

钢背 UHMWPE 纤维织物复合材料的摩擦学性能分析*

林羽东^{1,2} 郭智威^{1,2} 袁成清^{1,2}

(1. 武汉理工大学能源与动力工程学院 武汉 430063;

2. 国家水运安全工程技术研究中心可靠性工程研究所 武汉 430063)

摘要: 纤维织物增强钢背复合材料因具备优异的力学与摩擦学性能在航空航海等领域备受关注,在无油或少油工况下具有较好的应用前景。使用改性处理的超高分子量聚乙烯(Ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE)纤维织物作为增强材料,利用环氧树脂热压在不锈钢环上制备 UHMWPE 纤维织物增强钢背复合材料,研究其与 45 钢盘在环-环端面干摩擦状态下的摩擦学特性,考察纤维织物层数与摩擦转速对材料摩擦学性能的影响,对磨损前后复合材料厚度及 45 钢质量进行测取,利用表面轮廓仪与扫描电子显微镜对复合材料及对偶件磨损面进行观察与分析。结果表明,三种织物结构均能改善不锈钢的摩擦磨损特性,其中一层织物结构所表现的综合摩擦特性最好,在试验工况下摩擦因数与磨损率平均降低了 77.7% 与 67.2%,在试验工况下主要发生磨粒磨损;二层与三层织物由于具备下层织物的支撑,故在较高转速下能保持材料自身良好的摩擦学特性,二层织物在试验工况下摩擦因数与磨损率平均降低了 71.5% 与 65.7%,三层织物则为 73.1% 与 60.3%,由于摩擦热量的积聚同时伴有树脂碎屑与破碎纤维的加入,其在高速下主要经历黏着磨损与疲劳磨损。试验表明,织物结构于摩擦工况下表现出较优的摩擦特性与可靠性,能较好地胜任无油或少油作业。

关键词: UHMWPE; 纤维织物; 钢背; 摩擦磨损; 复合材料

中图分类号: TB331; TH117

Tribological Properties of Steel Backing UHMWPE Fabric Composite

LIN Yudong^{1,2} GUO Zhiwei^{1,2} YUAN Chengqing^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Reliability Engineering Institute,

National Engineering Research Center for Water Transportation Safety, Wuhan 430063, China)

Abstract: Fabric reinforced steel backing composites have attracted much attention in the fields of aviation and navigation since it owns excellent mechanical and tribological properties, which has good application prospects under oil-free or low-oil conditions. The modified ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fabric was used as the reinforcing part, and the composites was attached to the stainless steel ring by hot pressing with epoxy resin. The tribological properties of the composites against 45 steel with a ring-on-ring configuration in dry sliding were studied. The influence of the number of fabric layers and the sliding velocity on the tribological properties of the material was investigated. The thickness of the composite and the mass of the 45 steel before and after the tests was measured. The profilometer and scanning electron microscope were used to observe and analyze the worn surface of the composites and their counterparts. The results show that the fabric layer can greatly improve the friction and wear characteristics of stainless steel, and with one layer exhibits the best tribological characteristics under the experiment conditions, while under the experimental conditions, the friction coefficient and wear rate are reduced by 77.7% and 67.2% on average, mainly produces abrasive wear; Due to the lower fabric, the composite with more layers can maintain the better tribological characteristics of the fabric itself at higher sliding velocity, the friction coefficient and wear rate of the two-layer fabric under the experimental conditions are reduced by 71.5% and 65.7% on average, while the three-layer fabric are 73.1% and 60.3% respectively. Owing to the accumulation of frictional heat with accompanied by the addition of resin chips and broken fibers, it mainly experienced adhesive wear and fatigue wear at the higher sliding velocity. The

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(51509195)。

Fund: Supported by Youth Program of National Natural Science Foundation of China(51509195).

20201214 收到初稿, 20210209 收到修改稿

Experiment shows that the fabric exhibits better tribological properties and reliability under dry conditions, which greatly suits oil-free and oil-less conditions.

Keywords: UHMWPE; fabric; steel backing; friction and wear; composite

0 前言

船舶、舰艇等水路交通装备,因机舱、甲板如电机衬套、起重机滑轮和绞盘、舷梯和舱口铰链等配备机械设施工作环境较为特殊,其轴承中的润滑介质于遭遇高温或水气后若不及时更换易导致氧化变质,使设备运行出现安全隐患^[1]。随着碳纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯(Ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE)等新型高性能纤维织物的问世,其增强型自润滑复合材料在机械性能与摩擦特性上均表现优异^[2-4]。与短纤维丝束不同,织物增强使材料在经、纬方向的力学、摩擦学性能保持一致,最大限度提高材料强度与耐磨性,在制备复合材料时不易起皱且易模压成型,具有独特的优势。除此之外,其良好的导热性能有助于缓解树脂基体降解及纤维分层,从而保持材料的特性^[5]。

通常纤维织物根据不同的工作条件以不同的形式编织制造,经过一定的改性处理后通过树脂浸渍、预固化、热压等手段与金属基体黏连^[6],从而形成一层或多层衬层改善材料摩擦性能,该材料既能使基体金属的性质得以保留与发挥,同时也使其上的固体润滑剂的优良性能得以表现,是近年发展的一种具有较高应用价值的先进自润滑复合材料^[7]。目前对纤维织物增强钢背复合材料的研究多集中于碳纤维^[8]、芳纶纤维^[9]、PTFE 混织型织物^[10]等。通过在金属基体上复合一层浸渍了润滑填料的纤维织物复合材料,提升材料的承载能力、耐冲击能力等。周先辉等^[6]使用碳纤维与聚四氟乙烯纤维混编织物并通过热压在 45 钢表面制备了环氧树脂基自润滑复合材料,通过试验对其干摩擦特性进行了考察,结果表明,碳纤维环氧树脂复合材料稳态摩擦因数为 0.4,比磨损率为 $1.9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,而通过添加纤维混编,复合材料摩擦因数为 0.14、比磨损率为 $5.3 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,大大改善了复合材料的摩擦学性能。但改善效果极大依赖于摩擦温度、载荷和速度参数,其中摩擦高温使复合材料摩擦学特性改变,黏结磨损加剧,并使偶件钢环表面出现氧化磨损。

