

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.010

湿法与干喷湿法制备的碳纤维对复合材料性能的影响

王峰, 庞宝琳, 胡溯, 王彦博, 张一川, 冀美宇, 张扬

(中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

摘要: 目前碳纤维主要的制备方法包括湿法和干喷湿法两种, 两种方法生产的碳纤维存在一些差异, 对复合材料的性能也会产生不同的影响。为探究两种方法制备的碳纤维的区别及其对复合材料性能的影响, 以国产T700级碳纤维和ACTECH1203中温环氧树脂为原料, 采用两步法得到预浸料, 后采用真空成型方式制备了碳纤维单向带复合材料。探究了分别以湿法(G型)及干喷湿法(S型)制备的以碳纤维为增强体的复合材料在常温及湿热状态下的力学性能差异, 并观测了两种纤维的表面形貌及复合材料的界面状态。结果表明, T700级S型和G型纤维表面活性无差异, G型纤维表面布满沟槽, 与树脂基体的物理啮合作用更强; S型纤维表面光滑, 更少的表面褶皱使得其缺陷更少, 体现为更高的拉伸强度。在室温干态力学性能对比中, G型纤维复合材料的压缩强度比S型纤维复合材料的高8%, 而S型纤维复合材料的拉伸性能比G型纤维复合材料的高9%。且在进行相同的吸湿处理后, G型纤维复合材料的力学性能保持率更优, 能达到85.6%; S型纤维复合材料力学性能保持率较差, 仅为71.6%。微观形貌观察表明, G型纤维与树脂基体黏连性更强, 断裂面纤维上有明显的树脂残留; 而S型纤维断裂面树脂残留很少。

关键词: T700级碳纤维; 预浸料; 复合材料; 界面性能; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0076-07

Effects of carbon fibers prepared by wet spinning and dry-jet wet spinning on properties of composites

WANG Feng, PANG Baolin, HU Su, WANG Yanbo, ZHANG Yichuan, JI Meiyu, ZHANG Yang

(AVIC Composite Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract : At present, the main preparation methods of carbon fibers include wet method and dry-spray wet method. Carbon fibers produced by these two methods exhibit certain differences, which can differently affect the properties of the resulting composites. In order to explore the difference between the carbon fibers prepared by the two methods and their influence on the properties of the composites, the domestic T700 carbon fiber and the ACTECH1203 medium temperature epoxy resin developed were used as raw materials. The prepreg was obtained by two-step method, and then the carbon fiber unidirectional belt composites were prepared by vacuum molding. The mechanical performance differences under normal and hot-humid conditions of the composites reinforced by wet spinning (G-type) and dry-jet wet spinning (S-type) carbon fibers were explored. The surface morphologies of the two fibers and the interface states of the composite materials were observed. Results indicate that S-type and G-type fibers exhibit no difference in surface activity. G-type fibers have surfaces full of grooves, leading to stronger physical interlocking with the resin matrix. S-type fibers have smoother surfaces with fewer folds, thus fewer defects, resulting in higher tensile strength. In the dry mechanical performance comparison at room temperature, G-type fiber composites display 8% higher compressive performance and 9% lower tensile performance than S-type fiber. Furthermore, after undergoing the same moisture absorption treatment, G-type fiber composites exhibit better mechanical performance retention rates, with the compressive performance retention rate reaching 85.6%. S-type fiber composites show poorer performance retention rates, with the compressive performance retention rate of only 71.6%. Results of microscopic morphology observation demonstrate that G-type fibers have stronger adhesion to the resin matrix, with evident resin residues on the fractured fiber surfaces, while S-type fibers have minimal resin residues on the fractured surfaces.

Keywords : T700-grade carbon fibers ; prepreg ; composite ; interfacial performance ; mechanical property

通信作者: 张扬, 硕士研究生, 研究员, 研究方向为树脂基复合材料

收稿日期: 2025-06-20

引用格式: 王峰, 庞宝琳, 胡溯, 等. 湿法与干喷湿法制备的碳纤维对复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(8): 76-82.

WANG Feng, PANG Baolin, HU Su, et al. Effects of carbon fibers prepared by wet spinning and dry-jet wet spinning on properties of composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 76-82.

