

碳含量对中频磁控溅射沉积 MoCN 涂层 微观结构及摩擦学性能的影响

李卫¹, 李德香², 鲁志杰², 刘叶诚², 吕笑文², 徐志彪²

(1. 岭南师范学院 机电工程学院, 广东 湛江 524048;

2. 五邑大学 轨道交通学院, 广东 江门 529020)

摘要: **目的** 为了大幅提高机械零部件表面的硬度和耐磨性能, 探究制备具有低摩擦因数、高硬度和良好耐磨性的 MoCN 涂层。**方法** 采用中频磁控溅射技术在不锈钢基板和硅片上, 通过控制 C_2H_2 气体(纯度 99.99%, 0、3、6、9 mL/min) 的量来制备具有不同含碳量的 MoCN 纳米复合涂层。通过 X 射线衍射仪和拉曼光谱仪分析涂层主要的物相结构, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 和原子力显微镜 (AFM) 表征涂层的表面和断面形貌。采用连续刚度法, 利用纳米压痕仪测试涂层的纳米硬度和弹性模量。利用自动划痕试验机和光学显微镜 (OM) 评估涂层与基体之间的黏附强度。最后利用多功能摩擦磨损试验机进行磨损试验, 通过 SEM 对试验后的涂层进行磨损形貌分析, 并对涂层的摩擦学性能进行评价。**结果** 涂层微观组织和力学性能表征结果表明, MoCN 涂层由 MoN 相和非晶态碳相组成。随着涂层中碳含量的增加, 涂层与基体之间的结合力和涂层表面的粗糙度都呈现逐渐减小的趋势, 其涂层的划痕失效临界载荷和表面粗糙度的最小值分别为 6.90 N 和 6.80 nm, 但是涂层的纳米硬度从 7.36 GPa 增至 10.23 GPa。摩擦磨损试验结果表明, 随着涂层中碳含量的增加, 试验中的摩擦因数逐渐降低, 最小为 0.51。磨损表面的损伤程度逐渐减低, 涂层的耐磨性能提高, 其主要磨损机制为黏着磨损、磨粒磨损和剥落。**结论** 随着涂层中碳含量的增加, 涂层的柱状生长模式逐渐细化, 形成了致密的微观结构, 其力学性能和摩擦学性能逐渐提高。

关键词: 中频磁控溅射技术; 纳米复合涂层; MoCN; 微观结构; 力学性能; 摩擦学性能

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)04-0184-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.04.015

Effect of Carbon Content on the Microstructure and Tribological Properties of MoCN Nanocomposite Coating Prepared by Medium Frequency Magnetron Sputtering

LI Wei¹, LI De-xiang², LU Zhi-jie², LIU Ye-cheng², LYU Xiao-wen², XU Zhi-biao²

收稿日期: 2022-04-13; 修订日期: 2022-08-16

Received: 2022-04-13; Revised: 2022-08-16

基金项目: 国家自然科学基金 (52105202, 51905172); 广东省基础与应用基础研究基金 (2020A1515011407)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52105202, 51905172); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2020A1515011407)

作者简介: 李卫 (1988—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为摩擦磨损、表面技术、连接结构动力学。

Biography: LI Wei (1988-), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: friction and wear, surface technology, dynamic of joint structure.

通讯作者: 徐志彪 (1989—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为微动摩擦学、摩擦磨损、表面技术。

Corresponding author: XU Zhi-biao (1989-), Male, Doctor, Master supervisor, Research focus: fretting wear, friction and wear, surface technology.

引文格式: 李卫, 李德香, 鲁志杰, 等. 碳含量对中频磁控溅射沉积 MoCN 涂层微观结构及摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 184-191.

LI Wei, LI De-xiang, LU Zhi-jie, et al. Effect of Carbon Content on the Microstructure and Tribological Properties of MoCN Nanocomposite Coating Prepared by Medium Frequency Magnetron Sputtering[J]. Surface Technology, 2023, 52(4): 184-191.

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lingnan Normal University, Guangdong Zhanjiang 524048, China;

2. School of Rail Transportation, Wuyi University, Guangdong Jiangmen 529020, China)

ABSTRACT: In practical engineering application, in order to reduce the damage of parts in the process of friction and wear, coatings are often deposited on the metal surface to improve the wear resistance of parts. MoN coating is a candidate material for tool coating because of its excellent wear resistance. Moreover, by introducing C atom into MoN coating, C and N combine to form nanocomposite structure, which can effectively improve the hardness and anti-oxidation performance of MoN coating. The work aims to explore and prepare MoCN nanocomposite coating with low friction factor and good wear resistance to greatly improve the hardness and wear resistance of mechanical part surface. In this study, MoCN nanocomposite coatings with different carbon contents were prepared by controlling the amount of C_2H_2 gas (99.99% purity, 0 mL/min, 3 mL/min, 6 mL/min and 9 mL/min) on stainless steel substrates and silicon wafers with medium frequency magnetron sputtering. The effects of carbon content on the microstructure, mechanical properties and tribological properties of the coatings were investigated. The main phase structure of the coating was analyzed by X-ray diffraction and Raman spectroscopy. Scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) were used to characterize the surface and section morphology of the coating. The nano-hardness and elastic modulus of the coating were measured by continuous stiffness method and Nano-indentation. The adhesion strength between the coating and the substrate was evaluated by automatic scratch tester and optical microscope (OM). Finally, the wear test was carried out by the multifunctional friction and wear tester, the wear morphology of the tested coating was analyzed by SEM, and the tribological properties of the coating were evaluated. According to the characterization results of coating microstructure and mechanical properties, MoCN coating was a polycrystalline structure composed of MoN phase and amorphous carbon phase. With the increase of carbon content, the surface roughness of the coating decreased from 11.60 nm to 6.80 nm, and the coating grains were refined. From the cross-sectional morphology of the coating, it could be observed that the MoN coating grew in an obvious loose columnar shape and there were a large number of microporous defects. With the doping of carbon, the columnar crystal growth mode was gradually refined to form a dense microstructure. In addition, from the mechanical property characterization results, it could be seen that the carbon content of the coating had a significant impact on the mechanical properties of the coating. The main performance was that with the increase of carbon content in the coating, the hardness of the coating increased from 7.36 GPa to 10.23 GPa, showing a gradual increasing trend. At the same time, the ability to resist elastic-plastic deformation was gradually enhanced. However, during the scratch test, the abrupt load of acoustic emission signal decreased from 13.80 N to 6.90 N, indicating that the adhesion strength of the coating decreased gradually due to the increase of residual stress. During the wear test, the amorphous carbon element in the coating had a good lubrication effect after graphitization. Therefore, with the increase of carbon content in the coating, the friction coefficient of the coating decreased from 0.85 to 0.51. The wear resistance of the coating was enhanced. The main wear mechanisms in the wear process were adhesive wear, abrasive wear and spalling. It can be seen that with the increase of carbon content in the coating, the columnar growth mode of the coating is gradually refined to form a dense microstructure, and the mechanical and tribological properties are gradually improved.

