

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.09.021

# PEK-C 水性上浆剂对 CCF/PEEK 复合材料界面性能的影响

熊平<sup>1</sup>, 田芳林<sup>1</sup>, 李声耀<sup>1</sup>, 张兴迪<sup>2</sup>, 张英伟<sup>1</sup>, 胡天辉<sup>1</sup>, 王志鹏<sup>2</sup>

(1. 株洲时代工程塑料科技有限责任公司, 湖南株洲 412007; 2. 中国科学院大连化学物理研究所能源材料部, 辽宁大连 116023)

**摘要:** 为提高聚醚醚酮(PEEK)树脂对连续碳纤维(CCF)的浸润性,改善 CCF/PEEK 复合材料的界面性能,采用自制的酚酞基聚芳醚酮(PEK-C)水性乳液为上浆剂,对 CCF 进行上浆改性,并通过叠层热压法制备了 CCF/PEEK 复合材料。测试了上浆前后 CCF 织物表面的润湿性,研究了上浆剂浓度对 CCF/PEEK 复合材料弯曲性能、孔隙率和层间剪切强度(ILSS)的影响。结果表明,当 PEK-C 水性上浆剂浓度为 2% 时,CCF 表面接触角由上浆处理前的 74.9° 降低为上浆处理后的 53°。采用此浓度上浆剂处理的 CCF 制备的 CCF/PEEK 复合材料,其弯曲强度、弯曲模量、ILSS 分别为 895 MPa, 72 GPa 和 66.7 MPa,比未上浆处理的 CCF/PEEK 复合材料分别提高了 95.7%, 72.7%, 39.8%, 孔隙率仅为 0.85%。PEK-C 水性上浆剂可显著改善 CCF 与 PEEK 树脂的界面结合和相容性,提高 CCF/PEEK 复合材料的力学性能。

**关键词:** 碳纤维;聚醚醚酮;酚酞基聚芳醚酮;水性上浆剂;界面性能

**中图分类号:** TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)09-0143-06

## Effect of PEK-C water-based sizing agent on interface properties of CCF/PEEK composites

XIONG Ping<sup>1</sup>, TIAN Fanglin<sup>1</sup>, LI Shengyao<sup>1</sup>, ZHANG Xingdi<sup>2</sup>, ZHANG Yingwei<sup>1</sup>, HU Tianhui<sup>1</sup>, WANG Zhipeng<sup>2</sup>

[1. Zhuzhou Times Engineering Plastics Industrial Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China;

2. Division of Energy Materials (DNL22), Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China]

**Abstract:** In order to enhance the infiltration of poly (ether ether ketone)(PEEK) resin on continuous carbon fibers (CCF) and improve the interfacial properties of CCF/PEEK composites, phenolphthalein-based polyaryletherketone (PEK-C) aqueous emulsion prepared by self was used as a sizing agent to modify CCF, and CCF/PEEK composites were prepared by the laminated hot pressing method. The wettability of CCF fabric surface before and after sizing was tested, and the effects of sizing agent concentration on the flexural properties, porosity, and interlaminar shear strength (ILSS) of CCF/PEEK composite materials were studied. The results show that the contact angle of CCF surface decreases from 74.9° (prior to sizing treatment) to 53° (following sizing treatment) when the concentration of the PEK-C water-based sizing agent is 2%. The flexural strength, flexural modulus, and ILSS of CCF/PEEK composites prepared with CCF treated by sizing agent with 2% concentration are 895 MPa, 72 GPa, and 66.7 MPa, which are 95.7%, 72.7%, and 39.8% higher than those of the unsized CCF/PEEK composites, respectively. The porosity is only 0.85%. The PEK-C water-based sizing agent has been demonstrated to significantly enhance the interfacial bonding and compatibility between CCF and PEEK, as well as to improve the mechanical properties of CCF/PEEK composites.