碳纤维复合材料凭借其轻质、高强度、高模量、出色的耐疲劳和耐腐蚀性能^[1],被广泛用于航空领域中的梁、肋、框等骨架缘条的制备,起特定方向增强作用。树脂基复合材料组分包含树脂基和增强体,其中树脂基体为连续相,在复合材料中黏结增强体^[2]。增强纤维的性能、质量及与树脂基体的相容性将影响复合材料性能。碳纤维具有质量轻、比强度高、比模量高、耐高温、热膨胀系数小、耐疲劳强度高、化学稳定性好等诸多优异性能,然而,碳纤维表面是非极性和惰性的,润湿能力差^[3-4],其表面的粗糙度、微晶大小、官能团的种类和数量等,均对界面性能有很大的影响^[5-6],导致其难以与树脂基体有力结合,从而影响复合材料的整体力学性能。

常用的碳纤维的纺丝方法包括湿法和干喷湿法^[7]。湿法纺丝是纺丝原液从喷丝头出来后直接浸入凝固液中,工艺方法简单,容易控制,典型代表为东丽公司生产的T300和T800级碳纤维^[8],此类碳纤维表面有沿纤维轴向排布的沟槽,这种沟槽增大了碳纤维的表面积,有利于碳纤维与树脂的物理啮合,提高了复合材料界面结合性能^[9]。但同时沟槽也是碳纤维表面的缺陷,沟槽若深浅不一,容易产生应力集中,影响碳纤维的拉伸强度^[10-12]。干喷湿纺是原液从喷丝头流出后先经过空气再浸入凝液中,这种方法纺丝速度快、纤维致密、表面光滑,聚丙烯腈(PAN)分子链段沿纤维方向排列取向优化,拉伸强度更高,典型代表是东丽公司生产的T700级碳纤维^[13-14]。但干喷湿纺的缺点是光滑表面使界面结合变弱,会产生低的层间剪切强度(ILSS),会降低复合材料的力学性能。且沟槽容易残留有机溶剂,会造成原丝内部缺陷,影响纤维质量^[15]。

基于以上分析,笔者采用湿法和干喷湿法制备的碳纤维制备了树脂基碳纤维复合材料,并对其进行了拉伸、压缩、弯曲、剪切性能等测试,观察其微观形貌,并对结果进行分析,探究不同工艺制备的碳纤维对复合材料性能的影响,为碳纤维复合材料在飞行器领域的应用提供实验基础和理论依据^[16]。

1 实验部分

1.1 主要原材料

T700级碳纤维:GW700S-12K(S型)和CCF700G-12K(G型),威海拓展纤维有限公司;

树脂基体:ACTECH1203中温固化环氧树脂,中航复合材料有限责任公司;

双氰胺固化剂:阿兹肯化工有限公司;

碳纤维中温环氧树脂体系预浸料:ACTECH1203/CCF700G, ACTECH1203/GW700S,纤维面密度为 (150 ± 10) g/m²,树脂质量分数为 $(35\pm 3)\%$,北京中航复合材料有限责任公司;

密封胶、真空袋、导气毡:保定市瑞彼得复合材料销售有限公司;

真空嘴:自制。

1.2 主要仪器及设备

真空泵:U4.165 F/K,德国Becker公司;

烘箱:DZF-6020,上海精宏设备有限公司;

万能力学试验机:MTS E42.503,美斯特工业系统有限公司;

X射线光电子能谱(XPS)仪:NEXSA G2,杭州赛默科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-4700,日本Hitachi公司;

原子力显微镜(AFM):Dimension Edge,德国Bruker公司。

1.3 预浸料的制备

采用热熔两步法,先将ACTECH1203树脂制备成树脂膜,然后将树脂膜分别与CCF700G和GW700S碳纤维复合制备成预浸料。

1.4 复合材料实验件的制备

复合材料实验件均采用真空固化方法成型,真空固化过程如下^[19]。

(1)依据测试项目不同,按ASTMD3039/D3039M-2017, SACMA SRM 1R-1994, ASTM D3518/D3519M-2018, ASTM D2344/D2344M-2022, ASTM D5229/D5229M-2020测试要求将预浸料裁剪成不同大小的料片。

(2)将所有料片两侧的离型纸揭下,选取一条基准边,按基准边重合的方向进行铺贴,每贴4~6层进行一次真空压实,重复多次得到预成型体板材。

(3)将预成型体板材上下贴薄膜,置于钢板上,放置导气毡,并用密封胶将真空袋固定在钢板上,用真空嘴将真空袋内空气完全抽出。

(4)将烘箱温度升至 (127 ± 3) °C,打开烘箱将封装好的预成型体放入,保温90 min。

(5)加热完后待烘箱冷却,取出样品,完成脱模,得到力学试验件。

1.5 测试与表征

1.5.1 G型纤维与S型纤维表面分析

采用SEM和AFM对碳纤维表面进行定性和定量分析,通过SEM测量纤维截面直径,计算纤维截面最长边与最短边之比。使用XPS对碳纤维表面元素及官能团组成进行分析。

1.5.2 复合材料的力学性能分析

复合材料基本力学性能测试包含 0° 拉伸性能、 0° 压缩性能、面内剪切性能和层间剪切性能, 0° 拉伸性能按照ASTM D3039/D3039M-2017测试, 0° 压缩性能按照SACMA SRM 1R-1994测试,面内剪切性能按照ASTM D3518/D3519M-2018测试,层间剪切性能按照ASTM D2344/D2344M-2022测试。吸湿处理按照ASTM D5229/D5229M-2020进行,同一试样连续两次七天称重变化小于0.02%,即可进行力学性能测试。

