

离子液体润滑下非晶碳膜的载流摩擦磨损行为

刘秀芳¹, 李霞², 张广安², 眭剑¹

(1. 宜宾学院 化学与化工学院, 四川 宜宾 644000;

2. 中科院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: **目的** 考察非晶碳膜 (amorphous carbon film, a-C) 在干摩擦和在离子液体 (IL) 润滑下的载流摩擦磨损行为特点。**方法** 选取不锈钢、涂覆离子液体的不锈钢、a-C 薄膜和涂覆离子液体的 a-C 薄膜 (a-C-IL) 分别与不锈钢小球对磨, 在直流电流为 0.2 A 的条件下进行摩擦磨损测试, 对比了各种试样的摩擦学行为。通过扫描电镜、表面三维轮廓仪和拉曼光谱对磨痕和磨斑进行分析表征, 并讨论各种摩擦副的磨损机制。**结果** 非晶碳膜与离子液体均能有效地降低钢-钢摩擦副在载流条件下的摩擦系数, 使得稳定摩擦系数从~0.8 分别降低到~0.2 和~0.15。当 a-C 膜与 IL 进行复合后, 进一步降低了 a-C 膜的载流摩擦系数 (~0.1), 但是 a-C 膜的耐磨性能降低。**结论** 在载流摩擦磨损测试下, 钢-钢摩擦副的摩擦系数大, 磨损严重, 伴随轻微的粘着磨损; 离子液体可以明显减小摩擦副之间的粘着, 降低钢-钢摩擦副的摩擦系数和磨损率。在钢基底上镀 a-C 薄膜, 摩擦过程中 a-C 磨屑形成的转移膜发生了石墨化, 能显著降低摩擦系数, 减小磨损率。a-C-IL 固液复合薄膜具有比 a-C 膜更低的载流摩擦系数, 但其耐磨性能不如 a-C 膜。

关键词: 非晶碳膜; 离子液体; 固液复合润滑; 载流摩擦; 磨损机理

中图分类号: TH117.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0194-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.029

Current-carrying Friction and Wear Behavior of the Amorphous Carbon Film Lubricated by Ionic Liquid

LIU Xiu-fang¹, LI Xia², ZHANG Guang-an², SUI Jian¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Yibin University, Yibin 644000, China; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the current-carrying friction and wear behaviors of the amorphous carbon (a-C) film in both dry friction and ionic liquid (IL) lubricated conditions. The friction tests were carried by grinding stainless steel, steel coated with IL, a-C film and a-C film coated with IL (a-C-IL) with stainless steel balls under direct current of 0.2 A to compare the friction behaviors of various samples. The wear traces and wear scars of the samples were characterized by scanning electron microscopy, surface 3D profiler and Raman spectrum, and the wear mechanisms of the friction pairs were discussed. Both the a-C film and IL could effectively decrease the current-carrying friction coefficient of the steel-steel friction pair, and reduce the

收稿日期: 2018-10-21; 修订日期: 2019-02-17

Received: 2018-10-21; Revised: 2019-02-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51505419); 宜宾学院博士启动基金项目 (2013QD12)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51505419), the Startup Foundation for Doctors of Yibin University (2013QD12)

作者简介: 刘秀芳 (1982—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为表面处理与防护技术。

Biography: LIU Xiu-fang (1982—), Female, Ph. D., Lecturer, Research focus: surface modification and protection technology.

通讯作者: 眭剑 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面处理与防护技术。邮箱: suijian09@126.com

Corresponding author: SUI Jian (1983—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: surface modification and protection technology. E-mail: suijian09@126.com

steady friction coefficient values to ~ 0.15 and ~ 0.20 from ~ 0.8 , respectively. The composite lubrication of the a-C and IL further decreased the current-carrying friction coefficient (~ 0.1), but the wear resistance decreased accordingly. The friction coefficient of the steel-steel friction pair is high and the wear is severe. The mechanism is severe abrasive wear with slight adhesion wear. The IL lubrication can obviously reduce the friction coefficient and wear rate of steel-steel friction pair, and the wear mechanism is acceptable abrasive wear. The a-C film can provide good lubrication and wear resistance for the electrical contact material in dry friction. In the current-carrying friction process, the formed transfer film by the a-C wear debris is graphitization and the mechanism of the a-C films is slight abrasive wear. The friction coefficient of the a-C-IL solid-liquid composite lubrication coating is lower than that of a-C film, but the wear resistance is weaker. In friction process, the surface structure of the a-C is broken, and the generated wear debris mixed with the IL can form a solid-liquid composite lubrication coating, which can reduce the friction force, but is easily extruded out of the friction contact zone. Therefore, a steady solid-liquid composite lubrication coating needs to be reconstructed with more wear debris worn off from the a-C film to increase the wear rate.