KEY WORDS: medium frequency magnetron sputtering; nanocomposite coating; MoCN; microstructure; mechanical property; tribological property

零部件的摩擦磨损贯穿机械设备服役的整个过程,是导致机械零部件断裂失效的主要因素之一,因此降低机械设备中零部件的摩擦磨损对“双碳”经济的实施至关重要。在节能减排和机械产品再制造可持续发展的战略下,通过在金属表面沉积涂层的方法可以显著提高成形部件的耐磨性^[1]。由于过渡金属氮化物涂层具有较高的硬度、耐磨性、耐腐蚀性和抗热稳定性等特点,因此它在航空航天工业、核电工业和石油工业等领域得到了广泛的应用^[2]。其中,MoN 硬质涂层被认为是一种具有优良抗磨损性能的涂层,被作为刀具涂层的候选材料,但其较低的防氧化温度阻碍了 MoN 涂层的发展应用^[3]。研究者试图通过在 MoN

涂层中引入 C 原子,使 C 与 N 结合,形成纳米复合结构,以期大幅提高 MoN 涂层的硬度和防氧化性能^[4]。例如, Liu 等^[5]采用直流磁控溅射法在(100)硅和不锈钢基体上沉积了 MoCN 涂层,发现沉积的 MoCN 涂层的硬度远高于单一的 MoC 涂层或 MoN 涂层。Qian 等^[6]采用磁控溅射法制备了 MoN 涂层和 MoCN 涂层,对经过热处理的 MoN 涂层和 MoCN 涂层的微观结构和性能进行了分析。结果表明,与 MoN 涂层相比,MoCN 涂层具有更精细的微结构、更小的摩擦因数和更好的耐磨性。通过不断研究刀具涂层发现, C 元素的掺杂可以有效地提高 MoN 涂层的硬度和耐磨性能。近年来,研究者们越来越关注不同制备技术

对涂层微观结构和力学性能的影响。例如, Gilewicz 等^[7]和 Kuznetsova 等^[8]采用阴极电弧蒸发法制备了 MoCN 涂层, 研究了碳浓度对涂层表面粗糙度和晶粒的影响。Warcholinski 等^[9]采用阴极电弧蒸发法制备了不同化学组成和不同碳含量的 Mo(C)N 涂层, 详细研究了 Mo(C)N 涂层的力学特性和摩擦学性能。

文中研究采用中频磁控溅射技术在硅片(100)和 304 不锈钢表面制备不同含碳量的 MoCN 涂层, 系统研究不同碳含量掺杂对中频磁控溅射技术制备的 MoCN 涂层的微观结构和摩擦学性能的影响。

1 实验

1.1 材料及涂层制备

在 Ar、N₂ 和 C₂H₂ 混合气体中, 采用中频磁控溅射技术(MF), 以 2 个纯钼靶为原材料, 在硅片(100)和 304 不锈钢基体表面上制备了不同含碳量的 MoCN 纳米复合涂层。首先, 将不锈钢基体表面抛光至表面粗糙度 Ra=10 nm。为了保持基体表面的清洁, 将抛光后的不锈钢基体放入无水酒精溶液中用超声波清洗 15 min。然后, 将基体放置在真空室中, 真空度大于 0.001 Pa。在涂层沉积前, 先将不锈钢基体置于 Ar 气环境中, 利用霍尔离子溅射 15 min, 以清除附着在基体表面的氧化物和其他杂质。最后, 将 Ar(纯度 99.95%, 40 mL/min)和 N₂(纯度 99.99%, 40 mL/min)气体引入真空室, 通过控制 C₂H₂ 气体(纯度 99.99%, 0 mL/min、3 mL/min、6 mL/min、9 mL/min)的量来制备不同含碳量的 MoCN 涂层。将在不同浓度 C₂H₂ 气流中制备的不同含碳 MoCN 纳米复合涂层分别定义为 MoN、MoCN-1、MoCN-2 和 MoCN-3。在整个沉积过程中, 要求真空室处于恒温状态。

1.2 分析方法

采用 X 射线衍射仪(XRD)和拉曼光谱仪(Raman)分析了涂层主要的物相结构。采用扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)对涂层的表面、截面和三维形貌进行表征。采用连续刚度法, 利用纳米压痕仪(MML)对涂层的硬度和弹性模量进行测试。通过自动划痕试验机测试涂层与基体之间的黏附强度, 再用光学显微镜(OM)观察划痕形貌。最后, 利用多功能摩擦磨损试验机(UMT TriboLab)进行磨损试验, 对试验后的试样用 SEM 进行磨损形貌分析, 并对涂层的摩擦学性能进行评价。

