

温度电场耦合下纳米结构碳膜的摩擦学特性及机理

余植敏 陈磊 范雪*

深圳大学机电与控制工程学院,深圳,518060

摘要:在SiO₂基体上分别制备了纳米结构(非晶及石墨烯纳晶)碳膜,利用自主设计的多物理场耦合往复摩擦学实验装置,研究了不同纳米结构的碳膜在温度电场耦合作用下的摩擦学特性。室温下,纳米结构碳膜摩擦因数的主要影响因素为电场;摩擦副温度为200℃时,纳米结构碳膜摩擦因数的主要影响因素为温度。温度电场耦合作用下,非晶碳膜的纳米结构向纳晶结构转化,摩擦因数减小;石墨烯纳晶碳膜结构稳定,但碳膜磨损加剧导致摩擦因数波动较大。

关键词:碳膜;摩擦学特性;纳米结构;温度;电场

中图分类号:TH117.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Tribological Properties and Mechanism of Nanostructured Carbon Films under Coupling Effect of Temperature and Electric Field

YU Zhimin CHEN Lei FAN Xue*

College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong, 518060

Abstract: The nanostructured carbon films including amorphous carbon films and graphene nanocrystalline carbon films were prepared on SiO₂ substrates. A self-designed reciprocating tribometer capable for applying coupled multi-physical fields was employed to investigate the tribological properties of the different nanostructured carbon films under the coupling effect of temperature and electric field. At room temperature, the electric field was the dominant factor for affecting the friction coefficient of nanostructured carbon films. When the temperature of tribopair was 200℃, temperature became the main influencing factor. Under the coupling effects of temperature and electric field, the structured evolution to graphitic-like structure leads the reduction of friction coefficient of amorphous carbon film. While the nanostructure of graphene nanocrystalline carbon film is stable, but the aggravated wear results in significant fluctuations of friction coefficient.

Key words: carbon film; tribological property; nanostructure; temperature; electric field

0 引言

纳米结构碳膜在气门挺柱^[1]、轴承^[2]、刀具表面^[3]保护等领域具有广阔的应用前景。在高铁受电弓、机电系统^[4-5]应用中,摩擦接触界面不仅受电流影响,还受温度影响。

环境温度较为极端时,由于氧化和石墨化等原因^[6-8],纳米结构碳膜的摩擦学特性会发生急剧的恶化,因此,提高纳米结构碳膜在高温下的稳定性成为研究热点。目前主要采用元素掺杂、多层结构来提高纳米碳膜的高温摩擦性能^[9-11]。WANG等^[12]发现Si、N元素共掺杂可提高类金刚石涂层在高温下的热稳定性和力学性能。ZOU等^[13]发现重掺杂(13.8%的Ti、12.6%的Si)的类金刚石薄膜高温摩擦学特性最好,耐磨性也明显

提高。YU等^[14]研究了不同Si含量的类金刚石薄膜与钨中间层结合的涂层,发现该涂层在高温下会形成具有润滑作用的钨氧化物和碳化物的复合膜,进而减小摩擦因数。

对纳米碳膜的载流摩擦学特性研究集中在利用表面涂层和润滑技术提高纳米碳膜的载流摩擦性能^[15]。XUE等^[16]提出一种将纳米碳膜均匀覆盖在轴承球表面的方法,并发现施加电流时,滑动界面会形成氧化物和石墨烯纳米晶体,减少摩擦磨损。WANG等^[17]研究了雨水条件下的不同电流对C-Cu接触的载流摩擦学特性,发现雨水具有冷却、润滑和阻碍电流传导的作用。有学者还通过改变载流摩擦过程中的电流方向,研究了纳米碳膜的载流摩擦磨损性能。SUN等^[18]研究了在非晶碳膜和钢球的摩擦界面施加垂直电流时纳米碳膜的摩擦学特性,发现磨合周期几乎为零,摩擦因数减小一个数量级。YANG等^[19]研究了在

收稿日期:2025-05-27

基金项目:国家自然科学基金(51975382)

非晶碳膜和钢球的摩擦界面施加水平电流时纳米碳膜的摩擦学特性,发现电流方向与滑动方向不垂直时,摩擦因数大幅减小,碳膜磨损率更小。

以上研究表明,掺杂元素、添加多层结构等方式可使纳米碳膜具有较好的高温摩擦学性能;采用表面涂层与润滑技术,改变载流摩擦过程中电流的方向可使纳米碳膜具有较好的载流摩擦学性能。但以上研究集中在非晶碳膜,且实验针对温度或电场的单一因素,非晶碳膜、石墨烯纳晶碳膜在温度电场耦合作用下的摩擦学性能还鲜有研究。

为此,本文采用电子回旋共振等离子体溅射装置,在SiO₂基片上分别制备了非晶碳膜和石墨烯纳晶碳膜,利用自行搭建的温度电场耦合摩擦学特性测量装置研究了纳米结构碳膜在温度电场耦合作用下的摩擦磨损性能。采用光学显微镜、拉曼光谱仪、透射电子显微镜表征纳米结构碳膜在温度电场耦合作用下的摩擦界面,分析其摩擦学特性,并阐明其摩擦机理。

1 试验

1.1 纳米结构碳膜制备

采用电子回旋共振等离子体溅射装置制备厚115 nm的两种碳膜,其中,使用发散式离子照射制备非晶碳膜,使用封闭式电子照射制备石墨烯纳晶碳膜。制备前,清洗基片并将其固定在基片架上,待本底真空度达到 8×10^{-5} Pa后,充入氩气直至工作气压。采用-50V偏压对基片表面进行等离子溅射,去除表面氧化层。发散式离子照射和封闭式电子照射的具体镀膜参数分别见表1、表2。

表1 发散式离子照射纳米碳膜的制备参数

Tab.1 Preparation parameters of nanostructured carbon films by divergent ion irradiation

参数	数值	参数	数值	
基片材料	P型SiO ₂	基片尺寸/mm	25×25	
工作气体	氩气	工作气压/Pa	0.07	
靶材偏压/V	-500	基片偏压/V	-5	
线圈电流/A	左	32	微波功率/W	350
	中	34		
	右	0	沉积时间/min	50

1.2 纳米结构碳膜的表征

利用Titan3 Themis G2型透射电子显微镜(TEM)在加速电压80 kV、电流密度 9.6×10^4 A/m²、曝光时间0.5 s条件下表征碳膜纳米结构;利用Axis Ultra DLD型X射线光电子能谱仪(XPS)表征碳膜表面,分析其表面化学态;利用四

表2 封闭式电子照射纳米碳膜制备参数

Tab.2 Preparation parameters of nanostructured carbon films by closed electron irradiation

参数	数值	参数	数值	
基片材料	P型SiO ₂	基片尺寸/mm	25×25	
工作气体	氩气	工作气压/Pa	0.07	
靶材偏压/V	-500	基片偏压/V	50	
线圈电流/A	左	40	微波功率/W	256
	中	40		
	右	48	沉积时间/min	25