1.5.3 复合材料的断口形貌分析

采用SEM进行观察不同碳纤维与基体间的界面效应,取剪切失效后的样品,对其断裂截面进行喷金处理,通过SEM观察纤维表面树脂剥落情况。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维表面形貌观察

两种国产T700级碳纤维(G型和S型)由SEM观测的表面及截面形貌如图1所示。由图1可见,因纤维制备工艺不同,干喷湿法制备S型纤维表面光滑、无沟槽,纤维截面呈圆形;湿法制得G型碳纤维表面布满沟槽,纤维截面呈豆蔻形^[7]。干喷湿法与湿法纺丝的区别主要体现在纺丝细流的凝固过

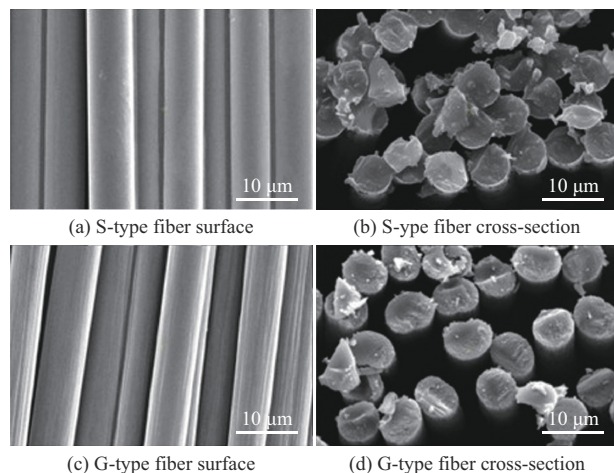


图1 G型和S型碳纤维表面形貌放大4 000倍的SEM照片

Fig. 1 SEM photos of surface morphology of G-type and S-type carbon fibers magnified by 4 000 times

程中。湿法纺丝喷丝板浸入在溶液中,由于纺丝细流存在内外浓度差,外层与内层扩散剧烈程度不同,导致纤维内部和表层结构差异较大,为表皮结构致密,芯层结构松散,最终表现为纤维表面存在大量沟槽。干湿法纺丝过程中由于具有“干喷”段的存在,纺丝液在进入空气层后会在空气层中部分扩散,同时气氛的保护作用对这种剧烈扩散过程有一定的抑制作用。导致干喷湿纺纤维在后续与凝固浴接触并扩散的过程中速度相对缓慢、平稳^[8]。因此表层结构与内部结构的差异较小,整体结构相对致密,同时纤维外表平整。

由截面图像测得两种纤维截面的最长直径和最短直径,并计算得长短比,见表1。S型和G型纤维直径在6~8 μm范围内,G型纤维的长短比明显高于S型纤维。因表面沟槽,G型纤维表面与树脂界面物理啮合更强,表面光滑的S型纤维与树脂结合表面积小,物理啮合相较G型较弱。

表1 国产T700级S型和G型碳纤维截面尺寸对比

Tab. 1 Domestic T700 grade S-type and G-type carbon fiber section size comparison

Fiber class	Maximum diameter/ μm	Length ratio
S-type	6.99	1.03
G-type	7.73	1.33

为定量对比S型纤维与G型纤维表面粗糙度区别,使用AFM对两款纤维的三维表面形貌进行观测,如图2所示。G型纤维表面多存在沿纤维方向的沟槽,且表面粗糙度(R_q)为47.6 nm,S型纤维表面的 R_q 为20.5 nm,S型纤维的 R_q 仅为G型纤维的40%,G型纤维与树脂结合时,物理啮合作用更强。

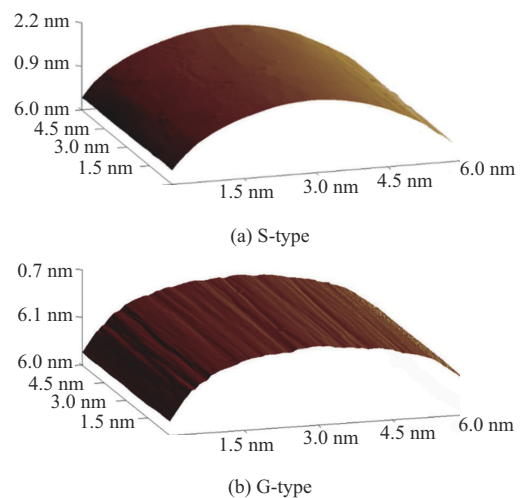


图2 国产T700级S型和G型碳纤维三维形貌AFM图

Fig. 2 AFM images of three-dimensional morphology of domestically produced T700 grade S-type and G-type carbon fibers