2 结果与讨论

2.1 涂层微观结构分析

MoN、MoCN-1、MoCN-2 和 MoCN-3 涂层的 XRD 图谱如图 1 所示。在 Mo(C)N 涂层的 XRD 图谱

上, MoN 相的(111)、(200)和(220)晶面位置分别为 37.50°、43.60°、62.30°。通过对 MoN、MoCN-1、MoCN-2 和 MoCN-3 涂层的 XRD 图谱进行分析表明, 随着碳的掺杂, Mo(C)N 在 43.60°处的峰减弱并变宽。这主要是因为涂层微观结构由晶态向非晶态转变。同时, 这也与 MoN 相结构的分布状态有关^[6]。由图 1 可见, X 射线的衍射峰变得短而宽^[10]。此外, 由于沉积过程中离子束轰击产生的涂层残余应力, 使得 X 射线衍射峰向低角度转变^[11-13]。涂层中的残余应力可以通过衍射峰的位置向低角度偏移的程度来评价, 即较大的偏移程度对应较大的残余应力^[14]。从 MoN 涂层到 MoCN-3 涂层, X 射线衍射峰的位置偏移程度逐渐增加, 因此涂层中的残余应力逐渐增加。这是由于随着碳含量的增加, 涂层中非晶组织逐渐增多, 则晶态组织相应减少, 使得非晶与晶态组织之间的内聚能和结合性逐渐下降, 最终导致复合涂层的残余应力急剧增加^[15]。

涂层的拉曼光谱测试结果如图 2 所示。拉曼光谱结果表明, 2 个典型峰位于 1 370 cm⁻¹ 和 1 563 cm⁻¹

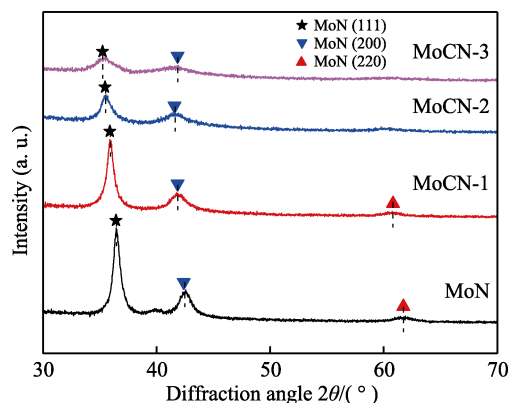


图1 MoN、MoCN-1、MoCN-2 和 MoCN-3 涂层的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of MoN, MoCN-1, MoCN-2, and MoCN-3 coatings

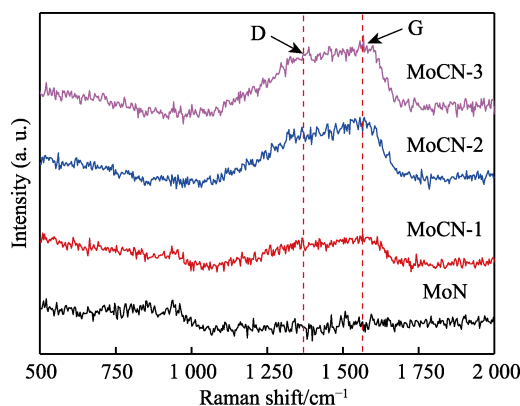


图2 MoN、MoCN-1、MoCN-2 和 MoCN-3 涂层的拉曼光谱

Fig.2 Raman spectra of MoN, MoCN-1, MoCN-2, and MoCN-3 coatings

左右, 分别表示非晶碳的 D 峰和 G 峰^[16-17]。D 峰起源于 sp^2 杂化碳原子的晶格缺陷, 而 G 峰则由 sp^2 杂化位置原子键的伸展和振动造成^[18-20]。非晶碳相的存在对复合涂层的力学性能具有很大的影响。由此可见, 将碳掺杂到 MoN 涂层中, D 峰和 G 峰的强度明显增大。这说明随着碳含量的增加, 制备的涂层中非晶态碳相的含量增加, 并且对于改善 MoN 涂层的力学性能有着重要的影响。这一结果验证了在 X 射线衍射谱结果分析中存在非晶碳相覆盖 MoN 相的结论, 并得到了涂层中典型元素化学键的结合状态。

通过原子力显微镜得到涂层的 2D 和 3D 表面形貌和相应粗糙度, 结果如图 3 所示。如图 3a 所示, MoN 涂层的表面粗糙度最大, 为 11.60 nm。主要原因是晶体颗粒之间的缝隙较大, 导致涂层表面凹凸不

平。随着碳含量的增加, 大量晶体与非晶体颗粒结合在一起, 填补了晶体颗粒之间的缝隙, 使得涂层表面逐渐变得平滑, 如图 3 所示。MoCN-3 涂层的粗糙度最小, 达到 6.80 nm, 并且呈现出细致而致密的表面形貌, 如图 3d 所示。同时, 还可以发现 MoCN-3 涂层表面晶粒的粒径更小。这种晶粒细化现象是由 MoCN 涂层类晶界面处形成的大量非晶态碳阻碍了沉积过程中晶粒的生长所致^[21]。

涂层横截面形貌的 SEM 图如图 4 所示。MoN、MoCN-1、MoCN-2、MoCN-3 的厚度分别为 2.25、2.73、2.63、2.37 μm , 并且在涂层与基体之间存在一个较为清晰的钼过渡层。从图 4a 可知, MoN 涂层为明显的疏松柱状晶体结构, 并存在大量的微孔缺陷^[22]。与 MoN 涂层形成鲜明对比的是, 尽管 MoCN-1 涂层