探针测试仪测量碳膜的方块电阻。碳膜的电阻为

$$R = \rho l_1 / (d l_2)$$

式中:R为碳膜的电阻; ρ 为碳膜的电阻率; l_1 为平行于电流方向的碳膜长度; d 为碳膜的厚度; l_2 为垂直于电流方向的碳膜长度。

1.3 温度电场耦合摩擦测试

使用自主设计的摩擦学实验装置进行温度电场耦合摩擦测试。如图1所示,采用三坐标位移台控制悬臂梁在X、Y、Z轴的位置;采用温控仪加热摩擦界面,采用红外温度传感器测量温度;选用往复式电动位移台控制平台运动;为测试电场作用下的碳膜,采用直流电源对样品施加平行于滑动方向的水平电场;氮化硅陶瓷球固定在悬臂梁的铝合金球套中,利用砝码施加法向载荷;采用应变片测量摩擦过程中悬臂梁的切向力与法向力。

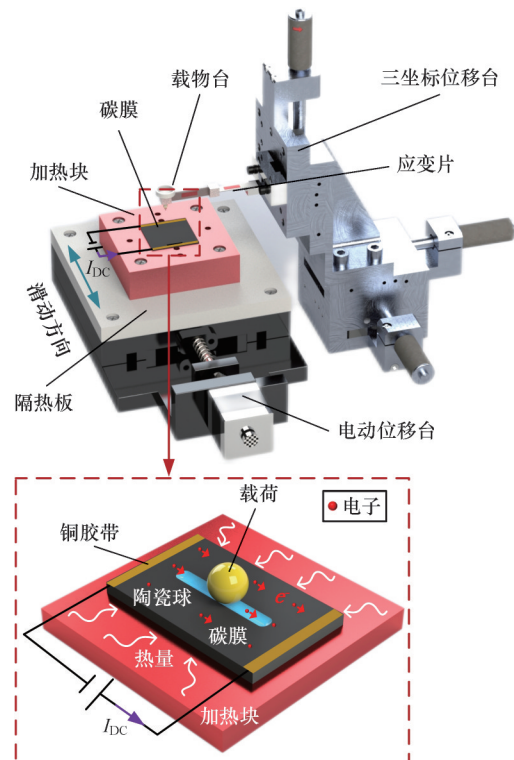


图1 温度与电场耦合摩擦实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature and electric field coupled tribometer

实验选用 25 mm×25 mm 的纳米结构碳膜、直径 1.6 mm 的氮化硅陶瓷球；法向载荷为 0.1 N，滑动速度为 1.5 mm/s，滑动行程为 3 mm，摩擦实验时间 0.5 h(450 圈)；环境温度为 22 ℃，湿度为 60%~70%。实验过程中，调节温控仪使摩擦界面温度分别为室温(22 ℃)和 200 ℃，并在每个温度下分别施加 0、0.03 A、0.05 A、0.07 A 的电流，每组实验重复 5 次，以减小实验误差。

1.4 摩擦界面及碳膜表征

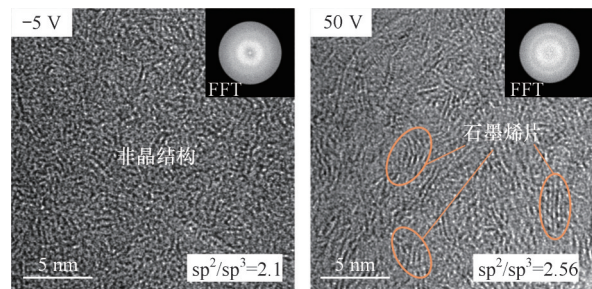
使用光学显微镜对碳膜表面磨痕及转移膜进行光学表征；采用 LabRAM HR Evolution 型拉曼光谱仪，在激光波长 532 nm、聚焦光斑直径 1 μm、物镜倍数 100 的条件下表征转移膜与碳膜；利用 Titan3 Themis G2 型 TEM，在加速电压 80 kV、电流密度 9.6×10^4 A/m²、曝光时间 0.5 s 条件下表征非晶碳膜表面。

2 结果与讨论

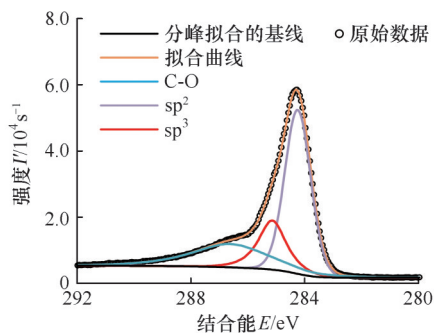
2.1 纳米结构碳膜的表征

2.1.1 碳膜纳米结构的表征

图 2 为不同纳米结构碳膜的 TEM 平面样图像。图 2a 为基片偏压 $U=-5$ V 碳膜的 TEM 图像，图中的碳原子无序排列，右上角的快速傅里叶变化(FFT)插图显现离散的非晶相，说明该碳膜为非晶碳膜。图 2b 为基片偏压 $U=50$ V 碳膜的



(a) 基片偏压 -5 V 碳膜 (b) 基片偏压 50 V 碳膜



(c) C 1s 峰的 XPS 能谱

图 2 纳米结构碳膜的 TEM 表面样图像及 C 1s 峰的 XPS 能谱

Fig.2 Plan-view TEM images and XPS spectrum of C 1s of nanostructured carbon films

TEM 图像，碳膜内部存在较多大尺寸的石墨烯片，从 FFT 插图可看到衍射光环，这表明该碳膜为石墨烯纳晶碳膜。采用分峰拟合法对 XPS 全谱图的 C1s 峰进行解谱，如图 2c 所示。进一步处理得到纳米结构碳膜中 sp^2 键和 sp^3 键的相对含量，非晶碳膜的 sp^2/sp^3 为 2.09，石墨烯纳晶碳膜的 sp^2/sp^3 为 2.55，高于非晶碳膜，说明石墨烯纳晶碳膜 sp^2 纳晶含量更高，与表征结果相符。

2.1.2 碳膜电学性能表征

利用四探针法测试得到的纳米结构碳膜方块电阻和电阻率如表 3 所示。非晶碳膜的方块电阻为 1.61 kΩ/sq，电阻率为 $1.85 \times 10^{-4} \Omega \cdot m$ 。含有较多 sp^2 杂化结构的石墨烯纳晶碳膜导电性较好，其方块电阻为 0.72 kΩ/sq，电阻率为 $0.83 \times 10^{-4} \Omega \cdot m$ 。

表 3 不同纳米结构碳膜方块电阻的测试结果

Tab.3 Test results of sheet resistance for different nanostructured carbon films

基片偏压/V	薄膜厚度/nm	方块电阻/(kΩ/sq)	电阻率/($10^{-4}\Omega \cdot m$)
-5	115	1.61	1.85
50	115	0.72	0.83

2.2 温度电场耦合作用下纳米碳膜的摩擦行为

2.2.1 室温与电场耦合作用下的摩擦行为

碳膜载流时，其表面温度上升，为确定实验过程中不同电流下的碳膜表面温度，每隔 5 min 记录一次碳膜表面(施加不同电流)温度，并将稳定阶段的温度均值作为摩擦实验过程中碳膜表面的温度。由图 3 可知，两种碳膜的表面温度均随电流的增大而升高，电流为 0.07 A 时，非晶碳膜表面温度达到最大值 41 ℃，石墨烯纳晶碳膜表面温度达到最大值 39 ℃。通入相同大小的电流时，非晶碳膜的表面温度均高于石墨烯纳晶碳膜的表面温度，这是因为非晶碳膜的电阻率较大，通入相同大小的电流时，非晶碳膜产生的热量更多。