UHMWPE 纤维是目前高性能纤维中比强度、比模量最高、耐冲击、耐腐蚀、耐低温等综合性能优越的材料之一,已广泛应用于防护、航空、航海、医疗

等诸多领域^[11-13]。由于其耐磨性高,自润滑性好,故在摩擦副界面减磨材料设计及应用领域具有较好应用前景。张艳等^[14]用酚醛树脂热压在 45 钢表面制备了 UHMWPE 纤维织物复合材料并研究了其在干摩擦、海水与机械油介质中的摩擦磨损性能,发现由于海水和机械油可以在摩擦界面形成一层摩擦润滑膜,故减小了复合材料的摩擦因数,但复合材料在这两种情况下的磨损率却大于干摩擦,认为水分与油液进入了黏接界面造成纤维织物与树脂黏接性能下降,故造成其抗磨性能下降。目前围绕 UHMWPE 纤维织物改性方法研究较多,而关于钢背 UHMWPE 纤维织物复合材料摩擦学特性的研究报导较少,UHMWPE 纤维织物层数对材料摩擦学特性及摩擦磨损机制的影响还有待进一步研究。由于目前复合材料摩擦磨损试验多用环-块或销-盘摩擦,这与实际应用场景中的端面连续接触存在差异^[6]。基于此,设计并制备了具有不同层数的 UHMWPE 纤维织物增强钢背复合材料,探究了复合材料与 45 钢在环-环端面连续接触干摩擦方式下的摩擦磨损性能,并对其摩擦磨损机理进行了分析。

1 试验部分

1.1 原材料与制备工艺

织物编织方式可分为平纹、斜纹和缎纹 3 种结构,平纹织物的经纱和纬纱每隔一根纱交织一次,其特点是交织点多,质地较牢、布面平整,具有较好耐磨性。斜纹织物织制较平纹织物复杂,牢固性不及平纹织物,但柔韧性和表面的光滑程度更好。缎纹织物相比于平纹织物和斜纹织物,更光滑,更美观,缺点在于容易刮丝。由于平纹织物织造简单、强度可靠和耐磨性好,在摩擦领域中的应用较为常用^[15-16]。试验中采用 LCPE200 平纹 UHMWPE 织物 1000 D,面密度: 200 g/m^2 ,厚度: 0.24 mm (成都鲁晨新材料科技有限公司);环氧树脂 E51(杭州五会港胶黏剂有限公司);2-乙基-4-甲基咪唑,硅烷偶联剂 KH550(上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。将环氧树脂、固化剂按质量比 100:7 混合搅拌均匀配置黏接剂用以施胶^[17]。由于 UHMWPE 纤维表面能较低,缺少极性官能团,故表面光滑呈惰性,纤维与基体之间的黏结性差,界面结合力较低^[18],在

施胶黏接前需要对其进行改性处理,经丙酮清洗后以 5 wt. % KH-550 硅烷偶联剂处理烘干完成改性。45 钢盘表面打磨至光滑状(用 240 目与 600 目砂纸,最终表面粗糙度为 $0.8 \mu\text{m}$),并用丙酮超声清洗烘干,对织物进行了接触角测量,发现改性后其接触角由 104.5 降至 89.1 ,即降低了 14.74% 。将黏接剂施与 UHMWPE 纤维织物至完全浸渍后室温放置 10 h,使其充分渗透织物并预固化,将纤维织物铺于不锈钢环上以 50°C 固化 0.5 h, 100°C 固化 1 h,室温放置 24 h 热压机制固化成型,制得 UHMWPE 纤维织物增强钢背复合材料。制得的一层织物结构中,织物浸透树脂后通过热压与钢背黏结合,二者之间存在一层较薄的树脂;而在多层织物结构中,上下两层织物浸润树脂后先通过堆叠放置预固化,后经整体热压制备为复合材料,由于织物在热压温度下不会产生熔融从而使上下层冷却后形成一体,故结合界面仍由微量树脂组成,而由于多层织物总体浸润树脂较多,故制得的复合材料表层树脂也较一层织物更厚,除此之外,织物结构经纬线交叉下陷处也存在部分树脂。

1.2 摩擦性能测试

摩擦磨损试验于 CBZ-1 船舶轴系摩擦磨损试验机上开展(武汉海马科技开发有限公司),探究 UHMWPE 纤维织物增强钢背复合材料与 45 钢盘对磨所表现的摩擦学特性,45 钢盘与不锈钢环的形貌与尺寸如图 1 所示。不锈钢环内径、外径与高度分别为 18 mm 、 30 mm 和 10 mm ,摩擦接触面积为 452.16 mm^2 。45 钢盘内径、外径与高度分别为 16 mm 、 40 mm 和 5 mm 。

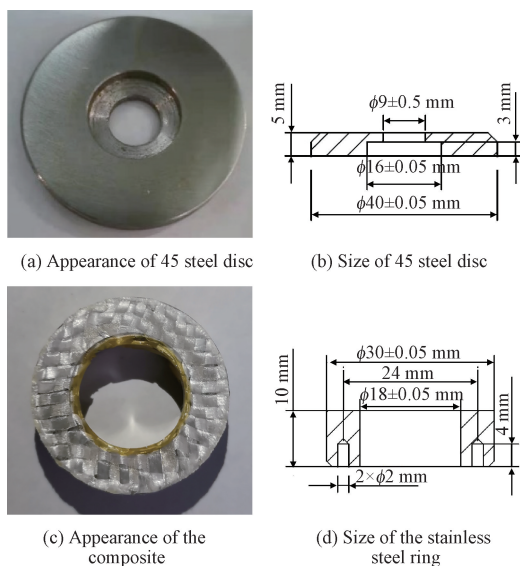


图 1 45 钢摩擦副与不锈钢环尺寸

Fig. 1 Size and appearance of 45 steel and stainless steel

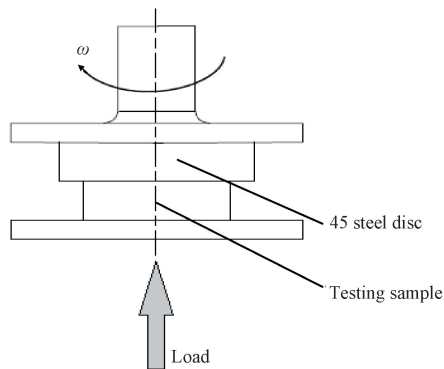
摩擦磨损试验机与其原理如图 2 所示。下环试样为钢背复合材料,以销进行定位;上环试样为 45 钢盘,固定在转轴上同步转动实现端面接触对磨。试验过程中通过传感器动态检测扭矩、载荷,通过式(1)计算材料摩擦因数^[19]

$$\mu = T/rF \quad (1)$$

式中, μ 为摩擦因数; T 为扭矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$); r 为半径 (m); F 为载荷 (N)。