**Keywords:** carbon fiber ; poly (ether ether ketone) ; phenolphthalein-based polyaryletherketone ; water-based sizing agent ; interfacial property

近年来,在双碳目标的背景下,连续碳纤维(CCF)增强热塑性复合材料由于具有可重复加工、可回收等优点,正成为国内外研究热点。但对于

CCF 增强热塑性复合材料而言,因碳纤维(CF)的疏水性和热塑性树脂基体的高熔体黏度导致的弱界面性是限制该类材料进一步应用的关键因素。弱

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFB3704604, 2022YFC2406102)

**通信作者:** 张兴迪, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为热塑性复合材料

**收稿日期:** 2024-06-07

**引用格式:** 熊平, 田芳林, 李声耀, 等. PEK-C 水性上浆剂对 CCF/PEEK 复合材料界面性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(9): 143-148.

XIONG Ping, TIAN Fanglin, LI Shengyao, et al. Effect of PEK-C water-based sizing agent on interface properties of CCF/PEEK composites [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9): 143-148.

界面性将使纤维和基体之间更容易脱胶,从而导致内部产生裂纹,降低复合材料的力学性能<sup>[1-4]</sup>。

正因如此,通过对CCF与热塑性基体树脂的界面改性进而提高热塑性复合材料的界面强度,越来越受到科学家和工程人员的关注。通常采用物理或者化学的方法对CF进行表面改性可以提高树脂与CF的浸润性。目前,常用的改性手段包括对CF表面进行氧化<sup>[5-6]</sup>或等离子体处理<sup>[7-8]</sup>、上浆<sup>[9-10]</sup>、化学接枝<sup>[11-12]</sup>、引入纳米粒子<sup>[13-14]</sup>等。从工程化角度考虑,对CF上浆是效率最高、成本最低、最有效的方法之一,适合工业化的连续生产<sup>[15]</sup>。

聚醚醚酮(PEEK)是一种芳香族半结晶性的热塑性树脂,它具有高强度、耐温性高、耐疲劳性好、耐有机溶剂等优点,是一种性能优异的用于CCF增强热塑性复合材料的基体树脂<sup>[16]</sup>。在欧盟“Clean Sky”项目的推动下,CCF/PEEK复合材料在航空领域有着广泛应用,空客公司的H-160直升机创新性地用CCF增强PEEK热塑性复合材料代替原有的钛合金材料制造旋翼桨毂中央件,法国Stelia公司采用CCF/PEEK复合材料制造了一个全尺寸热塑性机身验证件。帝人公司基于CCF和PEEK制造的材料Tenax™热塑性编织物(TPWF)和Tenax™热塑性复合层压板(TPCL)已通过国家先进材料性能中心(NCAMP)认证。

然而,商用CCF表面的上浆剂多为热固性树脂,主要成分为环氧树脂或不饱和聚酯。对于CCF/PEEK复合材料而言,此类上浆剂与PEEK树脂相容性差,界面性能弱。此外,CCF/PEEK复合材料的成型温度通常在340℃以上,热固性上浆剂在此温度下已开始发生热分解,进一步弱化CCF与PEEK树脂的界面性能<sup>[17]</sup>。因此,一种耐高温且与PEEK树脂相容性好的上浆剂能够保护CF表面,提高PEEK树脂对CF的浸润性,进而改善复合材料的界面结合,提高界面性能。

Liu等<sup>[18]</sup>选择聚醚酰亚胺(PEI)作为CCF/PEEK复合材料的上浆剂,系统研究了上浆剂种类(溶剂型和乳液型)和上浆量对CCF/PEEK复合材料界面剪切强度的影响。与未经上浆处理的CCF增强PEEK复合材料相比,PEI上浆后的CCF/PEEK复合材料的界面剪切强度和弯曲强度都有所提高,这表明上浆工艺对增强CCF与PEEK树脂基体之间的界面结合有一定的作用。

Yan等<sup>[19]</sup>制备了新型的可溶性氨基封端的聚醚醚酮(PEEK-NH<sub>2</sub>)作为上浆剂,用以改善CCF/PEEK复合材料的界面性能。与未经上浆处理的CCF/PEEK复合材料相比,上浆处理后的CCF/PEEK复合材料弯曲强度和层间剪切强度各提高了62.2%和43.1%。界面附着力的提高可归因于PEEK-NH<sub>2</sub>与PEEK良好的相容性,其在界面处起到有效的应力传递桥的作用。

