

荷载与湿热服役工况下碳纤维增强复合材料的摩擦学行为与磨损机制

咸贵军 齐肖 郭瑞 田经纬

Study on friction behaviors and wear mechanisms of carbon fiber reinforced composites under load and hygrothermal service conditions

XIAN Guijun, QI Xiao, GUO Rui, TIAN Jingwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241008.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

尼龙6填料对碳纤维-环氧树脂复合材料力学与摩擦磨损性能的提升机制

Enhancement mechanism of nylon 6 filler on the mechanical and frictional wear properties of carbon fiber-epoxy resin composites

复合材料学报. 2023, 40(9): 5011-5025 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230110.003>

湿热环境下碳纤维增强乙烯基树脂复合材料长期力学性能

Long-term mechanical properties of carbon fiber reinforced vinyl resin composites in hygrothermal environment

复合材料学报. 2023, 40(3): 1406-1416 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220509.001>

空心玻璃微珠/超高分子量聚乙烯复合材料低速重载工况下的摩擦磨损性能

Friction and wear properties of hollow glass microspheres/ultrahigh molecular weight polyethylene composites under low speed and high normal loads conditions

复合材料学报. 2022, 39(6): 2649-2660 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210720.001>

服役温度对铝合金-碳纤维增强树脂复合材料粘接接头准静态失效的影响

Effect of service temperature on quasi-static failure of aluminum alloy-carbon fiber reinforced polymer composite bonded joints

复合材料学报. 2020, 37(5): 1088-1095 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190708.001>

湿热环境下纤维增强树脂基复合材料疲劳性能研究进展

Fatigue performance of fiber reinforced polymer composites under hygrothermal environment A review

复合材料学报. 2022, 39(2): 431-445 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210828.001>

孔隙率对碳纤维/尼龙6复合材料湿热性能影响的数值模拟研究

Numerical study on the effect of void content on hygrothermal performances of carbon fiber reinforced polyamide 6 composites

复合材料学报. 2023, 40(2): 1154-1166 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220318.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20241008.002

荷载与湿热服役工况下碳纤维增强复合材料的摩擦学行为与磨损机制



分享本文

戚贵军^{1,3}, 齐肖⁴, 郭瑞^{1,3}, 田经纬^{*1,2,3}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 四川大学 高分子材料工程国家重点实验室, 四川 610065; 3. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 哈尔滨 150090; 4. 长三角碳纤维及复合材料技术创新中心, 常州 213126)

摘要: 海洋工程结构用金属材料易产生锈蚀、磨损与疲劳等不可逆损伤, 严重降低结构的服役寿命与安全储备。碳纤维增强环氧树脂 (CFRP) 复合材料具有较高的比强度/模量, 尤其在高载、冲刷、高温、高湿等湿热服役工况下具有优异耐摩擦与抗磨损性能, 作为工程材料有望大幅度提高海洋工程结构服役寿命。本文中, 研究了 CFRP 力学性能及在不同施加荷载、滑动速率、服役温度及水润滑等湿热服役工况下摩擦行为与磨损机制。研究发现, 基于真空灌注工艺, CFRP 板破坏断口显示纤维被树脂紧紧包裹, 并没有出现纤维团聚及纤维布分层现象。CFRP 摩擦磨损性能对荷载最敏感, 由于切向位移使摩擦副界面产生较大剪切应力; 服役温度第二; 滑动速率第三; 水润滑影响最小, 归因于水分子增加了对磨面距离, 缓解了磨损程度。与 500 g 相比, 负载 2 000 g 试样磨损速率和划痕宽度分别增加了 155.9% 和 111.0%, 归因于高负载工况使纤维/树脂界面发生脱粘损伤, 并引发严重分层磨损; 与室温相比, 100℃ 和 120℃ 服役温度下 CFRP 磨损速率分别增加了 72.5% 和 109.2%, 归因于高温服役工况使环氧树脂从玻璃态变为高弹态, 引发过度塑性变形, 最终使 CFRP 发生明显疲劳磨损。此外, 滑动速率和水润滑工况对 CFRP 摩擦系数影响不明显 (小于 20%), 尤其 60℃ 水润滑下其摩擦系数仅波动了 13.4%, 这是由于水分子的润滑功能和散热作用减少了摩擦程度, 仅发生轻微的磨粒磨损; 120 mm/s 速率下 CFRP 磨损速率较 60 mm/s 增加了 77.9%, 归因于较大速率差使 CFRP 表面和亚表面变形不一致, 导致粘着磨损发生。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 湿热服役工况; 力学性能; 摩擦行为; 磨损机制**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)08-4604-12

Study on friction behaviors and wear mechanisms of carbon fiber reinforced composites under load and hygrothermal service conditions

XIAN Guijun^{1,3}, QI Xiao⁴, GUO Rui^{1,3}, TIAN Jingwei^{*1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Sichuan University, Sichuan 610065, China; 3. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control, Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. Yangtze River Delta Carbon Fiber and Composite Material Innovation Center, Changzhou 213126, China)

Abstract: Metal materials used in marine engineering structures are prone to irreversible damage such as corrosion, wear and fatigue, which seriously reduces the service life and safety reserve of structures. Carbon fiber reinforced epoxy resin (CFRP) composites have a high specific strength/modulus, especially in the high load, washing, high temperature, high humidity and other hygrothermal service conditions have excellent friction and wear

收稿日期: 2024-08-20; 修回日期: 2024-09-08; 录用日期: 2024-09-25; 网络首发时间: 2024-10-08 12:29:12

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241008.002>

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3706501); 江苏省自然科学基金 (BK20240350); 高分子材料工程国家重点实验室 (sklpme2024-1-09) National Key Research and Development Program of China (2022YFB3706501); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20240350); State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering (sklpme2024-1-09)

通信作者: 田经纬, 博士, 讲师, 研究方向为土木工程纤维增强树脂复合材料与结构 E-mail: HITtianjingwei@163.com

引用格式: 戚贵军, 齐肖, 郭瑞, 等. 荷载与湿热服役工况下碳纤维增强复合材料的摩擦学行为与磨损机制 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(8): 4604-4615. XIAN Guijun, QI Xiao, GUO Rui, et al. Study on friction behaviors and wear mechanisms of carbon fiber reinforced composites under load and hygrothermal service conditions[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(8): 4604-4615(in Chinese).

resistance, as engineering materials is expected to greatly improve the service life of the marine engineering structure. In this paper, the basic mechanical properties of CFRP as well as the friction behavior and wear mechanism under different applied loads, sliding rates, service temperatures and water lubrication were studied. It was found that based on the vacuum perfusion process, the failure fracture of CFRP plates showed that the fibers were tightly wrapped by resin, and there was no fiber agglomeration and fiber lamination. The friction and wear properties of CFRP were most sensitive to the load, because the tangential displacement caused large shear stress at the interface between the specimen and the grinding ball; Service temperature was second; Sliding rate was third. The influence of water lubrication was minimal, which because the water molecules increased the distance and eased the wear degrees. Compared with 500 g, the wear rate and scratch width of samples loaded with 2 000 g increased by 155.9% and 111.0%, respectively, which was attributed to the irreversible debonding damage at the fiber/resin interface under high load conditions, leading to severe delamination wear. Compared with room temperature, the wear rate of CFRP at 100℃ and 120℃ increased by 72.5% and 109.2% respectively, which was attributed to the fact that the elevated temperature condition caused the epoxy resin matrix to change from a glassy state to a high elastic state, resulting in excessive plastic deformation of the resin, and finally obvious fatigue wear of CFRP. In addition, the effects of sliding rate and water lubrication on the friction coefficient of CFRP were not obvious (less than 20%), especially under 60℃ water lubrication, the friction coefficient fluctuated only 13.4%. This was because the lubrication function and heat dissipation of water molecules reduced the friction degree, and only slight abrasive wear occurred. The wear rate of CFRP at 120 mm/s increased by 77.9% compared with 60 mm/s, which was attributed to the inconsistency of surface and subsurface deformation of CFRP due to the large speed difference, resulting in adhesive wear.