(a) Appearance of tribo-tester



(b) Scheme of ring-on-ring dry friction and wear testing

图 2 摩擦磨损试验机及其原理

Fig. 2 Appearance and scheme of wear testing

为了模拟该材料的船舶实际应用工况条件,以船舶水密门对应部件的运行工况为对象,摩擦磨损试验设置为干摩擦,转速分别为 50 r/min (3.768 m/min)、 200 r/min (15.072 m/min) 与 350 r/min (26.376 m/min),法向载荷为 226 N (0.5 MPa),时间为 1 h 。试验前后用精度为 0.01 mm 的电子游标卡尺对试样厚度进行测量,通过计算得到试样体积变化 $\Delta V (\text{mm}^3)$,通过式(2)计算试样的比磨损率

$$w_s = \frac{\Delta v}{\sum w} \quad (2)$$

式中, w_s 为比磨损率 ($10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$); Δv 为摩擦前后体积变化; $\sum w$ 为累计摩擦功 ($\text{N} \cdot \text{m}$)。

用精度为 0.1 mg 的电子天平测量 45 钢盘磨损后的失重量 Δm ; 用配备能谱仪 (EDS) 的扫描电子显微镜 (SEM) 与激光干涉表面轮廓仪对试样的磨损形貌与前后界面材料组分进行测试并测量计算 45 钢 S_q 值, 其表示样品区域中各点高度的根均方, 为其高度的标准偏差, 计算公式为

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} (Z(x_k, y_l) - u)^2} \quad (3)$$

式中, M 表示 x 轴方向的采样点; N 表示 y 轴方向的采样点; $Z(x_k, y_l)$ 表示采样点 (x_k, y_l) 的高度值; u 为采样区域的平均高度。

为考察不同织物层数对 UHMWPE 钢背复合材料摩擦学性能的影响, 试验中制备了具有一 (NO.1)、二 (NO.2)、三 (NO.3) 层纤维织物的复合材料, 并将其与不具有织物结构的不锈钢空白组 (NO.0) 进行比较。结合测试数据进行材料的磨损机理分析, 探究 UHMWPE 纤维织物层数对摩擦副性能的影响机理, 为钢背 UHMWPE 纤维织物复合材料轴承的应用奠定基础。

2 试验结果与讨论

2.1 摩擦因数分析

图 3 为 4 种试样在 3 种不同工况下摩擦磨损过程中的平均摩擦因数。

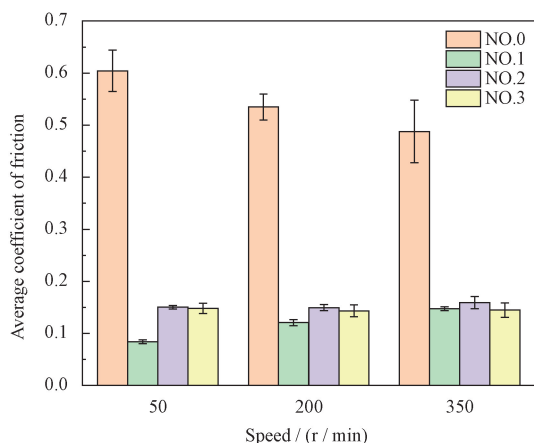


图 3 4 种试样在 3 种不同工况下的平均摩擦因数

Fig. 3 Variation of average friction coefficient of 4 kinds of materials under different rotating speed

由图 3 可知, NO.0 摩擦因数最大并高出具备织物结构的复合材料数倍, 这种情况在 50 r/min 工况下表现地最为明显。随着转速的增加, NO.0 试样摩擦因数相应有所下降, 但仍远高于织物结构。NO.1 平均摩擦因数随着转速的增加不断上升, 最终与 NO.3 基本持平; NO.2 平均摩擦因数随着转速

的增加基本保持一致; NO.3 平均摩擦因数随着转速的增加略微有所下降。综合平均摩擦因数比较, 一层织物结构在减摩性能方面表现最优, 摩擦因数较 NO.0 降低了 77.7%, 二层织物结构与三层织物结构则分别降低了 71.5% 与 73.1%。

由于不具备织物结构的试样在设定试验工况下摩擦学特性远不如织物结构试样, 且通过一段时间试验后均出现了不同程度的失效 (表现为摩擦因数突增、磨损严重), 故以下 $\mu-t$ 摩擦特性曲线只对具备织物结构的材料进行讨论。

图 4 为设计的三种织物结构试样在载荷为 226 N (0.5 MPa)、转速分别为 50 r/min (3.768 m/min)、200 r/min (15.072 m/min)、350 r/min (26.376 m/min), 环-环端面干摩擦工况下, 摩擦因数 μ 随时间 t 的变化曲线。

当转速为 50 r/min 时, NO.1 摩擦因数远低于 NO.2 与 NO.3, 其初始摩擦因数为 0.12, 经过一段时间的磨合后, 摩擦因数在 0.09~0.10 的范围内波动, 随着摩擦时间 t 的增加, 摩擦因数不断降低并在 $t=20$ min 后逐渐趋于平稳, 材料进入稳定摩擦磨损阶段, 且在后续试验过程中摩擦因数亦未出现较大波动, 最终摩擦因数保持在 0.08~0.085 范围内。由于摩擦初期磨损的为树脂层, 一层织物结构所含树脂较少, 在摩擦初期就已存在未被树脂完全覆盖的纤维, 而随着试验的进行, 树脂层磨薄, 纤维织物得以更多参与摩擦, 故其摩擦因数随着 t 的增加而下降, 表现出较好的减摩特性。NO.2 初始摩擦因数为 0.18, 通过短时间的磨合后摩擦因数降低并趋于平稳, $t=10$ min 后摩擦因数在 0.13~0.15 波动, 最终摩擦因数维持在 0.14~0.15 范围内。与 NO.1 的表现不同, NO.2 初始摩擦因数较高, 这是由于其纤维织物上覆盖的树脂较多, 且转速较慢, 导致树脂层消耗较缓, 随着试验的进行, 树脂不断磨损使部分纤维参与摩擦, 但纤维裸露程度不如 NO.1, 故减摩效果较差。NO.3 所表现的摩擦特性则与上述两者不同, 其初始摩擦因数较高, 随着磨合的进行摩擦因数得到一定的降低, 但随着 t 的增加摩擦因数不断上升, 并连续出现三次较为明显的先减后增现象, 最后摩擦因数达到 0.17 并仍有上升趋势, 表明材料摩擦特性出现恶化。由于三层织物结构树脂含量最多, 树脂层在 50 r/min 工况下不能有效磨薄, 且期间产生了大量树脂碎屑参与摩擦, 伴随着不断积累的摩擦热, 材料发生黏着与磨粒磨损, 故摩擦因数不断升高。综合比较, 在此工况下, NO.1 减摩特性表现最优。