KEY WORDS: amorphous carbon film; ionic liquid; solid-liquid composite lubrication; current-carrying friction; wear mechanism

随着宇航及航空、航海、微电子技术等高新技术产业的飞速发展,机电系统不断向着高精度与微型化方向发展。微型机电系统包括励磁电机、汽轮电机、微电机、整流装置以及宇航电机等广泛使用集电环、导电换向片、整流片、导电刷等各种滑动电接触元件,对应的摩擦副工况相对缓和,具有工作电流小、接触面积小与磨损率相对较小等特点。电接触材料的润滑与抗磨性能是决定滑动电接触元件寿命长且稳定运转的重要因素^[1]。

非晶碳基薄膜因兼具超低的摩擦与磨损而备受关注,并且经多年的研究开发,已广泛应用到汽车、电子、机械以及航空航天等诸多领域^[7-8]。大量研究表明,通过有效地调控结构、界面及组成,非晶碳基薄膜在各种工况(大气或惰性气氛、潮湿气氛、水环境、真空或超高真空、辐射环境)下均能表现出优异的抗摩减磨性能^[9-10]。但非晶碳基薄膜导电性能的研究相对较少。有文献指出,其电阻率因制备条件不同而在 $1\sim 10^{15} \Omega\cdot\text{m}$ 之间^[11]。这意味着可以通过控制成膜工艺,使得非晶碳基薄膜具有较好的导电性能,拓展其在电接触领域的应用。此外,有关非晶碳膜与液体润滑油在空间润滑领域复合使用的文献报道指出,固液复合润滑薄膜能有效克服非晶碳膜环境敏感性强的缺陷,降低摩擦噪声和实现自我修补,同时提供较高的承载能力和耐磨性能^[12]。因此,本文选择具有良好的热稳定性、较宽的电化学窗口、优异的润滑性和导电性^[13]的液体润滑剂——离子液体,并考察非晶碳膜作为电接触薄膜材料在载流情况下的摩擦学行为特点,同时探索离子液体与非晶碳膜复合对薄膜摩擦学性能的影响,以为后续研究提供指导。

1 试验部分

1.1 涂层制备

采用 TeerUDP650 型磁控溅射沉积系统制备 a-C

薄膜。基底选用不锈钢(30 mm×30 mm×0.8 mm)。将基底依次用丙酮和酒精进行超声波清洗 30 min,待干燥氮气吹干后,装入腔体样品架。打开设备抽气系统,待真空腔内背底真空抽至 $1.333\times 10^{-4} \text{ Pa}$ 时,通入氩气使得压强为 0.213 Pa。基底加偏压-500 V,以激发氩离子清洗活化基底表面 30 min,随后调整基底偏压至-300 V,打开直流电源,调节电流为 3.0 A,溅射铬(Cr)靶制备金属 Cr 过渡层 20 min,然后在 5 min 内逐渐降低 Cr 靶电流,并升高石墨靶电流,制备一层梯度过渡层,直至石墨靶电流升至 3.5 A, Cr 靶电流降至 0 A。然后保持石墨靶电流,调整基底偏压至-70 V,沉积非晶碳基薄膜,薄膜沉积时间为 550 min。沉积结束,关闭磁控溅射镀膜设备,并保持真空一定时间,待样品冷却至室温,将其取出,得到 a-C 薄膜。薄膜厚度与溅射时间相关,本实验制备的 a-C 薄膜厚度大约为 3.5 μm 。

依据文献报道的方法^[14],在实验室合成离子液体(1-甲基-3-己基咪唑六氟磷酸盐, IL)。取少量的离子液体润滑剂,均匀涂覆在不锈钢和 a-C 薄膜表面,制得不锈钢样品(Steel-IL)和固-液复合润滑薄膜(a-C-IL)。

1.2 表征

采用改装的 HSR-2M 型高速往复摩擦磨损试验机评价 Steel、Steel-IL、a-C 和 a-C-IL 四种样品在大气环境中的载流摩擦磨损性能。图 1 为载流摩擦磨损测试的示意图。用恒流直流电源控制电流,直流电流从上夹具流入,经过球盘接触区,由下试样底部流出。摩擦实验选用 $\phi 3 \text{ mm}$ 不锈钢球为对偶,往复滑动的载荷为 5 N,频率为 5 Hz,摩擦循环次数为 30 000 次。摩擦系数曲线由摩擦机实时自动记录。用 JSM-6701F 冷场发射扫描电子显微镜(Field emission scanning electron microscope, FESEM)观察 a-C 薄膜的表面和断面结构。试样的磨痕与对偶的磨斑形貌用扫描电子

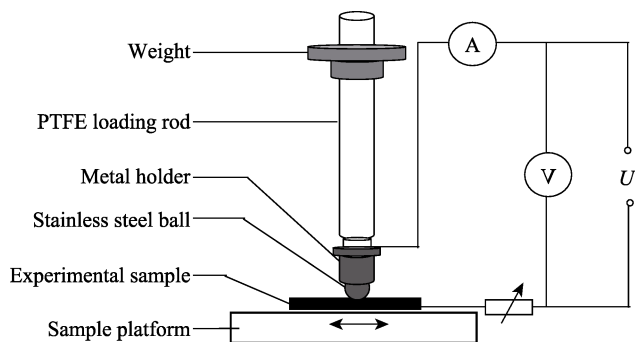
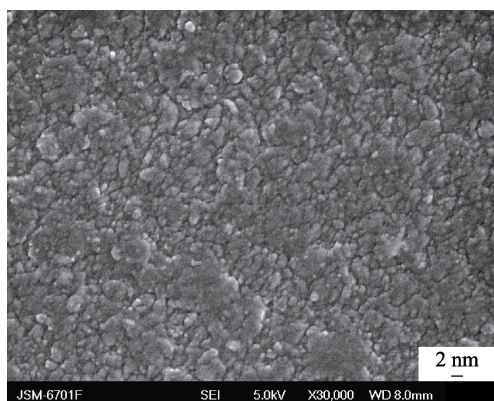