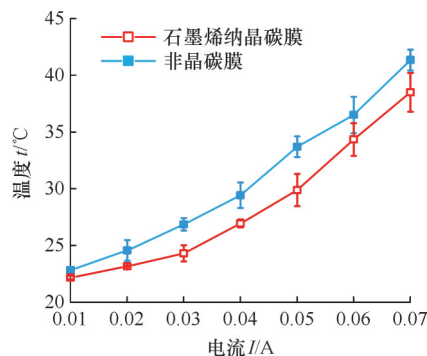


图 3 室温电场耦合作用下纳米结构碳膜的表面温度
Fig.3 Surface temperature of nanostructured carbon films with different electric fields under room temperature

图4为纳米结构碳膜在室温电场耦合作用下的摩擦曲线及平均摩擦因数曲线。由图4可知,当电流由0增大到0.07 A时,非晶碳膜的平均摩擦因数由0.110减小到0.053。电流为0.03 A时,碳膜表面温度约为27℃,与室温较为接近,平均摩擦因数为0.075,相较于室温下电流为0的摩擦因数0.11减小了32%,说明电场作用下电子对摩擦界面的影响较大。石墨烯纳晶碳膜的电流由0增大到0.07 A时,其平均摩擦因数由0.057增大到0.116,增大了103%,表明电场对摩擦界面的影响较大。

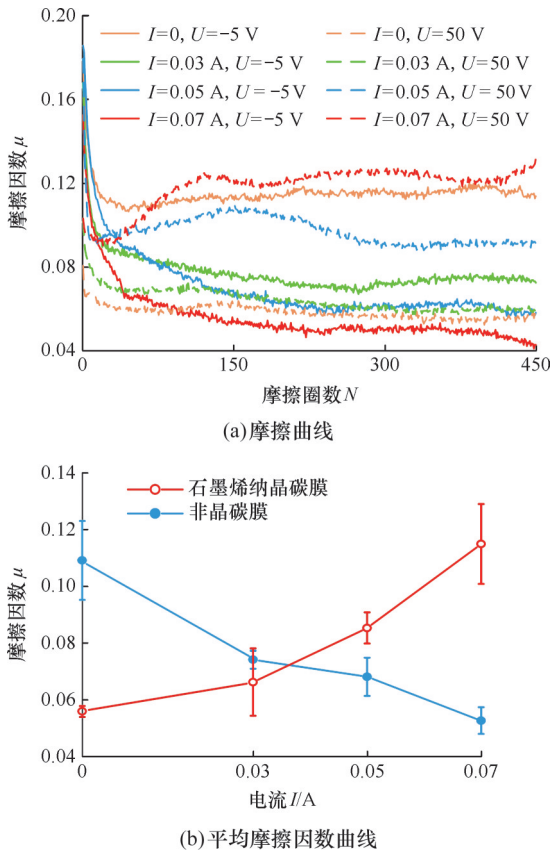


图4 室温电场耦合作用下纳米结构碳膜摩擦曲线及平均摩擦因数曲线

Fig. 4 Friction curves and average friction coefficient curves of nanostructured carbon films with different electric fields under room temperature

为进一步了解室温电场耦合作用下温度、电场对摩擦因数的影响,在法向载荷0.1 N、滑动速度1.5 mm/s、滑动行程3 m下进行了4种条件的摩擦实验,其中,摩擦前加热指实验前给碳膜加热30 min,然后关闭智能温控仪,再进行摩擦实验;摩擦前通电指实验前给碳膜通入电流30 min,然后关闭直流电源,再进行摩擦实验;摩擦时加热指在实验过程中持续给碳膜加热;摩擦时通电指在实验过程中持续给碳膜通入电流。图5为碳膜在

4种条件下的摩擦因数曲线。由图5a、图5b可知,非晶碳膜在不同条件下的摩擦因数均减小。摩擦时加热条件下,碳膜的摩擦因数随着温度的升高而减小,温度由22℃升高到41℃时,摩擦因数由0.11减小到0.068,减小了38%。摩擦时通电条件下,碳膜的摩擦因数随电流的增大而减小,电流由0增大到0.07 A时,摩擦因数由0.11减小到0.053,减小了52%。上述结果表明在电场作用下,碳膜表面不仅受温度影响,还受流过碳膜表面

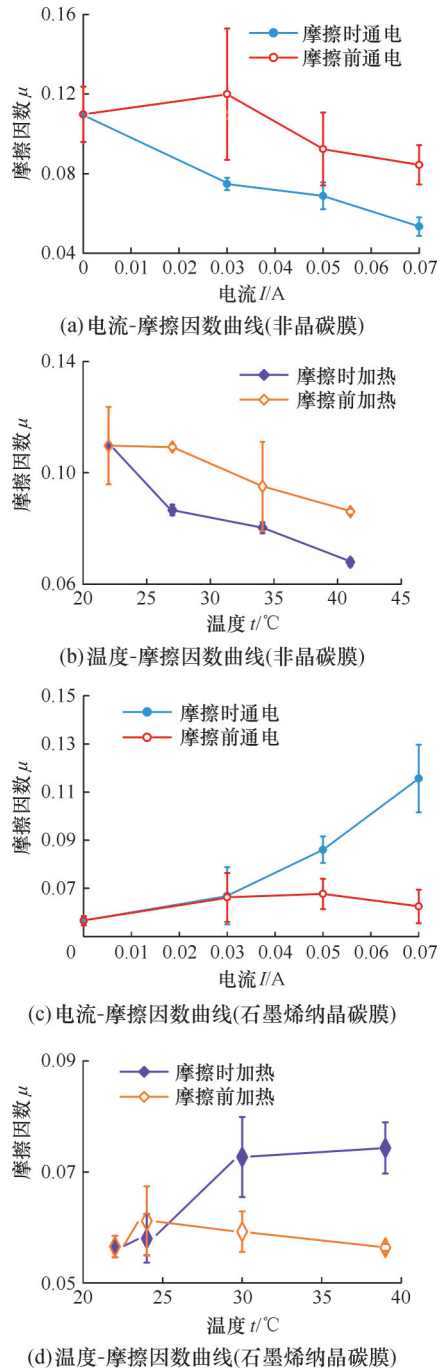


图5 纳米结构碳膜在四种温度和电场条件下的摩擦因数曲线

Fig.5 Friction coefficient curves of nanostructured carbon films under four temperature and electric field conditions

的电子作用,导致摩擦因数的减小幅度更大,摩擦因数更小。摩擦前加热或通电情况下,电流由0增大到0.07 A时,碳膜的摩擦因数减小,但减小的幅度较小。由图5c、图5d可知,石墨烯纳晶碳膜在4种条件下的摩擦因数均增大。摩擦时加热条件下,碳膜表面温度从22℃升至39℃时,摩擦因数由0.057增至0.074,增大了29.8%;摩擦时通电条件下,电流由0增大到0.07 A时,温度从22℃升至39℃,摩擦因数由0.057增至0.116,增大了103%。摩擦前加热或通电情况下,电流由0增大到0.07 A时,碳膜的摩擦因数变化较小。由此可知,水平流过的电子对石墨烯纳晶碳膜摩擦界面的影响较大,导致石墨烯纳晶碳膜的摩擦因数急剧增大。综上所述,在室温电场耦合作用下,稳定摩擦阶段的纳米结构碳膜摩擦因数的主要影响因素为电场。