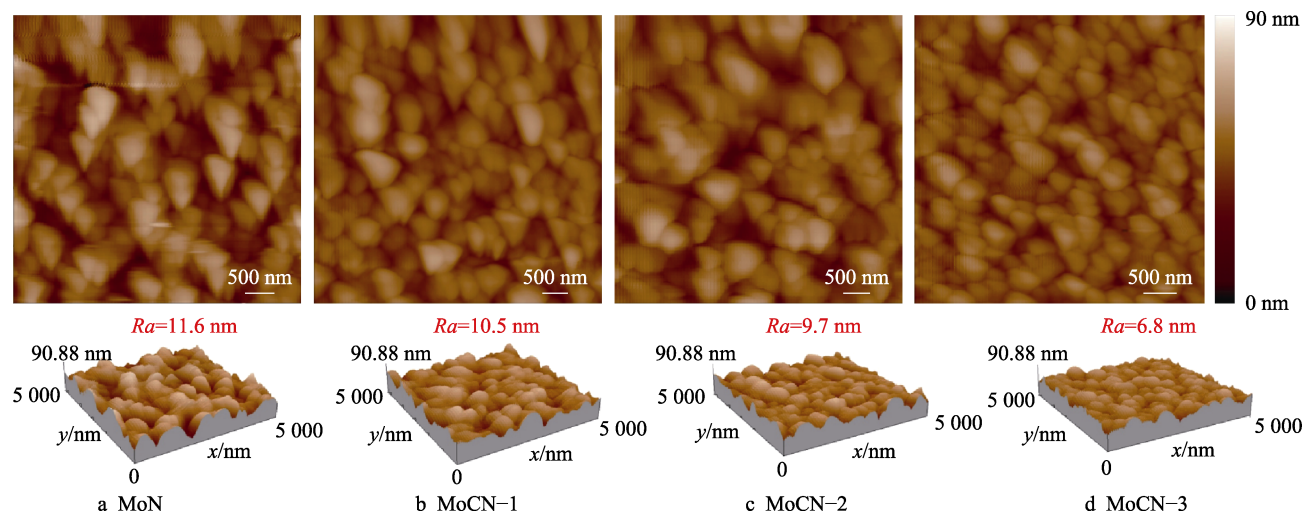


图 3 MoN、MoCN-1、MoCN-2 和 MoCN-3 涂层的 AFM 图像
Fig.3 AFM images of MoN, MoCN-1, MoCN-2, and MoCN-3 coatings

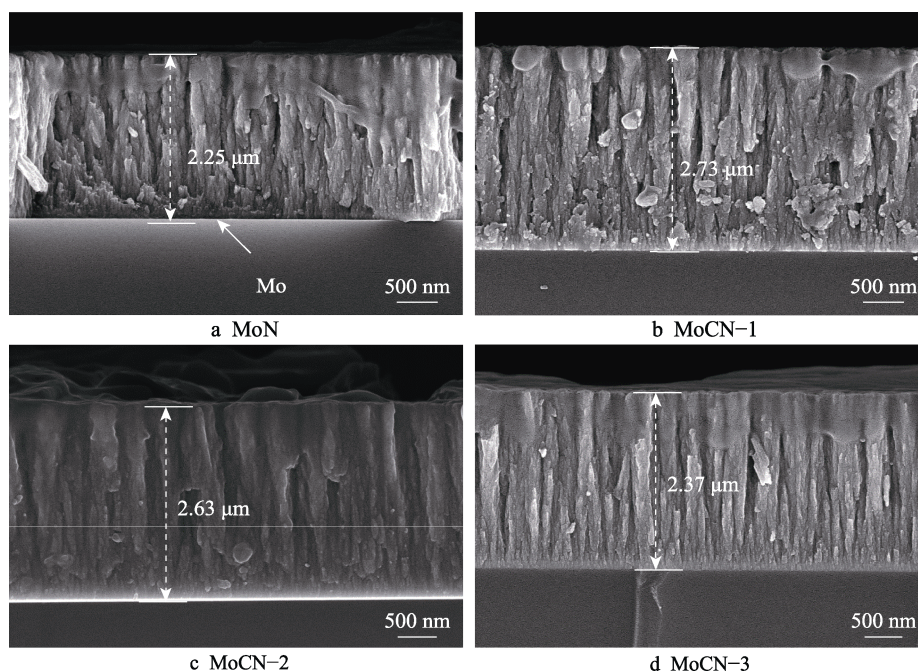


图 4 涂层的截面形貌
Fig.4 Cross-sectional morphologies of the coatings

仍然表现为柱状晶体的增长方式,但其结构较紧密,如图4b所示。对于MoCN-2和MoCN-3涂层(如图4c、d所示),可以清晰地看到涂层的柱状增长模式由不连续柱状向连续柱状晶体转变,形成了更为致密的微观结构,而且无明显缺陷。这些断面形貌的分析结果与原子力显微镜的分析结果一致,主要是因为涂层中非晶态碳的含量随着涂层中碳含量的增加而增加,这一结果可有效填充涂层中的微孔缺陷,而且有利于涂层中柱状晶的均匀生长^[23]。

2.2 力学性能分析

MoN、MoCN-1、MoCN-2和MoCN-3涂层的纳米硬度和弹性模量如图5a所示。由图5a可知,MoN涂层的纳米硬度为7.36 GPa,而MoCN涂层的纳米硬度分别为7.70、8.35、10.23 GPa。由此可知,所制备涂层的纳米硬度随着涂层中碳掺杂量的增加而增加。这可能是因为随着C元素的加入,C原子取代了涂层中的部分N原子,从而导致固溶体强化,涂层硬度增加^[24]。对于涂层的弹性模量,随着碳元素掺杂量的增加,呈现先减小后增大的趋势。由此可见,MoCN-1涂层的弹性模量最小,为123.92 GPa。

MoCN-3涂层的弹性模量最大,为140.39 GPa。这可能是因为随着涂层中碳掺杂量的增加,涂层的晶粒得到细化,形成了致密的微观结构,也与大量硬质MoN相的形成有关^[25]。在受载条件下,MoCN-3涂层可以防止错位运动,避免裂纹的萌生。随着涂层中碳含量的增加,形成了大量的非晶相,从而导致MoCN-3涂层的硬度和弹性模量增加。结果表明,碳含量对MoCN涂层的硬度和弹性模量有着显著影响。

