

纳米调制周期对 CrWN/MoN 纳米多层涂层结构和性能的影响

李助军¹, 包改磊², 刘怡飞¹, 张大童², 李兆南¹, 田灿鑫³

(1.广州铁路职业技术学院, 广州 510430; 2.华南理工大学, 广州 510640;
3.岭南师范学院, 广东 湛江 524048)

摘要: **目的** 研究纳米调制周期对 CrWN/MoN 纳米多层涂层结构及性能的影响。**方法** 采用电磁永磁共控的阴极电弧离子镀技术, 使用纯 N₂ 和合金 CrW 靶及纯金属 Mo 靶, 制备不同调制周期厚度的 CrWN/MoN 纳米多层涂层, 对 CrWN/MoN 纳米多层涂层的物相结构、微观形貌、硬度、摩擦系数和磨损率等进行分析。**结果** CrWN/MoN 纳米多层涂层由面心立方 CrWN 与六方 δ -MoN 两相组成。随着调制周期减小, CrWN/MoN 纳米多层涂层衍射峰强度逐渐减弱, δ -MoN(202)衍射峰消失, 涂层表面的大颗粒数量减少, 表面质量得到改善。随着调制周期由 45 nm 减小到 13 nm, 涂层的硬度由 29.4 GPa 逐渐减小到 25.5 GPa, 当调制周期为 8 nm 时, CrWN/MoN 纳米多层涂层硬度与弹性模量均达到最大值, 分别为 30.2 GPa 和 354.6 GPa。随着调制周期的减小, CrWN/MoN 纳米多层涂层平均摩擦系数由 0.45 逐渐减小到 0.29, 磨损速率由 $4.2 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 逐渐减小到 $3.3 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。**结论** 调制周期对 CrWN/MoN 纳米多层涂层性能影响较大, 调制周期厚度为 8 nm 时, CrWN/MoN 纳米多层涂层的硬度最大, 耐磨性能最好。

关键词: 电弧离子镀; CrWN/MoN 纳米多层涂层; 调制周期; 纳米硬度; 耐磨性能

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)12-0191-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.022

Influence of Nanometer Modulation Period on Structure and Properties of CrWN/MoN Nano-multilayer Coatings

LI Zhu-jun¹, BAO Gai-lei², LIU Yi-fei¹, ZHANG Da-tong², LI Zhao-nan¹, TIAN Can-xin³

(1.Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou 510430, China; 2.South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3.Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of nanometer modulation period on structure and properties of CrWN/MoN

收稿日期: 2019-11-26; 修订日期: 2020-11-08

Received: 2019-11-26; Revised: 2020-11-08

基金项目: 广州市高校创新创业教育平台项目 (2017241201); 广东省科技计划-国际合作项目 (2018A050506082); 岭南师范学院人才项目 (ZL1931)

Fund: Innovation and Entrepreneurship Education Project of Universities in Guangzhou (2017241201), International Cooperation Program of Guangdong Province Science and Technology Plan Project (2018A050506082), Talent Project of Lingnan Normal University (ZL1931)

作者简介: 李助军 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机械摩擦学与表面技术。

Biography: LI Zhu-jun (1980—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: mechanical tribology and surface technology.

通讯作者: 田灿鑫 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为表面工程。邮箱: cxtian@lingnan.edu.cn

Corresponding author: TIAN Can-xin (1983—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: surface engineering. E-mail: cxtian@lingnan.edu.cn

引文格式: 李助军, 包改磊, 刘怡飞, 等. 纳米调制周期对 CrWN/MoN 纳米多层涂层结构和性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 191-198.

LI Zhu-jun, BAO Gai-lei, LIU Yi-fei, et al. Influence of nanometer modulation period on structure and properties of CrWN/MoN nano-multilayer coatings[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 191-198.

nano-multilayer coatings. Nano-multilayer CrWN/MoN coatings with different modulation period were prepared by cathodic arc ion plating controlled by the permanent magnet with pure N_2 , alloy CrW target and pure metal Mo target. The microscale phase structure, morphology, hardness, friction coefficient and wear rate of the CrWN/MoN nano-multilayer coatings were systematically analyzed. The CrWN/MoN nano-multilayer coatings were composed of face-centered cubic CrWN and hexagonal δ -MoN. With the decrease of modulation period, the XRD diffraction peak of CrWN/MoN nano-multilayer coatings was gradually weakened, and the diffraction peak of δ -MoN (202) disappeared. The number of larger particles on the surface of the CrWN/MoN nano-multilayer coatings decreased and the surface quality of the coating was improved. With the modulation period decreasing from 45 nm to 13 nm, the hardness of the CrWN/MoN coatings decreased from 29.4 GPa to 25.5 GPa. When the modulation period decreased to 8 nm, the hardness and elastic modulus of the CrWN/MoN nanometer multilayer coatings reached the maximum values, 30.2 GPa and 354.6 GPa, respectively. With the decrease of modulation period, the average friction coefficient of CrWN/MoN nano-multilayer coatings gradually decreased from 0.45 to 0.29 and the wear rate decreased from $4.2 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ to $3.3 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. Thus, the modulation period has a great influence on the properties of CrWN/MoN nano-multilayer coatings. When the modulation period is 8 nm, the nano-multilayer CrWN/MoN coating has the highest hardness and the best wear resistance.