目前,CCF/PEEK复合材料用上浆剂多选用聚酰亚胺(PI)、聚醚酰亚胺(PEI)、PEEK、聚醚醚酮(PEKK)树脂及其衍生物,笔者选择与PEEK主链结构类似的酚酞基聚芳醚酮(PEK-C)为上浆剂主体成分,制备了PEK-C水性乳液作为CF的上浆剂。讨论了PEK-C水性上浆剂浓度对CCF/PEEK复合材料界面性能的影响,为实际的工程化应用提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

CCF织物:T300,斜纹,245 g/m<sup>2</sup>,含环氧上浆剂,江苏澳盛复合材料科技有限公司;

PEK-C:中国科学院大连化学物理研究所;

三氯甲烷:工业级,浙江衢化氟化学有限公司;

吐温80:工业级,济南泉胜化工有限责任公司;

PEEK薄膜:吉林大学。

### 1.2 主要仪器及设备

蠕动泵:WG600A,保定仁为流体科技有限公司;

高剪切乳化机:RHJ-D50L,扬州艾普威尔自动化设备有限公司;

CF连续上浆线:定制,威海光威精密机械有限公司;

模压机:自制,株洲时代工程塑料科技有限责任公司;

液滴形状分析仪:DSA100S,德国克吕士公司;

微机控制电子试验机:Z100TEW,德国Zwick Roell公司;

倒置光学显微镜:DMi8,德国Leica公司;

扫描电子显微镜(SEM):EVO18,英国ZEISS公司。

### 1.3 试样制备

PEK-C水性上浆剂的制备:将PEK-C树脂溶于三氯甲烷配制一定固含量的树脂溶液,将加入适量

吐温80的去离子水通过蠕动泵缓慢滴加到树脂溶液中,并通过高速剪切乳化机进行乳化,控制溶液温度低于40℃。滴加完毕继续搅拌30 min,通过减压蒸馏去除剩余的三氯甲烷,得到PEK-C水乳液。

CCF织物的上浆处理:将不同浓度的PEK-C水性上浆剂倒入上浆槽中,在CF连续上浆设备上CCF织物在导辊牵引下依次经过脱浆段(380℃)、上浆槽、干燥段(5个区段,温度分别为60,80,100,120,150℃),以1 m/min的速度收卷得到完成上浆的CCF织物。不同CCF的处理方式及对应试样简称见表1。

表1 CCF织物处理方式与对应试样简称

Tab. 1 Processing methods of CCF fabric and corresponding sample abbreviation

Sample abbreviation	Processing method
UCCF	No processing (Epoxy sizing agent)
CCF-0	Desizing
CCF-1	Sizing agent at 1% concentration
CCF-2	Sizing agent at 2% concentration
CCF-3	Sizing agent at 3% concentration

CCF/PEEK复合材料板材的制备:首先将CCF织物和PEEK薄膜裁剪成100 mm×200 mm的尺寸,在120℃烘箱中干燥30 min;其次,将10层CCF织物与11层PEEK薄膜交替铺层叠放在模具中,CCF织物质量占复合材料总质量的63%。随后采用热压法,在385℃,5 MPa条件下压制30 min,冷却脱模即可得到厚度为2 mm的CCF/PEEK复合材料板,制备示意图如图1所示。

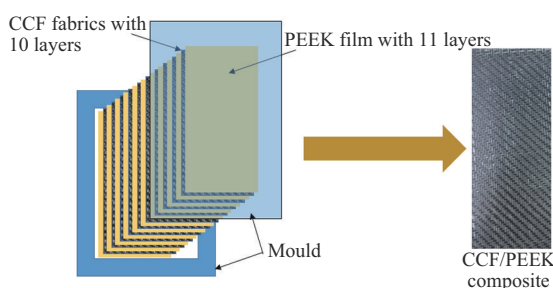


图1 CCF/PEEK复合材料制备示意图

Fig. 1 Schematic diagram for preparation of CCF/PEEK composites

#### 1.4 测试与表征

参考GB/T 42694-2023,采用液滴形状分析仪测定上浆前后CCF织物的接触角,所用液体为去离子水。

分别按照GB/T 3356-2014和ISO 14130-1997的测试条件和测试方法,采用微机控制电子试验机进行三点弯曲、层间剪切测试。弯曲性能测试样条

尺寸为80 mm×12.5 mm×2 mm,跨距64 mm,弯曲模量试验速率为2 mm/min,弯曲强度试验速率为5 mm/min。层间剪切性能测试样条尺寸为20 mm×10 mm×2 mm,跨距10 mm,试验速率为1 mm/min。