涂层的 H/E 和 H^3/E^2 如图5b所示。 H/E 和 H^3/E^2 与涂层的耐磨性、抗弹塑性变形能力和摩擦学性能有关^[26]。涂层的 H/E 和 H^3/E^2 的高低可表征涂层的弹性恢复能力和抗机械破坏能力,相应的数值越高,说明涂层的弹性恢复能力和抗机械破坏能力越好。如图5b所示,MoN涂层的 H/E 为0.05,而 H^3/E^2 为0.02 GPa。与MoN涂层相比,碳元素的掺杂有效地提升了涂层的 H/E 和 H^3/E^2 ^[27],表明随着碳元素的引入,MoCN涂层较单一的MoN涂层拥有了较为良好的耐磨性和力学性能。由此可以推测,在相同的载荷条件下,MoN涂层较其他涂层更容易出现变形和开裂^[28]。

试样的划痕试验结果如图6所示,展示了不同涂层的声发射信号(AE)和光学图像。由图6可知,

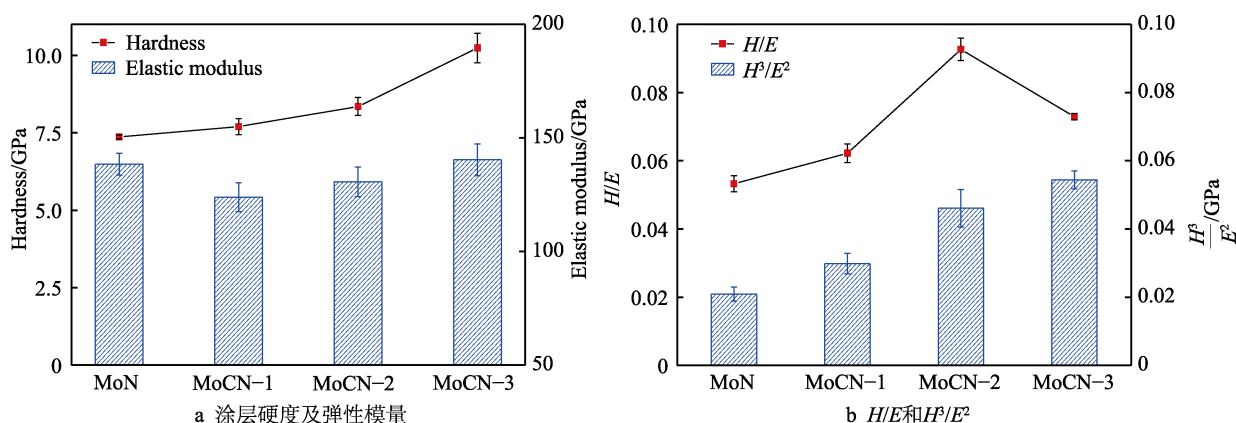


图5 MoN、MoCN-1、MoCN-2、MoCN-3涂层的硬度、弹性模量和 H/E 和 H^3/E^2
Fig.5 Hardness, elastic modulus and H/E and H^3/E^2 of MoN, MoCN-1, MoCN-2, and MoCN-3 coatings: a) Hardness and elastic modulus; b) H/E and H^3/E^2

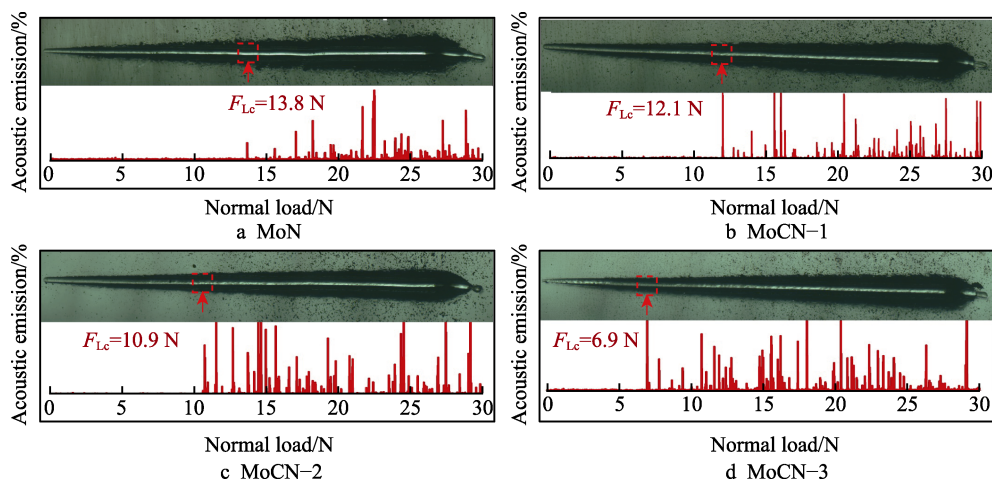


图6 涂层划痕声发射信号及光学图像

Fig.6 Acoustic emission signals (AE) and optical images of scratches of the coatings

在划痕试验过程中, MoN、MoCN-1、MoCN-2 和 MoCN-3 涂层上检测到的 AE 信号突变载荷分别为 13.80、12.10、10.90、6.90 N, 表明涂层结构已被破坏^[29]。可见, 随着涂层中碳掺杂量的增加, 涂层的划痕失效临界载荷 (F_{Lc}) 逐渐降低。临界载荷可用于定量分析涂层与基体的黏附强度。MoCN-3 涂层的 AE 信号突变载荷只有 6.90 N, 其涂层的黏附强度最小。这说明随着涂层中碳掺杂量的增加, 涂层的黏附强度逐渐降低。这种现象可能是由于随着碳元素掺杂量的增加, 涂层的残余应力值逐渐增大。残余应力是影响涂层与基体之间黏附强度的一个重要参数, 涂层的残余应力越高, 涂层与基体之间的黏附强度越差^[30]。这一结果与 XRD 结果的分析一致, 即随着涂层中碳掺杂量的增加, 涂层的残余应力逐渐增加。

