

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.019

分层缺陷对 CFRP 层合板力学性能的影响

陈静¹, 莫莉花², 房怡¹, 闫春雷¹, 祁健¹

(1. 中国空间技术研究院北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100094)

摘要: 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具备高强度和高刚度,被广泛应用于航空航天和汽车等领域,然而碳纤维的分层缺陷会极大影响其力学性能。因此,研究分层缺陷对 CFRP 层合板拉伸、压缩、剪切和弯曲等力学性能的影响具有重大意义。采用复合成型工艺,将聚四氟乙烯片添加到复合材料中,经成型加工制备具有分层缺陷的 CFRP 层合板,考察了分层区域的尺寸和形貌,研究了分层缺陷对 CFRP 层合板力学性能的影响。研究发现,分层缺陷能显著降低 CFRP 层合板的压缩、剪切和弯曲强度,而且分层区域面积越大,CFRP 层合板压缩和弯曲强度越小,但是分层区域面积的变化对拉伸强度影响较小。

关键词: 碳纤维;树脂基复合材料;分层缺陷;力学性能

中图分类号: TQ341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0122-06

Effect of delamination defects on mechanical properties of CFRP laminates

CHEN Jing¹, MO Lihua², FANG Yi¹, YAN Chunlei¹, QI Jian¹

(1. China Academy of Space Technology Beijing Spacecrafts, Beijing 100094, China;

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100094, China)

Abstract: Carbon fiber resin-based materials possess high strength and stiffness and are widely used in aerospace and automotive applications. However, delamination defects in carbon fibers can greatly affect the mechanical properties of the materials. Therefore, it is of great engineering significance to study the effect of delamination defects on the mechanical properties of carbon fiber resin matrix composite (CFRP) laminates such as tensile, compressive, shear and flexural properties. Using a composite molding process, polytetrafluoroethylene sheets were added to the composite material, and CFRP laminates with delamination defects were prepared by molding process, and the dimensions and morphology of the delamination region were examined to investigate the effects of delamination defects on the mechanical properties of CFRP laminates. It is found that the delamination defects can significantly reduce the compressive, shear and flexural strengths of CFRP laminates, and the larger the area of the delamination region, the smaller the compressive and flexural strengths of CFRP laminates, but the change of the area of the delamination region has less effect on the tensile strength.

Keywords: carbon fiber; resin matrix composite; delamination defect; mechanical property

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)是通过碳纤维作为增强体对树脂材料进行强化得到的,具有较低密度的同时还保持了很高的拉伸强度^[1-3]。这种轻量化且具有较高力学性能的特点使 CFRP 在航空航天、风力发电、汽车等领域有着极好的应用前景^[4-6]。目前常用的 CFRP 制备工艺包括液体成型、模压成型以及热压罐成型等^[7-8]。

CFRP 中出现的褶皱、分层和孔隙等缺陷会影响其力学性能,导致 CFRP 的安全性和使用寿命降低^[9-11]。其中 CFRP 的分层是复合材料中最为常见的一种缺陷,其主要是由 CFRP 中各层黏结性不好,层与层之间发生开裂导致的。分层有很多诱导因素,如各层之间存在微量气孔、压力过小造成的黏结程度不够或在制备过程中混入微量无法黏结的

基金项目: 国家自然科学基金项目(GDKJXM20210069)

通信作者: 陈静, 硕士, 工程师, 主要从事复合材料结构成型工艺研究工作

收稿日期: 2024-01-22

引用格式: 陈静, 莫莉花, 房怡, 等. 分层缺陷对 CFRP 层合板力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 122-127.

CHEN Jing, MO Lihua, FANG Yi, et al. Effect of delamination defects on mechanical properties of CFRP laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 122-127.