采用倒置光学显微镜对CCF/PEEK复合材料进行孔隙率测定。

采用SEM对CCF/PEEK复合材料层间剪切断面进行微观形貌表征,加速电压为10 kV。

## 2 结果与讨论

### 2.1 上浆前后CCF织物表面润湿性的分析

为分析不同浓度上浆剂对CCF织物表面润湿性的影响,表征了不同处理方式下CCF织物(UCCF,CCF-0,CCF-1,CCF-2,CCF-3)的接触角,如图2所示。由图2可知,CCF-0的接触角为74.9°,明显高于其他样品,表明将UCCF脱浆后织物表面的润湿性变差(UCCF出厂时使用环氧树脂型上浆剂处理)。然而,上浆处理后的CCF织物的接触角迅速下降,特别是CCF-3的接触角最小,为51.4°。这表明上浆后的CCF织物具有优异的润湿性。

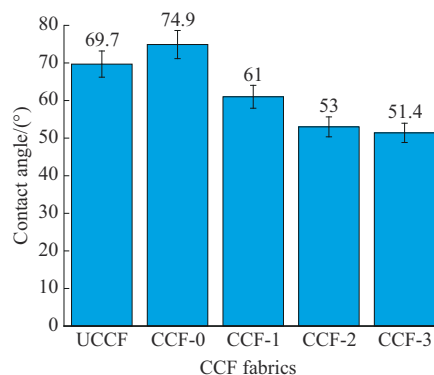


图2 不同处理方式CCF织物表面的接触角

Fig. 2 Contact angle of CCF fabrics surface with different processing methods

### 2.2 上浆剂浓度对CCF/PEEK复合材料弯曲性能的影响

三点弯曲测试综合了复合材料在实际应用中可能受到的拉伸、压缩和剪切力,通过对弯曲性能的研究可对复合材料力学性能进行全面了解,不同CCF/PEEK复合材料的弯曲性能如图3所示。由图3可知,UCCF/PEEK复合材料的弯曲性能最低,这是由于UCCF使用的是环氧类上浆剂,其与PEEK基体树脂相容性差。其次,环氧类上浆剂耐热性不足,在CCF/PEEK复合材料的成型温度下发生热分解,于界面形成空洞等缺陷<sup>[20]</sup>。经PEK-C水性上浆剂处理,CCF/PEEK复合材料弯曲强度和弯曲模量

随上浆剂浓度增加呈现出先升高后降低的趋势。CCF-2/PEEK复合材料的弯曲性能最好,与CCF-0/PEEK复合材料相比,CCF-2/PEEK复合材料的弯曲强度和弯曲模量分别提高了95.7%和72.2%。然而,随着上浆剂浓度的进一步增加,CCF-3/PEEK复合材料的弯曲强度和弯曲模量出现略微的下降,但是与CCF-0/PEEK复合材料相比弯曲强度和弯曲模量仍提高了88.9%和65.7%。CCF经PEK-C水性上浆剂处理后,CCF/PEEK复合材料弯曲性能得到显著提升的原因可能是由于PEK-C与PEEK基体间具有很好的相容性,通过物理和化学的相互作用产生了优异的“桥接”效应<sup>[21]</sup>。