KEY WORDS: cathodic arc ion plating; CrWN/MoN nano-multilayer coatings; modulation period; nano-hardness; wear resistance

CrN 涂层具有良好的耐磨、抗氧化和耐腐蚀等性能,被广泛应用于刀具、模具及机械零配件的表面强化中^[1-4]。随着加工制造需求的不断提升,二元 CrN 涂层很难满足实际的应用需求。CrN 在作为刀具涂层使用时,硬度较低^[5],尤其在作为汽车冲压类模具涂层使用时,需要结合离子渗氮复合工艺,才能满足工况的基本要求^[6-7]。此外,CrN 在作为零配件涂层使用,特别是发动机配件表面涂层时,需要较厚的厚度 ($>25 \mu\text{m}$)^[8-10]。这些需求对 CrN 涂层及其制备技术都提出了更高的要求。研究表明,通过添加新元素和纳米多层化处理,可有效提高 CrN 涂层的硬度,降低摩擦系数,提高耐磨性能。

W 元素掺杂 CrN 涂层,可有效改善 CrN 涂层的机械及摩擦学性能。Lin^[11]通过离子束辅助沉积制备 CrWN 涂层,W 含量 4.4%和 7.1%的 CrWN 涂层硬度最高,表面最平滑,适合于玻璃成形模具。王莉^[12]采用离子束辅助沉积技术制备各种 W 含量的 CrWN 涂层,9.96%W 的 CrWN 涂层固溶强化作用最显著,硬度最高。Wu^[13]通过直流磁控反应复合溅射技术制备了各种 W 含量 (13%~40.5%) 的 CrWN 涂层,结果显示,W 元素能有效抑制 CrN 晶粒长大,同时形成了 WN 第二相,这是 CrWN 涂层硬度提高到 25 GPa 的主要原因。W 的自润滑效果使 CrWN 涂层摩擦系数低于 0.3,磨损量低于 $4 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。Chang^[14]采用反应直流磁控溅射技术,制备了各种 W 含量的 CrWN 涂层,40%~60% W 的 CrWN 涂层中形成了 CrN 和 W_2N 两项混合结构,使 CrWN 涂层硬度高达 27 GPa,但 CrWN 涂层附着力很低 (小于 25 N)。由此可见,W 含量对 CrWN 涂层的机械和摩擦学性能起着至关重要的作用。

CrN 涂层结合 MoN 涂层形成纳米多层涂层也可有效提升涂层的硬度及耐磨性能。Pogrebniak^[15]通过

电弧离子镀技术制备了 8~19 μm 厚的 CrN/MoN 纳米多层涂层,在低偏压 (-20 V) 下制备的涂层的调制周期从微米尺度逐渐过渡到纳米尺度,硬度逐渐提高到 40 GPa,不断增多的界面有效阻止了位错的滑移和晶粒尺寸的增长,使涂层硬度得到提升。TIAN 等人^[16-17,19]采用电弧离子镀技术制备了 2~3 μm 厚的纳米多层 CrN/Mo₂N 涂层,研究表明,含 Mo、W 涂层在摩擦过程中,原位生成了 MoO_3 、 WO_3 润滑相,有效地改善了含 Mo、W 涂层的磨损系数 (低于 0.3) 和磨损速率 ($6.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$)。

采用 CrW 合金靶,利用电弧离子镀技术把含 W 的 CrWN 涂层与 MoN 涂层有效复合,形成纳米多层涂层的研究尚未见报道。因此,本文采用电磁永磁共控的阴极电弧离子镀技术,通过 CrW 合金靶 (Cr、W 原子数量比为 95:5 (下同),低 W 含量降低 CrW 合金靶脆裂风险,并有利于弧斑的稳定运行和膜层中元素的均匀分布) 与纯 Mo 金属靶材,在氮气气氛下制备 CrWN/MoN 纳米多层涂层,系统研究纳米调制周期对 CrWN/MoN 纳米复合涂层的结构、力学及摩擦学性能的影响,以期获得机械性能和摩擦学性能更为优良的纳米多层 CrWN/MoN 涂层。

1 实验

1.1 涂层制备

采用电磁永磁共控的阴极电弧离子镀技术,制备不同调制周期的纳米多层 CrWN/MoN 涂层。试验采用的衬底材料为硅片和 YT15 硬质合金试块,分别用于结构和性能测试。将衬底材料镜面抛光,酒精超声清洗并烘干。将试片装夹在衬底架上,抽真空并加热,温度 400 $^{\circ}\text{C}$,本底真空度到 $7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 后,依次对基

底进行 Ar 和金属 Mo 离子刻蚀。刻蚀结束后,在 1.5 Pa 氮气气氛、-120 V 偏压、125 A 弧电流条件下,在基体表面沉积 200 nm 左右 MoN 过渡层,然后开始沉积 CrWN/MoN 纳米多层涂层,所用靶材为 CrW 合金靶和 Mo 纯金属靶,沉积时间为 180 min。CrWN/MoN 纳米复合涂层具体的沉积工艺参数见表 1。

表 1 CrWN/MoN 纳米多层涂层沉积参数
Tab.1 Deposition parameters of the CrWN/MoN nano-multilayer coatings