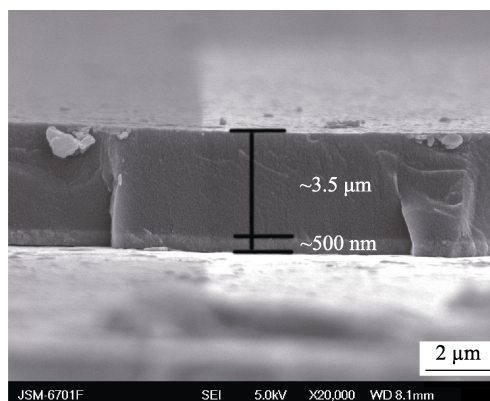
图1 载流摩擦测试示意图

Fig.1 Diagram of current-carrying friction test

显微镜 (SEM, JSM-5600L JEOL) 观察。摩擦试样经丙酮超声清洗后, 采用 ADE Phase Shift 公司生产的 MicroXAM 型非接触式三维表面轮廓仪扫描磨痕三



a 表面形貌



b 截面结构

图2 非晶碳膜的表面形貌和截面结构

Fig.2 (a) Surface topography and (b) cross-sectional structure of the amorphous carbon film

2.2 载流摩擦磨损行为

图3比较了 Steel、Steel-IL、a-C、a-C-IL 四个试样的载流摩擦磨损行为。在载流条件下, 钢片与钢球直接对磨, 跑合稳定后其摩擦系数接近 0.8, 摩擦曲线波动较大。这主要是因为在载流磨损条件下, 钢-钢接触会发生粘着现象, 而且瞬间的接触不良还会出现电弧放电现象, 使得摩擦副表现出较大且不稳定的摩擦系数和较高的磨损率。钢片表面涂覆离子液体后, 其载流摩擦系数得到了显著降低, 稳定摩擦系数约为 0.2, 摩擦系数曲线平滑而稳定, 这说明在小载流条件下, 离子液体能够作为一种良好的润滑剂, 为滑动电接触材料提供润滑保护。在载流条件下, a-C 薄膜经过一个短暂的跑合期, 摩擦系数从 0.4 左右快速降低并稳定在 0.15 左右, 这与很多文献中报道的 a-C 膜摩擦系数值相当。通过与离子液体复合润滑, a-C 薄膜的摩擦系数进一步降低, 从摩擦实验启动开始就稳定在 0.1 左右, 直到实验结束。摩擦系数曲线的稳定, 进一步证实离子液体能够起到减摩作用。

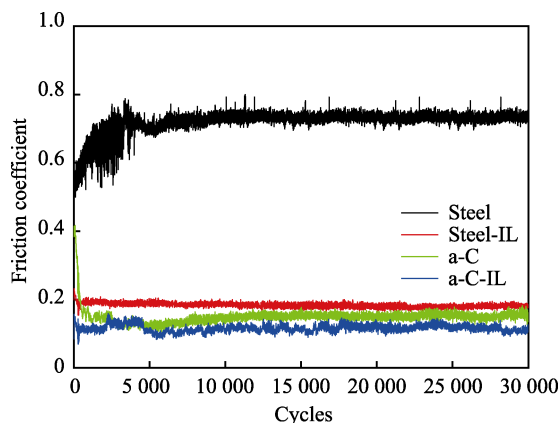


图3 四种样品在载荷 5 N、频率 5 Hz、电流 0.2 A 的条件下的摩擦曲线

Fig.3 Friction curves of the four samples under the condition of 5 N load, 5 Hz frequency and 0.2 A current

2.3 磨损表面分析

图4展示了载流摩擦测试后, Steel、Steel-IL、a-C 和 a-C-IL 四种样品磨痕的 SEM 形貌图。载流条件下, 与不锈钢球对磨, Steel 的磨痕宽度最大, 约

为 1.2 mm 左右 (见图 4a)。从磨痕形貌可以看出, 钢与钢对磨表现出明显的磨粒磨损与粘着磨损机制。离子液体显著地降低了钢的磨损, 其磨痕宽度约为 300 μm (见图 4b), 磨损机制由干摩擦条件下的磨粒磨损与粘着磨损混合机制转变为磨粒磨损机制, 粘着磨损现象消失。离子液体作为能够导电的液体润滑剂, 在钢表面的均匀涂覆使得摩擦副之间的接触更为紧密, 避免了摩擦副在摩擦过程中的电弧放电现象, 降低了摩擦表面的温度, 减轻甚至避免了粘着磨损的发生。