Keywords: carbon fiber reinforced composites; hygrothermal service conditions; mechanical performance; friction behavior; wear mechanism

海洋工程建设和运营维护是海洋强国的基础,但在海洋强腐蚀环境下,以传统钢筋混凝土和钢结构为主的基础工程设施面临突出的腐蚀与耐久性问题^[1]。尤其在高载、冲刷、高温、高湿、等湿热服役工况及外界冲击荷载作用下,海洋工程结构用金属材料易产生锈蚀、磨损与疲劳等损伤,严重威胁构件或结构的服役寿命与安全储备^[2-3]。因此,亟需研发可在高载、往复冲刷、高温、高湿下安全服役的长寿命与高耐久材料。

纤维增强聚合物(Fiber reinforced polymer, FRP)已经成为一种重要的工程材料^[4]。FRP复合材料由纤维、树脂基体与纤维-树脂界面组成^[5-6]。其中,碳纤维增强聚合物(环氧树脂)(Carbon fiber reinforced polymer (Epoxy resin), CFRP)复合材料具有轻质、高强、耐腐蚀等优点^[7-8],自20世纪末已逐步应用于桥梁工程结构中。例如,1996年在日本筑波建成了世界上第一座CFRP复合材料索体的人行斜拉桥,极大提高了桥梁的安全性与可靠性。因此,CFRP复合材料在海洋工程结构应用具有重要研究意义。

然而,CFRP服役过程中碳纤维与环氧树脂基体发生不同步变形^[7],导致纤维/树脂界面和树脂基体产生缺陷,出现多种损伤(如纤维断裂、纤

维/树脂界面脱粘、树脂基体开裂等)^[9-10]。此外,与碳纤维相比,环氧树脂基体质脆、易开裂,且抗冲击和耐候性能差^[11],导致纤维发生断裂前界面已脱粘或基体已开裂^[12]。因此,CFRP的服役寿命由碳纤维/环氧树脂界面和环氧树脂基体共同影响。

碳纤维/环氧树脂界面是连接碳纤维与环氧树脂基体的“桥梁”,然而当CFRP在摩擦磨损过程中碳纤维/环氧树脂界面传递应力时沿着纤维方向易出现微裂纹损伤等缺陷^[7],将导致外荷载无法在纤维、树脂基体间进行均匀地传递,极大影响CFRP应用过程中的服役性能与服役寿命^[13]。此外,环氧树脂基体内部的微裂纹通常是CFRP力学性能下降的起始点,尤其在外部荷载与服役环境共同作用下,树脂基体内部微裂纹开始萌生、扩展并逐步发展成宏观裂缝^[14],导致CFRP出现层间破坏损伤,最终演化为整体失效^[15]。进一步,随着实际服役工况的不断恶化,尤其是深海领域海水的持续冲刷、固体物质不断磨损与温湿交替荷载等作用^[16],极易对纤维/树脂界面与树脂基体造成不可逆的损伤,最终导致CFRP摩擦过程中发生微观形貌与结构变化,并伴随着不同的磨损机制^[17]。因此,亟需厘清不同服役工况下CFRP

复合材料的摩擦行为与磨损机制。

在不同荷载与湿热服役工况下摩擦磨损过程中, CFRP 复合材料将发生蠕变→屈服→扭曲→变形等一系列变化, 最终宏观上表现为磨屑的脱离与去除^[14, 18]。这种在宏观上材料表面磨屑的去除机制构成了极其复杂的热力学过程, 与纤维/树脂界面粘结、树脂基体物化性能及其服役环境紧密关联^[19-20]。尤其实际工况中的施加荷载、滑动速率、服役温度及水润滑对 CFRP 复合材料的磨损寿命具有重要的影响^[21], 这是由于不同服役工况决定着钢球和 CFRP 在摩擦过程中是否可以生成润滑转移膜, 最终对复合材料的摩擦行为和磨损机制具有关键影响作用^[22-23]。此外, 为了对润滑转移膜给出半定量解释, 引入线粗糙度 (Line roughness, LR) 的概念, 即沿着划痕方向每一点粗糙度的平均值, 用于表征润滑转移膜沿着磨损轨迹的微观形态, 便于直观地理解 CFRP 复合材料的摩擦磨损性能^[17]。因此, 研究 CFRP 复合材料在不同施加荷载、滑动速率、服役温度及水润滑等湿热工况下的摩擦行为与磨损机制具有重要的科学与工程价值。

综上所述, 为了明确海洋工程用 CFRP 复合材料的基本力学性能及在荷载与湿热服役工况下摩擦行为与磨损机制, 同时厘清碳纤维和环氧树脂在摩擦过程中的重要作用, 本文研究了基于真空灌注制备工艺的 CFRP 复合材料拉伸、弯曲、短梁剪切和热力学性能及在不同施加荷载 (500、1 000、1 500、2 000 g), 滑动速率 (60、80、100、120 mm/s), 服役温度 (室温 (RT)、60、80、100、120℃) 及水润滑 (RT、60、80、95℃) 湿热工况下的摩擦磨损性能, 结合微观表征手段, 揭示其抗磨损机制, 同时对每种工况下 CFRP 摩擦磨损性能影响因素进行了敏感性分析与对比, 旨在为 CFRP 的实际应用奠定理论基础。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

本文中采用 48 K 大丝束碳纤维, 采购于中国石化上海石油化工股份有限公司; 基体选用双酚 A 型环氧树脂 Ts-A 及胺类固化剂 Ts-B 和 4-甲基环己烷-1,3-二胺 (HTDA) 配合使用, 3 种组分的质量比为 100 : 16.3 : 10.9。环氧树脂 Ts 体系由山东大工复合材料有限公司生产, 其黏度和密度分别为 2 Pa·s 和 1 200 kg/m³。

1.2 试样制备

碳纤维增强环氧树脂基复合材料采用真空灌注工艺制备, 如图 1 所示。首先, 在玻璃板上依次放置聚四氟乙烯片和脱模布, 然后布置相同方向的六层碳纤维布堆叠在脱模布上, 并在最上层纤维布放置脱膜布和导流网; 然后, 将上述材料密封在真空薄膜中, 采用均质机 (ZYMC350 VS, 深圳中意科技有限公司) 以 5 000 r/min 的转速将环氧树脂 (Ts-A 组) 和两种固化剂 (Ts-B 和 HTDA) 搅拌 5 min, 采用真空泵将混合好的环氧树脂体系注入到碳纤维布中; 最后, 将 CFRP 复合材料室温下固化 48 h 后拆模, 随后在 60℃ 的烘箱 (KW-GZ-72, 广东科文试验设备有限公司) 中固化 24 h, 得到碳纤维增强环氧树脂基复合材料板。

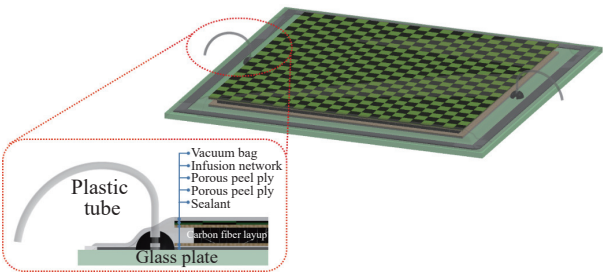
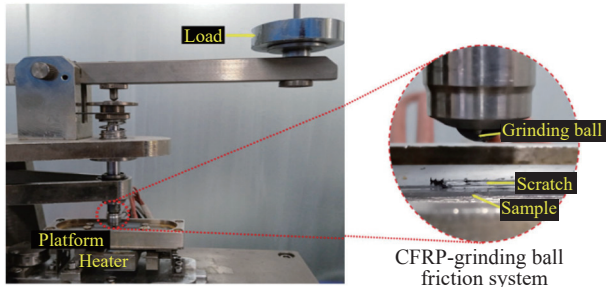


图 1 真空辅助树脂注射成型工艺示意图

Fig. 1 Vacuum assisted resin injection molding process diagram

1.3 实验方法

采用往复式摩擦磨损试验机 (HRTA02, 中国济南) 对 CFRP 进行摩擦学性能测试。CFRP 板裁剪为 36 mm×10 mm×2 mm, 并采用直径为 6.35 mm 的 Q235 钢球作为摩擦配副, 摩擦系数 (Coefficient of frictions, COFs) 在摩擦过程中可实时获得, 具体摩擦副如图 2 所示。磨损速率 (Wear rate, W_s) 通过摩擦前后材料的体积损失量计算得到, 具体计算如下式所示:



CFRP—Carbon fiber reinforced epoxy resin

图 2 往复式摩擦磨损试验机照片

Fig. 2 Picture of reciprocating friction and wear tester

$$W_s = \frac{\Delta V}{lF}$$

(1)

式中： ΔV 为 CFRP 表面磨损前后体积变化量 (mm^3)； l 为往复摩擦磨损总长度 (m)； F 为法向施加的荷载 (N)，每次试验设定往复周期为 10 000 次。

1.4 力学性能测试

根据 ASTM D3039/D3039M-00^[24]，采用万能试验机 (HY-10080，上海衡翼精密仪器有限公司) 将裁剪好的试样进行拉伸性能测试，拉伸速度为 2 mm/min，并采用引伸计 (LAX 071E，力试 (上海) 科学仪器有限公司) 测量试样的形变量，每组采用 5 个平行试样进行测量。

根据 ASTM D7264/D7264M-07^[25]，弯曲的加载速率为 5 mm/min，同时通过 5 个平行试样获得试样弯曲性能及其标准差。

根据 ASTM D2344/D2344M-22^[26]，剪切加载速率设置为 1 mm/min，同样采用 5 个平行试样获得试样短梁剪切强度及其标准差。

1.5 热力学性能测试

根据 ASTM D 7028-07^[27] 标准，制备 40 mm×7 mm×3.2 mm 尺寸的试样，采用动态热力学测试仪 (Q800，美国 TA 公司) 测试。测试模式为单悬臂，测试温度从 25℃ 至 150℃，升温速率、频率和设置振幅分别为 5℃/min、1 Hz 和 20 μm。获得材料玻璃化转变温度 (Glass transition temperature, T_g) 和储能模量。

1.6 微观形貌测试

(1) 扫描电子显微镜分析

将力学测试和摩擦磨损测试后的 CFRP 试样表面用导电胶粘贴到铝片上，随后使用 E5200 自动喷金仪 (Cambridge，英国) 对样品表面进行喷金处理。通过扫描电子显微镜 (SEM，VEGA3 TESCAN) 对试样进行表面形貌分析，采用二次电

子成像模式，电压为 30 kV。

(2) 三维超景深显微镜分析

为了研究不同服役工况对 CFRP 摩擦行为和磨损机制的影响，采用三维超景深显微镜 (OLYMPUS DSX500) 分析试样划痕区域及其对应研磨球形貌。在连续扫描模式下，对划痕中间约 8 mm 区域进行定量测量，同时划痕长度和磨损宽度 (Wear scar width, WSW) 采取 10 组数据获得平均值，用于计算磨损速率。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维增强复合材料力学性能

荷载与湿热服役工况下碳纤维增强复合材料耐摩擦与抗磨损性能的演变规律与其基本力学性能紧密相关^[28]，尤其试样在摩擦过程中与对磨面间由于较大速度差和负载使研磨球将对 CFRP 表面产生不断地撕裂与冲击作用，因此研究 CFRP 的拉伸性能、弯曲性能及纤维/树脂界面粘结强度是十分必要的。

图 3 显示了碳纤维增强复合材料及其环氧树脂基体的力学性能。此外，值得强调的是，48 K 大丝束碳纤维单丝的拉伸强度、拉伸模量及其断裂伸长率分别为 3.75 GPa、210.20 GPa 和 0.87%^[29]，在 CFRP 内部承担力学骨架支撑作用；同时，基于真空灌注工艺制备的 CFRP 板中纤维体积分数约为 50vol%，密度约为 1.5 g/cm³。如图 3(a) 所示，环氧树脂基体的拉伸强度、拉伸模量和断裂伸长率分别为 63.91 MPa、3.66 GPa 和 3.78%，其体积的 50% 被碳纤维替换后，CFRP 的拉伸强度和拉伸模量分别提高了 1 981.8% 和 2 722.9%，可见碳纤维较高的比强度和比模量得到了充分的发挥；同时与环氧树脂基体相比，CFRP 的弯曲强度和弯曲模量分别增加了 961.7% 和 2 366.6%(图 3(b))，这表明碳纤维增强树脂基体具有显著的抗弯折性

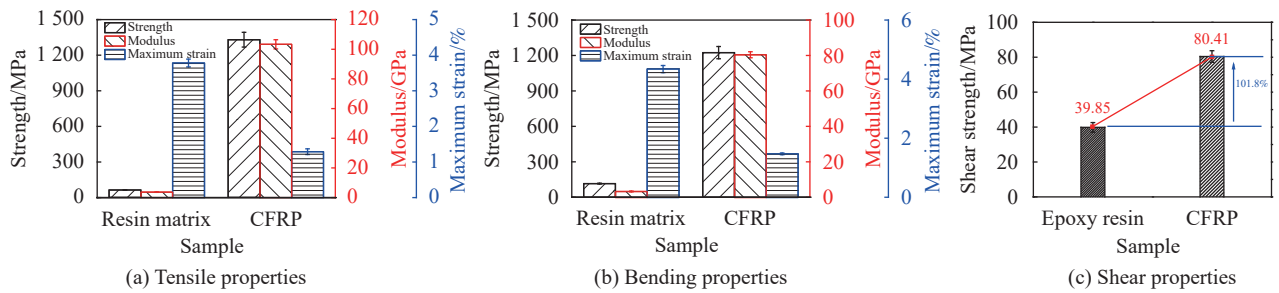


图 3 环氧树脂和碳纤维增强复合材料的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of epoxy resin and carbon fiber reinforced composites

能。然而，CFRP 的拉伸和弯曲断裂伸长率较树脂基体分别降低了 65.9% 和 66.1%，因此 CFRP 在拉伸和弯曲过程中碳纤维与树脂基体的受力协调决定着其服役寿命，可推断 CFRP 摩擦过程中研磨球的撕扯与磨损由其内部碳纤维主要承担，因此需要重点关注 CFRP 耐摩擦抗磨损过程中碳纤维的服役状态与微观形貌。

进一步，为了表征碳纤维增强复合材料内部纤维/树脂界面粘结性能，选取环氧树脂和 CFRP 复合材料短梁剪切破坏断口进行微观形貌分析。与树脂基体相比，CFRP 的短梁剪切强度增加了 101.8% (图 3(c))，这表明制备过程中真空灌注工艺可以将树脂溶液较均匀地分布在碳纤维布周围，确保纤维与树脂界面粘结良好。如图 4(a) 所示，环氧树脂断口光滑，并呈现“鱼鳞”形貌，内部没有出现明显孔洞等缺陷，这表明环氧树脂 Ts 体系固化过程中三维交联程度较好。此外，值得强调的是，CFRP 断口形貌显示纤维被树脂紧紧包裹，局部并没有出现纤维团聚及纤维布分层现象 (图 4(b))，这可用于证明基于真空灌注工艺制备的 CFRP 内部纤维-树脂界面粘结良好，为后续荷载与湿热服役工况下 CFRP 的耐摩擦抗磨损服役性能奠定力学基础。

2.2 碳纤维增强复合材料热力学性能

为了表明碳纤维增强复合材料在摩擦过程中的磨损机制与服役特征，选取了 4 种服役工况下磨损最为严重试样进行了热力学性能测试，即 2 000 g 荷载、120 mm/s、120℃ 和 95℃ 水润滑磨损工况。其中，值得注意的是，进行动态热机械性能测试试样中心位置均有明显的划痕磨损，这便于进一步揭示磨损后试样的热力学性能演变机制。

表 1 总结了 CFRP 板在不同磨损服役工况下热力学性能演化规律。其中，值得强调的是，CFRP 的玻璃化转变温度 (T_g) 与其内部树脂基体的分子交联密度相关， T_g 值越大表明固化效果越好；储能模量则是表明材料储存弹性变形的能力，是指