Deposition parameter	Values
Bias voltage/V	-120
Target material	CrW, Mo
Deposition pressure /Pa	1.0
Target current/A	CrW=80, Mo=125
Temperature/°C	400
Reaction gas	N ₂
Rotation speeds/(rad·min ⁻¹)	0.5, 1, 2, 3
Deposition time/min	180

1.2 表征与测试

采用日本 Smart Lab X 射线衍射仪 (XRD), 通过掠入射模式测定涂层的晶体结构。采用场发射扫描电子显微镜 (Nova Nano 430, FEI, USA) 和场发射透射电子显微镜 (Tecnai G2 F20 S-TWIN, FEI) 观察涂层的形貌和微观结构。采用安捷伦 Agilent Nano Indenter G200 纳米压痕仪对复合涂层的硬度和弹性模量进行测试,载荷 30 mN, 每个样品随机取 6 个点, 并取平均值。室温下使用布鲁克公司生产的 UMT-Tribo Lab 球盘旋转摩擦磨损试验仪对涂层样品的摩擦性能进行测试,载荷 15 N, 采用直径 6 mm 的 Si₃N₄ 陶瓷球作为对磨材料,圆形磨痕直径为 4 mm, 转速 200 r/min, 对磨时间 40 min。采用 TALYSURF CLI 1000 表面轮廓仪测量磨痕截面深度,并计算其磨损率,每个磨损轨道取 4 个截面测量,求平均值。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

不同纳米调制周期 CrWN/MoN 纳米多层涂层的 XRD 谱如图 1 所示。从图中可以看出, CrWN/MoN 纳米多层涂层由面心立方 CrWN 和六方 δ-MoN 两相组成。CrWN 和 MoN 两种异质层交替构成的纳米多层涂层没有完全对应的 CrWN 和 δ-MoN 的衍射峰,其衍射峰是 CrWN 和 δ-MoN 晶相的重叠峰。调制周期为 45 nm 的 CrWN/MoN 纳米多层涂层出现了明显的 δ-MoN(202)峰。随着调制周期减小,涂层衍射峰强度逐渐减弱,δ-MoN(202)衍射峰消失。这是因为随着多层涂层调制周期逐渐减小,单层膜越来越薄,有

效抑制了涂层中晶粒的生长^[20]。图中分别给出了 CrN (PDF#65-2899)和 δ-MoN(PDF#25-1367)标准 PDF 卡片所对应的衍射峰位置。与面心立方 CrN 相比,单层 CrWN 衍射峰向小角度偏移,这是由于 W 原子置换了 CrN 中的 Cr 原子,形成具有面心立方 CrN 结构的 CrWN 置换固溶体,导致晶格畸变,晶格常数增大所致^[12]。

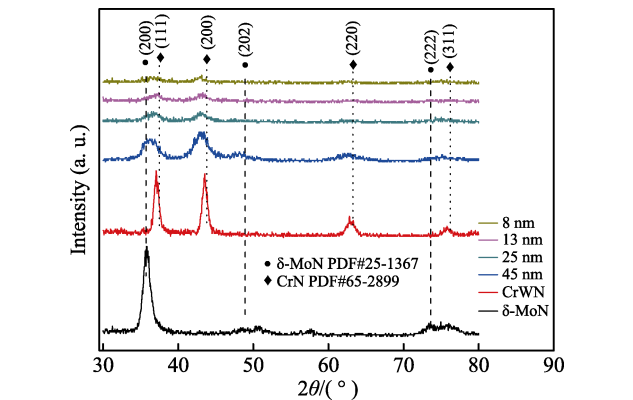


图 1 不同调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的 XRD 谱图

Fig.1 XRD patterns of the CrWN/MoN nano-multilayer coatings with different modulation period

2.2 涂层的表面和截面形貌

图 2 所示为 CrWN/MoN 纳米多层涂层的表面形貌。由图可知,随着调制周期逐渐减小,涂层表面大颗粒数量减少,尺寸逐渐减小,且小尺寸颗粒数量也有减少的趋势。这是因为由颗粒剥落引起的大尺寸浅坑数量逐渐减少,小坑洞增多,随着调制周期厚度的减小,对膜层中大颗粒数量有一定的抑制作用。调制周期为 8 nm 的 CrWN/MoN 涂层表面颗粒数量最少,坑洞数量也较少。与常规电弧离子镀膜层表面相比^[21],采用永磁电磁共控的电弧离子镀技术制备的 CrWN/MoN 纳米多层涂层表面大颗粒得到了有效的抑制。电/永磁相结合,优化了靶材表面区域磁场,进一步约束了靶材表面的电子,同时加快电子在靶面的运动,促进弧斑在靶面的快速湮灭与再生,有效抑制了大熔滴的崩发,膜层表面更光滑。常规电弧离子镀技术下很难稳弧的 Mo 元素,在电磁、永磁共同作用下,降低了引弧难度,在 125 A 弧电流下实现了 Mo 靶的稳定运行,也没有因弧电流增大,产生大颗粒恶化的问题。

不同纳米调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的截面 SEM 形貌如图 3 所示。由图可知,所制备的不同调制周期的 CrWN/MoN 纳米复合涂层的总厚度变化不大,在 3.2~3.6 μm 之间。这是因为涂层沉积过程中,在保持沉积气压、基片偏压、靶材电流不变的情况下,涂层的厚度主要与沉积时间有关,因此涂层的厚度没有发生明显变化。CrWN/MoN 纳米多层涂层结构致密,没有明显的柱状结构。