2.2.2 高温电场耦合作用下的摩擦行为

图6为碳膜在高温电场耦合作用下的摩擦曲线及平均摩擦因数曲线。由图6a、图6b可知,温度为200℃时,随着电流的增大,非晶碳膜摩擦的磨合圈数及稳定阶段的平均摩擦因数均增大。电流由0增至0.07 A时,摩擦因数由0.016增至0.037。电流为0时,摩擦界面的温度由室温22℃增加至200℃,摩擦因数从0.11减小到0.016,降低了86%左右,降低幅度接近仅加电摩擦电流由0增至0.07 A降低幅度的2倍。这说明在高温(200℃)条件下,非晶碳膜的摩擦因数同时受温度和电场影响,但此时的摩擦因数主要影响因素为温度。由图6c可知,对于石墨烯纳晶碳膜,当温度为200℃时,施加电流后,碳膜摩擦的磨合期较短,快速进入稳定摩擦阶段,但随着电流的增大,在摩擦圈数超过200后,摩擦曲线的波动逐渐增大。稳定摩擦阶段的平均摩擦因数结果如6d所示,可以看到,随着电流的增大,摩擦因数基本保持不变,说明在高温(200℃)条件下,石墨烯纳晶碳膜稳定阶段的摩擦因数基本不受电场影响,此时的主要影响因素为温度。综上所述,在高温电场耦合作用下,纳米结构碳膜稳定摩擦阶段的摩擦因数的主要影响因素为温度。

2.3 摩擦界面表征

2.3.1 室温电场耦合作用

图7为室温电场耦合作用下纳米结构碳膜对磨球上转移膜的光镜图。由图7a可知,非晶碳膜对磨球上的转移膜面积较小,薄而稀疏;由图7b可知,石墨烯纳晶碳膜对磨球上的转移膜面积随电流的增大而增大,但无法形成大面积均匀且厚

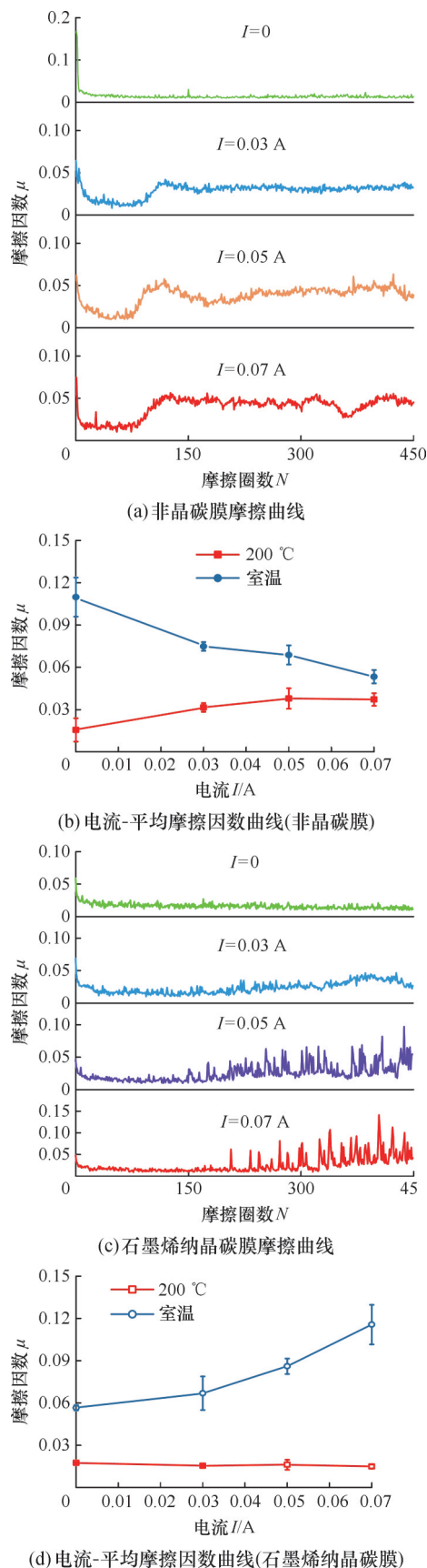


图6 高温(200℃)电场耦合作用下纳米结构碳膜的摩擦曲线及平均摩擦因数曲线

Fig. 6 Friction curves and average friction coefficient curves of nanostructured carbon films with different electric fields under temperature of 200 °C

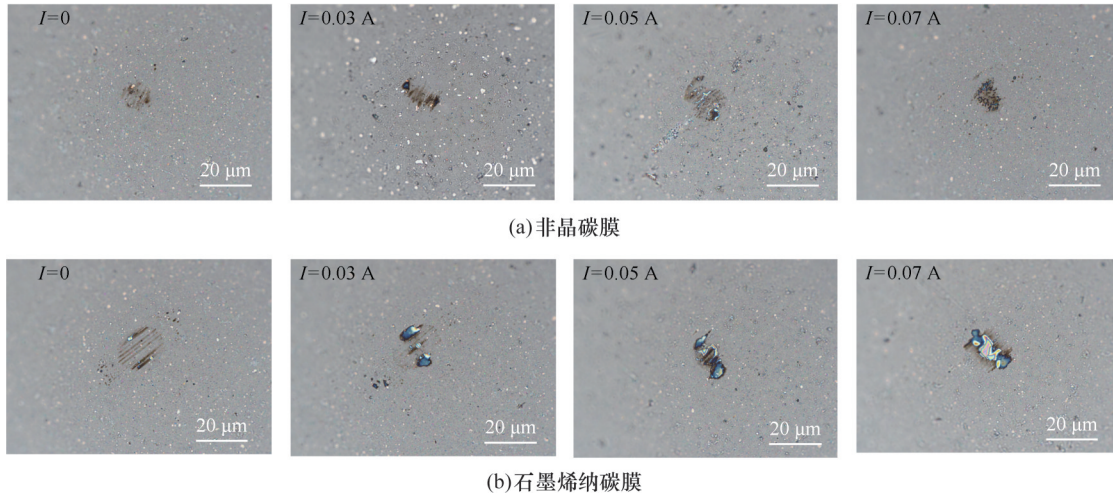


图7 室温电场耦合作用下纳米结构碳膜对磨球转移膜光镜图

Fig.7 Optical images of transfer films with different electric fields under room temperature