2.2 碳纤维表面化学活性分析

在预浸料制备过程中,树脂浸润纤维经历了从快速浸润到缓慢浸润的过程,树脂与纤维刚接触时,纤维的表面结构及表面能将很大程度影响浸润速率和质量。

碳纤维表面化学活性以化学活性基团的含量表示,这些活性基团主要是C—O,C=O以及O—C=O,通常以O/C和活性官能团比例来表示碳纤维表面化学活性^[19]。O/C比值越大,碳纤维表面可能形成的活性官能团越多,越容易与树脂基体发生化学反应,碳纤维表面活性越强,越有利于纤维和树脂基体形成化学键,增强复合材料的界面性能^[20]。通过使用XPS仪对S型和G型纤维分别做了表面元素以及官能团含量分析。两种纤维表面均包含C,O,Si和N四种元素,四种元素含量并无明显差异,如图3所示。相应地,活性基团占比亦无明显差异,如图4所示。因此,姑且可以认为,表面活性对两款纤维与树脂间的两相界面黏接强度受的影响

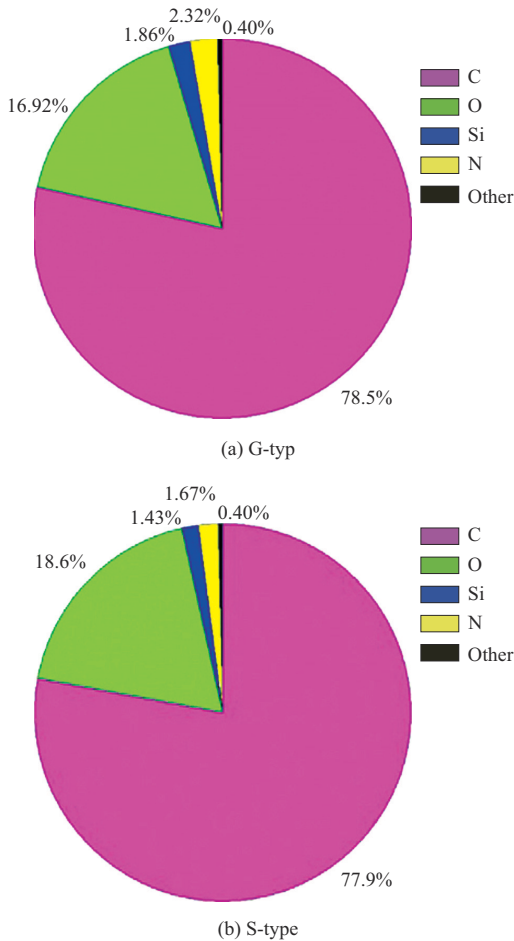


图3 G型和S型碳纤维表面元素及含量
Fig. 3 Surface elements and content of G-type and S-type carbon fibers

一致。

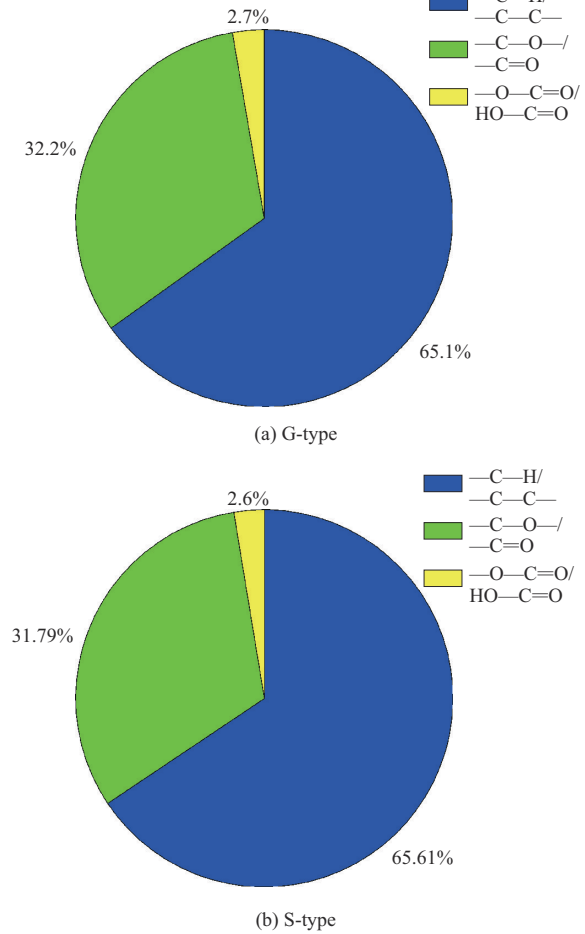


图4 G型和S型碳纤维表面活性官能团及含量
Fig. 4 Surface active functional groups and content of G-type and S-type carbon fibers