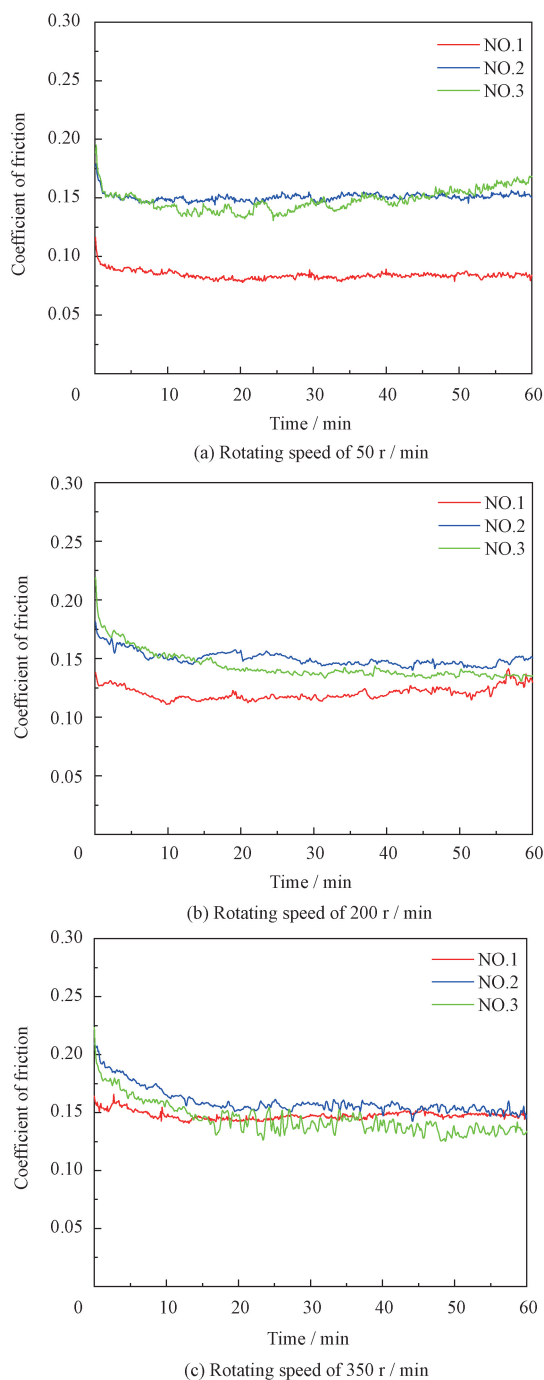


图 4 三种织物增强复合材料与 45 钢在不同转速工况下对磨的 $\mu-t$ 特性曲线

Fig. 4 Variation of friction coefficient against time of 3 kinds of composites under different rotating speed

当转速为 200 r/min 时, NO. 1 摩擦因数较 50 r/min 时有明显上升, 初始摩擦因数为 0.14, 随着试验的进行摩擦因数不断下降, $t=10$ min 时摩擦因数降为 0.11, 进入稳定磨损阶段, 摩擦因数变化平缓, 当 $t=50$ min 时, 材料摩擦学特性恶化, 减摩效果降低, 摩擦因数上升至 0.15, 并且后续有继续上升的趋势。由于转速的上升, 材料运行工况恶化, 造成纤维织物润滑效果下降, 故摩擦因数有所上升, 在

试验末期由于织物层已发生磨损, 故摩擦因数有上升趋势。NO. 2 的摩擦因数整体表现为随摩擦时间增加而略微下降, 其值较 50 r/min 无明显上升, 但波动更大。由于转速的上升造成较多表层树脂破碎, 碎屑的加入使摩擦因数产生小幅波动, 但由于其具备下层织物, 故整体摩擦因数能得到保持。NO. 3 在 200 r/min 工况下的摩擦学特性较 50 r/min 得到了较大提升, 其初始摩擦因数为 0.22, 随着一段时间的磨合后降为 0.15, 随着摩擦过程的进行, $\mu-t$ 曲线逐渐平稳, 材料进入稳定摩擦磨损阶段, 摩擦因数不断降低, 最终达到 0.13, 且仍有继续下降的趋势。在此工况下, 树脂层磨损良好, 使纤维显露并随着试验的进行更多地参与摩擦过程, 使摩擦因数进一步下降。综合比较, 在此工况下 NO. 1 减摩特性表现最优。

当转速为 350 r/min 时, NO. 1 摩擦因数进一步上升, 初始摩擦因数达到 0.17, 经过短暂的磨合后降为 0.15, 且后续一直保持较为平稳。NO. 2 摩擦因数与波动均较 200 r/min 工况更大, 磨合时间达到了 20 min, 在稳定磨损期其摩擦因数在 0.15 ~ 0.16 间波动, 但无明显上升趋势。NO. 3 摩擦因数与 200 r/min 工况基本相当, 但经过 20 min 的磨合后, 其值在 0.125~0.16 的范围内不断波动下降, 最终摩擦因数达到 0.14。NO. 2 与 NO. 3 摩擦因数在此工况下均存在较大波动, 为恶劣工况带来的磨粒与温升所致, 且于 NO. 3 中表现更明显, 但由于下层织物的支撑, 摩擦因数仍能保持较低并有下降的趋势。其中 NO. 3 材料温升更快, 初始黏着与磨粒更严重导致树脂破碎较多, 消耗较快, 摩擦因数较高, 经过这个阶段后纤维得以较多裸露参与摩擦, 故摩擦因数得以降低并平稳。NO. 1 只具备一层织物, 随着摩擦的进行织物层破损, 故在试验后期摩擦因数略微上升。综合比较, 在此工况下, NO. 3 减摩特性最优, 但摩擦因数波动较大; NO. 1 稳定性最优, 减摩效果亦较好; NO. 2 前期摩擦因数较大, 后期与 NO. 1 大致相同, 波动程度则介于二者之间。