实的转移膜。

图8为室温电场耦合作用下电流0.07 A的纳米结构碳膜对磨球上转移膜的拉曼光谱图。由图

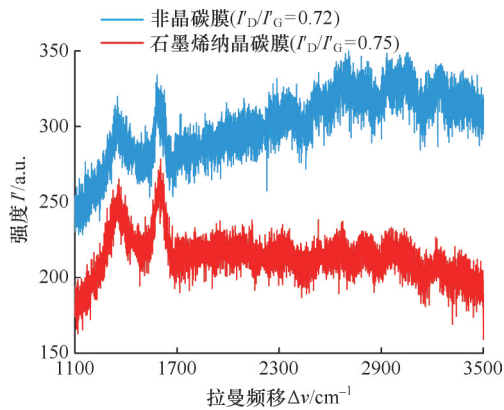


图8 室温电场耦合作用下纳米结构碳膜对磨球转移膜在电流为0.07A时的拉曼光谱图

Fig.8 Raman spectra of transfer films at a current of 0.07 A under room temperature

8可知,两种碳膜对应转移膜D峰和G峰的强度比 I_D/I_G 均较小,说明此时两种碳膜对应的转移膜均为非晶结构。

图9为室温电场耦合作用下不同纳米结构碳膜的磨痕光镜图。由图9a可看出,随着电流的增大,非晶碳膜磨痕宽度 w 由 $22\ \mu\text{m}$ 减小到 $15\ \mu\text{m}$,说明碳膜和对磨球的接触面积逐渐减小,摩擦因数减小;由图9b可看出,随着电流的增大,石墨烯纳晶碳膜的磨痕宽度由 $17\ \mu\text{m}$ 增大到 $27\ \mu\text{m}$,说明碳膜和对磨球的接触面积逐渐增大,摩擦因数增大。

2.3.2 高温电场耦合作用

图10为高温电场耦合作用下不同碳膜对磨球转移膜的光镜图。由图10a可知,非晶碳膜对磨球上的转移膜面积较小,薄而稀疏;由图10b可知,石墨烯纳晶碳膜对磨球上的转移膜面积较大,厚而密集。电流为0和0.03 A时,石墨烯纳晶碳

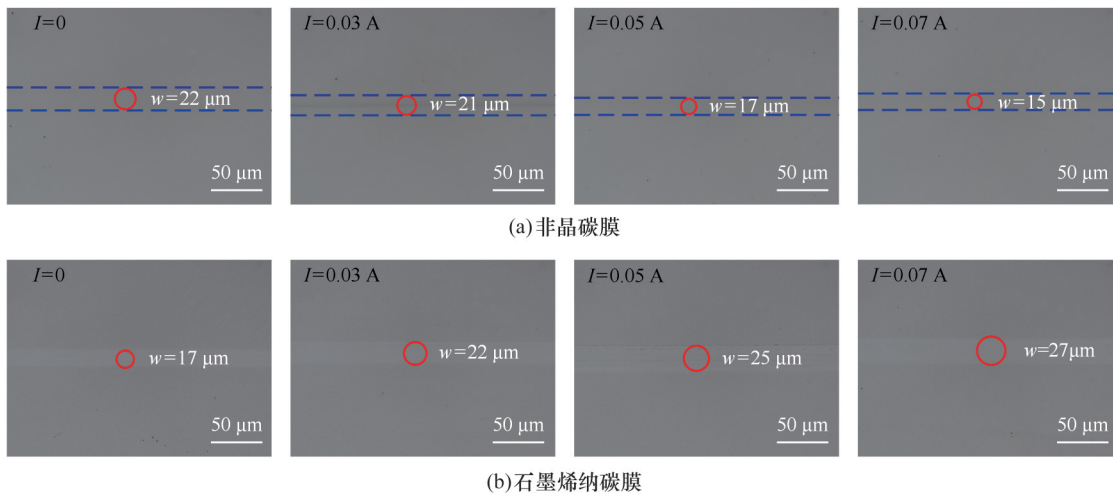


图9 室温电场耦合作用下纳米结构碳膜表面磨痕图

Fig.9 Optical images of wear tracks on the nanostructured carbon films with different electric fields under room temperature

膜对磨球上的转移膜边缘有少量的磨屑堆积,摩擦因数较小;电流为0.05 A、0.07 A时,石墨烯纳晶碳膜对磨球上的转移膜边缘有大量的磨屑堆

积。磨屑的大量堆积是摩擦曲线在摩擦圈数超过200后波动较大的原因。

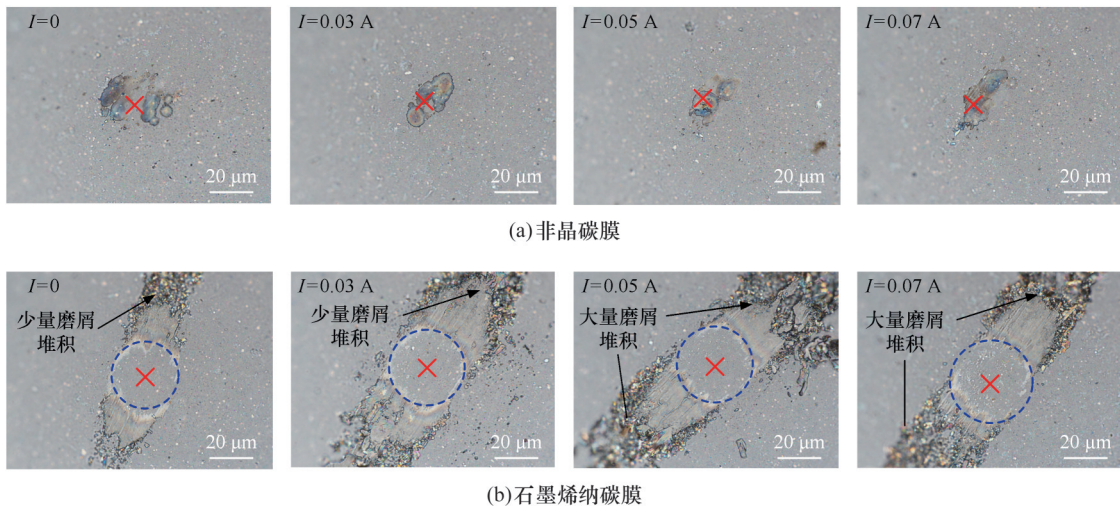


图10 高温(200°C)电场耦合作用下对磨球转移膜光镜图

Fig.10 Optical images of transfer films with different electric fields under temperature of 200°C

图11为高温电场耦合作用下不同碳膜对磨球转移膜的拉曼光谱图,对拉曼光谱进行分峰后得到碳膜的D峰和G峰,进一步计算得到D峰和G峰的强度比 I_D/I_G 。温度为200°C,电流为0、0.03 A、0.05 A、0.07 A时,非晶碳膜的 I_D/I_G 分别为

0.86、0.87、0.85、0.80;石墨烯纳晶碳膜的 I_D/I_G 分别为0.96、0.93、0.92、0.86。分析可知,温度为200°C时,电流由0增大到0.07 A时,非晶和石墨烯纳晶碳膜对磨球转移膜D峰和G峰的强度比 I_D/I_G 变化不大,说明电场对转移膜纳米结构的影响小。