2.3 复合材料的力学性能分析

对两种纤维制得的复合材料进行拉伸、压缩、剪切等常见力学性能测试,测试结果如图5—图8所示。由图5可见,在纤维表面沟槽的作用下,G型纤维与树脂界面物理啮合作用更大,其在复合材料上的表现为室温干态下,G型纤维复合材料0°的压缩强度比S型纤维复合材料高8%。但同时,由于G型纤维表面存在沟槽,相较于S型纤维的光滑表面更容易出现缺陷,形成应力集中,故G型纤维复合材料的0°拉伸强度比S型纤维复合材料低9%。另对比ASTM D5229/D5229-M20吸湿处理后的两款复合材料的力学性能,材料湿热处理后的性能保持率也是材料界面性能的体现形式,这是由于在湿热环境下,水蒸气进入材料内部,降低了界面结合面积,使界面结合力对材料性能的影响增大^[21]。发现在71℃湿态条件下,G型纤维复合材料0°压缩强度比

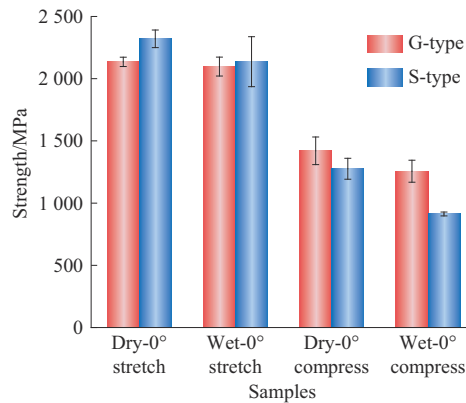


图5 G型和S型纤维复合材料在湿态和干态下0°方向拉伸/压缩力学性能对比

Fig. 5 Comparison of tensile/compressive mechanical properties of G-type and S-type fiber composites in 0° direction

S型纤维复合材料提高34%,且性能保持率提高11.7%。这说明界面作用更强的纤维复合材料拥有更好的耐湿热性能。

G型纤维复合材料和S型纤维复合材料的90°拉伸/压缩性能如图6所示。由于实验材料均为单向带复合材料,在90°方向上的力学性能主要由树脂提供,纤维与树脂界面性能的影响也被放大。因此,可以看到G型纤维复合材料室温干态下的90°拉伸性强度比S型纤维复合材料的高33.1%,湿态下G型纤维复合材料的90°拉伸性强度比S型纤维复合材料的也要高出18.9%。而当压缩性能接近时,G型纤维复合材料在湿热条件下的压缩性能保持率比S型的高9.5%。

弯曲性能也是能够体现复合材料界面性能的重要性能指标之一,如图7所示,G型纤维复合材料

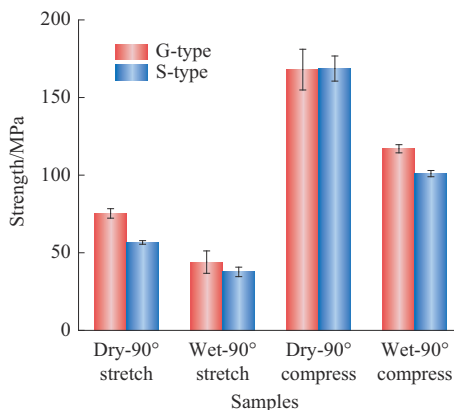


图6 G型和S型纤维复合材料在湿态和干态下90°方向拉伸/压缩力学性能对比

Fig. 6 Comparison of tensile/compressive mechanical properties of G-type and S-type fiber composites in 90° direction under wet and dry conditions

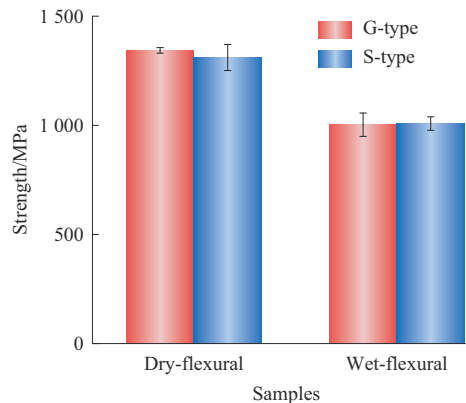


图7 G型和S型纤维复合材料在湿态和干态下的弯曲强度对比

Fig. 7 Comparison of flexural strength of G-type and S-type fiber composites in wet and dry state