2.2 磨损性能分析

为考察织物层数对复合材料磨损性能的影响, 在试验前后用精度为 0.01 mm 的电子游标卡尺对复合材料的厚度进行测量并计算体积磨损率, 用精度为 0.1 mg 的电子天平对织物结构对磨副的质量进行测取并计算其失重量, 结果如图 5 与表 1 所示; 对典型对磨副磨损表面进行了 EDS 分析, 结果如图 6 所示。

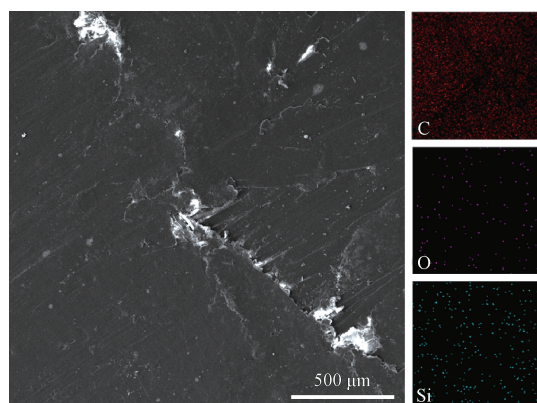


图5 织物材料磨损前表面 EDS 分析

Fig. 5 EDS morphology of the fabric sample microstructure before the test

表1 三种织物复合材料的 45 钢对磨副在不同转速下的失重量

Table 1 Mass loss of 45 counterpart under varies rotating speed

Speed/(r/min)	Mass loss of counterpart/mg		
	NO. 1	NO. 2	NO. 3
50	0.72	-0.77	-1.31
200	0.85	0.63	-1.15
350	2.05	1.18	1.65

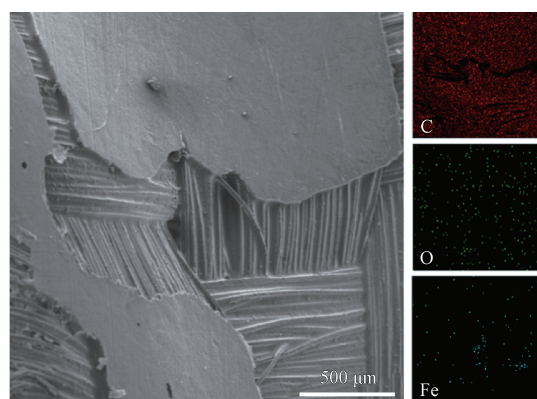


图6 织物材料磨损后表面 EDS 分析

Fig. 6 EDS morphology of the fabric sample microstructure after the test

由表 1 可见,随着转速上升,三种纤维织物对磨副失重亦随之增加。NO. 1 对磨副由于磨损较为严重,故失重最多,这种现象在 350 r/min 工况下最为明显。与 NO. 1 不同,NO. 2,NO. 3 对磨副均存在增重,为材料表层树脂黏附转移造成的增重大于对磨副磨损失重所致,且 NO. 3 表现更为突出。转速为 50 r/min 时,三种对磨副失重最小且产生了增重,表明此时磨损量较小且树脂更易发生转移;当转速上升至 200 r/min 时,NO. 1 和 NO. 2 对磨副失重量相当,NO. 3 对磨副仍存在较大增重,证明其摩擦热积

聚较大且使树脂发生转移;350 r/min 工况下产生摩擦热造成的温升最为明显,但对磨副失重大幅增加,表明树脂并未大量转移到对磨副表面而是甩离摩擦界面。

图 5、6 为织物材料磨损前后表面 EDS 分析,图 7 为典型对磨副磨损面 EDS 分析,由图 7 可见钢盘表面存在黏附,EDS 分析表明膜层主要含 C,为环氧树脂主要富含元素之一,在图 5、6 中也有所体现;膜层右方大量富含 Fe 元素,表明复合材料表层树脂在与钢件配副过程中由于热量积聚与应力产生了转移黏附。除上述两种元素外,钢件表面还存在均布的 O 元素,为 45 钢氧化后的产物,证明钢盘表面发生了氧化磨损。而复合材料表面在磨损后较磨损前则多了微量 Fe 与较多的 O,证明摩擦过程中产生了氧化磨损。

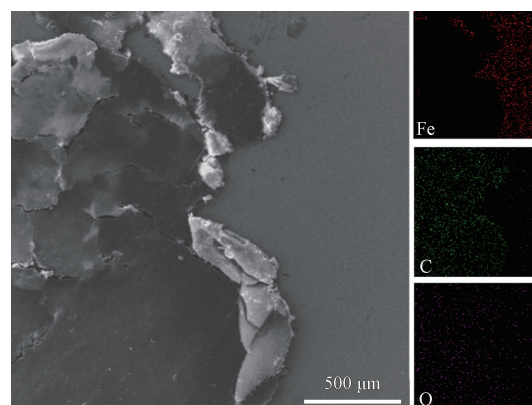


图7 45 钢磨损后表面 EDS 分析

Fig. 7 EDS morphology of the 45 steel microstructure after the test

表 2 与图 8 给出了四种试样在不同转速下的磨损厚度与计算得到的体积磨损率,由图 8 可知,NO. 0 磨损率最大且远高于织物结构试样,这种现象随着转速的上升表现得更为明显,但上升趋势逐渐变缓,为试样摩擦特性发生不同程度恶化失效所致。50 r/min 工况下,三种织物复合材料的磨损率相当且较大。此工况下三种材料主要磨损树脂层,在相对较短的行程内对树脂层的快速磨损使其磨损率较高。随着转速上升至 200 r/min,三种复合材料的磨损率得到不同程度的下降,其中 NO. 1 磨损率最低。由于其表面树脂含量较少,经过一段时间磨损后耐磨性较好的织物参与摩擦,故磨损率较低。随着织物层数的增加,复合材料表层树脂含量亦相应增加,导致试样在摩擦过程中产生的摩擦热增多,不仅会使表层树脂产生热裂纹,连续接触的摩擦面间积聚的磨粒与热量也会使复合材料与对偶副之间产生一