图 4c、d 分别为 a-C 膜与 a-C-IL 复合薄膜经载流

摩擦测试后的磨痕形貌。在载流干摩擦条件下, a-C 薄膜的磨痕宽度与深度都较小, 磨痕表面平滑, 几乎未见明显的磨屑。这说明非晶碳膜在载流条件下仍然表现出了低摩耐磨的性能, 意味着它具有作为优良的载流固体润滑涂层的潜力。对 a-C 膜与离子液体复合后进行摩擦测试, 发现其摩擦系数得到了降低, 但磨损变大, 见图 4d。在磨痕中心区域, 可以看见窄且浅的犁沟, 表现为明显的磨粒磨损现象。仔细观察磨痕边缘存在连续的堆积物, 这可能是摩擦中不断增加的磨屑与离子液体混合形成的固液粘稠混合物被挤出磨痕区域而形成的。

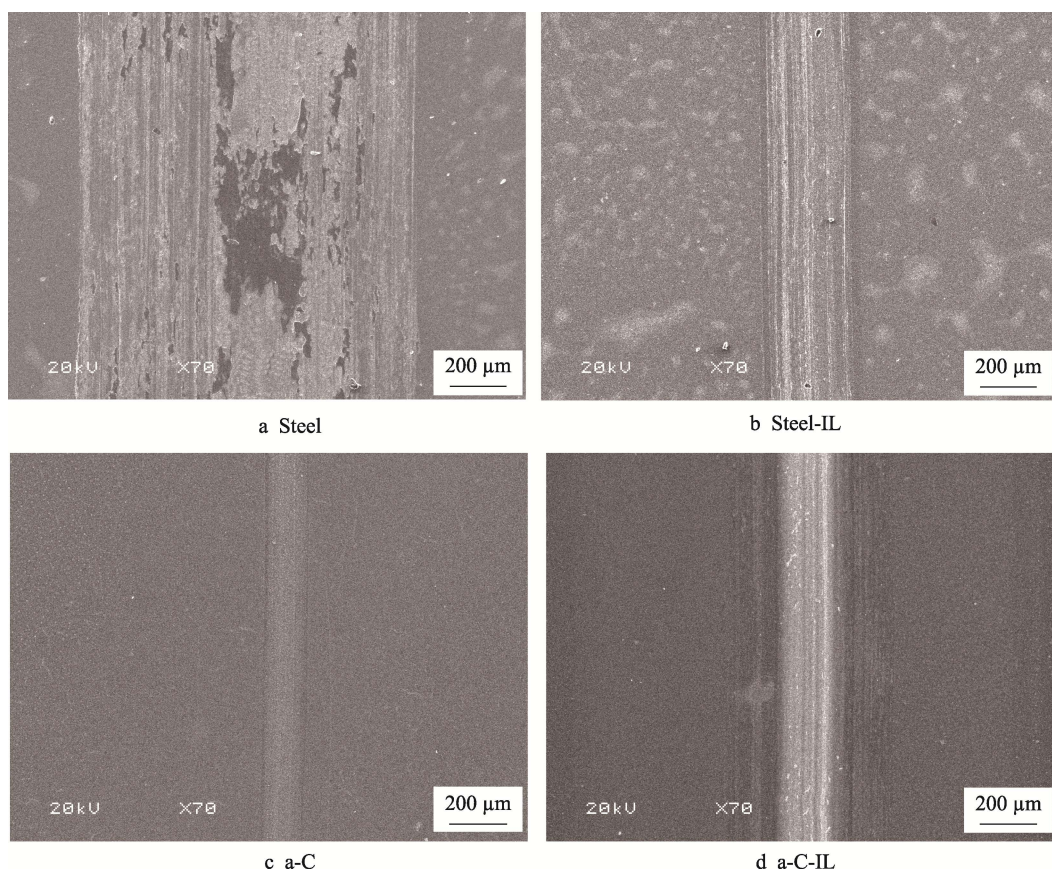


图 4 样品磨痕表面的 SEM 形貌
Fig.4 SEM of the wear traces

图 5 中的三维轮廓图进一步证实了 a-C 膜和 a-C-IL 复合薄膜的磨痕表面 SEM 观察结果。从图 5a、b 可以看出, 在载流条件下, a-C 膜的磨痕宽度约为 150 μm , 深度约为 0.3 μm 。磨痕的三维轮廓图和二维平面图均显示 a-C 膜磨痕表面平整, 仅伴随有非常轻微的磨粒磨损, 凸显了 a-C 膜优异的耐磨特征。图 5c、d 分别为经载流摩擦测试后, a-C-IL 复合薄膜磨痕的三维与二维图。样品表面附着的磨屑与离子液体混合物经超声清洗后, 三维测试清晰地展现了复合薄膜的磨痕形貌和磨损情况。从图中可以看出, 复合薄膜的磨痕中心区域宽度约为 200 μm , 深度在 0.5~0.8 μm 范围, 局部区域磨痕深度超过了 1.5 μm , 其磨