2.3 摩擦磨损性能分析

不同涂层在摩擦磨损试验中的摩擦因数曲线如图 7 所示。如图 7 所示, 在相同的加载条件下, 涂层的摩擦因数经过短暂的磨合期, 进入稳定期。其中, MoN 涂层的摩擦因数最高, 为 0.85。随着涂层中碳含量的增加, 涂层的摩擦因数逐渐降低。MoCN-3 涂层的摩擦因数最低, 为 0.51。这主要是因随着涂层中碳含量的增加, 在 MoCN-3 涂层表面形成了细腻而致密的晶体结构, 其表面较光滑, 光滑的涂层表面在一定程度上降低了摩擦因数。同时, MoCN-3 涂层中的非晶碳元素在摩擦过程中出现石墨化后, 具有良好的润滑作用, 因此碳含量的增加可以有效降低涂层的摩擦因数^[31]。

试样磨损表面的 SEM 结果如图 8 所示。如图 8a 所示, MoN 涂层的磨损表面出现了较宽、较深的磨损轨迹, 而且出现了明显的大块剥落现象, 说明涂层从基体上脱落的情况较为严重。与 MoN 涂层相比,

MoCN-1 涂层磨损表面的磨损轨迹变窄, 出现了涂层剥落的现象, 并伴随着些许微犁沟的出现, 如图 8b 所示, 总体来说其损伤程度较 MoN 涂层轻。MoCN-2 涂层磨损表面的磨损轨迹相较于前两者, 变得更浅和更窄, 其磨损形貌主要表现为少量的犁沟^[32], 并无涂层剥落现象出现, 如图 8c 所示。从磨损表面可以直观地看出, MoCN-2 涂层与 MoCN-3 涂层的损伤程度较相似。虽然 MoCN-2 涂层和 MoCN-3 涂层的磨损表面都存在微犁沟, 但总体磨损都较轻微, 如图 8c、d 所示。通过试验可知, MoN 涂层和 MoCN-1 涂层的磨损机制以黏着磨损、磨粒磨损和剥落为主; MoCN-2 涂层和 MoCN-3 涂层磨损后的表面较为光滑, 只有少量犁沟出现。由此可知, MoCN-2 涂层和 MoCN-3 涂层的主要磨损机制为轻度黏着磨损和磨粒磨损。这说明随着涂层中碳元素的增加, 在摩擦过程中形成的非晶石墨相能有效降低试验过程中的摩擦磨损, 因此在涂层中掺杂适量的碳可以有效地提高涂层的摩擦磨损性能。

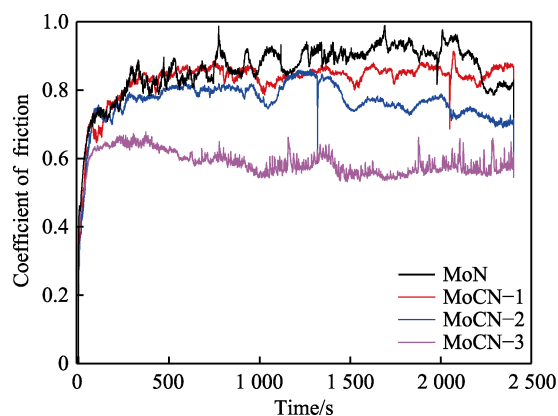


图 7 涂层的摩擦因数曲线
Fig.7 Friction coefficient curves of the coatings

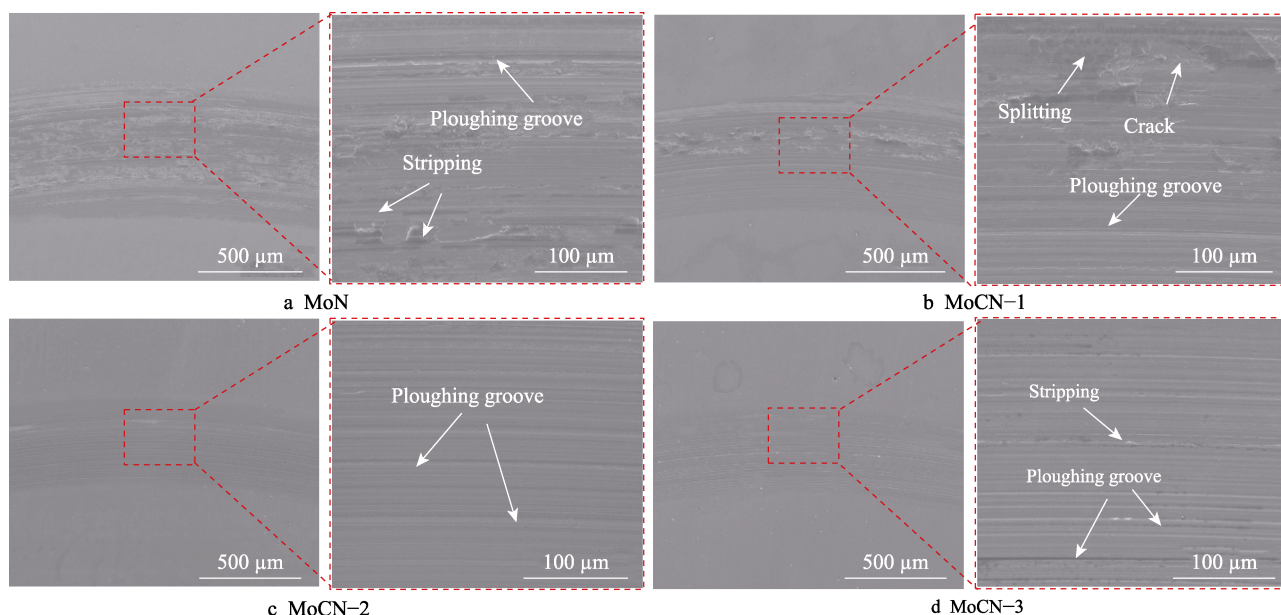


图 8 不同涂层磨损后表面的 SEM 图像
Fig.8 SEM images of the worn surfaces of different coatings