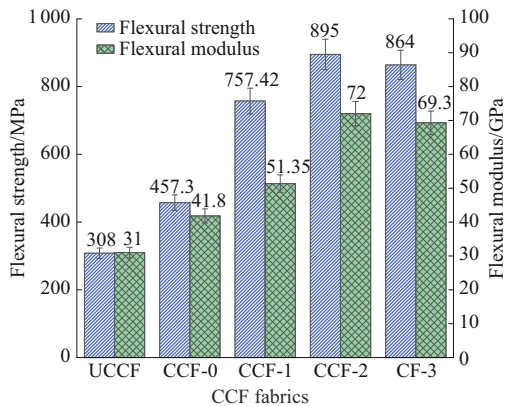


图3 不同CCF/PEEK复合材料弯曲性能

Fig. 3 Flexural properties of different CCF/PEEK composites

### 2.3 上浆剂浓度对CCF/PEEK复合材料孔隙率的影响

为了分析CCF/PEEK复合材料内部缺陷,采用光学显微镜观察了CCF/PEEK复合材料的形貌,对复合材料的孔隙进行计算,如图4和图5所示。从图4和图5可知,CCF/PEEK复合材料的孔隙率随PEK-C上浆剂浓度的增加而明显减小,上浆剂浓度为2%时复合材料的孔隙率为0.85%,相比未上浆处理的复合材料孔隙率降幅明显。这表明PEK-C水性上浆剂可以有效改善PEEK树脂与CF的界面浸润性。当上浆剂浓度从2% (CCF-2)增加至3% (CCF-3)时,复合板材的孔隙率变化幅度很小,仅为0.03%,孔隙率趋于稳定。

### 2.4 上浆剂浓度对CCF/PEEK复合材料界面性能的影响

短梁法测试用于评估CCF/PEEK复合材料的层间剪切强度(ILSS),它是CF与PEEK基体之间界面相互作用的关键指标。图6为不同上浆剂浓度对CCF/PEEK复合材料ILSS的影响。从图6可知,