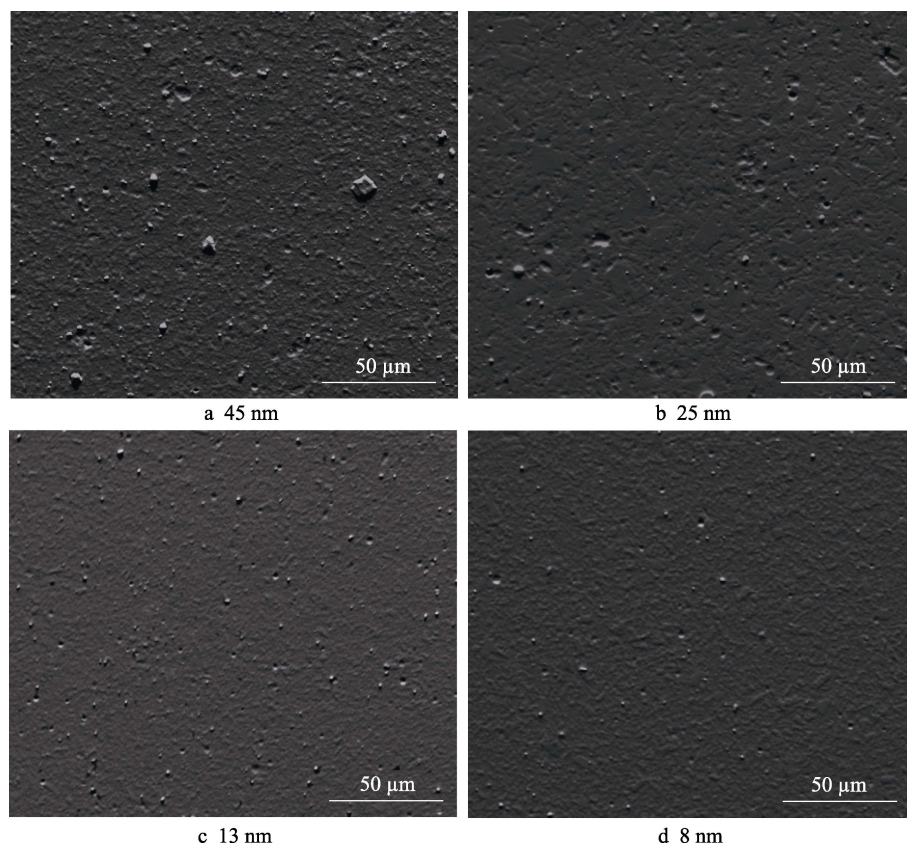


图 2 不同调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of the CrWN/MoN nano-multilayer coatings with different modulation period

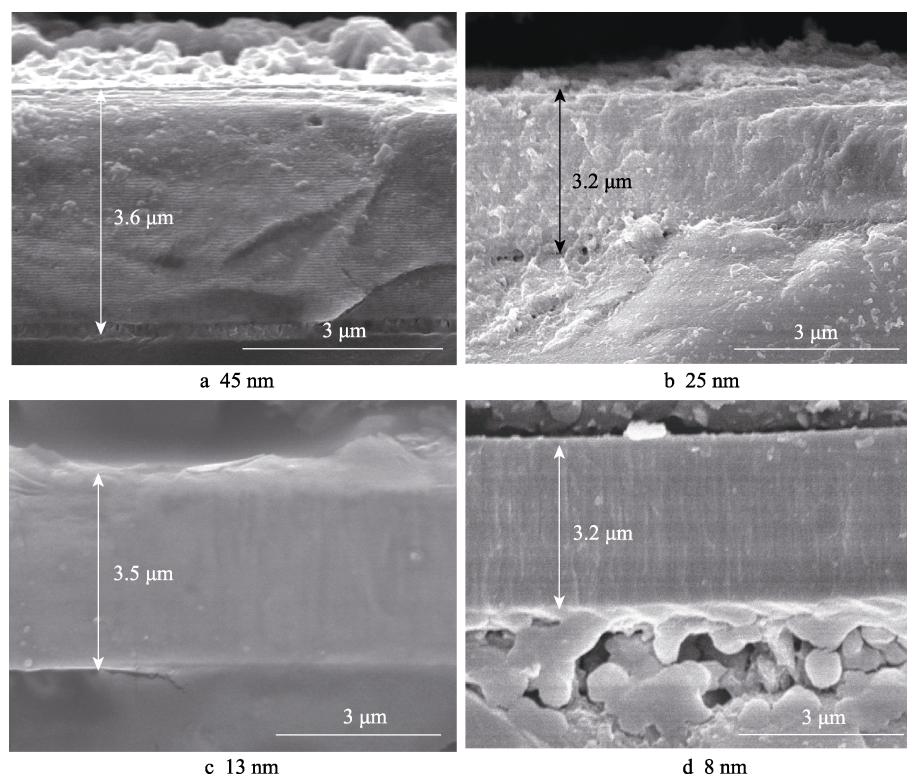


图 3 不同调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的截面 SEM 形貌

Fig.3 Cross-sectional SEM images of the CrWN/MoN nano-multilayer coatings with different modulation period

