 (6 ± 0.5) h,保温结束后自然冷却至室温。

1.3 力学性能测试

采用电子万能试验机进行不同纤维混杂比例的复合材料实验件的力学性能测试,主要是基本力学性能实验测定,包括刚度特性和强度特性。拉伸性能测试(包括 0° 和 90° 方向)参考ASTM 3039标准;压缩性能测试(包括 0° 和 90° 方向)参考ASTM 6641标准;此外,纵横剪切性能测试参考ASTM 3518标准,层间剪切性能测试则参考ASTM 2344标准。

2 实验结果与讨论

2.1 混杂纤维预浸料的制备

CCF800H碳纤维属于中等模量碳纤维,其拉伸模量为 290 GPa,而CCM40J和CCM55J碳纤维属于高等模量碳纤维,其拉伸模量分别为 380 GPa和 540 GPa,模量大幅增加。本工作以CCF800H碳纤维为基础纤维,以CCM40J和CCM55J碳纤维为混杂纤维,按照不同混杂比例,作为面内混杂纤维预浸料的增强体。实现两种混杂纤维在预浸料中更加分散且均匀,提高复合材料力学性能的均匀性,采用丝束较小的6K纤维进行预浸料制作。确定制备的碳纤维预浸料详细类型如表2所示。

表 2 碳纤维预浸料的类型

Table 2 Types of carbon fiber prepregs

Prepreg	Hybrid ratio of carbon fiber	Resin system
F84-55	CCF800H(50%)/CCM40J(50%)	AC631
F84-64	CCF800H(60%)/CCM40J(40%)	AC631
F84-46	CCF800H(40%)/CCM40J(60%)	AC631
F85-55	CCF800H(50%)/CCM55J(50%)	AC631
F85-64	CCF800H(60%)/CCM55J(40%)	AC631

AC631 双马来酰亚胺树脂是一类耐高温、高性能树脂体系,已应用到多个飞机复合材料结构中。按照混杂纤维预浸料(35±2%)(质量分数,下同)的树脂含量,计算得出单面 AC631 双马树脂的胶膜面密度为 40 g/m²,在进行预浸料制备时,对纤维增强体进行双面覆膜,实现 35% 的树脂含量。根据 Q/ZHFC 8193—2016 AC631 高温固化双马树脂规范,通过调控树脂温度调节树脂黏度以及胶膜机双辊之间的间隙,制备出了符合树脂面密度要求的双马树脂胶膜,在胶膜的制备过程中,采用红外线检测仪在线监测树脂胶膜面密度,树脂质量精度控制在±2 g/m²,作为混杂纤维预浸料的热熔法树脂基体。

将 CCF800H 碳纤维与 CCM40J,CCM55J 碳纤维按照表 2 的混杂比例进行面内混杂,纤维面密度设定为 145 g/m²,以 AC631 环氧树脂为基体,采用热熔法制备碳纤维预浸料。分别按照 CCF800H 与 CCM40J,CCM55J 的混杂比例,将一定轴数的碳纤维分别放置于纱架上,通过篦子后,牵引排布到预浸机。在排纱过程中,保证了纤维的均匀展平,未出现叠加互相缠绕。为保证纤维在运行过程中尽量减少纤维损伤,每个篦子孔只穿一根纱,提高不同纤维混杂比例预浸料时纤维的均匀分布性。通过调节 AC631 树脂与纤维的复合温度、树脂黏度,控制纤维张力和压辊间隙,进行树脂与高模量碳纤维的复合制备工艺研究,确定适合 AC631 树脂与 CCM40J 和 CCM55J 高模量碳纤维预浸料的制备工艺。制备出以 AC631 高温双马来酰亚胺树脂为基体,以国产 CCF800H 碳纤维为基本增强材料,以 CCM40J 及 CCM55J 高模量碳纤维为混杂增强体,纤维单位面积质量为 145 g/m²,树脂含量为(35±2%)的五种纤维混杂比例的预浸料。

2.2 混杂纤维复合材料的力学性能

采用热压罐成型方法,制备出五种混杂纤维增强复合材料层合板,分别测试了力学性能。

五种混杂纤维配比层合板的 0° 拉伸性能测试对比如图 1 所示。从图 1 可以看出,在 CCF800H 和 CCM40J 混杂纤维复合材料体系中,随着 CCM40J 纤维在混杂