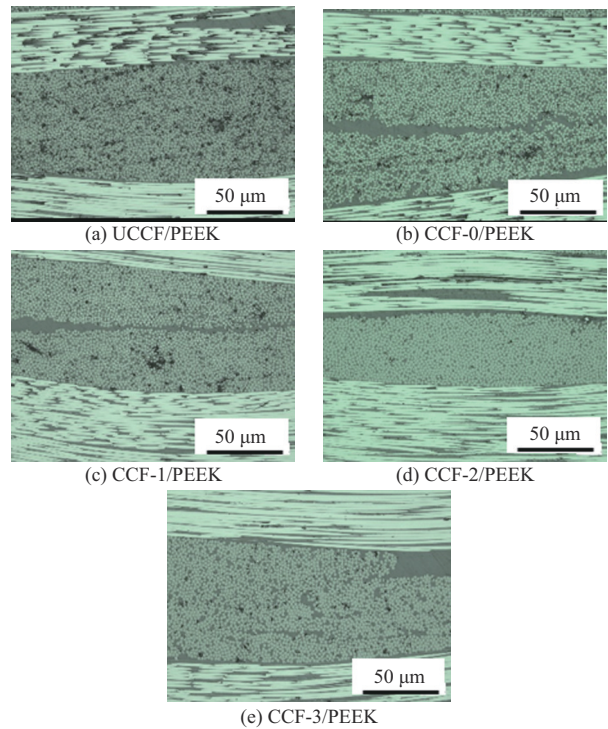


图4 不同CCF/PEEK复合材料的显微镜图

Fig. 4 Microscope images of different CF/PEEK composites

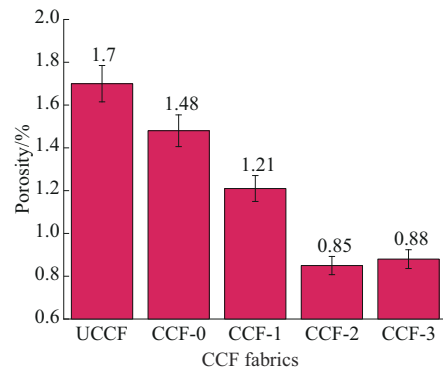


图5 不同CCF/PEEK复合材料的孔隙率

Fig. 5 Porosity of different CF/PEEK composites

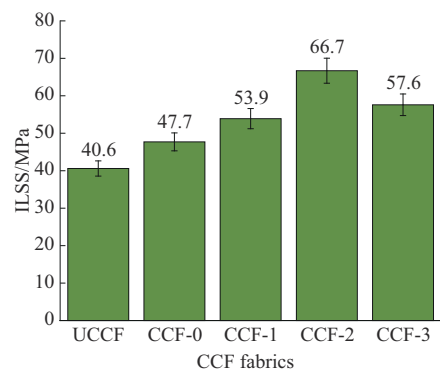


图6 不同CCF/PEEK复合材料的ILSS

Fig. 6 ILSS of different CCF/PEEK composites

CCF/PEEK复合材料的ILSS随上浆剂浓度的增加表现出先升高后降低的趋势。经PEK-C水性上浆

剂处理的CCF织物所制备的复合材料,其ILSS均高于UCCF/PEEK复合材料和CCF-0/PEEK复合材料。其中,CCF-2/PEEK复合材料的ILSS最高,与UCCF/PEEK和CCF-0/PEEK复合材料相比,CCF-2/PEEK复合材料的ILSS分别提高了64.3%和39.8%。这是由于,CCF织物经过使用PEK-C水性上浆剂处理后,CF表面包裹了一层致密的PEK-C树脂,提高了基体树脂PEEK与CF织物间的浸润性和相容性,CF表面的PEK-C树脂与基体树脂PEEK的扩散和缠结,增强了CF与PEEK的界面相互作用,进而提升了CCF/PEEK复合材料的界面性能<sup>[22-24]</sup>。

为进一步考察CF与基体树脂PEEK的界面结合状态,采用SEM对剪切破坏后的CCF/PEEK复合材料断面进行了研究,如图7所示。由图7a1至图7e1所有剪切破坏的横向截面都可以观察到暴露的CF。对于未经PEK-C水性上浆剂处理的CCF/PEEK复合材料,CF表面光滑,黏附PEEK较少,如图7a1和图7b1所示。在剪切破坏的纵向截面上,则存在纤维拔出留下的孔洞,且纤维周围存在明显的空隙,如图7a2和图7b2所示。这表明CF与PEEK的界面结合较弱,在受力时发生脱黏。相反,当CF使用PEK-C水性上浆剂处理后,可以明显地看到PEEK树脂黏附在每根CF表面,且随着上浆剂浓度的增加CF上黏附的PEEK树脂也随之增加,如图7c1~图7e1所示。纵向截面上,纤维周围的空隙和拔出时所产生的空洞明显减少,且树脂呈撕裂状,如图7c2~图7e2所示。这表明PEK-C水性上浆剂可以有效改善CF与PEEK基体间的相容和结合。在不同浓度上浆剂处理的复合材料中,CCF-2/PEEK复合材料的弯曲性能和ILSS最佳。这可能是由于当上浆剂浓度过低时,无法在CF表面形成均匀的上浆剂涂层,从而导致纤维和PEEK基体之间的部分缺陷,如图7c1所示部分CF表面未黏附PEEK树脂。当上浆剂浓度高于2%时,上浆剂涂层过度积聚在纤维表面,而PEK-C树脂的强度低于PEEK树脂,当复合材料受外力时,纤维表面过量的PEK-C先于PEEK发生破坏,进而导致复合材料性能下降。