杂质^[12-14]。CFRP出现分层会导致材料内部出现缺陷,在服役过程中,CFRP中的缺陷可能会产生裂纹,并进一步扩展,大大降低了CFRP材料的力学性能,最终导致CFRP材料失效^[15],因此研究分层对CFRP力学性能的影响是非常重要的。但由于CFRP实际分层的形貌难以预测且难以复制,人工分层制造CFRP的分层缺陷是目前使用最多的一种方式^[16]。

Wu等^[17]研究了褶皱这一缺陷对CFRP力学性能的影响,结果表明,随着面内褶皱高宽比的增大,CFRP的拉伸强度、压缩强度和冲击强度均下降,且面内褶皱对于拉伸强度的影响最为敏感。刘佳等^[18]研究表明,当面内褶皱高宽比较小时,复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量下降并不明显,而当面内褶皱的高宽比较大时,会导致上述性能出现严重下降。王雪明等^[19]研究指出,分层缺陷是复合材料成型过程中最容易产生的缺陷。Short等^[20]研究则表明,分层会对复合材料的压缩强度造成较大的影响,且压缩强度会随着分层位置的加深和分层大小的增加而降低。除此之外,孔隙、鼓泡等缺陷也是影响CFRP的重要因素。当前CFRP的分层缺陷研究主要集中在缺陷形成机理研究及复合材料缺陷检测方法与技术上,缺少对缺陷的微观结构与复合材料的交互认识,对缺陷导致CFRP的失效过程的影响机制少有报道。

基于此,笔者通过人工制造CFRP的分层缺陷的方式,研究了分层缺陷对CFRP拉伸强度、弯曲强度、压缩强度和剪切强度等各项力学性能的影响,分析了CFRP的失效过程,并研究了不同尺寸的分层对CFRP力学性能的影响,为利用分层缺陷来制备不同强度的复合材料层压板提供了实验依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

平纹编制布预浸料:T300,CYCOM® 970,纤维含量72%,比利时索尔维公司;

聚四氟乙烯:P6377,厚度100~200 nm,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

丙酮:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

双酚A环氧树脂6101:E44,南通星辰有限公司。

1.2 主要仪器及设备

热压罐:RYG-14,西安龙德科技发展有限公司;

分析天平:ME403/02,梅特勒托利多仪器上海有限公司;

电子万能试验机:ETM 204C,湖北万测实验设备有限公司;

金相显微镜:BX41M-LED,日本OLYMPUS公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):SU 8010,日本HITACHI公司。

1.3 CFRP试样制备

CFRP试样的制备流程如图1所示,在预浸料铺贴完成前,将分层缺陷嵌入以制备分层缺陷试样。由于聚四氟乙烯和环氧树脂的黏结性能较差,故使用聚四氟乙烯作为制造分层缺陷的材料。一共铺层12层来制备短梁剪切试样,所用铺层顺序为[0/45/45/45/0/45]。通过将不同尺寸的聚四氟乙烯片添加到试样中以制备不同分层的人工分层CFRP试样,所有分层均嵌入在试样的中间位置,并对制备的不同人工分层CFRP试样进行多项力学性能测试。拉伸人工分层CFRP试样编号和分层尺寸见表1,压缩和弯曲人工分层CFRP试样编号和分层尺寸见表2,短梁剪切人工分层CFRP试样编号和分层尺寸见表3。

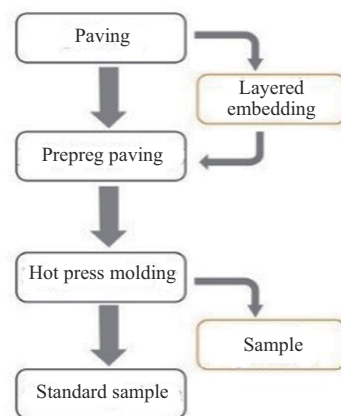


图1 标准试样及分层试样制备流程

Fig. 1 Standard sample and delamination sample preparation process

表1 拉伸人工分层CFRP试样编号和分层尺寸

Tab. 1 Tensile artificial delamination CFRP sample number and delamination size

Samples	Width/mm	Length/mm
1 [#]	8	16
2 [#]	12	24
3 [#]	16	32
4 [#]	18	36

表2 压缩和弯曲人工分层 CFRP 试样编号和分层尺寸

Tab. 2 Tensile and bending artificial delamination CFRP sample number and delamination size