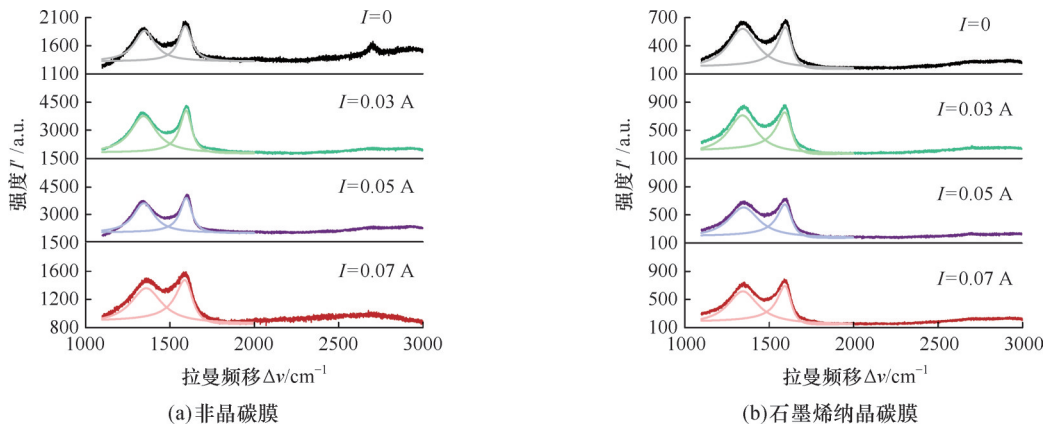


图11 高温(200°C)电场耦合作用下对磨球转移膜拉曼光谱图

Fig.11 Raman spectra of transfer films with different electric fields under temperature of 200°C

图12为高温电场耦合作用下纳米碳膜的磨痕光镜图。由图12a可看出,随着电流的增大,非晶碳膜的磨痕宽度由12 μm增大到15 μm,碳膜与对磨球的接触面积增大,与摩擦因数的变化趋势相同;由图12b可看出,石墨烯纳晶碳膜磨损严重,磨痕宽度随电流的增大先略微变小而后变大,电流为0.05 A、0.07 A时,碳膜摩擦接触区域发生严重磨损,因此,摩擦曲线在摩擦圈数超过200圈后的波动较大。

米结构特征,利用TEM及拉曼光谱仪表征分析不同外场下的碳膜纳米结构。图13为非晶碳膜在不同条件下的TEM表面样图像。由图13a、图13c可看出,室温下施加电场时,碳膜内部结构没有发生变化,FFT插图表明碳膜内部结构为非晶结构;由图13b、图13d可看出,温度200°C时,碳膜内部均形成较多的石墨烯片,碳膜内部的非晶结构向石墨烯纳晶结构转变。

2.3.3 温度电场耦合作用下碳膜表征

为进一步研究温度电场耦合作用下的界面纳

在不同条件下利用拉曼光谱仪对碳膜进行测试,结果如图14所示。由图14a可知,室温下,电流为0、0.07 A时,非晶碳膜的 I_D/I_G 分别为0.69

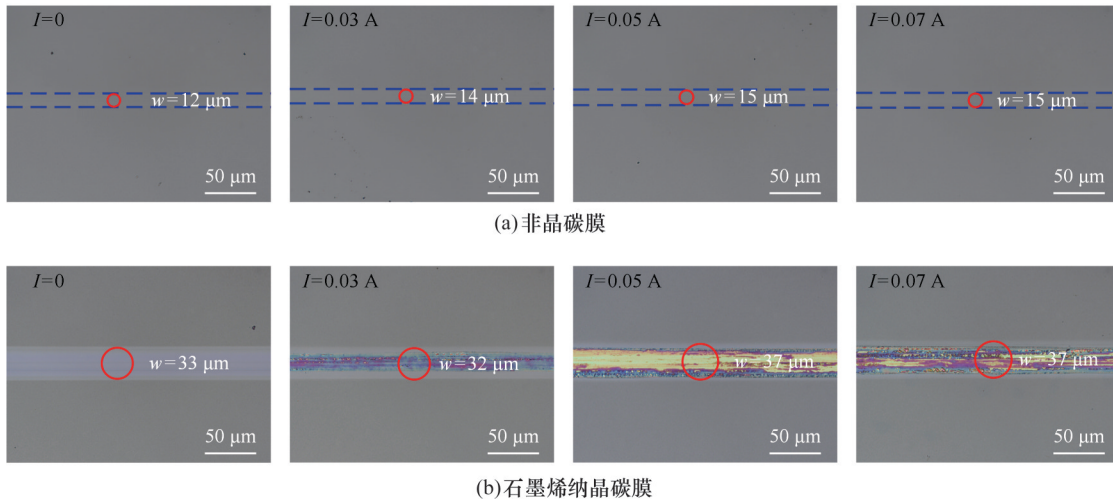


图 12 高温 (200 °C) 电场耦合作用下纳米结构碳膜磨痕光镜图

Fig.12 Optical images of wear tracks on the nanostructured carbon films with different electric fields under temperature of 200 °C

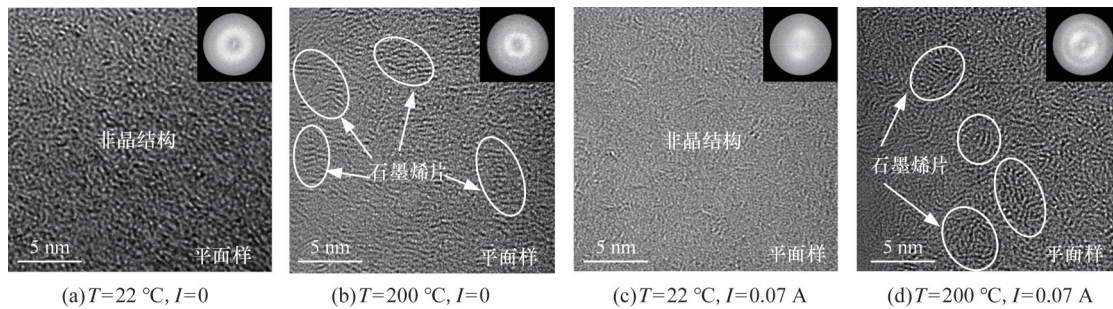


图 13 非晶碳膜在不同条件下的 TEM 表面样图像

Fig.13 Plan-view TEM images of amorphous carbon film under different conditions

及 0.67, 这说明室温下的非晶碳膜内部结构没有转变; 温度 200 °C、电流 0、0.07 A 时, I_b/I_G 分别为 0.81 和 0.82, 这表明高温下的非晶碳膜内部结构向石墨烯纳晶结构转变, 拉曼谱图的变化与 TEM 图像的变化相符。由图 14b 可知, 室温下, 电流为

0、0.07 A 时, 石墨烯纳晶碳膜的 I_b/I_G 均为 1.01; 温度 200 °C、电流 0、0.07 A 时, I_b/I_G 分别为 0.97 和 0.96, I_b/I_G 在不同条件下的变化不大, 表明石墨烯纳晶碳膜的结构在温度电场耦合作用下稳定, 没有变化。