干态下的弯曲强度比S型纤维复合材料的高2.5%,同样说明在室温干态下G型纤维与树脂的界面结合更牢固^[22]。

图8展示了两种纤维复合材料的剪切性能差异。G型纤维复合材料在面内剪切及层间剪切时的表现均优于S型纤维复合材料。室温干态时G型纤维复合材料的面内剪切强度和层间剪切强度比S型的分别高10.2%和6.3%。71℃湿态下G型纤维复合材料面内剪切强度和层间剪切强度比S型纤维复合材料高10%~12%,且性能保持率高6%左右。

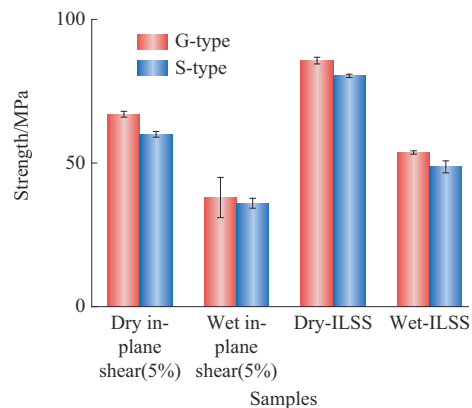


图8 G型和S型纤维复合材料在湿态和干态下的剪切性能对比

Fig. 8 Comparison of shear properties of G-type and S-type fiber composites under wet and dry conditions

湿热环境为航空结构复合材料的主要使用环境,高温和高湿环境会导致复合材料结构性能下降和破坏形式的改变,其影响主要体现在界面失效方面,高温使树脂黏度降低,与纤维的结合力下降;而高湿使水蒸气更容易吸附于纤维表面,降低纤维与树脂结合面积。因此,湿热环境对界面结合较弱的S型纤维复合材料的力学性的影响较大^[23]。

2.4 复合材料的界面性能分析

两种复合材料压缩失效截面微观形貌如图9所示,由图9可见,G型纤维复合材料断口表面(如图9a和图9c所示)呈现出大面积的树脂斑块覆盖在纤维表面,这表明材料在应力作用下产生裂纹后,裂纹更容易沿树脂基体内部扩展,这可以被认为是一个强界面结合的迹象。另一方面,对于S型纤维复合材料,图9b和图9d显示纤维表面干净,无树脂斑块残留,表明复合材料的界面附着力较差。

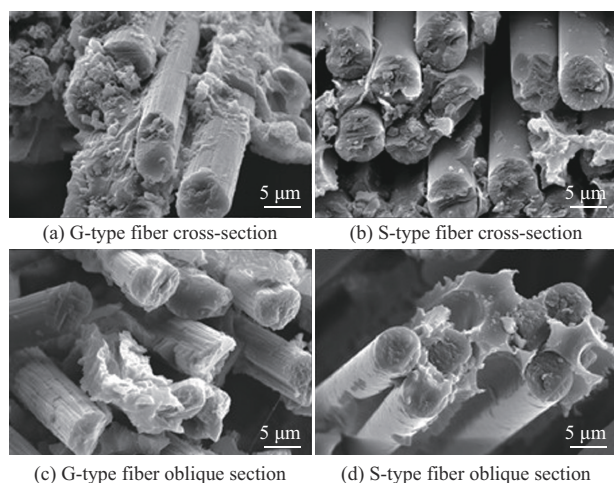


图9 G型纤维和S型纤维制备的复合材料压缩失效截面形貌的SEM照片

Fig. 9 SEM photos of compression failure cross-sectional morphology of composite materials prepared from G-type and S-type of fiber

综合以上分析,S型纤维复合材料断口出现纤维被大量拔出的区域,界面结合强度低,存在明显的界面分离,表现为宏观压缩强度相对较低。这可能是由于一方面S型纤维表面光滑,与树脂基体的机械锚钉作用较弱,从而导致界面黏接能力较低;另一方面S型纤维的表面能偏低,与环氧树脂的浸润性能较差,导致复合材料制备过程中S型纤维与树脂浸润均匀性不佳,且难以对纤维形成完全有效浸润。G型复合材料断口无纤维大量集中被拔出区域,存在一定的界面分离,但并不明显,表现为复合材料的宏观压缩强度相对较高。这是因为G型纤维表面粗糙,使得纤维与树脂基体的界面结合面积较大且机械锚钉作用增强;此外,G型纤维与环氧树脂浸润比较均匀,复合材料制备过程中树脂对G型纤维的浸润较充分。由此可见,纤维的浸润性能对复合材料的宏观压缩强度有较大的影响,两者呈现良好的一致性^[24]。