Samples	Width/mm	Length/mm
5 [#]	1	1
6 [#]	3	3
7 [#]	6	6
8 [#]	9	9

表3 短梁剪切人工分层 CFRP 试样编号和分层尺寸

Tab. 3 Short beam shear artificial delamination CFRP sample number and delamination size

Samples	Width/mm	Length/mm
9 [#]	2	4
10 [#]	4	8
11 [#]	6	12
12 [#]	8	16

1.4 测试与表征

1.4.1 截面形貌观察

将人工分层 CFRP 试样切成薄片,使用砂纸对含有分层缺陷的部分进行打磨,然后再对其进行抛光处理,并使用 FESEM 和金相显微镜对人工分层 CFRP 试样的截面微观形貌进行观察。

1.4.2 拉伸强度测量^[21]

采用尺寸为 250 mm × 25 mm × 2.6 mm 的 CFRP 试样进行拉伸强度测试,拉伸速率为 2 mm/min。每组试样包含 6 个平行试样,试样的拉伸强度是所有测试试样的平均值。拉伸强度计算见公式(1)。

$$\delta_t = \frac{P}{bh} \quad (1)$$

式中: δ_t 为试样拉伸强度,单位 MPa; P 为测试过程中最大载荷,单位 N; b 为试样宽度,单位 mm; h 为试样厚度,单位 mm。

1.4.3 压缩强度测量^[21]

采用尺寸为 140 mm × 13 mm × 2.6 mm 的 CFRP 试样进行压缩强度测试,测试速率为 2 mm/min。每组试样包含 6 个平行试样,试样的压缩强度是所有测试试样的平均值。压缩强度 δ_c 计算见公式(2)。

$$\delta_c = \frac{P}{bh} \quad (2)$$

1.4.4 剪切强度测量^[21]

采用尺寸为 25 mm × 9 mm × 3 mm 的 CFRP 试样进行剪切强度测试,每组试样包含 6 个平行试样,试样的剪切强度是所有测试试样的平均值。剪切强度 δ_s 计算见公式(3)。

$$\delta_s = \frac{3P}{4bh} \quad (3)$$

1.4.5 弯曲强度测量^[21]

使用三点弯曲对 CFRP 试样进行弯曲强度测量,试样的尺寸为 100 mm × 13 mm × 2.6 mm。每组试样包含 6 个平行试样,试样的弯曲强度是所有测试试样的平均值。弯曲强度 δ_f 计算见公式(4)。

$$\delta_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (4)$$

式中: L 为跨距,单位 mm。

2 结果与讨论

2.1 人工分层 CFRP 试样的截面形貌

人工分层 CFRP 试样的截面微观形貌如图 2 所示。从图 2a 可以发现,在层合板中存在明显的分层现象,其中用白色线标出的为聚四氟乙烯插层,宽度为 0.15 μm ,这主要是由于两者较差的相容性造成的。另外,从图 2b 的金相图中也可以清楚地观察到碳纤维和环氧树脂与聚四氟乙烯的分层现象,聚四氟乙烯与环氧树脂之间出现的较为明显的界面,这主要与两者之间较差的黏结性相关。由此可以判断,使用聚四氟乙烯对 CFRP 试样进行人工分层的嵌入设计是可行的。

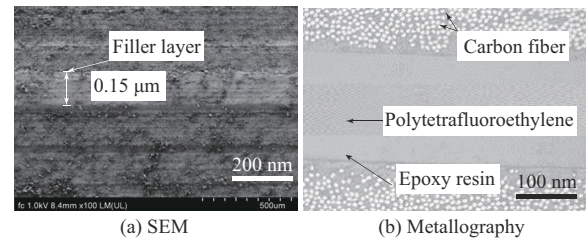


图2 含有分层缺陷层合板的截面形貌

Fig. 2 Cross-sectional morphology of laminated plates with delamination defects

2.2 分层对 CFRP 拉伸性能的影响

不同尺寸试样的拉伸性能测试如图 3 所示。从图 3a 可以发现,人工分层 CFRP 试样与 CFRP 标准试样表现出相似的拉伸行为,而且从图 3b 的数值可得 CFRP 标准试样和人工分层 CFRP 试样的最大拉伸强度均在 420~430 MPa 范围内。这表明分层对 CFRP 的拉伸性能影响不大,这是因为在拉伸过程中试样受到的轴向力与分层的方向一致,而且在拉伸过程中会导致 CFRP 产生一定的向中心方向的应力。