为深入了解 CrWN/MoN 涂层的微观结构, 对不同纳米调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层截面进

行 TEM 分析观察, 如图 4 所示。通过调整衬底转速得到的 CrWN/MoN 多层膜具有较好的纳米级多层结

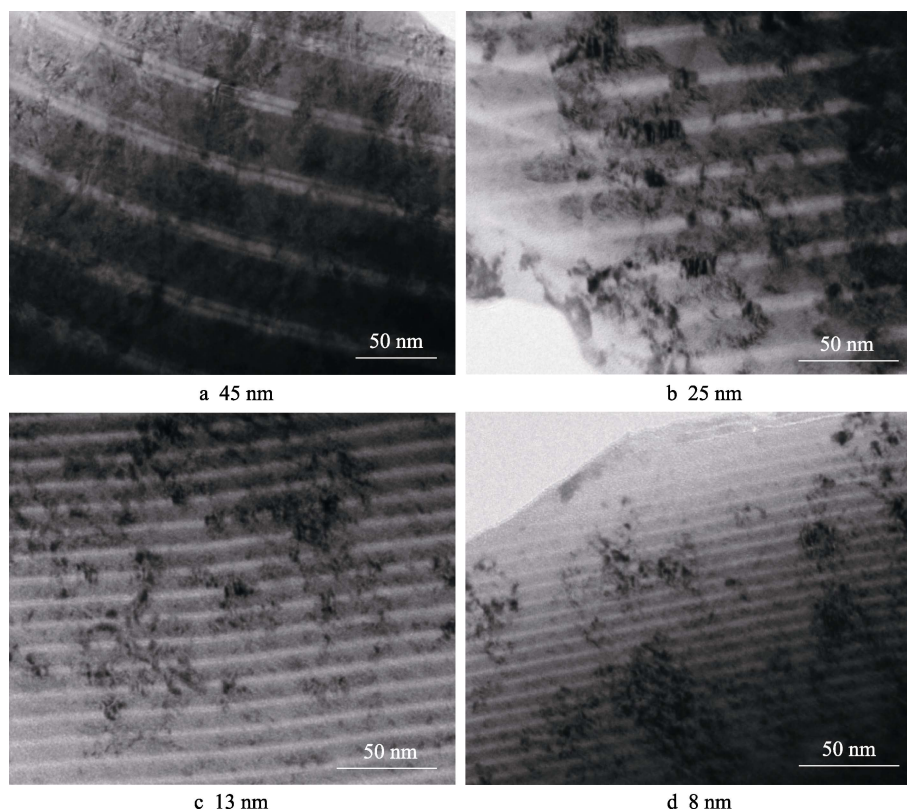


图 4 不同调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层截面 TEM 形貌

Fig.4 Cross-sectional TEM images of the CrWN/MoN nano-multilayer coatings with different modulation period

构, 从图中可以清晰地看到 CrWN/MoN 涂层的纳米多层周期结构(白色区域为 CrWN 层, 灰黑色区域为 MoN 层, 层与层之间的界面比较模糊)。从调制周期 45 nm 的 CrWN/MoN 纳米多层涂层中明显看到, 在白色 CrWN 层中有一黑色薄层, 据参考文献[22]报道, 黑色薄层可能为 MoN 层。

2.3 涂层的力学性能

图 5 为不同纳米调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的纳米压痕硬度和弹性模量变化曲线。各调制周期厚度的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的硬度(30 GPa)

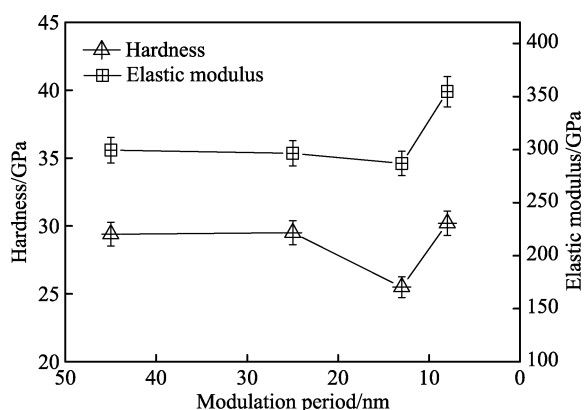


图 5 不同调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的硬度和弹性模量

Fig.5 Hardness and elastic modulus of the CrWN/MoN nano-multilayer coatings with different modulation period

与弹性模量(300 GPa)变化不大。与单层 δ -MoN 和 CrWN 涂层的硬度(20~22 GPa)相比, CrWN/MoN 纳米多层涂层的硬度有明显提升。由 SEM(图 3)和 TEM(图 4)截面形貌图可以看到, 在不同衬底转速下制备的不同纳米调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层没有明显的柱状晶, 涂层微观结构更致密。这是因为多层结构有效抑制了位错的产生与运动, 多因素协同作用促进了涂层硬度的提升。涂层结晶变差(图 1), CrWN 与 MoN 层界面模糊(图 4), 对 CrWN/MoN 纳米多层涂层硬度有一定的影响。调制周期 13 nm 的 CrWN/MoN 纳米多层涂层硬度有所降低, 其主要原因需要进一步的探究。