3 结论

(1)同样作为T700级碳纤维,在元素组成,表面基团组成等方面相近的G型纤维和S型纤维,因其制备工艺不同导致其表面形貌不同。

(2)碳纤维的表面形貌会直接影响到纤维的力学性能,相比于G型纤维的凹槽表面,表面更加光滑的S型纤维缺陷较少,在受拉伸时不易产生应力集中,致使其本身断裂强度高,同样S型纤维复合材料的拉伸强度较G型纤维复合材料拉伸强度高9%。

(3)带有凹槽的表面对于纤维与树脂的界面结合能力有一定增强,相较于S型纤维复合材料,G型纤维复合材料在压缩、剪切等与界面性能相关性更高的力学性能测试中有更好的表现,G型纤维复合材料的压缩强度较S型纤维复合材料的高8%,在湿热条件下的压缩性能保持率高11.7%。

参考文献

- [1] 据裕波,李智,柏挺,等.低成本碳纤维的研究进展与应用[J].工程塑料应用,2023,51(11):181-186.
JU Yubo, LI Zhi, BAI Ting, et al. Research progress and application of low-cost carbon fiber[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11):181-186.
- [2] 王玉琳,朱有欣,李学臻,等.树脂基纤维复合材料层间界面剥离性能的研究[J].高科技纤维与应用,2024,49(5):66-71.
WANG Yulin, ZHU Youxin, LI Xuezheng, et al. Study on the interfacial peeling performance of resin based fiber composite laminates [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2024, 49(5):66-71.
- [3] 李兆彤,李龙,王在铎,等.碳纤维表面特征对碳/环氧复合材料界面性能的影响[J].宇航材料工艺,2021,51(2):47-51.
LI Zhaotong, LI Long, WANG Zaiduo, et al. Effect of carbon fiber surface characteristics on interfacial properties of carbon/epoxy composite[J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(2): 47-51.
- [4] 韩萍.碳纤维表面多尺度结构调控及其环氧树脂复合材料界面性能研究[D].青岛:青岛大学,2019.
HAN Ping. Study on multiscale structure regulation of carbon fiber surface and interfacial properties of epoxy resin composites[D]. Qingdao:Qingdao University, 2019.
- [5] 伊翠云,刘甲秋,周国泰,等.国产T700碳纤维用环氧树脂及其复合材料性能研究[J].纤维复合材料,2023,40(4):46-49.
YI Cuiyun, LIU Jiaqiu, ZHOU Guotai, et al. Study on properties of epoxy resin and its composite materials for domestic T700 carbon fiber[J]. Fiber Composites, 2023, 40(4):46-49.
- [6] 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. Manufacturing process for carbon fiber reinforced EP composite motor vessels[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12):51-57.
- [7] 华夏,崔野,郭万元,等.聚丙烯腈纤维预氧化过程结构演变及与