### 3 结论

(1)使用PEK-C水性上浆剂对CF上浆可以降低CF的接触角,改善CF表面的润湿性。

(2)PEK-C水性上浆剂能显著提高CCF/PEEK复合材料的弯曲性能,当上浆剂浓度为2%时,CCF-

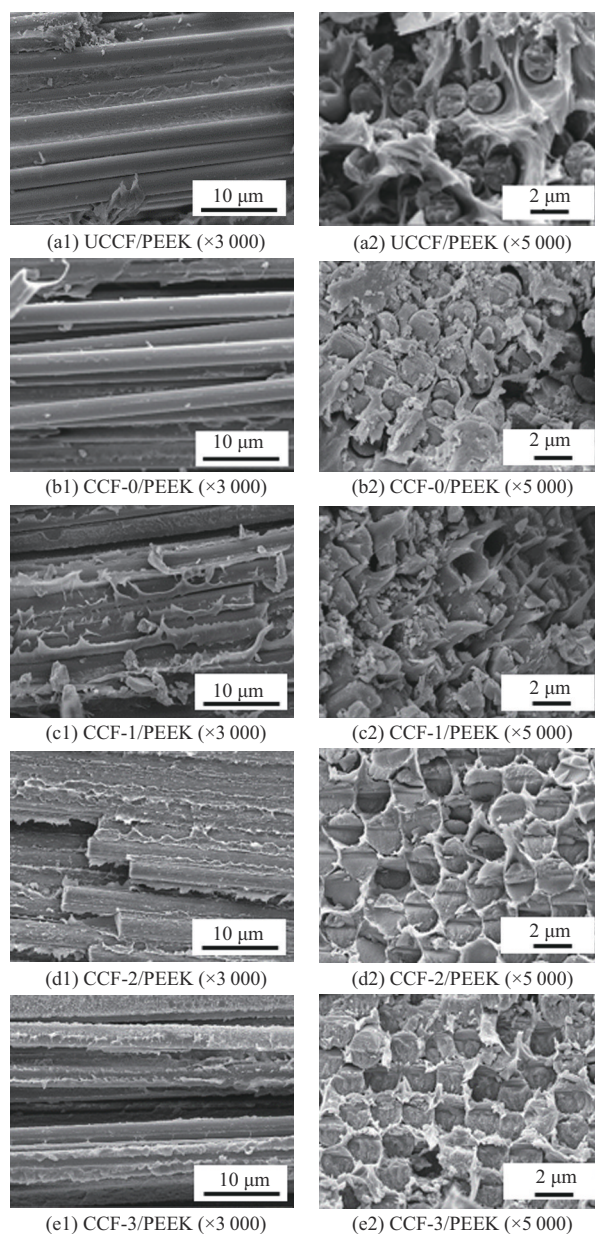


图7 不同CCF/PEEK复合材料的SEM图像(a1~e1为横向截面, a2~e2为纵向截面)

Fig. 7 SEM images of different CCF/PEEK composites (a1~e1:transverse section, a2~e2:longitudinal section)

2/PEEK复合材料的弯曲强度和弯曲模量分别较CCF-0/PEEK复合材料提高了95.7%和72.2%。

(3)PEK-C水性上浆剂能明显改善CF与PEEK树脂间的界面结合性能。当上浆剂浓度为2%时复合材料的ILSS最高,与UCCF/PEEK和CCF-0/PEEK复合材料相比,CCF-2/PEEK复合材料的ILSS分别提高了64.3%和39.8%。

### 参考文献

- [1] KIM K W, JEONG J S, AN K H, et al. A study on the microstructural changes and mechanical behaviors of carbon fibers induced