定的黏着磨损,故 NO. 2 与 NO. 3 磨损率较高且 NO. 3 更大,此现象与 ZHOU 等^[6]得出的结论相似。在 350 r/min 工况下,NO. 1 磨损率较 200 r/min 时更大。由于其只具备一层织物,在 350 r/min 的工况下表面产生了大量的树脂碎屑充当磨粒,伴随积聚的摩擦热,使其发生了磨粒磨损与黏着磨损,并使部分纤维破碎断裂,造成其磨损率上升。对于多层织物复合材料,得益于 UHMWPE 的耐磨性与自润滑性,下层织物结构承载了磨损带来的磨粒与碎屑。虽在此工况下产生并积聚的摩擦热较 200 r/min 更多,但由于磨损初期树脂层已被较大程度破坏并甩出摩擦面,故 NO. 2 与 NO. 3 的磨损率比 NO. 1 低,且均较 200 r/min 工况小。由于温度积聚造成摩擦性能恶化,NO. 3 磨损率虽较 200 r/min 工况下有所下降,但仍高于 NO. 2。综合比较,一层织物结构在转速不高时耐磨性能方面表现最优,磨损率平均较 NO. 0 降低了 67.2%,二层织物结构与三层织物结构则分别降低了 65.7%与 60.3%。

利用表面轮廓仪对 45 钢盘磨损面进行分析,表面轮廓形貌与 S_q 值如表 3 与图 9 所示。

表 2 四种试样的表面磨损厚度

Table 2 Surface wear thickness of four samples

Speed/(r/min)	Wear thickness/mm			
	NO. 0	NO. 1	NO. 2	NO. 3
50	0.062	0.035	0.038	0.036
200	0.325	0.051	0.080	0.120
350	0.604	0.154	0.134	0.136

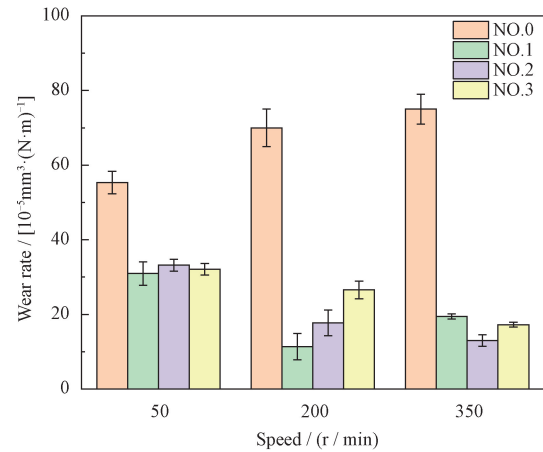
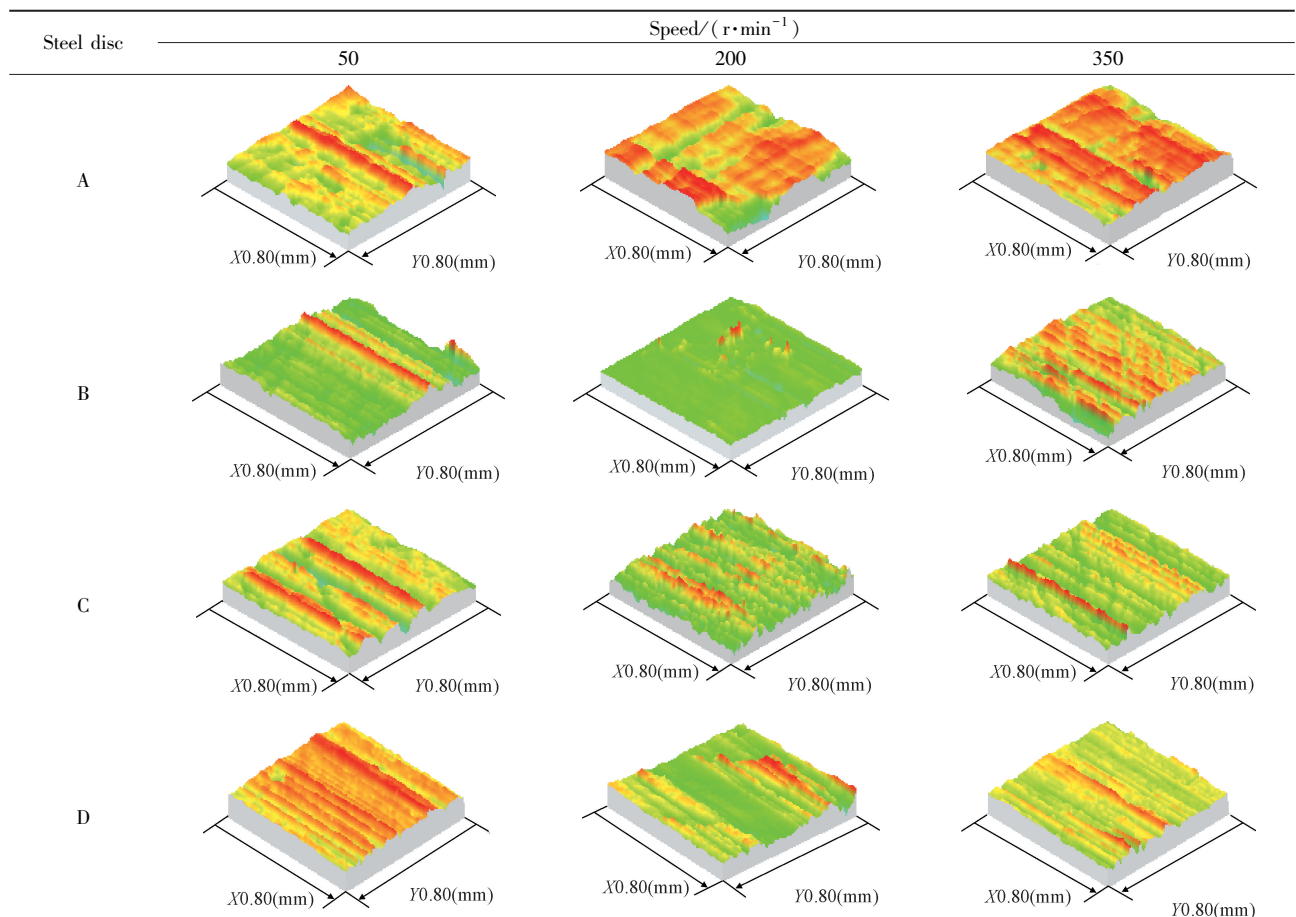