CFRP 标准试样和人工分层 CFRP 试样在拉伸之后的断面形貌如图 4 所示。从图 4a 可以发现,CFRP 标准试样在拉伸过程中发生了纤维的断裂,并且试样边缘的裂纹较为平整,这是较为明显的横

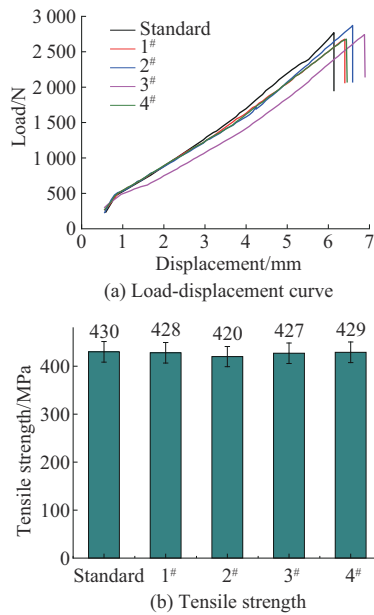


图3 含有不同分层缺陷CFRP层合板的拉伸性能
Fig. 3 Tensile properties of CFRP laminates with different delamination defects

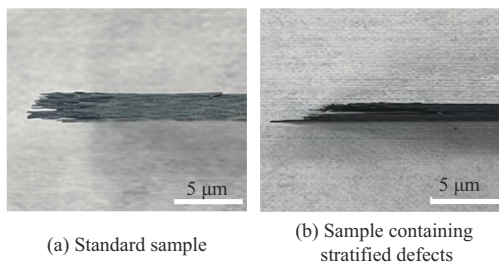


图4 不同CFRP层合板试样拉伸断面
Fig. 4 Tensile fractures of different CFRP laminates

向型断裂。对于人工分层CFRP试样来说(图4b),其裂纹是从分层缺陷处萌生并发展,其边缘裂纹并不平整,这属于分层型断裂。

2.3 分层对CFRP压缩性能的影响

不同尺寸试样的压缩性能测试结果如图5所示。由图5a可知,尺寸对试样的压缩性能影响较大,表现出不同的压缩曲线。由图5b可知,CFRP标准试样和人工分层CFRP试样的压缩强度分别为382, 363, 352, 338, 319 MPa,说明存在分层缺陷试样的压缩强度明显低于标准试样,并且随着分层面积的增大而降低。这是由于分层附近材料并未黏结,使得试样在压缩过程中容易在分层处发生破坏,导致其承载能力降低。

CFRP标准试样和人工分层CFRP试样在压缩之后的表面形貌如图6所示。从图6a可以看出,CFRP标准试样表层出现了凸起,这是由表层纤维的断裂导致的。随后试样的另一面发生受力不均

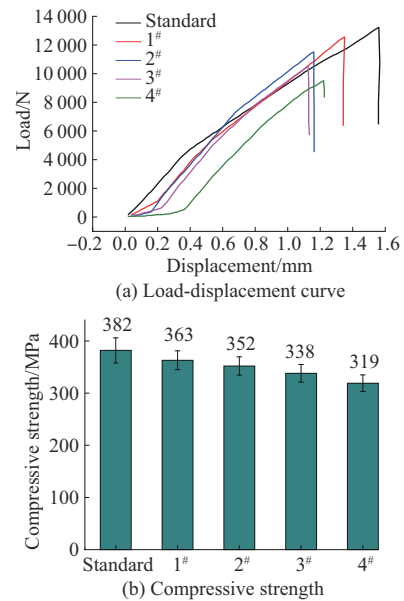


图5 含有不同分层缺陷CFRP层合板的压缩性能
Fig. 5 Compressive properties of CFRP laminates with different delamination defects