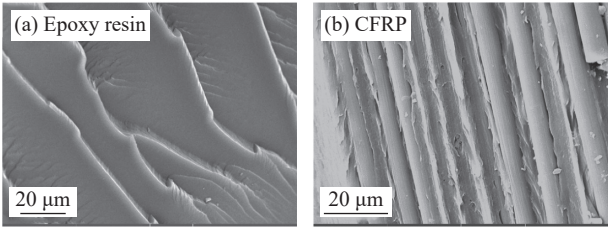


图 4 短梁剪切断口形貌

Fig. 4 Shear fracture morphologies of short beams

粘弹性材料在交变作用下储存能量的量度，表征着材料的弹性性质。未在磨损工况服役前，CFRP 的 T_g 为 137.4℃，储能模量为 36 358 MPa。与服役前相比，磨损 CFRP 的 T_g 和储能模量值一般呈现下降规律，最大下降百分比分别为 4.0% 和 10.8%，归因于往复摩擦磨损使 CFRP 内部树脂基体开裂、纤维-树脂界面脱粘，这将在后续 CFRP 的摩擦行为和磨损机制具体进行讨论。然而，在 120℃ 服役工况下，磨损后 CFRP 的 T_g 和储能模量较服役前反而呈现增加趋势，这可能是由于高温磨损工况使树脂基体产生了积极的后固化效应，抵消了磨损对 CFRP 产生的部分不利影响。这一点可从磨损前和 120℃ 磨损后 CFRP 的损耗因子得到验证，与磨损前相比，高温服役工况下 CFRP 的损耗因子仅减少了 8.9%，而其余工况下减少的较显著，尤其 2 000 g 服役荷载下减少了 28.6%。此外，在不同服役工况下 CFRP 的损耗模量均出现了下降规律，最大下降百分比为 37.6% (2 000 g 荷载工况)，表明 CFRP 产生形变时内部能量转变为热能的效率逐渐降低，导致高荷载磨损工况下 CFRP 内部的纤维和树脂不能发挥良好的协同效应。

2.3 碳纤维增强复合材料的摩擦学行为

2.3.1 施加荷载的影响

一般来说，摩擦力与摩擦表面间法向施加荷载成正比，并且与接触面积无关。然而，针对聚合物及其复合材料，当压力较高时，摩擦力与法向荷载不成正相关，而与接触面积有关 [30-31]。因此，为了研究不同荷载下 CFRP 的摩擦行为、磨

表 1 不同磨损服役工况下 CFRP 的热力学性能

Table 1 Thermodynamic properties of CFRP under different wear service conditions

| Service condition | $T_g/^\circ\text{C}$ | Storage modulus/MPa | Loss modulus/MPa | Loss factor |
|-----------------------|----------------------|---------------------|------------------|-------------|
| Pre-service | 137.40±1.68 | 36 358 | 11 434 | 0.3145 |
| 2 000 g load | 131.93±1.24 | 32 431 | 7 135 | 0.2245 |
| 120 mm/s rate | 134.51±2.46 | 34 632 | 9 129 | 0.2636 |
| 120℃ temperature | 138.14±2.45 | 37 542 | 10 752 | 0.2864 |
| 95℃ water lubrication | 136.85±1.24 | 35 214 | 9 665 | 0.2745 |

Note: T_g —Glass transition temperature.

损规律和微观形貌，图 5 总结了 CFRP 在不同施加荷载下摩擦系数、磨损速率及其对应的平均线粗糙度值。随着施加荷载的增加，CFRP 的 COFs 波动范围呈现先增加后减少趋势。这是由于荷载对 COFs 的影响是通过改变实际接触面积来实现。对于较低荷载 (500 g)，CFRP 表面与研磨球的接触处于弹性或粘弹性状态，其中实际接触面积与荷载成正比，因此试样/研磨球界面的接触为直接点接触，导致试样的 COFs 最高。对于较高荷载 (2 000 g)，CFRP 和研磨球的接触状态从弹性或粘弹性变为塑性或粘塑性。此时，过大的塑性变形

使界面接触面积增加，导致 CFRP 的 COFs 不再随荷载增加出现显著变化。然而，较高荷载将导致 CFRP 表面磨损程度和摩擦温度增加，因而在磨损轨迹区域将产生大量的磨屑。例如，与 500 g 荷载相比，负载 2 000 g 的 CFRP 试样 W_s 和 WSW 分别增加了 155.9% 和 111.0%，这表明 CFRP 表面磨损严重，同时高荷载工况对纤维复合材料摩擦磨损性能的影响较显著。这是由于在往复且高剪切应力作用下，由于纤维与树脂基体抵抗变形的能力存在差异，使纤维/树脂界面发生脱粘损伤，降低了 CFRP 抵抗外界荷载的强度与刚度^[32]。

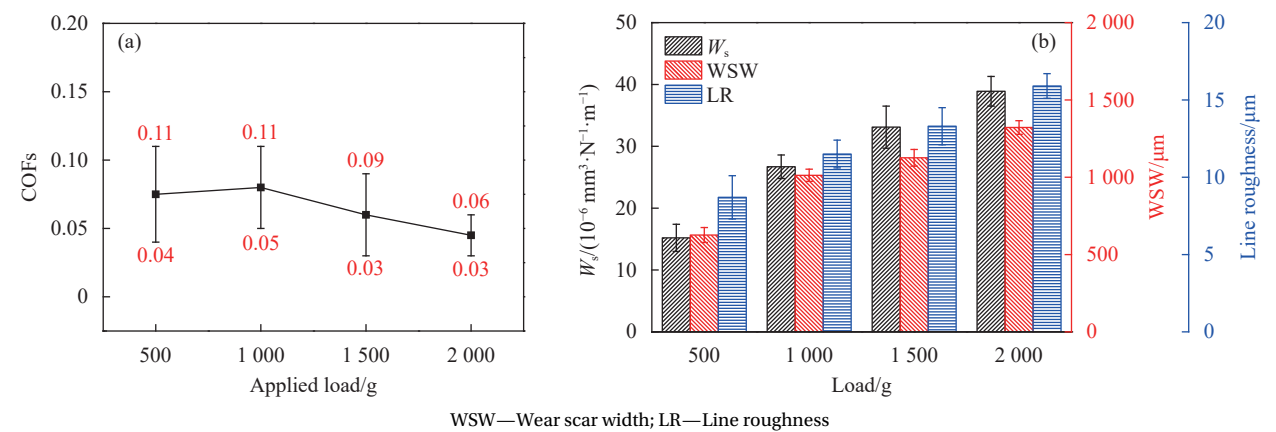


图 5 施加荷载对 CFRP 摩擦系数 (COFs) 和磨损速率 (W_s) 的影响

Fig. 5 Effects of applied loads on coefficient of frictions (COFs) and wear rate (W_s) of CFRP

然而，值得注意的是，即使在 2 000 g 荷载作用下，CFRP 的 LR 值也仅为 15.9 μm ，这表明摩擦过程中磨痕表面的磨损量较均匀，没有发生大面积脱落现象。这是由于碳纤维在摩擦过程中形成的非平整表面易变成摩擦接触点，使树脂磨屑粘着一起，避免了摩擦接触界面发生进一步划伤。

图 6 为在不同荷载作用下 CFRP 表面磨损轨迹形貌，用以解释服役过程中的摩擦行为和磨损程度。如图 6(a) (500 g) 和图 6(b) (1 000 g) 低荷载作用，CFRP 磨损轨迹表面没有出现明显的划伤。这是由于 CFRP 在摩擦过程中其表面的树脂被优先磨损并在持续荷载压力下形成一层润滑转移膜，同时碳纤维中的石墨由于片层间易滑动，为 CFRP 提供了润滑效果，因此低荷载作用下 CFRP 只发生了轻微粘着磨损和磨粒磨损。

作为比较，随着施加荷载增加到 1 500 g (图 6(c)) 和 2 000 g (图 6(d))，CFRP 划痕区域的润滑转移膜表面逐渐出现了与滑动方向垂直的微裂纹，尤其在 2 000 g 荷载作用下较明显。这是由于增加的荷