2.4 涂层的摩擦性能

图 6 所示为不同纳米调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的摩擦系数曲线。涂层与对磨材料之间磨合时间短, 大调制周期的涂层的摩擦系数随磨损时间的延长而逐渐增大。随着调制周期逐渐减小, CrWN/MoN 纳米多层涂层的摩擦系数逐渐减小。调制周期 8 nm 的 CrWN/MoN 纳米多层涂层摩擦系数随磨损时间变化相对平稳。插图是不同纳米调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的磨损率, 随着纳米调制周期减小, 层间界面数量增多, 涂层的磨损率逐渐降低^[15]。8 nm 调制周期厚度的 CrWN/MoN 纳米多层涂层硬度最高, 其平均摩擦系数和磨损率最低, 分别为 0.29 和 $3.3 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。与 CrN 的摩擦系数(0.6~

0.7) 和磨损率 ($3.3 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$) 以及 CrWN 的摩擦系数 (~ 0.5) 和磨损率 ($5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$) 相比, CrWN/MoN 纳米多层涂层的减摩耐磨性能有明显的提升。

图 7 所示为不同纳米调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的磨损形貌。图 7a—d 分别为纳米调制周期 45、25、13、8 nm 的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的磨损形貌。可以看出, 涂层磨损轻微, 磨损轨迹平滑, 边缘没有明显的磨屑堆积, 但有明显的坑洞和较浅的犁沟, 且磨损轨迹宽度随调制周期减小而变窄。在摩擦过程中, 大颗粒脱落, 形成坑洞, 且大颗粒脱落后混入摩擦副接触面之间, 被破碎成小颗粒磨料, 在后

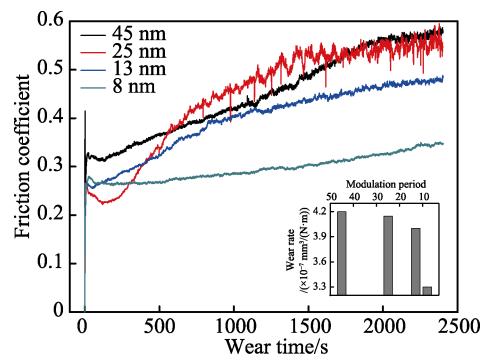


图 6 不同调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的摩擦系数
Fig.6 Friction coefficient of the CrWN/MoN nano-multilayer coatings with different modulation period