损相较 a-C 膜更为严重, 表现为明显的磨粒磨损。同时, 从图中可以看出在磨痕中心两侧约 200 μm 范围内, 具有较浅的刮擦痕迹。这应该是磨屑与离子液体形成的混合物被挤出在磨痕边缘, 在压应力作用下刮擦样品表面所致。根据 SEM 观察和三维轮廓测试, 可以确定 a-C 薄膜与离子液体复合后, 其磨损性能降低。这可能是由于离子液体的黏度较小, 在摩擦应力作用下很容易渗透进入 a-C 薄膜的纳米级微孔中, 进而在压应力作用下产生液压, 并破坏薄膜的表面结构, 产生的大尺寸磨屑与离子液体混合形成的固液复合物又很快被挤出摩擦副接触区, 而重新构建稳定的固液润滑层又需要更多的固体磨屑, 使得 a-C 薄膜的磨损增加。

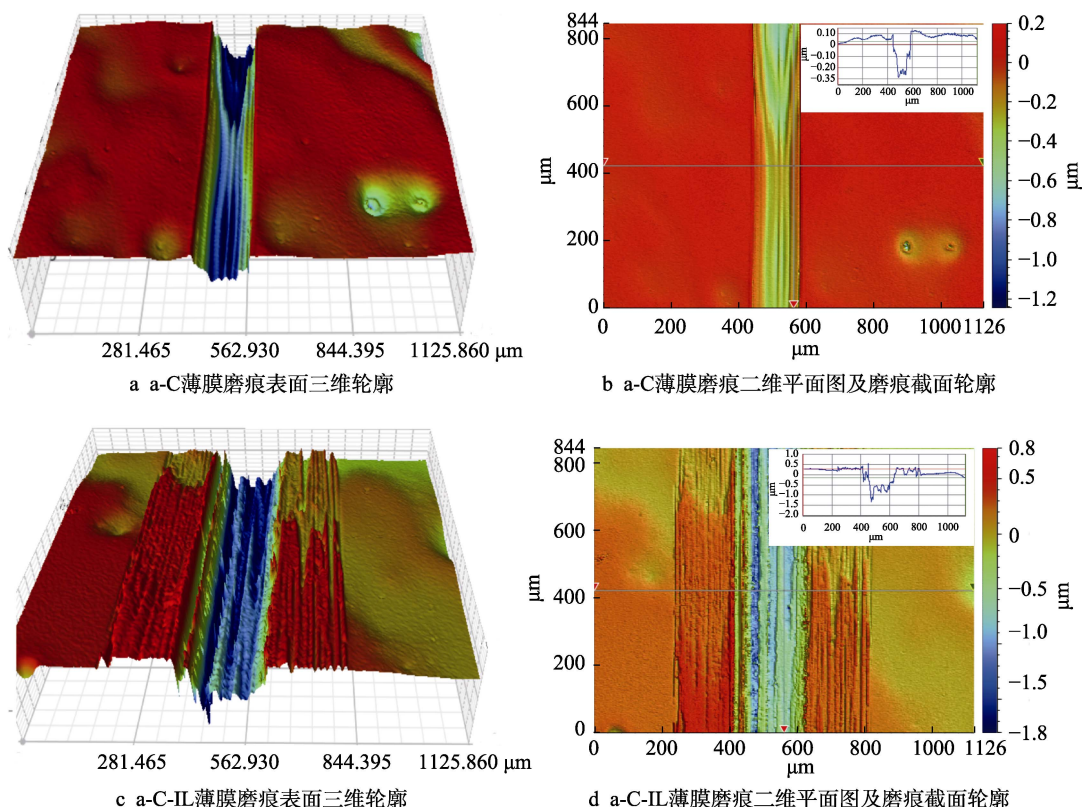


图5 a-C薄膜和a-C-IL膜的磨痕表面三维轮廓与二维平面图及磨痕截面轮廓
 Fig.5 3D profile, 2D plan images and cross section of wear traces of the a-C (a, b) and a-C-IL (c, d)

2.4 磨斑表面形貌

图6所示分别与Steel、Steel-IL、a-C膜和a-C-IL复合膜对磨后,小球磨斑的形貌。由图6a可知,与Steel对磨后,对偶小球的磨损非常大,磨斑直径约为1.2 mm,这与图4a中观察到的结果吻合。且磨斑边缘有很多细小松散的磨屑,结合磨斑区域的犁沟特征,进一步证实了磨损机制为磨粒磨损机制。从磨斑和磨痕形貌观察,均未发现明显的电弧烧蚀现象。这可能是因为一方面,载流摩擦测试中施加的直流电流小(0.2 A),对应的电压也较小;另一方面,摩擦副之间的接触面积大且紧密,在离子液体润滑条件下,磨斑尺寸显著减小。

摩擦过程中,离子液体因磨屑的产生而呈现黑色。仔细观察发现在磨斑上分布着颗粒状的磨屑,这应该是摩擦副之间磨粒磨损的主要原因。非晶碳膜不仅为基底材料提供了耐磨润滑防护,同时也减轻了对对偶材料的损伤。从图6c可以看出,与a-C薄膜对磨后,不锈钢小球的磨斑尺寸和磨损很小。磨斑表面可明显观察到一层转移膜,这应该是在摩擦过程中,a-C薄膜的磨屑转移到对偶上,形成了连续的石墨化转移膜,起到了减摩抗磨的作用。磨斑周围分布着细小的磨屑,说明多余的磨屑能够及时从摩擦接触面移出,所以a-C膜的摩擦系数低而稳定。对偶小球与a-C-IL复合润滑薄膜对磨后,在磨斑上覆盖了一层较厚的转移层,它是由摩擦过程中产生的a-C磨屑与离