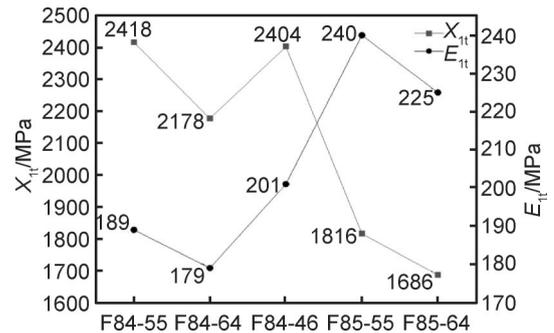


图 1 五种混杂纤维配比层合板的 0° 拉伸强度与模量对比图

Fig. 1 Comparison of 0° tensile strength and modulus of five hybrid fiber ratio laminates

纤维复合材料层合板中含量从 40% 增加到 50% 和 60%,复合材料的 0° 拉伸模量 E_{1t} 由 179 GPa 增加到 189 GPa 和 201 GPa,实现了复合材料刚度提升。同时,0° 拉伸强度 X_{1t} 也从 2178 MPa 提高到了 2418 MPa 和 2404 MPa。综合测试数据,CCF800H 和 CCM40J 的混杂比例为 4:6 时,复合材料的刚度和强度可实现较高的水平。

CCF800H 和 CCM55J 混杂纤维复合材料体系中,当 CCF800H 和 CCM55J 的混杂比例为 4:6 时,0° 拉伸强度和模量为 1686 MPa 和 225 GPa,当 CCF800H 和 CCM55J 纤维的混杂比例为 5:5 时,0° 拉伸强度和模量提高到 1816 MPa 和 240 GPa。针对 CCF800H 和 CCM55J 混杂纤维复合材料体系,两种纤维的混杂比例为 5:5 时,复合材料保持了较高的强度和模量。

0° 方向拉伸性能主要取决于纤维种类、纤维体积含量、纤维平直状态及其与树脂的浸润性。单向复合材料层合板拉伸破坏形式主要有三种典型断口:纒帚状散丝断口、不规则断口和平断口。其中,以不规则断口强度最佳,平断口次之,散丝断口强度偏低。界面强度太弱会出现散丝断口,界面强度太高会出现平断口。

CCF800H 和 CCM40J 三种混杂比例(5:5,6:4,4:6)纤维复合材料 0° 拉伸试样均出现了散丝断口(图 2)和未全部断裂两种破坏形式(图 3)。



图 2 0° 拉伸试样的散丝状断口

Fig. 2 Filamentary fracture of 0° tensile specimen



图3 0°拉伸试样的未断裂破坏形式

Fig. 3 Unbroken failure pattern of 0° tensile specimen

相对于CCF800H碳纤维的模量(290 GPa),CCM40J纤维的模量较高(377 GPa)。混杂纤维复合材料在受拉伸载荷时,由于两者的模量不匹配,载荷会优先由刚度高的CCM40J碳纤维承受,造成承受载荷分布不均。另外,CCF800H碳纤维的断裂伸长率为1.9%,而CCM40J碳纤维的断裂伸长率为1.2%,CCM55J碳纤维的断裂伸长率仅为0.8%,造成的后果就是在混杂纤维复合材料拉伸过程中,CCM40J和CCM55J纤维早于CCF800H发生断裂。这就是在测试过程中,有一部分纤维发生断裂,而另一部分纤维未发生断裂的原因。如果继续施加拉伸载荷,CCF800H发生断裂,就会出现试样破坏的散丝断口。

复合材料的90°拉伸性能主要取决于树脂与纤维的浸润性以及树脂与纤维之间的界面性能。CCF800H与CCM40J三种纤维混杂比例的复合材料层合板的90°拉伸性能差别不大。图4为五种混杂纤维配比层合板的90°拉伸强度与模量对比图,从拉伸强度性能数据来看,6:4混杂比例的拉伸强度较其他两种比例高,说明AC631树脂与CCF800H纤维的界面性能优于AC631树脂与CCM40J纤维的界面性能。相比较而言,CCF800H与CCM55J混杂纤维复合材料层合板的90°拉伸强度 X_{2t} 较CCF800H与CCM40J混杂纤维复合材料层合板低,说明AC631树脂与CCM55J纤维的界面性能更弱。