- 碳纤维结构比较[J].工程塑料应用,2021,49(6):125-130.
- HUA Xia, CUI Ye, GUO Wanyuan, et al. Structural evolution of polyacrylonitrile fibers during pre-oxidation and comparison with carbon fiber structure[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6):125-130.
- [8] 崔霞,刘新东,高航,等.三种碳纤维表面性能分析及其复合材料界面性能[C]//2019树脂基复合材料学术研讨会论文集.贵阳,2019:23-31.
- Cui Xia, Liu Xindong, Gao Hang, et al. Analysis of surface properties of three kinds of carbon fibers and interfacial properties of composites[C]//2019 Symposium on Resin Matrix Composites. Guiyang, 2019:23-31.
- [9] 赵新星,邓紫怡,孙泽玉,等.大丝束碳纤维的上浆工艺及其性能研究[J].合成纤维工业,2023,46(4):7-13.
- ZHAO Xinxing, DENG Ziyi, SUN Zeyu, et al. Sizing process and properties of large-tow carbon fiber[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2023, 46(4):7-13.
- [10] 刘震宇.国产T700级碳纤维复合材料性能研究和翼片成型工艺优化[D].济南:山东大学,2019.
- LIU Zhenyu. Study of domestic t700-grade carbon fiber composites and optimization of wing panel forming process[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [11] 肖何,陈藩,刘寒松,等.国产ZT7H碳纤维表面状态及其复合材料界面性能[J].复合材料学报,2021,38(8):2554-2567.
- XIAO He, CHEN Fan, LIU Hansong, et al. Surface state of domestic ZT7H carbon fiber and interface property of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8):2554-2567.
- [12] 程圣,王云飞,任勃旭,等.CCF800碳纤维表面粗糙度及对复合材料界面性能的影响[J].中国设备工程,2023(10):128-130.
- CHENG Sheng, WANG Yunfei, REN Boxu, et al. Surface roughness of CCF800 carbon fiber and its influence on interfacial properties of composites[J]. China Plant Engineering, 2023(10):128-130.
- [13] 张育洋,李飞,魏海银.T700碳纤维增强树脂基复合材料的制备与性能研究[J].合成纤维,2021,50(3):54-58.
- ZHANG Yuyang, LI Fei, HU Haiyin. Study on the preparation and properties of T700 carbon fiber reinforced resin matrix composite laminates[J]. Synthetic Fiber in China, 2021, 50(3):54-58.
- [14] 张海燕,李根臣,刘震宇,等.国产T700级碳纤维及复合材料性能表征[J].化工新型材料,2020,48(4):238-240.
- ZHANG Haiyan, LI Genchen, LIU Zhenyu, et al. Characterization of domestic T700 carbon fiber and its composites[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(4):238-240.
- [15] 赵晓莉,齐晷华,刘建军,等.干喷湿纺法制备T700级聚丙烯腈基碳纤维[J].工程塑料应用,2019,47(1):67-71,95.
- ZHAO Xiaoli, QI Shuhua, LIU Jianjun, et al. Preparation of T700 grade PAN carbon fiber by dry spray wet spinning[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1):67-71, 95.
- [16] 张扬,王峰,朱凯,等. ACTECH®1203树脂体系固化动力学及其复合材料真空成型工艺研究[J].当代化工,2021,50(10):2322-2326,2331.
- ZHANG Yang, WANG Feng, ZHU Kai, et al. Research on curing kinetics and vacuum forming process of ACTECH® 1203 resin system[J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, 50(10):2322-2326, 2331.
- [17] 徐牛牛,杭传伟,张淑斌,等.纺丝工艺对T700级碳纤维及其复合材料性能的影响[J].合成纤维,2023,52(5):29-33.
- XU Niuniu, HANG Chuanwei, ZHANG Shubin, et al. Effect of spinning process on the properties of T700 carbon fibers and its reinforced composites[J]. Synthetic Fiber in China, 2023, 52(5):29-33.
- [18] 和淑倩.干喷湿纺聚丙烯腈凝固丝结构性能表征方法及影响因素探讨[D].上海:东华大学,2021.
- HE Shuqian. Characterization Methods and Influencing Factors of Structure and Properties for Dry-Jet Wet Spun Polyacrylonitrile Coagulated Filaments[D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [19] 黄春旭,陈刚,王启芬,等.碳纤维表面改性技术研究进展[J].工程塑料应用,2022,50(1):170-174.
- HUANG Chunxu, CHEN Gang, WANG Qifen, et al. Research progress of carbon fiber surface modification technology[J]. Engineering plastics application, 2022, 50(1):170-174.
- [20] 王莉,拜斌,张璋,等.国产T800H碳纤维/环氧树脂复合材料化学结合及特性研究[J].粘接,2023,50(5):73-76.
- WANG Li, BAI Bin, ZHANG Zhang, et al. Studies on chemical bonding and characteristics of domestic T800H carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Adhesion, 2023, 50(5):73-76.
- [21] 张月欣,杨明君,王崇杰,等.干湿环境对环氧树脂/碳纤维复合材料层合板老化性能的影响[J].工程塑料应用,2022,50(4):124-129.
- ZHANG Yuexin, YANG Mingjun, WANG Chongjie, et al. Effects of dry/wet environment on aging properties of epoxy resin/carbon fiber composite laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):124-129.
- [22] 王静,李闯,耿闻,等.碳纤维复合材料高温界面性能研究进展[J].高分子材料科学与工程,2024,40(3):163-171.
- WANG Jing, LI Chuang, GENG Wen, et al. Progress of high temperature interfacial properties of carbon fiber composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(3):163-171.
- [23] 张藕生,李承高,牛延沼,等.湿热环境下纤维增强复合材料吸湿与界面性能研究[J].复合材料科学与工程,2024(10):87-96.
- ZHANG Ousheng, LI Chenggao, NIU Yanzhao, et al. Study on water absorption and interfacial properties of CFRP and GFRP composites in hygrothermal environment[J]. Composites Science and Engineering, 2024(10):87-96.
- [24] 杨刚,李韶亮,林晓凤,等.复合材料压缩应变的等效替代试验方法[J].工程塑料应用,2024,52(7):124-130.
- YANG Gang, LI Shaoliang, LIN Xiaofeng, et al. Equivalent alternative test method for compressive strain of composite[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7):124-130.