图 8 不同试样在不同转速下的体积磨损率

Fig. 8 Varies volume wear rate of 4 test samples under different rotating speed

表 3 45 钢盘磨损面的表面轮廓

Table 3 Wear surface morphologies of 45 counterpart



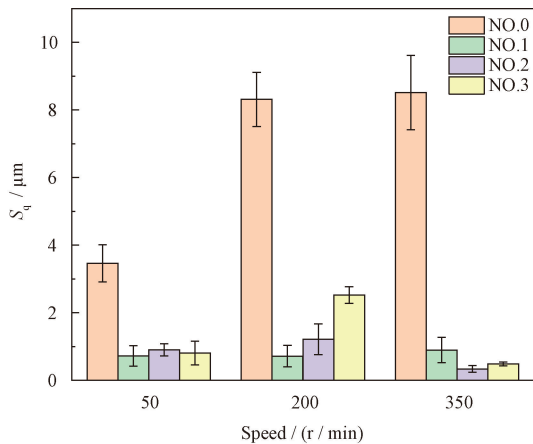


图9 不同转速下与不同材料配副的钢盘磨损面 S_q 值

Fig. 9 S_q value of the worn surface of 45 counterparts with different composites under different rotating speed

表3为不同工况下45钢盘磨损表面形貌。其中A、B、C、D分别代表零、一、二、三层织物对磨副。由表可见,A组钢盘表面存在大量沟壑与划痕,并随着转速上升而加剧,摩擦工况最为恶劣;当钢盘与织物材料配副且转速为50 r/min时,随着织物层数增加,由树脂层黏附于钢盘表面形成的微波峰亦随之增多,使其表面粗糙度上升,故C与D组钢盘表面微波峰较多;随着转速上升至200 r/min,B、C、D表面较上一工况更为平整,树脂黏附减少;当转速为350 r/min时,B组钢盘表面较C、D更为粗糙,为摩擦工况恶化带来的磨痕与犁沟所致。C组钢盘表面形貌与200 r/min工况大致相同,D组钢盘表面亦存在较多犁沟,证明此时磨粒磨损较上一工况更为严重。

图9为对偶件磨损面 S_q 值,其主要代表了测量区域的粗糙度大小,钢盘表面 S_q 值越大,证明摩擦工况越恶劣,材料的润滑性能随之下降,导致对偶副的磨损加剧。故与织物材料配副的钢盘磨损面 S_q 值均远低于与纯不锈钢配副的钢盘。在配副过程

中,磨痕将带来材料表面的高度降,树脂黏附则会导致材料表面的高度升,两者共同影响 S_q 值的大小。由于一层织物表面树脂含量较少,故随着转速上升,磨痕主导了其 S_q 的增加;二层与三层织物表面树脂含量较多,在50 r/min与200 r/min工况下由于摩擦热积聚导致较多树脂转移,从而造成其 S_q 较高并主导了其增加的趋势,而当转速进一步上升为350 r/min时,树脂在摩擦过程中大量甩离摩擦界面,且由于下层织物较好的摩擦性能,45钢盘 S_q 值得以下降并得到较小的值。

3 摩擦磨损机理分析

为进一步分析 UHMWPE 纤维织物增强钢背复合材料摩擦磨损机理,使用扫描电子显微镜对4种试样在50 r/min工况下磨损后的表面形貌进行了扫描分析,结果如图10所示。

如图10a所示,NO.0表面存在大量磨痕与沟壑,且左侧存在因热应力与黏着导致的深坑与裂纹,种种迹象表明该试样经历了极为恶劣的磨粒磨损与黏着磨损,导致其摩擦因数与磨损率较高。图10b~10d分别展示了NO.1、NO.2与NO.3的磨损表面。由图10b可见,NO.1磨损表面仅存在少量破碎树脂,且裸露的UHMWPE纤维均较完整,表明此时摩擦工况良好,故其摩擦因数较低;图10c中存在一层较厚且破碎的树脂,其边缘还出现了断层与裂纹,部分树脂从基体中拔出并以丝状与块状分布于材料摩擦表面,证明此时材料表面受到了循环应力与热量积聚从而产生黏着,树脂层因此产生了热裂纹,随着破碎树脂块的加入从而使摩擦工况恶化,在此工况下无过多UHMWPE纤维的参与也是造成其摩擦因数较一层织物大幅提升的原因之一;图10d中存在大量已完全破碎的树脂颗粒,下方则存在已接近破碎的树脂层,磨损面表现为疲劳磨损,树脂颗粒随着摩擦的进行不断分布于磨损面并充当磨粒,进一步

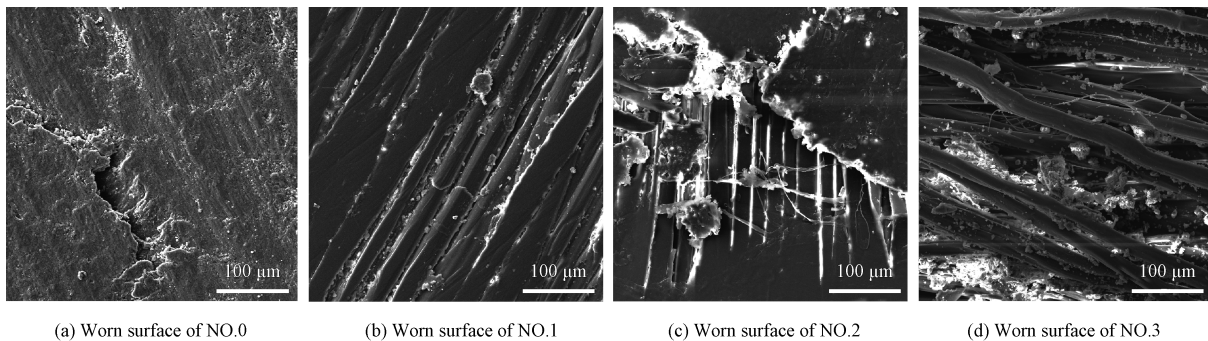


图10 不同试样在50 r/min工况下放大500倍的磨损面形貌

Fig. 10 Worn surfaces of different materials under the rotating speed of 50 r/min ($\times 500$)

破坏较为完整的树脂,且图中裸露的纤维边缘出现了细长的丝束,这是由磨粒拖拽扯出所致,丝束扯出断裂后将随树脂颗粒一同充当磨粒,造成疲劳磨损。由于三层织物复合材料具备较厚的树脂层,故在此工况下摩擦逐渐转变为磨粒与树脂层间的对磨,严重的磨粒磨损是 NO.3 在此工况下表现出较高的摩擦因数并存在不断上升趋势的主要原因。

4 结论

(1) 由于 UHMWPE 纤维具备优良的自润滑性与耐磨性,其纤维织物增强钢背复合材料摩擦学特性与可靠性较纯不锈钢试样得到了明显提升,在试验工况下摩擦因数与体积磨损率均保持在 0.15 与 $3.5 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 以内。