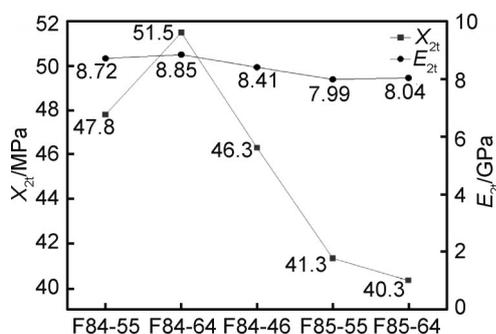


图4 五种混杂纤维配比层合板的90°拉伸强度与模量对比图

Fig. 4 Comparison of 90° tensile strength and modulus of five hybrid fiber ratio laminates

混杂纤维增强复合材料0°压缩性能如图5所示,可以看出,在CCF800H和CCM40J混杂纤维复合材料体系中,随着CCM40J纤维在混杂纤维复合材料层合板中含量从40%增加到50%和60%,复合材料的0°压缩模量 E_{1c} 基本保持不变,同时,0°压缩强度从1285 MPa增加到1319 MPa和1401 MPa。综合测试数据,CCF800H和CCM40J的混杂比例为4:6时,复合材料的强度可实现较高的水平。在CCF800H和CCM55J混杂纤维复合材料体系中,CCF800H和CCM55J的混杂比例为4:6时,0°压缩强度和模量 X_{1c} 为710 MPa和196 GPa,当CCF800H和CCM55J纤维的混杂比例为5:5时,0°压缩强度和模量提高到718 MPa和191 GPa。两种混杂比例的复合材料层合板性能相差不多。

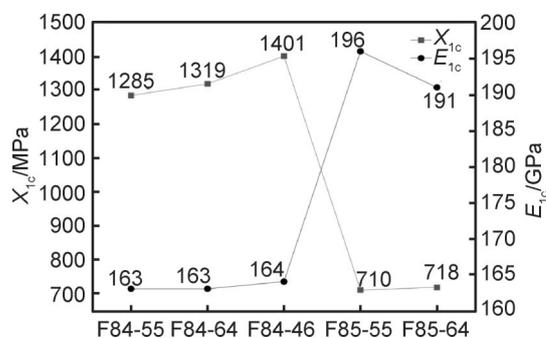


图5 五种混杂纤维配比层合板的0°压缩强度与模量对比图

Fig. 5 Comparison of 0° compression strength and modulus of five hybrid fiber ratio laminates

混杂纤维增强复合材料面内剪切性能如图6所示。可以看出,在CCF800H和CCM40J混杂纤维复合材料体系中,随着CCM40J纤维在混杂纤维复合材料层合板中含量从40%增加到50%和60%,复合材料的面内剪切强度 S_{12} 从77.5 MPa降至73.6 MPa和70.7 MPa。其主要原因可能是树脂基体与CCM40J碳纤维结合强度较与CCF800H的结合强度低所致。

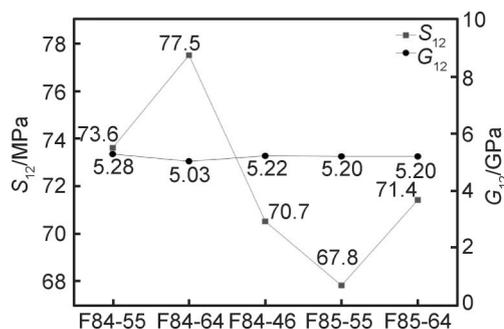


图6 五种混杂纤维配比层合板的面内剪切强度与模量对比图

Fig. 6 Comparison of in-plane shear strength and modulus of five hybrid fiber ratio laminates

CCM40J 纤维在混杂纤维复合材料层合板中含量从 40% 增加到 50% 和 60%，复合材料的内面剪切模量 G_{12} 从 5.03 GPa 增加到 5.28 GPa 和 5.22 GPa，相差不大。

CCF800H 和 CCM55J 混杂纤维复合材料体系中，当 CCF800H 和 CCM55J 的混杂比例为 5:5 和 6:4 时，内面剪切强度分别为 67.8 MPa 和 71.4 MPa，模量均为 5.20 GPa。