载使试样/研磨球界面的接触状态从弹性或粘弹性变为塑性或粘塑性，最终导致磨损轨道表面的树

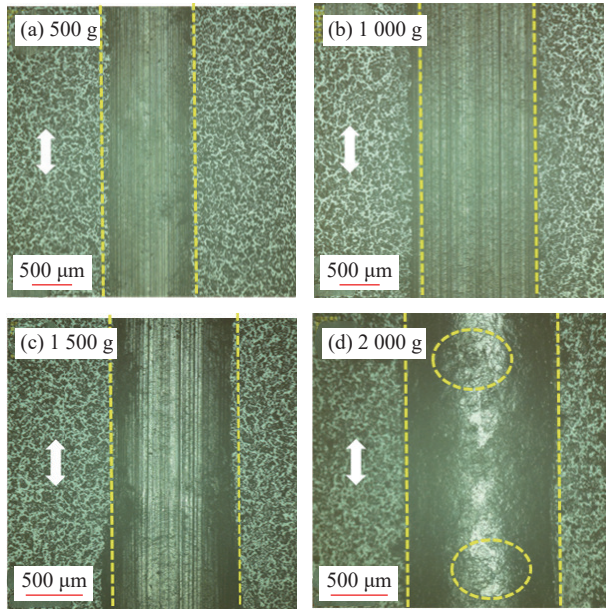


图 6 不同荷载作用下 CFRP 表面划痕

Fig. 6 CFRP surface scratches under different loads

脂基体发生过度塑性变形，表明 CFRP/研磨球界面发生了较严重的摩擦与磨损。这是由于高荷载作用使由树脂磨屑组成的润滑转移膜无法继续承担高剪切应力而发生严重损伤，裸露的碳纤维由于高表面硬度发生突然断裂，从而增加了对研磨球的机械阻碍和摩擦阻力。

2.3.2 滑动速率的影响

研磨球滑动速率对服役过程中 CFRP 的摩擦行为和磨损速率的影响不容忽视，尤其高滑动速率易引起树脂基体发生过度塑性变形甚至快速转移出磨损区域的现象^[33]。

如图 7(a) 所示，随着滑动速率的增加，CFRP 的 COFs 波动不明显，这表明滑动过程中摩擦副间摩擦

力相对稳定。然而，与较低滑动速率 (60 mm/s) 相比，高滑动速率 (120 mm/s) 下 CFRP 的 W_s 和 WSW 分别增加了 78.2% 和 39.6% (图 7(b))。这表明 CFRP 与对磨面在低速和高速相对滑动工况下，即使摩擦系数差异较小，但磨损速率却增加明显。这是由于试样/研磨球界面较大的速度差使试样表面和亚表面变形不协调，增加了 CFRP 表面材料损失量，导致 CFRP 内部的碳纤维小碎片与研磨球发生了剧烈摩擦，增加了磨损量。此外，值得注意的是，在 100 mm/s 滑动速率下，CFRP 表面的 LR 值波动较小 (图 7(b))，这是由于树脂磨屑对变薄→开裂→断裂的碳纤维进行了封装，避免其尖端暴露在划痕表面^[23]，缓解了 CFRP/研磨球界面摩擦程度。

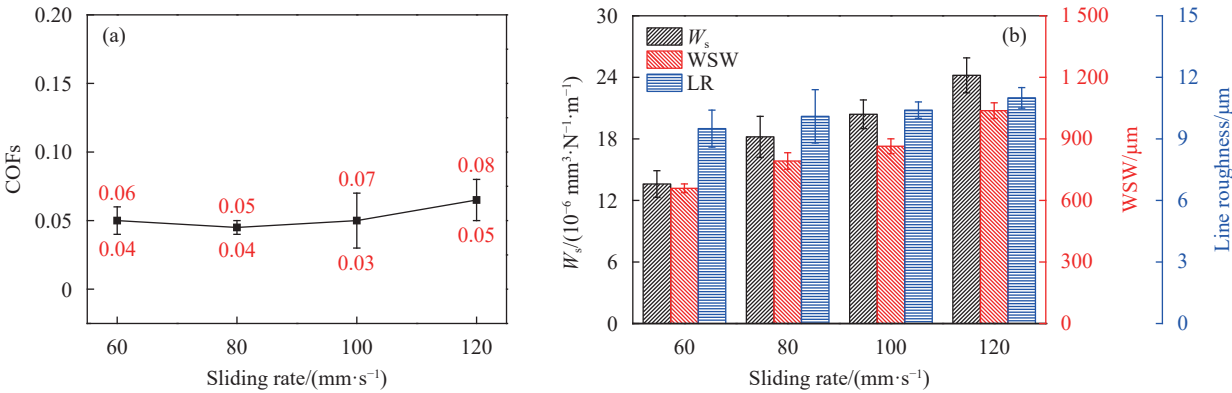


图 7 滑动速率对 CFRP 的摩擦系数 (a) 和磨损速率 (b) 的影响

Fig. 7 Effects of sliding rate on COFs (a) and wear rate (b) of CFRP

图 8 为不同滑动速率工况下 CFRP 的表面磨损形貌。随着滑动速率的增加，图 8(a)~8(d) 显示 CFRP 划痕表面均出现了平行于滑动方向的磨损痕迹，尤其当滑动速率为 100 mm/s (图 8(c)) 和 120 mm/s (图 8(d)) 时，表面出现了磨损碎屑。这是由于高剪切速率增加了试样/研磨球界面区域的摩擦热，导致环氧树脂基体由于散热不及时逐渐变得软化，最终表现为粘着磨损和轻微的磨粒磨损。因此，较高的剪切滑动速率增加了 CFRP 的磨损体积，导致试样/研磨球界面发生剧烈的摩擦与磨损。这是由于在较高滑动速率下环氧树脂基体产生了过度塑性变形，导致碳纤维磨屑被连续挤压，使摩擦界面温度不断升高^[34]，最终使 CFRP 表面的润滑转移膜逐渐出现不连续现象。

2.3.3 服役温度的影响

环氧树脂基复合材料在摩擦过程中服役温度是影响聚合物及其复合材料摩擦学性能的重要指标。

尤其高温服役工况下摩擦副系统因往复摩擦而产生的摩擦热将被阻碍向环氧树脂亚表面进行有效传递，导致接触点区域温度较高，最终产生较大塑性变形。图 9 显示不同服役温度对 CFRP 摩擦行为和磨损速率的影响规律。随着服役温度的升高 (RT~120℃)，CFRP 的 COFs 呈现下降趋势，尤其在 120℃ 工况温度，与室温相比，其平均 COFs 下降了 37.5%。这是由于 120℃ 高温工况接近于 CFRP 的 T_g (136.8℃)，使树脂基体产生较大的塑性变形，缓解了研磨球与 CFRP 的摩擦阻力。然而，高温工况下过度的塑性变形将导致摩擦过程中磨损体积呈现显著增加。例如，与室温摩擦相比，120℃ 工况下 CFRP 的 W_s 和 WSW 分别增加了 109.2% 和 48.8%。这是由于较高的工况温度使高分子聚合物表面物理状态从玻璃态转变为高弹态或黏流态，使划痕区域形成了低黏度的黏性流体层，导致高温服役工况下 CFRP 摩擦系数很低，但磨损量却增加明显。这也可从逐渐增

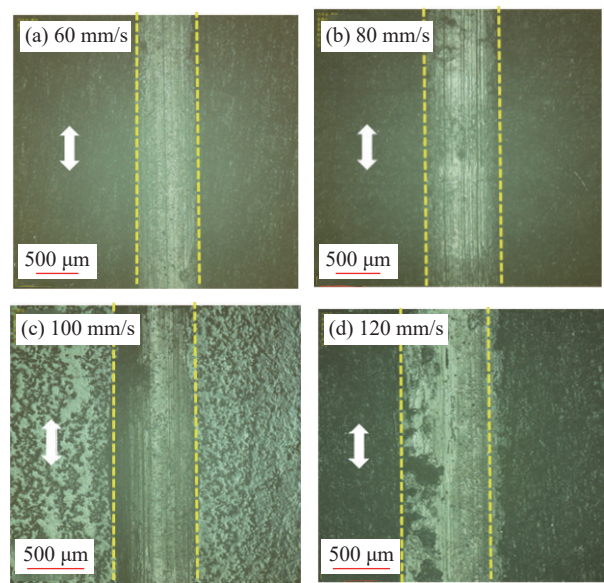
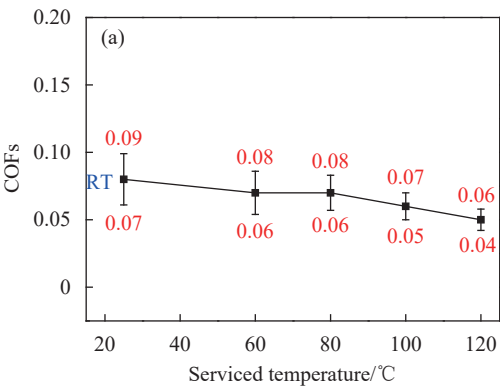