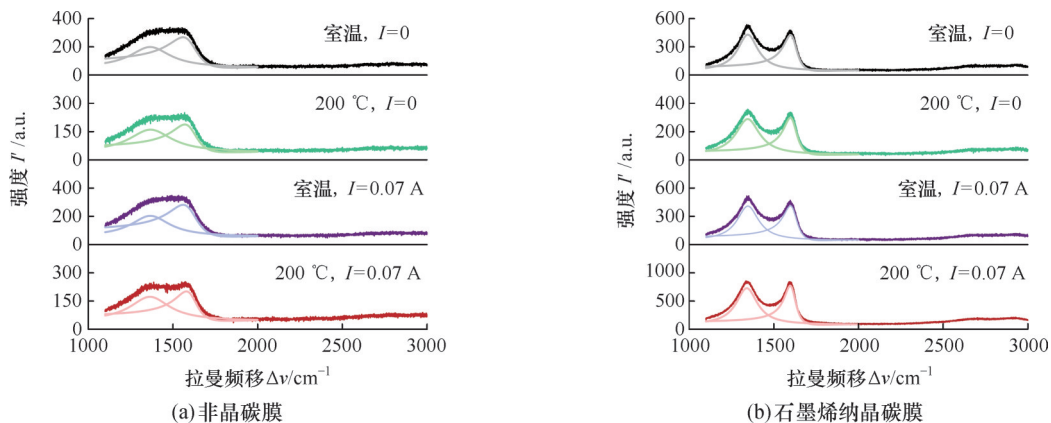


图 14 纳米结构碳膜在不同条件下的拉曼光谱图

Fig.14 Raman spectra of nanostructured carbon films under different conditions

2.4 温度电场耦合摩擦机理

摩擦表界面的上述分析结果可说明温度电场耦合作用下纳米结构碳膜摩擦因数的影响机理。如图 15a 所示, 在室温电场耦合作用下, 碳膜及转

移膜均为非晶结构, 摩擦界面为非晶结构与非晶结构的相互作用结果。碳膜与对磨球的接触面积较大, 磨痕宽度、摩擦因数较大。随着电流逐渐增大, 摩擦因数逐渐减小, 这可能是因为电场作用

下,摩擦界面的电子互斥使碳膜与对磨球的接触面积与磨痕宽度减小。在高温(200 °C)及电场耦合作用下,高温诱导碳膜结构由 sp^3 结构向 sp^2 结构转化。此时的碳膜及转移膜均为石墨烯纳晶结构,摩擦界面为石墨烯纳晶结构与石墨烯纳晶结构的相互作用结果,且在摩擦过程中,碳膜及转移膜表面的石墨烯纳晶取向大多平行于滑动方向^[19],摩擦剪切作用减小,摩擦因数减小。电流逐渐增大时,摩擦因数缓慢增大的可能原因如下:结构改变的非晶碳膜通电后,碳膜表面的自由能增大,在滑动接触界面的微区域形成黏结,剪切力增大。

图 15b 为石墨烯纳晶碳膜的摩擦机理示意图,在室温电场耦合作用下,零散的转移膜的纳米结构为非晶结构。此时,摩擦界面为非晶结构与

石墨烯纳晶结构的相互作用结果。碳膜与对磨球的接触面积较小,磨痕宽度、摩擦因数较小。电流逐渐增大时,摩擦因数逐渐增大的可能原因如下:电场作用下的碳膜表面自由能增大,碳膜与对磨球接触的微区域形成黏结。高温(200 °C)电场耦合作用下,碳膜及转移膜均为石墨烯纳晶结构,摩擦界面为石墨烯纳晶结构与石墨烯纳晶结构的相互作用结果,摩擦很快进入稳定摩擦阶段,且摩擦因数较小。电流增至 0.05 A、0.07 A 时,摩擦因数曲线在摩擦圈数超过 200 后波动很大。此时的碳膜处于磨损阶段,在高温、压力、电子的多重作用下,碳膜内部的 sp^2 键断裂,石墨烯纳晶结构被破坏,导致薄膜的力学性能急剧下降,所以碳膜与对磨球的接触面积增大,磨痕宽度增大,摩擦因数增大且有较大幅度的波动。

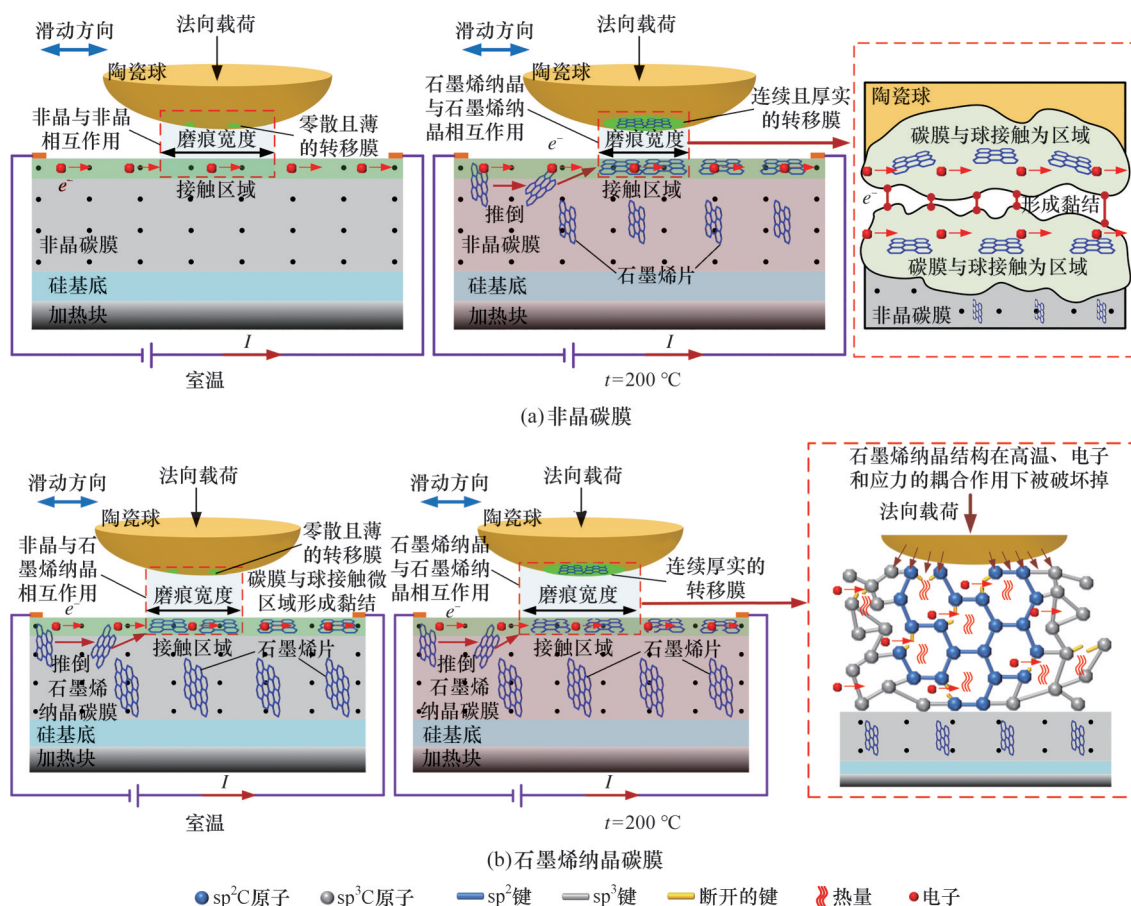


图 15 温度电场耦合作用下纳米结构碳膜的摩擦机理分析图($I=0.07$ A)