- by optimized electrochemical etching[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165:764–771.
- [2] YUAN H J, ZHANG S C, LU C X. Surface modification of carbon fibers by a polyether sulfone emulsion sizing for increased interfacial adhesion with polyether sulfone[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 317:737–744.
- [3] SZABÓ L, IMANISHI S, TETSUO F, et al. Electron beam induced strengthening of a short carbon fiber reinforced green thermoplastic composite: Key factors determining materials performance[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 121: 386–396.
- [4] 朱敏杰,魏陇沙,孔文锋,等.超支化聚酰亚胺上浆剂对碳纤维增强聚醚醚酮复合材料力学性能的影响[J/OL].*复合材料科学与工程*, 2024: 1–5[2024-7-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.TU.20240227.1738.004.html>.  
ZHU Minjie, WEI Longsha, KONG Wenfeng, et al. Effect of hyperbranched polyimide sizing agent on mechanical properties of carbon fiber reinforced poly(ether-ether-ketone)[J/OL]. *Composites Science and Engineering*, 2024: 1–5[2024-7-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.TU.20240227.1738.004.html>.
- [5] JIANG J J, YAO X M, XU C M, et al. Influence of electrochemical oxidation of carbon fiber on the mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide/epoxy composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 95:248–256.
- [6] GAO D T, YANG H R, LIU G, et al. Effect of electrochemical oxidation degree of carbon fiber on the interfacial properties of carbon fiber - reinforced polyaryletherketone composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2023, 42(21–22): 1 107–1 118.
- [7] BOROOJ M B, SHOUSHARI A M, SABET E N, et al. Influence of oxygen plasma treatment parameters on the properties of carbon fiber[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2016, 30(21): 2 372–2 382.
- [8] KIM J, MAUCHAUFFÉ R, KIM D, et al. Mechanism study of atmospheric-pressure plasma treatment of carbon fiber reinforced polymers for adhesion improvement[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 393. DOI:10.1016/j.surfcoat.2020.125841.
- [9] WANG X K, HUANG Z G, LAI M L, et al. Highly enhancing the interfacial strength of CF/PEEK composites by introducing PAIK onto diazonium functionalized carbon fibers[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 510. DOI:10.1016/j.apsusc.2020.145400.
- [10] MARATHE U, PADHAN M, BIJWE J. Exploration of pros and cons of polyetherimide solutions with varying concentrations as the sizing agents for graphite fibers in graphite fabric-PAEK composites[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14:2 085–2 095.
- [11] WANG S D, YANG Y C, MU Y F, et al. Synergy of electrochemical grafting and crosslinkable crystalline sizing agent to enhance the interfacial strength of carbon fiber/PEEK composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 203. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108562.
- [12] CHEN H, CAI Q Y, WU J, et al. Interfacial enhancement of carbon fiber/nylon 12 composites by grafting nylon 6 to the surface of carbon fiber[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 441: 538–545.
- [13] ZHU P, SHI J, BAO L M. Effect of polyetherimide nanoparticle coating on the interfacial shear strength between carbon fiber and thermoplastic resins[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 509. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145395.
- [14] LIU F, DENG S Q, ZHANG J N. Mechanical properties of epoxy and its carbon fiber composites modified by nanoparticles[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2017, 2017(1). DOI: 10.1155/2017/8146248.
- [15] 杨雪勤,任宏亮,骆佳美,等.水性SPEKK上浆剂改善CF/PEEK复合材料的力学性能[J].*复合材料学报*, 2023, 40(11):6 061–6 072.  
YANG Xueqin, REN Hongliang, LUO Jiamei, et al. Water-based SPEKK sizing agent for improving the mechanical properties of CF/PEEK composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(11):6 061–6 072.
- [16] REN T N, ZHU G M, ZHANG C S, et al. Preparation of CF/PEEK composites with high mechanical performance using PEEK derivatives as the sizing agent[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2023, 44(4). DOI:10.1002/marc.202200738.
- [17] YANG Y C, WANG T J, WANG S D, et al. Strong interface construction of carbon fiber-reinforced PEEK composites: An efficient method for modifying carbon fiber with crystalline PEEK[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2020, 41(24). DOI: 10.1002/marc.202000001.
- [18] LIU H S, ZHAO Y, LI N, et al. Effect of polyetherimide sizing on surface properties of carbon fiber and interfacial strength of carbon fiber/polyetheretherketone composites[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(2):931–943.
- [19] YAN T W, YAN F, LI S, et al. Interfacial enhancement of CF/PEEK composites by modifying water-based PEEK-NH<sub>2</sub> sizing agent[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 199. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108258.
- [20] YUAN C C, LI D Z, YUAN X Y, et al. Preparation of semi-aliphatic polyimide for organic-solvent-free sizing agent in CF/PEEK composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 201. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108490.
- [21] SUN Z L, LUO Y X, CHEN C Y, et al. Mechanical enhancement of carbon fiber-reinforced polymers: From interfacial regulating strategies to advanced processing technologies [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 142. DOI:10.1016/j.pmatsci.2023.101221.
- [22] 周存,田智勇.聚醚醚酮水性上浆剂对碳纤维热塑性复合材料界面性能的影响[J].*天津工业大学学报*, 2022, 41(3):20–27.  
ZHOU Cun, TIAN Zhiyong. Effect of polyetheretherketone water-based sizing on interface properties of CFs/PEEK composites[J]. *Journal of Tiangong University*, 2022, 41(3):20–27.
- [23] WANG T, JIAO Y S, MI Z M, et al. Improving the interfacial adhesion of carbon fiber/polyether ether ketone composites by polyimide coating[J]. *Chemistry Select*, 2020, 5(19):5 507–5 514.
- [24] 王清清,王飘飘,钱鑫,等.水溶性热塑性聚酰亚胺上浆剂对国产高强高模碳纤维复合材料界面性能的影响[J].*材料工程*, 2023, 51(5):174–182.  
WANG Qingqing, WANG Piaopiao, QIAN Xin, et al. Effect of water-soluble thermoplastic polyimide sizing agent on interfacial properties of domestic high strength and high modulus carbon fiber reinforced composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(5):174–182.