子液体混合后形成的固液复合润滑层。该润滑层降低了摩擦副之间的剪切应力,表现为具有较低的摩擦系数。另外,在磨斑表面和磨斑周围分布着大量的a-C磨屑与离子液体形成的混合物,这证实了在离子液体润滑下,a-C的抗磨性能降低。另外,结果显示,在离子液体润滑下的a-C的磨屑尺寸相较于摩擦条件下更大,这种大尺寸的磨屑也证实了表面产生的磨屑并未经过长期的循环碾压就被转移出摩擦接触区。

对a-C薄膜和a-C-IL复合薄膜经摩擦测试后的磨痕和对偶磨斑做了拉曼分析,其结果如图7所示。从图7a可见,非晶碳膜在1000~1800 cm^{-1} 范围内有一个很宽的Raman峰,该宽峰特征是典型的非晶碳膜的Raman特征^[15]。通过计算机可将该宽峰拟合为两个分别以1550 cm^{-1} 和1376 cm^{-1} 附近为中心G峰(带)和D峰。G峰对应于 E_{2g} 中心震动模式,反映了环状或链状结构中成对出现的 sp^2 原子C—C键的伸展震动^[16-17]。D峰对应于 A_{1g} 对称模式震动,与石墨样品中的无序度有关。经载流摩擦测试后,a-C膜磨痕的Raman图谱特征没有变化,仍然表现为一个宽峰特征。然而对偶不锈钢球磨斑的微区Raman图谱在~1321 cm^{-1} 和~1595 cm^{-1} 左右出现了明显的D峰和G峰,这说明对偶摩擦面上已经形成了一层摩擦转移碳膜。D峰的出现说明转移膜中出现了更多的 sp^2 结构,开始出现晶化现象;而较弱的G峰强度说明这种 sp^2 结构仍然呈现为高度无序状态^[18]。结合磨痕

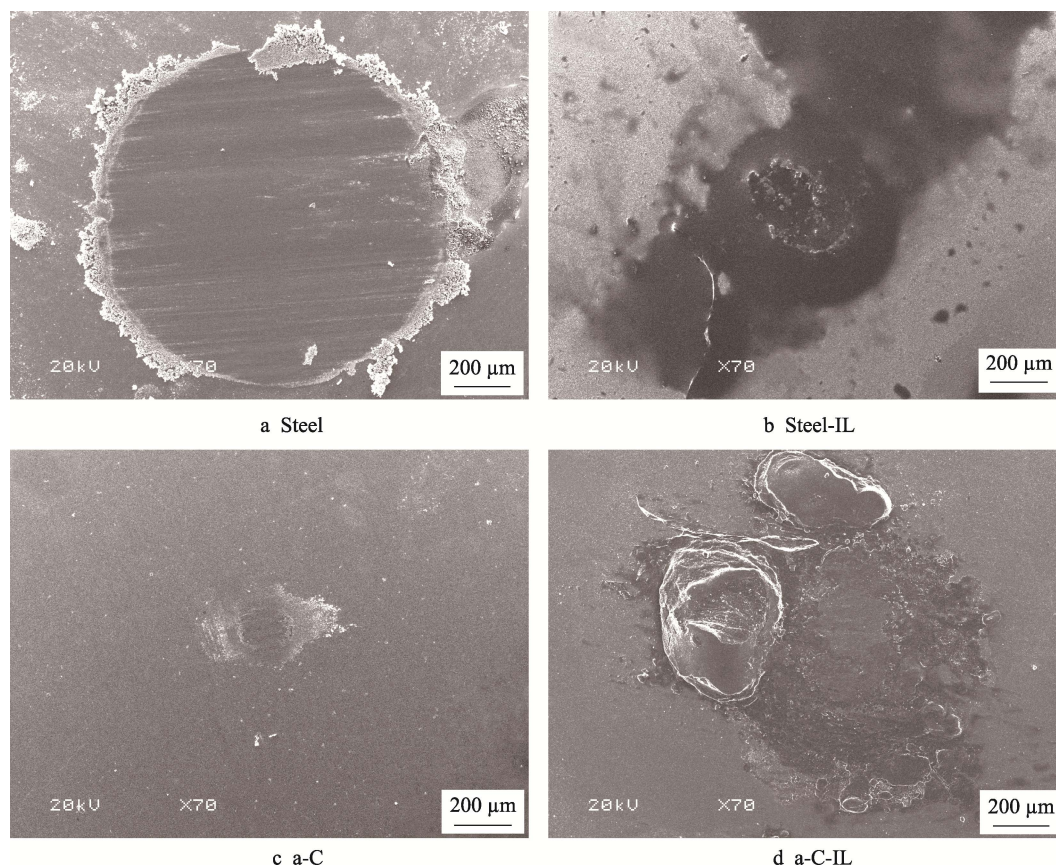


图 6 分别与 Steel、Steel-IL、a-C 和 a-C-IL 对磨后不锈钢球表面磨斑的 SEM 形貌
Fig.6 SEM of wear scar of the steel ball sliding against Steel, Steel-IL, a-C and a-C-IL