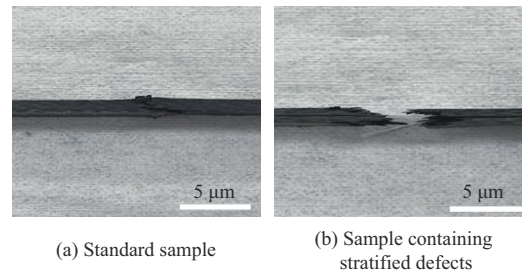


图6 不同CFRP层合板试样压缩断面
Fig. 6 Compression fractures of different CFRP laminates

的现象,从而引发裂纹并扩展,导致试样断裂。从图6b可以看出,人工分层CFRP试样的裂纹更加明显,这是由于分层处的缺陷使得试样内部应力无法完整传递,而在分层处向两端扩展,从而导致断裂破损。

2.4 分层对CFRP剪切性能的影响

CFRP标准试样和人工分层CFRP试样的剪切强度曲线和计算数值如图7所示。由图7a可知,试样的剪切曲线表现出相似的变化趋势。从图7b可以发现,CFRP标准试样的剪切强度为64 MPa,而人工分层CFRP试样的剪切强度仅为40 MPa左右,且尺寸对其剪切强度影响不大。这是由于在测试过程中,试样所受到的剪切应力在分层处无法继续传递,而是在分层处形成了应力集中,从而导致人工分层CFRP试样的剪切应力出现大幅下降,但分层区域大小对于试样的剪切应力并无明显影响。

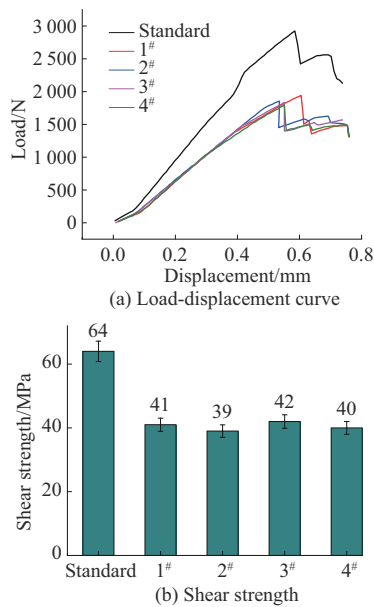


图7 含有不同分层缺陷CFRP层合板的剪切性能
Fig. 7 Shear properties of CFRP laminated plates with different delamination defects

2.5 分层对CFRP弯曲性能的影响

不同试样的弯曲性能测试结果如图8所示。从图8a可以看出,不同试样弯曲性能的曲线形状是相同的。另外,从图8b可以看出,人工分层CFRP试样的弯曲强度要低于CFRP标准试样,且试样的弯曲强度随着分层区域面积的增加而下降。这是由于试样在弯曲过程中受到多个不同方向载荷的影响,但在分层处的载荷无法继续传递,从而产生应力集中,进而导致试样弯曲强度下降。

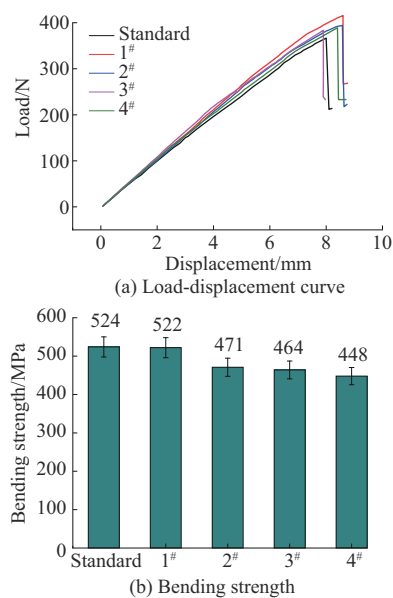


图8 含有不同分层缺陷CFRP层合板的弯曲性能
Fig. 8 Bending properties of CFRP laminates with different delamination defects

CFRP标准试样和人工分层CFRP试样在弯曲之后的表面形貌如图9所示。从图9a可以看出,标准试样两面均产生了裂纹,且在压头接触面裂纹较小。从图9b可以看出,人工分层CFRP试样仅在一面出现了比较明显的裂纹,这是由分层造成的应力分布不均导致的。