(2) 随着转速上升,一层织物复合材料摩擦因数上升较明显,但波动较小,体积磨损率呈先减后增的趋势;二层织物复合材料摩擦因数略有所上升且较低速工况出现小幅波动,体积磨损率呈不断下降趋势;三层织物复合材料摩擦因数略有所下降但较低速工况出现较大波动,体积磨损率亦呈下降趋势。

(3) 摩擦过程产生的树脂碎屑与热量积聚是导致复合材料摩擦学特性恶化的主要因素。一层织物结构试样主要为磨粒磨损,二层织物结构试样主要为黏着磨损,三层织物结构试样主要为疲劳磨损与磨粒磨损。

(4) 综合对比,一层织物结构在三种工况下摩擦特性表现较优,在试验工况下摩擦因数与磨损率平均降低了 77.7% 与 67.2% ;二、三层织物结构由于破损后仍具备下层织物的支撑,在试验工况下二层织物摩擦因数与磨损率在平均降低了 71.5% 与 65.7% ,三层织物则为 73.1% 与 60.3% 。故更适用于高速工况的应用。

参 考 文 献

- [1] KARIS T E, MILLER J L, HUNZIKER H E, et al. Oxidation chemistry of a pentaerythritol tetraester oil[J]. Tribology Transactions, 1999, 42(1):14.
- [2] SHEN X, GAO P, LIU Z, et al. Elastic properties of the fabric liner and their influence on the wear depth of the spherical plain bearing[J]. Journal of Nanomaterials, 2014, 2014: 1-7.
- [3] LIU N, WANG J, CHEN B, et al. Enhancement on interlaminar shear strength and tribological properties in

- water of ultra high molecular weight polyethylene/glass fabric/phenolic laminate composite by surface modification of fillers[J]. Materials & Design, 2014, 55(3): 805-811.
- [4] SUBBAYA K M, SURESHA B, RAJENDRA N, et al. Grey-based Taguchi approach for wear assessment of SiC filled carbon-epoxy composites[J]. Materials & Design, 2012, 41(OCT.): 124-130.
- [5] 周先辉. 高效重载钢背衬碳织物/环氧树脂复合材料螺旋副研究[D]. 广州:广东工业大学, 2008.
- ZHOU Xianhui. Research on high efficiency, heavy-load, steel backing carbon fabric/epoxy composite screw pair[D]. Guangzhou:Gaungdong University of Technology, 2008.
- [6] 周先辉, 孙友松, 王万顺. CF/PTFE 纤维混编织物增强环氧复合材料干摩擦特性[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 650-658.
- ZHOU Xianhui, SUN Yousong, WANG Wanshun. Dry tribological property of carbon/polytetrafluoroethylene hybrid fabric reinforced epoxy composite[J]. Tribology, 2016, 36(5): 650-658.
- [7] 刘超锋. 国内自润滑轴承用材料的研究和开发[J]. 铸造技术, 2006, 27(4): 416-420.
- LIU Chaofeng. Advance in research and development of self-lubricating composite used by bearing materials in China [J]. Foundry Technology, 2006, 27(4): 416-420.
- [8] SURESHA B, RAMESH B N, SUBBAYA K M, et al. Influence of graphite filler on two-body abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites [J]. Materials & Design, 2010, 31(4): 1833-1841.
- [9] KHAFIDH M, SCHIPPER D, MASEN M, et al. Friction and wear mechanism of short-cut aramid fiber and silica reinforced elastomers [J]. Wear, 2019, 428-429: 481-487.
- [10] XIANG D, SHU W, LI K. Friction and wear behavior of a new 40Cr steel-PTFE fabric composite under heavy loads[J]. Materials & Engineering A, 2008, 483(483-484): 365-368.
- [11] YANG L S, WANG J L. The research progress of ultra high molecular weight polyethylene fiber [J]. New Chemical Materials, 2002(8):3.
- [12] 赵刚, 赵莉, 谢雄军. 超高分子量聚乙烯纤维的技术与市场发展[J]. 纤维复合材料, 2011(1): 50-56.
- ZHAO Gang, ZHAO Li, XIE Xiongjun. Ultra high molecular weight polyethylene fiber material technology and market development prospect [J]. Fiber Composites, 2011(1): 50-56.
- [13] 王桦. 超高分子量聚乙烯纤维[J]. 四川纺织科技,

- 2001(1): 6-10.
- WANG Hua. Brief introduction on ultra-high molecular weight polyethylene fiber[J]. Sichuan Textile Technology, 2001(1): 6-10.
- [14] 张艳, 郭芳. 环境介质对 UHMWPE 纤维织物复合材料摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2014, 39(3): 110-114.
- ZHANG Yan, GUO Fang. Effect of environment medium on tribological properties of UHMWPE fabric composites[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(3): 110-114.
- [15] BIJWE J, RATTAN R. Influence of weave of carbon fabric in polyetherimide composites in various wear situations[J]. Wear, 2007, 263(7-12): 984-991.
- [16] 潘广镇, 齐乐华, 付业伟, 等. 碳纤维布复合材料摩擦性能研究进展[J]. 中国材料进展, 2015, 34(6): 453-461.
- PAN Guangzhen, QI Lehua, FU Yewei, et al. Progress in tribological properties of carbon fabric composites. [J]. Materials China, 2015, 34(6): 453-461.
- [17] 徐虹, 张可, 卢岩, 等. 玄武岩纤维-碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料的制备与力学性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(4): 767-773.
- XU Hong, ZHANG Ke, LU Yan, et al. Preparation and mechanical property of carbon-basalt hybrid fiber plain fabric reinforced epoxy resin matrix composites. [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 767-773.
- [18] 田萌. UHMWPE 纤维针织物复合材料的研究与开发[D]. 西安:西北工业大学, 2015.
- TIAN Meng. Study and development of UHMWPE fiber knitted fabric composites[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2015.
- [19] YANG Z, GUO Z, YANG Z, et al. Study on tribological properties of a novel composite by filling microcapsules into UHMWPE matrix for water lubrication[J]. Tribology International, 2021, 153:106629.
-
- 作者简介: 林羽东,男,1997 年出生,硕士研究生。主要研究方向为船舶动力机械摩擦学。
E-mail:375229349@qq.com
- 郭智威(通信作者),男,1986 年出生,副教授,博士研究生导师。主要研究方向为船舶动力机械摩擦学及表界面技术。
E-mail:zwguo@whut.edu.cn