图 7 为五种混杂纤维配比层合板的短梁剪切强度与模量对比图，可以看出，在 CCF800H 和 CCM40J 混杂纤维复合材料体系中，三种混杂比例复合材料的短梁剪切强度 S 分别为 102, 100, 100 MPa，相差不大。在 CCF800H 和 CCM55J 混杂纤维复合材料体系中，当 CCF800H 和 CCM55J 的混杂比例为 5:5 和 6:4 时，短梁剪切强度分别为 66.8 MPa 和 66.7 MPa，低于 CCF800H 和 CCM40J 混杂复合材料。同类型混杂纤维，其混杂比例不同，短梁剪切强度没有明显变化。

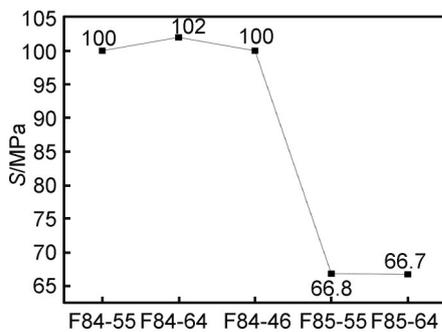


图 7 五种混杂纤维配比层合板的短梁剪切强度与模量对比图

Fig. 7 Comparison of shear strength and modulus of short beams of five kinds of hybrid fiber ratio laminates

表 3 列出了以上数据的分析结果。经实验验证 CCF800H/CCM40J(5:5), CCF800H/CCM40J(4:6), CCF800H/CCM55J(5:5) 三种典型混杂配比均可获得较好的力学性能。

表 3 混杂纤维复合材料层合板性能数据

Table 3 Properties of hybrid fiber composite laminates

Material	$X_{1t}/$ MPa	$E_{1t}/$ GPa	$X_{2t}/$ MPa	$E_{2t}/$ GPa	$X_{1c}/$ MPa	$E_{1c}/$ GPa	$S_{12}/$ MPa	$G_{12}/$ GPa	$S/$ MPa
F84-55	2421	189	47.8	8.72	1285	163	73.6	5.28	100
F84-64	2178	179	51.5	8.73	1319	163	77.5	5.03	102
F84-46	2404	201	48.3	8.41	1401	164	70.7	5.22	100
F85-55	1816	240	41.3	7.99	710	196	67.8	5.20	66.8
F85-64	1686	225	40.1	8.04	718	191	71.45	5.20	66.7

3 结论

(1) 采用热熔法制备出以 AC631 双马来酰亚胺树

脂为基体，以 CCF800H 碳纤维与 CCM40J 和 CCM55J 碳纤维为增强体的五种面内混杂纤维预浸料。

(2) 通过对面内混杂复合材料层合板的力学性能测试，对不同混杂复合材料体系的力学性能变化进行了分析，经实验验证所选取 CCF800H/CCM40J(5:5), CCF800H/CCM40J(4:6), CCF800H/CCM55J(5:5) 三种典型混杂配比均可获得较好的力学性能，并为飞机复合材料结构件的研制提供参考的基础材料性能数据。

参考文献

- [1] HAYASHI T. On the improvement of mechanical properties of composites by hybrid composition [C]// Proceeding of the 8th International Reinforced Plastics Conference. Brighton, UK, 1972.
- [2] 石珊珊, 王萌恩, 吕航宇, 等. 混杂纤维复合材料层合板拉伸性能研究[J]. 大连交通大学学报, 2023, 44(3):79-84.
SHI S S, WANG M E, LU H Y, et al. Study on tensile properties of hybrid fiber composite laminates [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2023, 44(3):79-84.
- [3] 关晓方, 贾智源. 碳玻混编单向复合材料的性能分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(7):10-15.
GUAN X F, JIA Z Y. Performance analysis of carbon/glass hybrid woven unidirectional composite materials [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(7):10-15.
- [4] 樊萍, 晏雄. 混杂纤维复合材料的研究进展[J]. 纺织科技进展, 2008(1):20-22.
FAN P, YAN X. The research development of hybrid fiber-reinforced composites [J]. Progress in Textile Science and Technology, 2008(1):20-22.
- [5] 王海雷, 段跃新, 王维维, 等. 玻璃纤维与碳纤维混杂复合材料的拉伸及低速冲击性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(2):102-109.
WANG H L, DUAN Y X, WANG W W, et al. Study on tensile and low velocity impact performance of glass and carbon fibers hybrid composites [J]. Composite Science and Engineering, 2021(2):102-109.
- [6] 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]. 复合材料科学与工程, 2015(12):87-93.
MA T, LI W. Study of the tensile failure mode of unidirectional carbon fiber/glass fiber inner ply-inter ply hybrid composites [J]. Composite Science and Engineering, 2015(12):87-93.
- [7] 张博明, 李嘉, 李煦. 混杂纤维复合材料最优纤维混杂比例及其应用研究进展[J]. 材料工程, 2014(7):107-112.
ZHANG B M, LI J, LI X. Optimal mix ratio of hybrid fiber reinforced polymer composites and their researching progress [J]. Journal of Materials Engineering, 2014(7):107-112.
- [8] 乌云其格, 隋成国, 马如飞, 等. 混杂纤维复合材料性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2018, 43(4):25-31.
Wuyunqige, SUI C G, MA R F, et al. Study on properties of hybrid fiber composites [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2018, 43(4):25-31.
- [9] 张承双, 崔霞, 李翠云, 等. PBO/T700 层间混杂复合材料弯曲及