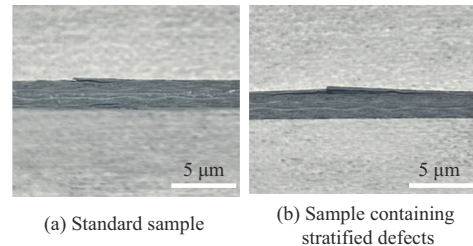


图9 不同CFRP层合板试样弯曲破坏形貌
Fig. 9 Bending failure morphology of different CFRP laminates

3 结论

通过将聚四氟乙烯片添加到CFRP试样中,制备了人工分层CFRP层合板试样,研究了分层缺陷对CFRP层合板拉伸、弯曲、剪切和弯曲性能的影响,掌握了分层区域面积对于不同力学性能的影响规律。具体结论如下:

- (1) 分层对于CFRP层合板的拉伸强度影响较小,但会降低其压缩性能,分层区域越大,层合板的压缩性能越差;
- (2) 分层会导致CFRP层合板的剪切强度大幅降低,但分层区域面积对其剪切强度无明显影响;
- (3) 分层会降低CFRP层合板弯曲性能,且弯曲强度随着分层区域的增加而降低。

参考文献

- [1] 苏飞,欧阳晨恺,李枫,等.碳纤维增强树脂复合材料齿槽加工中分层缺陷的形成机制[J].复合材料学报,2021,38(12):4 042-4 051.
SU Fei, OUYANG Chenkai, LI Feng, et al. Formation mechanism of delamination defects in carbon fiber reinforced resin composite tooth groove machining[J]. Journal of Composite Materials, 2021, 38(12):4 042-4 051.
- [2] 卢康逸.碳纤维树脂基复合材料纵向压缩强度提高的多层次实现机制研究[D].北京:北京化工大学,2023.
LU Kangyi. Study on the multilevel realization mechanism of longitudinal compressive strength improvement of carbon fiber resin matrix composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [3] 许良,涂宜鸣,崔浩,等. T800碳纤维复合材料低速冲击渐进损伤仿真与试验研究[J].大连理工大学学报,2021,61(6):608-614.
XU Liang, TU Yiming, CUI Hao, et al. Simulation and experimental study on the progressive damage of T800 carbon fiber compos-