Fig.15 Friction mechanisms of nanostructured carbon films under the coupling effect of temperature and electric field ($I=0.07$ A)

3 结论

利用自行设计的温度电场耦合摩擦实验装置探究了纳米结构碳膜在温度电场耦合作用下的摩擦学特性,通过对摩擦界面的磨痕、转移膜、碳膜表征,分析并确定了非晶及石墨烯纳晶碳膜在温

度电场耦合作用下的摩擦机理。

室温下,纳米结构碳膜摩擦因数的主要影响因素为电场。随电流的增大,非晶碳膜的摩擦因数 0.11 降低至 0.053;石墨烯纳晶碳膜的摩擦因数从 0.057 升高到 0.116。摩擦副温度为 200 °C 时,纳米结构碳膜的摩擦因数的主要影响因素为温

度。高温作用下,非晶碳膜向石墨烯纳晶碳膜转变,摩擦过程中,石墨烯片转移到对偶副表面,形成了石墨烯纳晶结构与石墨烯纳晶结构相互作用、易于剪切的摩擦界面,摩擦因数减小。石墨烯纳晶碳膜结构稳定,但温度电场耦合作用会导致石墨烯纳晶碳膜磨损加剧,摩擦因数波动较大。

参考文献:

[1] 李伟军,李周裕,王媛慧. DLC涂层改善气门挺柱摩擦学性能的试验研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(5): 704-709.
LI Weijun, LI Zhouyu, WANG Yuanhui. Experimental Study on Effects of DLC Coating on Improvement of Tap-pet Tribology Characteristics[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(5): 704-709

[2] 李迎春,邹春生,邱明,等. 乏油环境下不同掺杂GLC膜的摩擦学行为[J]. 中国机械工程, 2019, 30(20): 2431-2438.
LI Yingchun, ZOU Chunsheng, QIU Ming, et al. Tribological Behaviors of GLC Films with Different Dopants under Starved-oil Conditions[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(20): 2431-2438.

[3] 王璋,蔡振兵,孙阳,等. 基于冲击动能控制的Cr-DLC涂层动力学响应和磨损行为[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 78-86.
WANG Zhang, CAI Zhenbing, SUN Yang, et al. Dynamic Response and Wear Behavior of CR-DLC Coating under Impact Kinetic Energy Controlled Mode[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 78-86.

[4] TOLER B F, COUTU R A, McBRIDE J W. A Review of Micro-contact Physics for Microelectromechanical Systems (MEMS) Metal Contact Switches[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(10): 103001.

[5] SONG Xi, CHEN Dixiang, REN Yuan, et al. Theoretical, Simulation and Experimental Research on a Capacitive Sensor Used for Detecting the High-speed Railway Contact Line[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(22): 25775-25781.

[6] ZHANG Tengfei, WAN Zhixin, DING Jicheng, et al. Microstructure and High-temperature Tribological Properties of Si-doped Hydrogenated Diamond-like Carbon Films[J]. Applied Surface Science, 2018, 435: 963-973.

[7] ABOU GHARAM A, LUKITSCH M J, BALOGH M P, et al. High Temperature Tribological Behavior of W-DLC against Aluminum[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(7): 1905-1912.

[8] WANG Junjun, PU Jibin, ZHANG Guangan, et al. Architecture of Superthick Diamond-like Carbon Films with Excellent High Temperature Wear Resistance[J]. Tribology International, 2015, 81: 129-138.

[9] 许伟,代明江,林松盛,等. 掺W类金刚石薄膜的高温摩擦学行为[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(3): 379-386.
XU Wei, DAI Mingjiang, LIN Songsheng, et al. High Temperature Tribological Behavior of W-Doped Diamond-like Carbon Films[J]. Tribology, 2017, 37(3): 379-386.

[10] ZHANG Yagang, SUN Wanchang, DONG Yaru, et al.

Electrodeposition and Microstructure of Ni and B Co-doped Diamond-like Carbon (Ni/B-DLC) Films[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126713.

[11] LI Zeqing, ZHANG Honghong, XU Minglong, et al. Tribological Behavior of a Novel Si- and WC- Co-reinforced A-C Multilayer Coating at 25 - 500 °C[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 468: 129775.

[12] WANG Xinyu, ZHANG Xiao, WANG Cong, et al. High Temperature Tribology Behavior of Silicon and Nitrogen Doped Hydrogenated Diamond-like Carbon (DLC) Coatings[J]. Tribology International, 2022, 175: 107845.

[13] ZOU Yuanshu, WANG Xiaofeng, WANG Langping. Microstructure and High-temperature Tribological Properties of Ti/Si Co-doped Diamond-like Carbon Films Fabricated by Twin-targets Reactive HiPIMS[J]. Diamond and Related Materials, 2024, 141: 110573.

[14] YU Weijie, WANG Junjun, HUANG Weijiu, et al. Improving High Temperature Tribological Performances of Si Doped Diamond-like Carbon by Using W Interlayer[J]. Tribology International, 2020, 146: 106241.

[15] 赵新泽,李晨诗,吕亚茹,等. 改善载流摩擦副摩擦学特性的表面处理技术综述[J]. 中国表面工程, 2024, 37(4): 79-101.
ZHAO Xinze, LI Chenshi, LYU Yaru, et al. Review of Surface Treatment Technologies for Improving Tribology Characteristics of Current-carrying Friction Pairs[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(4): 79-101.

[16] XUE Peidong, CHEN Cheng, FAN Xue, et al. Current-carrying Friction in Carbon Coated Ball Bearing[J]. Friction, 2023, 11(11): 2008-2020.

[17] WANG Hong, GAO Guoqiang, DENG Lei, et al. Study on Current-carrying Tribological Characteristics of C-Cu Sliding Electric Contacts under Different Water Content [J]. Coatings, 2023, 13(1): 42.

[18] SUN Kun, FAN Xue, ZHANG Weiqiang, et al. Contact-focusing Electron Flow Induced Nanosized Graphene Sheet Formation in Amorphous Carbon Films for Fast Low-friction[J]. Carbon, 2019, 149: 45-54.

[19] YANG Zhitao, HU Zelong, FAN Xue, et al. Parallel Electricity at Friction Interface Induced Fast Superlow Friction of Amorphous Carbon Films[J]. Applied Surface Science, 2022, 577: 151962.

(编辑 张洋)

作者简介:余植敏,女,2002年生,硕士研究生。研究方向为纳米结构碳膜的制造及摩擦学特性、透射电镜原位摩擦下的碳膜摩擦机理。E-mail:2510095068@mails.szu.edu.cn。范雪(通信作者),女,1984年生,副教授。研究方向为碳纳米结构薄膜的可控制造、跨尺度表面摩擦学特性。发表论文40余篇。E-mail: fanx@szu.edu.cn。

本文引用格式:

余植敏,陈磊,范雪. 温度电场耦合下纳米结构碳膜的摩擦学特性及机理[J]. 中国机械工程,2026,37(1):30-39.
YU Zhimin, CHEN Lei, FAN Xue. Tribological Properties and Mechanism of Nanostructured Carbon Films under Coupling Effect of Temperature and Electric Field[J]. China Mechanical Engineering,2026,37(1):30-39.