- 压缩性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(11):34-37.
- ZHANG C S, CUI X, LI C Y, et al. Study on flexural and compressive properties of PBO fiber and T700 carbon fiber hybrid composites [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2015 (11) : 34-37.
- [10] 张小冬,王耀杰,邓宗才. 混杂纤维片材拉伸性能研究[J]. 国防交通工程技术, 2010, 8(1):21-25.
- ZHANG X D, WANG Y J, DENG Z C. An experiment study of the tensile properties of IHFRP [J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defense*, 2010, 8(1):21-25.
- [11] 严文聪,曾金芳,李朝阳,等. 芳纶Ⅲ纤维及其混杂碳纤维复合材料的压缩性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2016(11):90-93.
- YAN W C, ZENG J F, LI C Y, et al. Study on composite properties of aramid Ⅲ fiber and its hybrid composites [J]. *Composite Science and Engineering*, 2016(11):90-93.
- [12] 秦飞飞,盛冬发. 基于等效夹杂理论的混杂纤维复合材料有效弹性模量预测[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(10):95-100.
- QIN F F, SHENG D F. The prediction of effective elastic modulus for hybrid fiber composites based on equivalent inclusion theory [J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50 (10) : 95-100.
- [13] 马卿元,杨睿,孟祥鹏. 热固/热塑混杂复合材料结构刚度调控方法研究[J]. 复合材料科学与工程, 2023(5):37-44.
- MA Q Y, YANG R, MENG X P. Study on stiffness regulation method of thermosetting/thermoplastic hybrid composite structure [J]. *Composite Science and Engineering*, 2023(5):37-44.
- [14] 王小萌,温世龙,夏林祥. 层内混杂纤维增强复合材料力学性能理论研究[J]. 新技术新工艺, 2023(6):42-45.
- WANG X M, WEN S L, XIA L X. Research on theory of mechanical properties of intralayer hybrid fiber reinforced composites [J]. *New Technology and New Process*, 2023(6):42-45.
- [15] 孙志杰,吴燕,钟伟虹. 混杂纤维复合材料热膨胀性能及混杂效应的研究[J]. 新型炭材料, 2002, 17(1):49-52.
- SUN Z J, WU Y, ZHONG W H. Study on the thermal expansion performance and hybrid effect of hybrid composites [J]. *New Carbon Materials*, 2002, 17(1):49-52.
- [16] CHAMIS C C, LARK R F, SINCLAIR J H. Mechanical property characterization of intraply hybrid composite [M]. West Conshohocken :ASTM International, 1981.
- [17] FARIBORZ S, YANG C, HARLOW D. The tensile behavior of intraply hybrid composites model and simulation [J]. *Journal of Composite Materials*, 1985, 19(4):334-354.
-
- 基金项目:**国家重点研发计划项目(2022YFC2406103)
- 收稿日期:**2023-12-28;**修订日期:**2024-08-12
- 通讯作者:**高军鹏(1979—),男,博士,高级工程师,主要从事树脂基复合材料研究,联系地址:中国航空制造技术研究院复合材料技术中心(101300),E-mail:johnper@163.com
- (本文责编:解 宏)