- ites in low-speed impact[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2021, 61(6):608–614.
- [4] 郑欣,刘荣海,初德胜,等. 高热环氧树脂及碳纤维增强复合材料的制备与性能研究[J]. 当代化工研究, 2022(24):73–75.
ZHENG Xin, LIU Ronghai, CHU Desheng, et al. Preparation and properties of high thermal conductivity epoxy resin and carbon fiber reinforced composites[J]. Contemporary Chemical Research, 2022(24):73–75.
- [5] 杨玲玉,董顺,洪长青. 新型低密度树脂裂解碳改性碳纤维复合材料的制备与性能研究[J]. 空天防御, 2022, 5(4):1–9.
YANG Lingyu, DONG Shun, HONG Changqing. Preparation and properties of new low-density resin cracked carbon modified carbon fiber composites[J]. Air and Space Defense, 2022, 5(4):1–9.
- [6] 张亚萍,石磊,郭小凤,等. 界面结合方式对氧化石墨烯-碳纤维/环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2020, 26(6):927–936.
ZHANG Yaping, SHI Lei, GUO Xiaofeng, et al. Effect of interfacial bonding mode on the properties of graphene oxide-carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2020, 26(6):927–936.
- [7] 孟祥武,郑志才,肖亚超,等. 碳纤维增强环氧树脂复合材料发动机壳体成型工艺[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(12):51–57.
MENG Xiangwu, ZHENG Zhicai, XIAO Yachao, et al. Carbon fiber reinforced epoxy resin composite engine case molding process [J]. Engineering Plastics Applications, 2020, 48(12):51–57.
- [8] 邱科礼,张晶. 树脂基复合材料在海军装备中的研究进展及应用[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(12):3 873–3 877.
QIU Keli, ZHANG Jing. Research progress and application of resin matrix composites in naval equipment[J]. Silicate Bulletin, 2019, 38(12):3 873–3 877.
- [9] 郭强,徐恒元,何凯,等. 树脂基复合材料废弃物回收再利用现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(S2):634–638.
GUO Qiang, XU Hengyuan, HE Kai, et al. Current status and development trend of resin matrix composites waste recycling[J]. Materials Herald, 2019, 33(S2):634–638.
- [10] 姜大勇. MCA/碳纤维/环氧树脂复合材料阻燃性能的研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2021.
Jiang Dayong. Research on flame retardant properties of MCA/carbon fiber/epoxy resin composites[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [11] 王振彪,王琛琛,李刚,等. KH560对碳纤维树脂基复合材料性能的影响[J]. 辽宁化工, 2023, 52(9):1 271–1 274.
WANG Zhenbiao, WANG Chenchen, LI Gang, et al. Effect of KH560 on the properties of carbon fiber resin matrix composites [J]. Liaoning Chemical Industry, 2023, 52(9):1 271–1 274.
- [12] 焦晓岚,邓鑫,郑玲,等. 碳纤维增强环氧树脂复合材料的制备及性能[J]. 塑料, 2023, 52(4):32–36.
JIAO Xiaolan, DENG Xin, ZHENG Ling, et al. Preparation and properties of carbon fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Plastics, 2023, 52(4):32–36.
- [13] 谷雨. 碳纤维增强聚合物复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 冶金与材料, 2023, 43(7):118–120.
GU Yu. Research progress of carbon fiber reinforced polymer composites in aerospace[J]. Metallurgy and Materials, 2023, 43(7): 118–120.
- [14] 步鹏飞,任辉启,阮文俊. 铺层角度对碳纤维/环氧树脂基复合材料板等效刚度的影响[J]. 南京理工大学学报, 2021, 45(5): 537–544.
BU Pengfei, REN Huiqi, RUAN Wenjun. Influence of layup angle on equivalent stiffness of carbon fiber/epoxy resin matrix composite plate[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2021, 45(5):537–544.
- [15] 宋柳青,张宏建,温卫东,等. 湿热环境下树脂基复合材料层合板强度分析方法[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(5):116–118.
SONG Liuqing, ZHANG Hongjian, WEN Weidong, et al. Strength analysis method of resin matrix composite laminates under humid and hot environment[J]. Mechanical Manufacturing and Automation, 2021, 50(5):116–118.
- [16] 朱滨海,王佳,付国,等. 碳纤维复合材料分层缺陷的超声相控阵检测方法研究[J]. 中国设备工程, 2024(1):191–192.
ZHU Binhai, WANG Jia, FU Guo, et al. Research on ultrasonic phased array detection method of delamination defects in carbon fiber composites[J]. China Equipment Engineering, 2024(1): 191–192.
- [17] Wu C J, Gu Y Z, Luo L, et al. Influences of in-plane and out-of-plane fiber waviness on mechanical properties of carbon fiber composite laminate[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2018, 37(13): 877–891.
- [18] 刘佳,潘利剑,岳广全,等. 面内纤维褶皱对碳纤维复合材料拉伸力学性能的影响[J]. 上海纺织科技, 2021, 49(10): 5–8.
LIU Jia, PAN Lijian, YUE Guangquan, et al. Tensile mechanical properties of in-plane fiber folds on carbon fiber composites[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2021, 49(10): 5–8.
- [19] 王雪明,谢富原,李敏,等. 热压罐成型复合材料复杂结构对制造缺陷的影响规律[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 757–762.
WANG Xueming, XIE Fuyuan, LI Min, et al. Effect of complex structure of Autoclave composites on manufacturing defects[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 757–762.
- [20] Short G J, Guild F J, Pavier M J. Delaminations in flat and curved composite laminates subjected to compressive load[J]. Composite Structures, 2002, 58(2): 249–258.
- [21] 唐玉玲. 碳纤维复合材料连接结构的失效强度及主要影响因素分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
TANG Yuling. Analysis of failure strength and main influencing factors of carbon fiber composite joint structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.