图 8 不同滑动速率作用下 CFRP 表面划痕

Fig. 8 CFRP surface scratches under different sliding rates



RT—Room temperature

图 9 服役温度对 CFRP 摩擦系数和磨损速率的影响

Fig. 9 Effects of serviced temperature on COFs and wear rate of CFRP

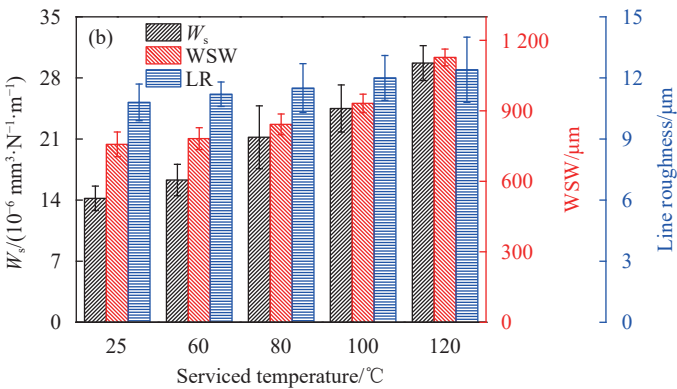
2.3.4 水润滑的影响

基于上述干态摩擦分析，选取不同温度水润滑工况下 CFRP 的湿态摩擦行为对比，验证其在湿热工况下摩擦磨损性能。值得强调的是，与干态摩擦相比，湿态摩擦下 CFRP 的摩擦行为和磨损状态受到固体润滑膜和液体水膜的耦合影响。与此同时，液态水膜的完整性和连续性也取决于摩擦过程中的服役温度，因此选择 4 种工况温度 (RT、60℃、80℃ 和 95℃) 进行试样的摩擦磨损性能试验。需要强调的是，为了防止水分子在 100℃ 沸腾并迅速蒸发，因此选用 95℃ 的水润滑工况用于摩擦磨损性能测试。

如 图 11 所示，随着工况温度的不断升高，

加的 LR 值得到验证。

图 10 为不同服役温度作用下 CFRP 表面划痕形貌。在较低服役温度 (RT、60℃ 和 80℃) 下，CFRP 表面磨损区域没有出现明显划痕损伤、纤维开裂与粉碎 (图 10(a)~10(c)) 现象。这是由于在摩擦过程中碳纤维具有优异的导热性，避免纤维/树脂界面因摩擦生热产生热量聚集，使环氧树脂基体仍可保持玻璃态，表面硬度并没有丧失。相反，随着服役温度增加到 100℃ (图 10(d)) 和 120℃ (图 10(e))，CFRP 表面出现较多磨损划痕，尤其当服役温度为 120℃，划痕区域出现了局部塑性变形和沟槽，从其对应的轮廓 (图 10(f)) 也可看出磨痕呈现明显变形形貌，树脂基体具有“波浪”特征。这可能是由于树脂基体当从玻璃态转变为高弹性态时，环氧树脂基体包覆的高模量碳纤维磨屑暴露在划痕表面，并与研磨球发生了直接接触摩擦。



CFRP 的平均 COFs 值逐渐增加，尤其 95℃ 的水润滑工况。这是由于 95℃ (接近水的沸点) 下水分子由液态变为气态，导致试样/研磨球界面水分子膜呈现不连续性。此外，与干态摩擦 (不同施加荷载、不同滑动速率和不同服役温度) 相比，CFRP 在不同温度水润滑摩擦工况下表现出较好的耐磨性能。例如，与 2 000 g 荷载 (图 5(b))、120 mm/s 滑动速率 (图 7(b)) 和 120℃ 干态摩擦 (图 9(b)) 相比，95℃ 水润滑工况下 CFRP 的 W_s 和 WSW (图 11(b)) 分别减少了 58.3% 和 41.6%、45.4% 和 31.5%、33.1% 和 25.5%。此外，不同温度的水润滑作用下 CFRP 的 LR 值差异较小。例如，与常温水润滑相比，95℃ 水润滑工况下 CFRP 的 LR 值仅增加了 16.5%。这

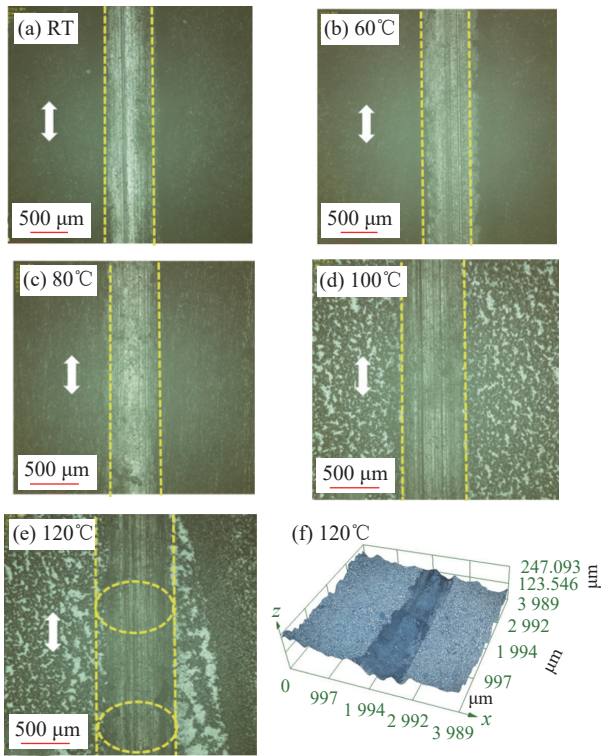


图 10 不同服役温度作用下 CFRP 表面划痕及其磨痕轮廓

Fig. 10 CFRP surface scratches and abrasion profiles under different serviced temperatures

是由于水分子膜在润滑的同时还可以抵抗研磨球引起的磨损划伤。例如，Zhang 等^[35]指出，当摩擦副暴露在海水中，海水起到润滑作用的同时可以增加材料与对磨面的摩擦距离，缓解了界面区域的磨损程度，使摩擦过程中磨损机制从严重的疲劳磨损变为轻微的磨粒磨损。

图 12 为不同温度水润滑作用下 CFRP 表面划痕形貌。如图 12(a)~12(d) 所示，与较低工况温度 (RT 和 60°C) 相比，高温 (80°C 和 95°C) 水润滑作用下 CFRP 表面沿着滑动方向出现明显的磨损痕

迹，这是由于 CFRP 内部的树脂磨屑转移膜被水分子快速蒸发张力破坏，导致 CFRP/研磨球摩擦副间的距离减小，产生直接接触摩擦。这归结为两个原因：一是升高的温度增加了环氧树脂分子链的移动并降低了 CFRP 表面硬度；另一个是升高的温度赋予水分子获得更多的动能，使水分子不断蒸发与沸腾，从而破坏了润滑水膜的连续性，导致 CFRP 与研磨钢球摩擦接触面积增加，将会破坏钢球表面致密的氧化膜，最终发生严重的腐蚀磨损。

2.4 碳纤维增强复合材料的磨损机制

为了综合比较不同服役工况对 CFRP 摩擦行为和磨损速率的影响机制，图 13 总结了在施加荷载 (2 000 g)、滑动速率 (120 mm/s)、服役温度 (120°C) 和高温 (95°C) 水润滑作用下，CFRP 表面磨损的微观形貌。如图 13(a)~13(d) 所示，分别为上述几种服役工况下 CFRP 划痕区域磨损最严重的微观形貌，并通过树脂基体磨损状态和纤维/树脂界面脱粘情况揭示 CFRP 耐磨损演化机制。

针对施加荷载影响 (图 13(a))，CFRP 磨损表面树脂基体已经产生了过度的塑性变形，并且纤维出现大量被拔出现象。这是由于 CFRP 表面受到高荷载作用导致摩擦阻力显著增加，使沿着滑动方向产生较大切向位移，破坏了纤维/树脂界面粘结。与此同时，高荷载工况作用使摩擦接触界面温度升高，导致 CFRP 表面凸起区域在摩擦热下产生过大塑性变形甚至断裂，最终使 CFRP 表面耕犁出的沟槽被重塑或切削，因而在 2 000 g 荷载工况下其产生了较大的 W_s 、WSW 和 LR 值 (图 5(b))，符合分层磨损机制^[36-37]。