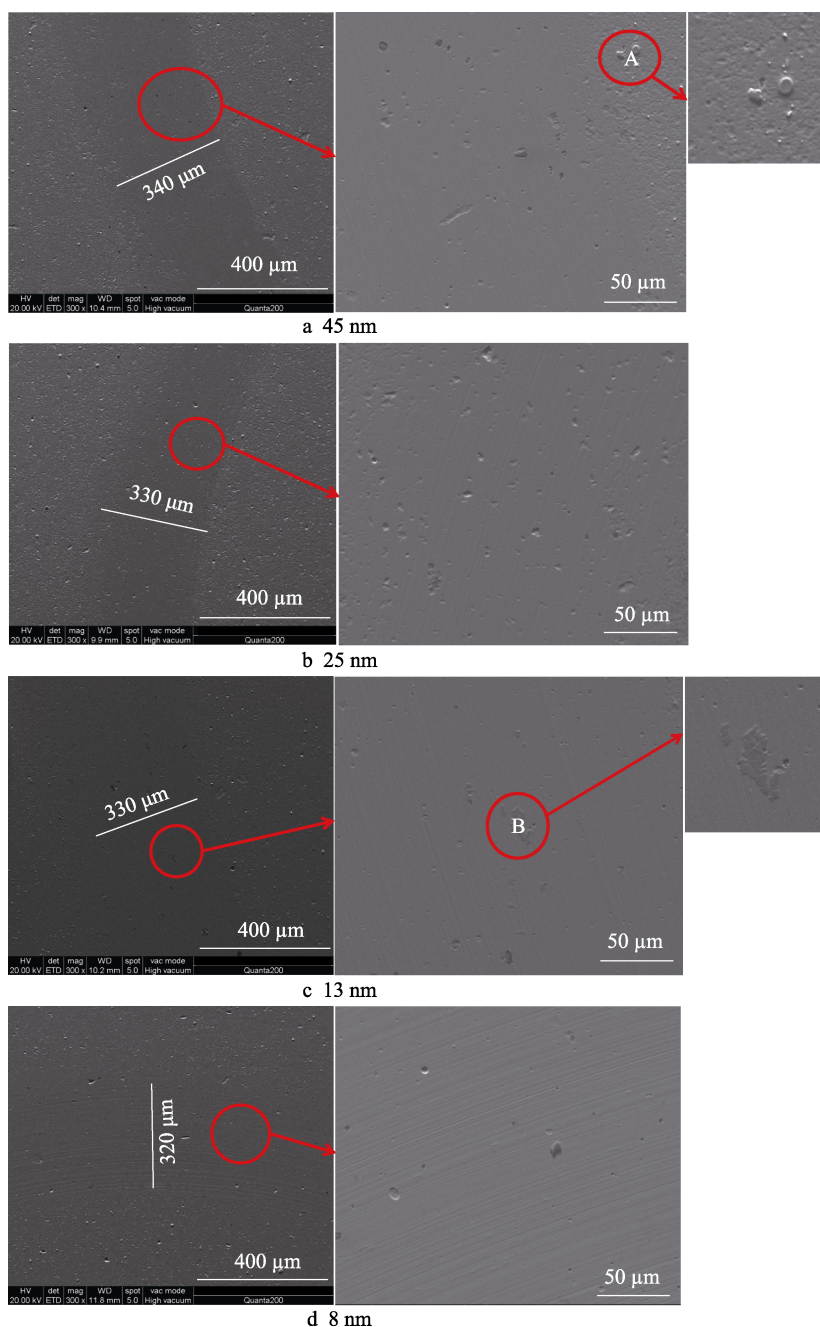


图 7 不同调制周期的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的磨损形貌

Fig.7 Wear morphologies of the CrWN/MoN nano-multilayer coatings with different modulation period

续摩擦中充当推挤或切削作用, 形成犁沟。由图 7a 标记 A 处和图 7c 标记的 B 处可以看到, 脱落大颗粒被摩擦副压至塑性变形的碎屑。CrN 在干摩擦状态下的主要磨损机制是磨粒磨损和粘附磨损^[23-24], 磨损轨迹边缘有大量的磨屑及较深的犁沟。W 掺杂 CrN 与 MoN 形成的 CrWN/MoN 纳米调制周期多层涂层, 在摩擦过程中发生摩擦化学反应, 生成 WO_3 ^[25]、 MoO_3 ^[26] 润滑薄层, 起到固态润滑剂的作用, 使涂层耐磨性能显著提升, 降低了磨粒磨损对涂层的破坏程度, 只有较浅的犁沟出现。同时纳米多层结构提升了涂层的硬度, 对涂层耐磨性也有促进作用。

3 结论

1) 采用多弧离子镀技术, 以 CrW 合金 (95 : 5) 和 Mo 纯金属为靶材, 通过改变衬底转速, 在氮气气氛下制备了纳米调制周期的 CrWN/MoN 多层涂层。较 CrN 或 CrWN 单层涂层而言, CrWN/MoN 多层涂层有更高的硬度和更好的耐磨性。

2) CrWN/MoN 纳米多层涂层主要包含面心立方 CrWN 和六方 δ -MoN 两种晶相。随着调制周期逐渐减小, 涂层表面大颗粒和浅坑尺寸逐渐减小, 且数量变少, 涂层表面质量得到改善。

3) 调制周期对 CrWN/MoN 纳米多层涂层的硬度和摩擦系数影响显著。8 nm 调制周期厚度的 CrWN/MoN 纳米多层涂层的硬度值最大, 为 30.2 GPa, 摩擦系数低于 0.3, 磨损率最低, 为 $3.3 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

参考文献:

- [1] 宋贵宏, 杜昊, 贺春林. 硬质与超硬涂层[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
SONG Gui-hong, DU Hao, HE Chun-lin. Hard and super-hard coatings[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [2] 陈涛, 王泽松, 周霖, 等. 用于发动机活塞环表面涂层的 CrN 薄膜[J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 102-105.
CHEN Tao, WANG Ze-song, ZHOU Lin, et al. CrN films for surface coatings of engine piston rings[J]. China surface engineering, 2010, 23(3): 102-105.
- [3] 夏飞. HIPIMS 技术制备 CrN 涂层及其结构与力学性能的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
XIA Fei. Study the structure and mechanical properties of CrN coatings prepared by HIPIMS technology[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
- [4] 金烨堂, 王进, 马大衍, 等. 硬质合金刀条 AlCrN 硬质膜性能的研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(4): 139-144.
JIN Ye-tang, WANG Jin, MA Da-yan, et al. Properties of AlCrN coating on cemented carbide cutters[J]. Journal of net shape forming engineering, 2018, 10(4): 139-144.
- [5] 龙永杰. 高速钢刀具表面磁控溅射 CrN 涂层及其性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
LONG Yong-jie. Research on magnetron sputtering CrN coating and performance of high speed steel tool[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [6] 王永光, 陈瑶, 陆小龙, 等. 40Cr 钢表面渗氮及制备 CrN 涂层在重载低速下的摩擦学性能[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 71-76.
WANG Yong-guang, CHEN Yao, LU Xiao-long, et al. Tribological properties of plasma nitriding and CrN coating on 40Cr steel with high load at low speed[J]. Surface technology, 2018, 47(2): 71-76.
- [7] WANG Yong-guang, CHEN Yao, ZHAO Dong, et al. Deformation mechanism of CrN/nitriding coated steel in wear and nano-scratch experiments under heavy loading conditions[J]. Applied surface science, 2018, 447: 100-106.
- [8] SHI P Z, WANG J, TIAN C X, et al. Structure, mechanical and tribological properties of CrN thick coatings deposited by circular combined tubular arc ion plating[J]. Surface & coatings technology, 2013, 228: S534-S537.
- [9] 赵晚成, 马亚军, 李生华, 等. CrN 活塞环涂层的摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2005(2): 59-62.
ZHAO Wan-cheng, MA Ya-jun, LI Sheng-hua, et al. Tribological performance of chromium nitride piston ring coating[J]. Lubrication engineering, 2005(2): 59-62.
- [10] 林松盛, 黄儒明, 苏一凡, 等. CrN 膜层结构对其性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2019, 13(3): 195-201.
LIN Song-sheng, HUANG Ru-ming, HANG Yi-fan, et al. Effect of CrN film structure on performance[J]. Materials research and application, 2019, 13(3): 195-201.
- [11] LIN C H, DUH J G, YAU B S. Processing of chromium tungsten nitride hard coatings for glass molding[J]. Surface & coatings technology, 2006, 201: 1316-1322.
- [12] 王莉. 钨含量对 CrWN 涂层在不同润滑条件下的摩擦学性能影响研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
WANG Li. Effect of tungsten contents on tribological properties of CrWN coatings under different lubrication conditions[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [13] WU Wan-Yu, WU Chia-hao, XIAO Bo-hong, et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of CrWN films deposited by DC magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2013, 87: 209-212.
- [14] CHANG Li-chun, ZHENG Yu-zhe, GAO Yu-xiang. Mechanical properties and oxidation resistance of sputtered Cr-W-N coatings[J]. Surface & coatings technology, 2017, 320: 196-200.
- [15] 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.
- [16] TIAN C X, HAN B, ZOU C W, et al. Synthesis of monolayer MoN_x and nano-multilayer CrN/ Mo_2N coatings using arc ion plating[J]. Surface & coatings technology, 2019, 370: 125-129.