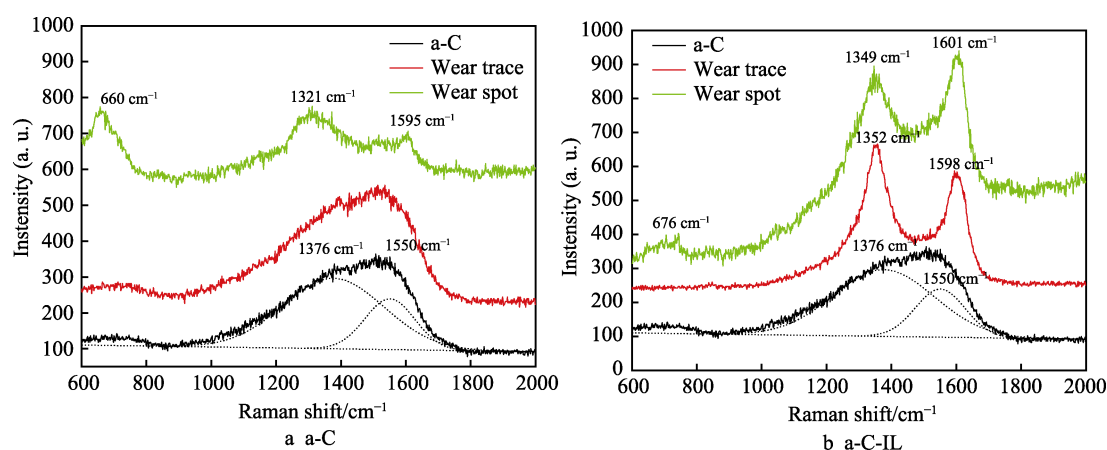


图 7 a-C 和 a-C-IL 经载流摩擦测试后的磨痕和磨斑的拉曼光谱
Fig.7 Raman spectrum of wear trace and wear scars of a-C and a-C-IL after current-carrying friction test

表面 Raman 结果,说明在载流摩擦测试过程中,法向应力协同电流作用将促使 a-C 薄膜表面石墨化,而石墨化 a-C 材料又在摩擦剪切作用下快速地转移到对偶钢球上,形成稳定的摩擦转移膜,有效地降低了摩擦系数。此外在 $\sim 660\text{ cm}^{-1}$ 附近还有一个氧化铁的特征峰,说明对偶钢球在载流摩擦测试中发生了摩擦化学反应^[19]。

图 7b 的 Raman 光谱反映了在离子液体润滑下, a-C 膜经载流摩擦测试后,磨痕与磨斑表面碳材料的结构变化。磨痕与磨斑表面的 Raman 光谱中都分别

出现了以 $\sim 1352\text{ cm}^{-1}$ 和 $\sim 1598\text{ cm}^{-1}$ 为中心,相较于干摩擦条件下峰强更高,半峰宽更窄的 D 峰和 G 峰。分峰特征表明 a-C 薄膜材料发生了明显的石墨化现象。在磨痕表面的 Raman 图谱中, D 峰较窄,且其强度高于 G 峰。而在磨斑表面的 Raman 图谱中, D 峰半峰宽较大,略高与 G 峰。两者相似的 G 峰特征表明载流摩擦过程中,碳材料中 sp^2 结构的短程有序网络结构逐渐向长程有序化转变,晶化作用增强。而不同 D 峰特征则说明磨痕表面的碳材料相较于磨斑 sp^2 结构增多,石墨化更为严重。石墨化增强的 a-C 材料

与离子液体在摩擦副之间形成固液复合润滑层,进一步降低了 a-C 薄膜的摩擦系数,同时因为离子液体的引入,使得 a-C 材料更容易与离子液体复合,而转移到对偶表面,进而在摩擦作用下挤出磨痕区域,这又降低了材料的耐磨损性能。

3 结论

本文主要研究了 a-C 薄膜在干摩擦和离子液体润滑下的载流摩擦磨损行为特点,主要得到以下结论:

1) 在干摩擦载流条件下,钢-钢摩擦副的摩擦系数大,磨损严重,表现为严重的磨粒磨损,并伴随轻微的粘着磨损。离子液体可以明显降低钢-钢摩擦副的摩擦系数和磨损率,磨损机制为磨粒磨损。

2) 在干摩擦载流条件下, a-C 薄膜可以为电接触材料提供良好的润滑与耐磨保护。在与不锈钢对磨中,其表面结构未发生明显变化,但磨屑形成的转移膜发生了石墨化,其磨损机制表现为轻微的磨粒磨损。

3) 在载流摩擦条件下, a-C-IL 固液复合薄膜具有比 a-C 膜更低的摩擦系数,但是其耐磨性能不如 a-C 膜。在与不锈钢对磨中,其固相 a-C 薄膜结构被破坏,形成的磨屑与 IL 形成固液复合润滑层,虽然降低了摩擦系数,但其更容易被挤出摩擦接触区,因此需要重新构建稳定的固液复合润滑层,这就要求摩擦接触面产生更多的磨屑,从而使磨损率增加。