针对滑动速率影响 (图 13(b))，CFRP 内部纤

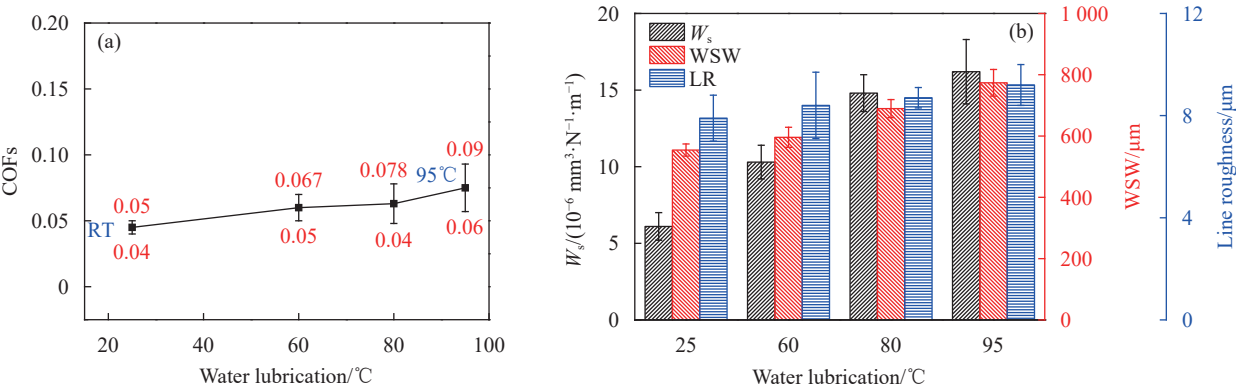


图 11 水润滑对 CFRP 摩擦系数 (a) 和磨损速率 (b) 的影响

Fig. 11 Effects of water lubrication on COFs (a) and wear rate (b) of CFRP

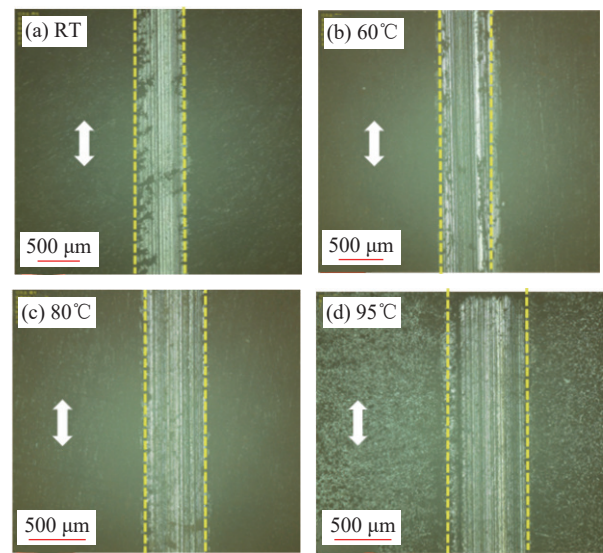


图 12 不同温度水润滑作用下 CFRP 表面划痕
Fig. 12 CFRP surface scratches under water lubrication at different temperatures

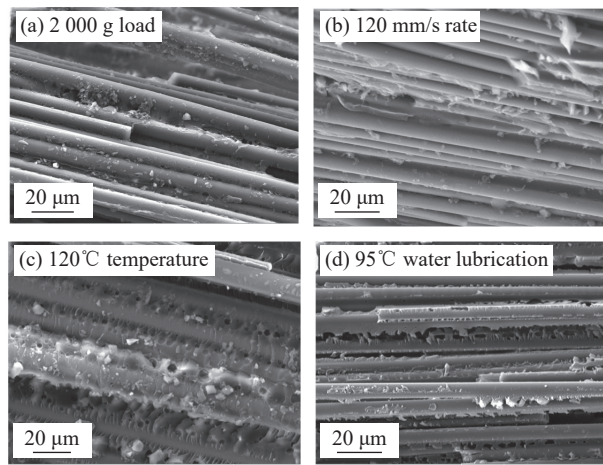


图 13 CFRP 在几种最恶劣工况服役条件下的磨损形貌比较
Fig. 13 Comparison of worn morphologies of CFRP under several most severe service conditions

维/树脂界面粘结良好并没有出现明显的脱粘现象。此外，树脂基体表面出现波纹、磨损碎屑呈现堆叠现象，导致 CFRP 表面产生过度塑性变形，而其亚表层弹性变形滞后，因而 CFRP 在高速滑动速率下 W_s 、WSW 和 LR 值变化较稳定 (图 7(b))，这与粘着磨损机制一致^[36,38]。

针对服役温度影响 (图 13(c))，CFRP 表面出现了与滑动方向垂直的微裂纹。这是由于较高服役温度降低了 CFRP 抵抗热变形的能力，导致其表面硬度降低。同时，在较高服役温度 (接近 T_g) 下，环氧树脂基体高分子链活性增加，导致磨损轨迹各区域变形不一致，使 CFRP 表面裂纹不断萌生

与发展，最终变化为撕裂和表面疲劳现象，满足疲劳磨损机制^[36,39]。

针对 95℃ 的水润滑影响，图 13(d) 显示了 CFRP 表面存在与滑动方向平行的磨损划痕，然而磨损划痕较浅，几乎不引起环氧树脂基体过度塑性变形，这可用于解释 95℃ 水润滑作用下 CFRP 具有最小 W_s 、WSW 和 LR 值的原因 (图 11(b))。同时，摩擦过程中研磨钢球将对 CFRP 表面产生耕犁→切削→开裂→破损等作用，因而出现了互相平行的“耕垄”滑移线，这符合磨粒磨损机制^[36,40]。

综上所述，研究影响 CFRP 摩擦行为和磨损速率的几个因素中，CFRP 对服役荷载最敏感，由于切向位移使试样和研磨球界面产生较大的剪切应力；服役温度第二；滑动速率第三；由于水分子膜的润滑作用和散热功能，高温 (95℃) 水润滑影响最后。

3 结论

(1) 基于真空灌注工艺制备的碳纤维增强环氧树脂 (CFRP) 内部纤维/树脂界面粘结良好，并没有出现纤维团聚及纤维布分层现象；CFRP 摩擦磨损性能对施加荷载最敏感，由于切向位移使试样和研磨球界面产生较大剪切应力；服役温度第二；滑动速率第三；水润滑影响最小；磨损服役后 CFRP 的热力学性能变化较小 (玻璃化转变温度 (T_g) 最大波动幅度小于 4%)。

(2) 与 500 g 相比，负载 2 000 g CFRP 的磨损速率 (W_s) 和磨损宽度 (WSW) 分别增加了 155.9% 和 111.0%，归因于沿着滑动方向产生较大切向位移，导致纤维/树脂界面发生脱粘损伤，降低了 CFRP 抵抗外界荷载的强度与刚度，磨损机制为分层磨损。

(3) 与室温相比，100℃ 和 120℃ 服役温度 CFRP 的磨损速率增加了 72.5% 和 109.2%，归因于高温工况导致树脂从玻璃态变为高弹态，使 CFRP 表面裂纹不断萌生与发展，最终变化为撕裂和表面疲劳现象，满足疲劳磨损机制。

(4) 滑动速率和水润滑对 CFRP 的摩擦系数影响不明显 (小于 20%)，尤其 60℃ 水润滑摩擦系数仅波动了 13.4%，归因于水分子润滑功能和散热作用缓解了 CFRP/研磨球界面摩擦状态，仅发生轻微的磨粒磨损；120 mm/s 速率下 CFRP 磨损速率较 60 mm/s 增加了 77.9%，归因于较大速率差使试样表面和亚表面变形不协调，触发粘着磨损机制。

参考文献:

- [1] TIAN J W, LI C G, XIAN G J. A layered superhydrophobic coating with excellent mechanical robustness and anti-corrosion performances[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 4281-4298.
- [2] TIAN Y, ZHANG G, YE H, et al. Corrosion of steel rebar in concrete induced by chloride ions under natural environments[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 369: 130504.
- [3] TIAN J, LI C, QI X, et al. Hygrothermal aging behavior and mechanism of multi-filler reinforced epoxy composites for steel structure coatings[J]. *European Polymer Journal*, 2023, 184: 111780.
- [4] 周亮洋, 汪昕, 梁训美, 等. 混杂纤维发热格栅增强砂浆/混凝土板力学性能[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(6): 682-694.
ZHOU Jingyang, WANG Xin, LIANG Xunmei, et al. Mechanical properties of hybrid fiber healing textile reinforced mortar/concrete slab[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2023, 45(6): 682-694 (in Chinese).
- [5] SUN Z, LUO Y, CHEN C, et al. Mechanical enhancement of carbon fiber-reinforced polymers: From interfacial regulating strategies to advanced processing technologies[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 142: 101221.
- [6] QI X, TIAN J, XIAN G. Hydrothermal ageing of carbon fiber reinforced polymer composites applied for construction: A review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 1017-1045.
- [7] QI X, TIAN J, GUO R, et al. Hydrothermal aging of carbon fiber reinforced polymer rods intended for cable applications in civil engineering[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 5151-5166.
- [8] XIA Z, JIANG T, YU T. Innovating arch structures with fiber-reinforced polymer composites: A review[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2023, 26(13): 2341-2358.
- [9] LOBANOV D, SLOVNIKOV S, LUNEGOVA E. Influence of internal technological defects on the mechanical properties of structural CFRP[J]. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2023, 17(65): 74-87.
- [10] 李昊, 宋世聪, 张炫烽, 等. 树脂基防隔热一体化热防护复合材料高温性能演变分析[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(2): 180-187.
LI Hao, SONG Shicong, ZHANG Xuanfeng, et al. Analysis of the evolution of high temperature performance of resin-based anti-insulation integrated thermal protection composites[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2024, 46(2): 180-187 (in Chinese).
- [11] 王安妮, 刘晓刚, 岳清瑞. 碳纤维复合材料拉索的锚固体系及服役性能研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(9): 45-54.
WANG Anni, LIU Xiaogang, YUE Qingrui. Research progress of carbon fiber reinforced polymer composite cable: Anchorage system and service performance[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(9): 45-54 (in Chinese).
- [12] 刘文迪, 张芝芳, 王景东. 纤维增强复合材料结构的弯曲疲劳性能研究现状[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(5): 478-489.
LIU Wendi, ZHANG Zhifang, WANG Jingdong. Review of bending fatigue behavior of fiber reinforced polymer composites[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2023, 45(5): 478-489 (in Chinese).
- [13] SAHU R, PONNUSAMI S A, WEIMER C, et al. Interface engineering of carbon fiber composites using CNT: A review[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(1): 9-42.
- [14] TIAN J, TANG Q, LI C, et al. Mechanical, bonding and tribological performances of epoxy-based nanocomposite coatings with multiple fillers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(23): 52303.
- [15] ZHUANG X, MA J, DAN Y, et al. Hydrothermal aging of carbon fiber reinforced epoxy composites with different interface structures[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 212-220: 110352.
- [16] DU Y, MA Y, SUN W, et al. Effect of hygrothermal aging on moisture diffusion and tensile behavior of CFRP composite laminates[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(3): 382-392.
- [17] TIAN J, QI X, LI C, et al. Friction behaviors and wear mechanisms of multi-filler reinforced epoxy composites under dry and wet conditions: Effects of loads, sliding speeds, temperatures, water lubrication[J]. *Tribology International*, 2023, 179: 108148.
- [18] TIAN J, LI C, XIAN G. Reciprocating friction and wear performances of nanometer sized-TiO₂ filled epoxy composites[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(4): 2061-2072.
- [19] 李烁. 基于碳纳米管和石墨烯的环氧树脂复合材料的摩擦学性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2020.
LI Shuo. Study on tribological properties of epoxy resin composites based on carbon nanotubes and graphene[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2020 (in Chinese).
- [20] YADAV R, SINGH M, SHEKHAWAT D, et al. The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 175: 107775-107787.
- [21] 于志强, 姜月. 颗粒填充环氧复合材料的摩擦学性能研究进

展 [J]. *材料工程*, 2016, 44(3): 114-121.

YU Zhiqiang, JIANG Yue. Research progress in tribological properties of particles filled epoxy resin composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(3): 114-121 (in Chinese).

[22] 张哲轩, 杨忠仪, 夏荣华, 等. Cr-C 类石墨复合涂层制备表征及其在硬质合金铣刀上的应用 [J]. *南京工业大学学报 (自然科学版)*, 2024, 46(1): 55-64.

ZHANG Zhexuan, YANG Zhongyi, XIA Ronghua, et al. Preparation and characterization of Cr-C type graphite composite coating and its application in cemented carbide milling cutters[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2024, 46(1): 55-64 (in Chinese).

[23] TIAN J, QI X, XIAN G. Effect of hygrothermal aging on the friction behavior and wear mechanism of the multi-filler reinforced epoxy composites for coated steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 140-151.

[24] ASTM International. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: ASTM D3039/D3039M-00[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2000.

[25] ASTM International. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials: ASTM D7264/D7264M-07[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2007.

[26] ASTM International. Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates: ASTM D2344/D2344M-22[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

[27] ASTM International. Standard test method for glass transition temperature (DMA T_g) of polymer matrix composites by dynamic mechanical analysis (DMA): ASTM D7028-07[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2007.

[28] GANGINENI P K, GUPTA K B G, PATNAIK S, et al. Recent advancements in interface engineering of carbon fiber reinforced polymer composites and their durability studies at different service temperatures[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(7): 4126-4164.

[29] 田经纬, 齐肖, 郭瑞, 等. 湿热老化对碳纤维增强复合材料力学和摩擦磨损性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(4): 1872-1884.

TIAN Jingwei, QI Xiao, GUO Rui, et al. Effect of hygrothermal aging on the mechanical and frictional wear properties of carbon fiber reinforced composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(4): 1872-1884(in Chinese).

[30] 杜岳峰. 石墨烯超润滑以及石墨烯复合材料摩擦学性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.

DU Yuefeng. Superlubricity of graphene and tribological properties of graphene composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021 (in Chinese).

[31] ZAGHLOUL M M Y, STEEL K, VEIDT M, et al. Wear behaviour of polymeric materials reinforced with man-made fibres: A comprehensive review about fibre volume fraction influence on wear performance[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2022, 41(5-6): 215-241.

[32] ASMAEL M, SAFAEI B, KALAF O, et al. Recent developments in tensile properties of friction welding of carbon fiber-reinforced composite: A review[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2022, 11(1): 1408-1436.

[33] MAN Z, WANG H, HE Q, et al. Friction and wear behaviour of additively manufactured continuous carbon fibre reinforced PA6 composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 226: 109332.

[34] SUDHAGAR S, KUMAR S S. Determination of wear, friction behavior and characterization of carbon fiber reinforced epoxy composites for transport applications[J]. *Materials Research*, 2020, 23(6): e20200268.

[35] ZHANG X, ZHANG M, SHAO M, et al. Comparative study on tribological behavior of Fe₃Al alloy against different counterparts in seawater[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30: 8030-8039.

[36] DASARI A, YU Z Z, MAI Y W. Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2009, 63(2): 31-80.

[37] 田经纬, 白艳博, 李承高, 等. 尼龙 6 填料对碳纤维-环氧树脂复合材料力学与摩擦磨损性能的提升机制 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(9): 5011-5025.

TIAN Jingwei, BAI Yanbo, LI Chenggao, et al. Enhancement mechanism of nylon 6 filler on the mechanical and frictional wear properties of carbon fiber-epoxy resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(9): 5011-5025 (in Chinese).

[38] ABDULLA F A, HAMID K L, OGAILI A A F, et al. Experimental study of wear rate behavior for composite materials under hygrothermal effect[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2020.

[39] BANDARU A K, WEAVER P M, O'HIGGINS R M. Abrasive wear performance of hygrothermally aged glass/PTFE composites[J]. *Polymer Testing*, 2021, 103: 107369.

[40] BACHCHAN A A, DAS P P, CHAUDHARY V. Effect of moisture absorption on the properties of natural fiber reinforced polymer composites: A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 49: 3403-3408.