3 结论

采用中频磁控溅射技术,通过调节 C_2H_2 气体的流量,在 304 不锈钢基体上制备了不同碳含量的 Mo(C)N 涂层。对制备涂层的微观组织、力学性能和摩擦性能进行了详细研究。主要结论如下。

1) MoN 涂层以明显疏松的柱状生长,存在大量的微孔缺陷。随着碳元素掺杂量的增加,柱状晶生长模式逐渐细化,形成了致密的显微组织。MoCN 涂层是由 MoN 相和非晶态碳相组成的多晶结构。

2) 涂层的含碳量对涂层的力学性能有着显著影响。随着涂层中碳含量的增加,涂层的硬度逐渐增大,抗弹塑性变形能力逐渐增强。然而,涂层的黏附强度因残余应力的增大而逐渐下降。

3) 在磨损试验过程中,涂层中的非晶态碳元素石墨化后具有良好的润滑效果。随着涂层中含碳量的增加,涂层的摩擦因数逐渐降低,涂层的耐磨性增强。在磨损过程中,主要的磨损机制为黏着磨损、磨粒磨损和剥落。

参考文献:

- [1] HOGMARK S, JACOBSON S, LARSSON M. Design and Evaluation of Tribological Coatings[J]. *Wear*, 2000, 246(1/2): 20-33.
- [2] 宋慧瑾, 鄢强, 李玫. 金属氮化物和碳化物硬质涂层的研究及应用进展[J]. *材料导报*, 2014, 28(S2): 491-493.
SONG Hui-jin, YAN Qiang, LI Mei. Study and Application Progress on the Metallic Hard Nitrides and Carbides Coatings[J]. *Materials Review*, 2014, 28(S2): 491-493.
- [3] 曹维成, 安耿, 刘高杰. 碳/氮化钼的性能、应用及制备[J]. *中国钼业*, 2006, 30(5): 45-49.
CAO Wei-cheng, AN Geng, LIU Gao-jie. The Properties, Applications and Preparation Methods of Molybdenum Carbide and Molybdenum Nitride[J]. *China Molybdenum Industry*, 2006, 30(5): 45-49.
- [4] ZHU Xiao-dong, YUE Di, SHANG Chen, et al. Phase Composition and Tribological Performance of Molybdenum Nitride Coatings Synthesized by IBAD[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 228: S184-S189.
- [5] LIU Q, LIU T, FANG Q F, et al. Preparation and Characterization of Nanocrystalline Composites Mo-C-N Hard Films[J]. *Thin Solid Films*, 2006, 503(1/2): 79-84.
- [6] QIAN Jian-guo, LI Shu-xin, PU Ji-bin, et al. Effect of Heat Treatment on Structure and Properties of Molybdenum Nitride and Molybdenum Carbonitride Films Prepared by Magnetron Sputtering[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 725-735.
- [7] GILEWICZ A, JEDRZEJEWSKI R, KOCHMANSKA A E, et al. Structure of MoCN Films Deposited by Cathodic Arc Evaporation[J]. *Thin Solid Films*, 2015, 577: 94-96.
- [8] KUZNETSOVA T, ZUBAR T, CHIZHIK S, et al. Surface Microstructure of Mo(C)N Coatings Investigated by AFM[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(12): 5450-5459.
- [9] WARCHOLINSKI B, GILEWICZ A, KUZNETSOVA T A, et al. Mechanical Properties of Mo(C)N Coatings Deposited Using Cathodic Arc Evaporation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 319: 117-128.
- [10] YU Li-hua, ZHAO Hong-jian, XU Jun-hua. Mechanical, Tribological and Corrosion Performance of WBN Composite Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 315: 380-386.
- [11] ZIN V, MIORIN E, DEAMBROSIO S M, et al. Mechanical Properties and Tribological Behaviour of Mo-N Coatings Deposited via High Power Impulse Magnetron Sputtering on Temperature Sensitive Substrates[J]. *Tribology International*, 2018, 119: 372-380.
- [12] 时海芳, 李强. 碳含量对 $Al_{0.5}Co_{0.5}NiCrFe$ 高熵合金涂层组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(3): 136-141.
SHI Hai-fang, LI Qiang. Effect of Carbon Content on Microstructure and Properties of $Al_{0.5}Co_{0.5}NiCrFe$ High-Entropy Alloy Coating[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2022, 47(3): 136-141.
- [13] KARLSSON L, HÖRLING A, JOHANSSON M P, et al. The Influence of Thermal Annealing on Residual Stresses and Mechanical Properties of Arc-Evaporated TiC_xN_{1-x} ($x=0, 0.15$ and 0.45) [J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(20): 5103-5114.
- [14] MORENO C M, SANCHEZ J M, ARDILA L C, et al. Determination of Residual Stresses in Cathodic Arc Coatings by Means of the Parallel Beam Glancing X-Ray Diffraction Technique[J]. *Thin Solid Films*, 2009, 518(1): 206-212.
- [15] XU Xing, SUN Jian-fang, XU Zhi-biao, et al. Microstructure, Electrochemical and Tribocorrosion Behaviors of CrCN Nanocomposite Coating with Various Carbon Content[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 411: 126997.
- [16] BONDAREV A V, KIRYUKHANTSEV-KORNEEV P V, SIDORENKO D A, et al. A New Insight into Hard Low Friction MoCN-Ag Coatings Intended for Applications in Wide Temperature Range[J]. *Materials & Design*, 2016, 93: 63-72.
- [17] SHTANSKY D V, BONDAREV A V, KIRYUKHANTSEV-KORNEEV P V, et al. Structure and Tribological Properties of MoCN-Ag Coatings in the Temperature Range of 25-700 °C [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 273: 408-414.
- [18] YE Yu-wei, WANG Yong-xin, CHEN Hao, et al. Doping Carbon to Improve the Tribological Performance of CrN Coatings in Seawater[J]. *Tribology International*, 2015,