参考文献:

- [1] 张永振, 宋克兴, 杜三明, 等. 载流摩擦学[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 182-231.
ZHANG Yong-zhen, SONG Ke-xing, DU San-ming, et al. Current carrier tribology[M]. Beijing: Science press, 2016: 182-231.
- [2] 李镇隆, 梁江, 王肖铮, 等. 自润滑电接触材料与电刷滑环元件[J]. 电工材料, 2008(1): 25-27.
LI Zhen-long, LIANG Jiang, WANG Xiao-zheng, et al. Self-lubricating electrical contact material and brush slip ring element[J]. Electrical engineering materials, 2008(1): 25-27.
- [3] 崔春翔, 赵晓宏, 徐华, 等. 碳纤维-铜复合材料研究[J]. 河北工业大学学报, 2002, 31(6): 43-48.
GUI Chun-xiang, ZHAO Xiao-hong, XU Hua, et al. Study and development of carbon fiber reinforced copper matrix composites[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2002, 31(6): 43-48.
- [4] 张雷, 周科朝, 刘文胜. 梯度结构 Ag-Cu-MoS₂ 电刷材料的制备及性能[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(11): 1766-1769.
ZHANG Lei, ZHOU Ke-chao, LIU Wen-sheng, et al. Preparation and properties of Ag-Cu-MoS₂ brush materials[J]. The chinese journal of nonferrous metals, 2005, 15(11): 1766-1769.
- [5] 袁青, 李兵虎, 童文俊, 等. 铜石墨复合材料改性研究进展[J]. 材料导报, 2004(11): 47-49.
- [6] YUAN Qing, LI Bing-hu, TONG Wen-jun, et al. Progress of studying modifying copper/graphite composite[J]. Materials review, 2004(11): 47-49.
钱刚, 凤仪, 张学斌. 铜基自润滑电接触复合材料研究综述[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 7-12.
QIAN Gang, FENG Yi, ZHANG Xue-bin, et al. Review on research of Cu-based self-lubricating electrical contact composites[J]. Surface technology, 2016, 45(1): 7-12.
- [7] ERDEMIR A, ERYILMAZ O L, NILUFER I B, et al. Synthesis of superlow-friction carbon films from highly hydrogenated methane plasmas[J]. Surface and coatings technology, 2000, 133-134: 448-454.
- [8] WANG Y, WANG L, XUE Q. Improving the tribological performances of graphite-like carbon films on Si₃N₄ and SiC by using Si interlayers[J]. Applied surface science, 2011, 257: 10246-10253.
- [9] BABA K, HATADA R. Preparation and properties of metal containing diamond-like carbon films by magnetron plasma source ion implantation[J]. Surface and coatings technology, 2002, 158-159: 373-376.
- [10] LIU X, WANG L, XUE Q. Surface composition variation and high-vacuum performance of DLC/ILs solid-liquid lubricating coatings: Influence of space irradiation[J]. Applied surface science 2012, 258(20): 8289-8297.
- [11] GAHR K H M, MATHIEU M, BRYLKA B. Friction control by surface engineering of ceramic sliding pairs in water[J]. Wear, 2007, 263(7-12): 920-929.
- [12] LIU X, WANG L, XUE Q. A novel carbon-based solid-liquid duplex lubricating coating with super-high tribological performance for space applications[J]. Surface and coatings technology, 2011, 205(8/9): 2738-2746.
- [13] 宇文飞燕, 闻小琴, 张武, 等. 自配副铜的离子液体-化学镀银膜复合润滑[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 145-150.
YUWEN Fei-yan, WEN Xiao-qin, ZHANG Wu, et al. Synergistic lubrication of self-mated Cu by ionic liquid-electroless Ag film[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 145-150.
- [14] VENIER C G, CASSERLY E W. Lubricants comprising novel cyclopentanes cyclopentadienes, cyclopentenenes and mixtures thereof and methods of manufacture: United States, 5, 012, 023[P]. 1991.
- [15] PISCANEC S, MAURI F, FERRARI A C, et al. Ab initio resonant raman spectra of diamond-like carbons[J]. Diamond and related materials, 2005, 14: 1078-1083.
- [16] CHU P K, LI L. Characterization of amorphous and nanocrystalline carbon films[J]. Materials chemistry and physics, 2006, 96: 253-277.
- [17] PARK S J, KIM J K, LEE K R, et al. Humidity dependence of the tribological behavior of diamond-like carbon films against steel ball[J]. Diamond and related materials, 2005, 12 (9): 1517-1523.
- [18] RONKAINEN H, VARJUS S, KOSKINEN J, et al. Differentiating the tribological performance of hydrogenated and hydrogen-free DLC coatings[J]. Wear, 2001, 249(3-4): 260-266.
- [19] SÁNCHEZ-LÓPEZ J C, ERDEMIR A, DOMMET C, et al. Friction-induced structure transformations of diamondlike carbon coatings under various atmospheres[J]. Surface and coatings technology, 2003, 163-164: 444-450.