- 90: 362-371.
- [19] TONG Cheng-yi, LEE J W, KUO C C, et al. Effects of Carbon Content on the Microstructure and Mechanical Property of Cathodic Arc Evaporation Deposited CrCN Thin Films[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 231: 482-486.
- [20] POGREBNJAK A D, BERESNEV V M, BONDAR O V, et al. Superhard CrN/MoN Coatings with Multilayer Architecture[J]. Materials & Design, 2018, 153: 47-59.
- [21] HE Shi-dong, PFAU A J, DIULUS J T, et al. Deposition and Characterization of Nickel Gallium Thin Films[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2018, 36(3): 031402.
- [22] 白羽, 黄平, 葛芳芳, 等. N 含量对 Cr-N 涂层结构和抗高温水蒸汽氧化性能的影响[J]. 中国表面工程, 2020, 33(2): 87-96.
- BAI Yu, HUANG Ping, GE Fang-fang, et al. Effects of N Content on Microstructure and High-Temperature Steam Oxidation Resistance of Cr-N Coating[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(2): 87-96.
- [23] 王力涛, 燕峰, 黄新放, 等. CrWN 涂层中 W 元素含量对涂层纳米硬度和热稳定性的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 372-380.
- WANG Li-tao, YAN Feng, HUANG Xin-fang, et al. Effect of W Content on the Nano-Hardness and Thermal Stability of the CrWN Coating[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 372-380.
- [24] 刘径舟, 刘洪喜, 邸英南, 等. 碳含量对激光熔覆 CoCrFeMnNiC_x 高熵合金涂层摩擦磨损和耐蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2020, 33(6): 118-127.
- LIU Jing-zhou, LIU Hong-xi, DI Ying-nan, et al. Effects of Carbon Content on Friction and Wear Behavior and Corrosion Resistance of Laser Cladding CoCrFeMnNiC_x High Entropy Alloy Coatings[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(6): 118-127.
- [25] CHENG Guo-an, HAN Dong-yan, LIANG Chang-lin, et al. Influence of Residual Stress on Mechanical Properties of TiAlN Thin Films[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 228: S328-S330.
- [26] 汪汝佳, 王振玉, 刘应瑞, 等. Ni 含量对 CrNiN 涂层结构与性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(5): 158-165.
- WANG Ru-jia, WANG Zhen-yu, LIU Ying-rui, et al. Influence of the Ni Content on Structure and Properties of CrNiN Coatings[J]. Surface Technology, 2022, 51(5): 158-165.
- [27] LEYLAND A, MATTHEWS A. On the Significance of the H/E Ratio in Wear Control: A Nanocomposite Coating Approach to Optimised Tribological Behaviour[J]. Wear, 2000, 246(1/2): 1-11.
- [28] 刘克, 刘翔, 李金龙. 碳含量对 TiAlCN 涂层结构和摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 76-85.
- LIU Ke, LIU Xiang, LI Jin-long. Effect of Carbon Content on Structure and Tribological Properties of TiAlCN Coating[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 76-85.
- [29] ZHENG Ya-jun, LENG Yong-xiang, XIN Xin, et al. Evaluation of Mechanical Properties of Ti(Cr)SiC(O)N Coated Cemented Carbide Tools[J]. Vacuum, 2013, 90: 50-58.
- [30] PHILIPPON D, GODINHO V, NAGY P M, et al. Endurance of TiAlSiN Coatings: Effect of Si and Bias on Wear and Adhesion[J]. Wear, 2011, 270(7-8): 541-549.
- [31] JU Hong-bo, DING Ning, XU Jun-hua, et al. Improvement of Tribological Properties of Niobium Nitride Films via Copper Addition[J]. Vacuum, 2018, 158: 1-5.
- [32] WANG Yue, LI Jin-long, DANG Chao-qun, et al. Influence of Carbon Contents on the Structure and Tribocorrosion Properties of TiSiCN Coatings on Ti₆Al₄V[J]. Tribology International, 2017, 109: 285-296.

责任编辑: 彭颀

(上接第 163 页)

- [32] YEONG S K, LUCKHAM P F, TADROS T F. Steady Flow and Viscoelastic Properties of Lubricating Grease Containing Various Thickener Concentrations[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 274(1): 285-293.
- [33] 潘家保, 程延海, 钱明, 等. 锂基润滑脂热流变特性及其变化机理[J]. 化工进展, 2018, 37(4): 1509-1515.
- PAN Jia-bao, CHENG Yan-hai, QIAN Ming, et al. Thermal-Rheological Properties and Variation Mechanisms of Lithium Lubricating Grease[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(4): 1509-1515.
- [34] GROPPER D, HARVEY T J, WANG Ling. A Numerical Model for Design and Optimization of Surface Textures for Tilting Pad Thrust Bearings[J]. Tribology International, 2018, 119: 190-207.
- [35] 于如飞, 陈渭. 脂润滑条件下表面织构对滑动表面承载性能的影响[J]. 润滑与密封, 2014, 39(10): 1-5.
- YU Ru-fei, CHEN Wei. Effect of Surface Texture on Load Carrying Capacity of Sliding Surface under Grease Lubrication[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(10): 1-5.
- [36] 潘家保, 程延海, 曹帅, 等. 热流变对润滑脂圆管内部流场影响的数值模拟[J]. 工程热物理论, 2015, 36(7): 1563-1567.
- PAN Jia-bao, CHENG Yan-hai, CAO Shuai, et al. Numerical Simulation of Thermal Rheological Effect on the Flow Field of Lithium Lubricating Grease during Pipeline Flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(7): 1563-1567.

责任编辑: 刘世忠