- [17] 齐东丽, 雷浩, 范迪, 等. Mo 含量对 CrMoN 复合涂层的组织结构和性能的影响[J]. 金属学报, 2015, 51(3): 371-377.
QI Dong-li, LEI Hao, FAN Di, et al. Effect of Mo content on the microstructure and properties of CrMoN composite coatings[J]. Acta metallurgica sinica, 2015, 51(3): 371-377.
- [18] SUSZKO Tomasz, GULBINSKI Witold, JAGIELSKI Jacek. The role of surface oxidation in friction processes on molybdenum nitride thin films[J]. Surface and coatings technology, 2005, 194(2-3): 319-324.
- [19] YANG Qi. Wear resistance and solid lubricity of molybdenum-containing nitride coatings deposited by cathodic arc evaporation[J]. Surface and coatings technology, 2017, 332: 283-295.
- [20] 林松盛, 周克崧, 冯诚诚, 等. 调制结构对 Ti-TiN-Zr-ZrN 多层膜力学性能影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(11): 3468-3472.
LIN Song-sheng, ZHOU Ke-song, FENG Cheng-cheng, et al. Effect of modulation structure on mechanical properties of Ti-TiN-Zr-ZrN multilayer films[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(11): 3468-3472.
- [21] 田灿鑫, 刘怡飞, 李助军, 等. 离子源增强电弧离子镀活塞环表面 CrN 涂层制备[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 19-26.
TIAN Can-xin, LIU Yi-fei, LI Zhu-jun, et al. Deposition of CrN coatings on piston rings using cathodic arc platings with ion source[J]. China surface engineering, 2017, 30(4): 19-26.
- [22] ZHOU Z, RAINFORTH W M, ROTHER B, et al. Elemental distributions and substrate rotation in industrial TiAlN/VN superlattice hard PVD coatings[J]. Surface and coatings technology, 2004, 183: 275-282.
- [23] LI Ze-chao, GUAN Xiao-yan, WANG Yong-xin, et al. Comparative study on the load carrying capacities of DLC, GLC and CrN coatings under sliding-friction condition in different environments[J]. Surface and coatings technology, 2017, 321: 350-357.
- [24] TENG Yue, GUO Yuan-yuan, ZHANG Min, et al. Effect of Cr/CrN_x transition layer on mechanical properties of CrN coatings deposited on plasma nitrided austenitic stainless steel[J]. Surface and coatings technology, 2019, 367: 100-107.
- [25] HUANG Xin-fang, XIE Zhi-wen, LI Kang-shen, et al. Microstructure, wear and oxidation resistance of CrWN glass molding coatings synthesized by plasma enhanced magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2020, 174: 109-206.
- [26] CHOI E Y, KANG M C, KWON D H, et al. Comparative studies on microstructure and mechanical properties of CrN, CrCN and CrMoN coatings[J]. Journal of materials processing technology, 2007, 187-188: 566-570.

(上接第 54 页)

- [9] 包蕊, 陈芮. 纳米 ZnO 的制备及其紫外吸收特性[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2013(6): 74-75.
BAO Rui, CHEN Rui. Preparation and ultraviolet absorption characteristics of nano-zinc oxide[J]. Journal of Yunnan Normal University (natural sciences edition), 2013(6): 74-75.
- [10] 刘超峰, 王振红, 胡行方. 氧化锌色素在真空紫外辐照下降解机理的研究[J]. 中国空间科学技术, 1998(8): 35-39.
LIU Chao-feng, WANG Zhen-hong, HU Xing-fang. Mechanism of degradation of ZnO pigment induced by ultraviolet irradiation in vacuum[J]. Chinese space science and technology, 1998(8): 35-39.
- [11] 李丹明, 田恺, 贺德衍. 基于单分子层模型 ZnO 热控涂层电子辐照光学性能退化研究[J]. 功能材料, 2010, 41(6): 1001-1004.
LI Dan-ming, TIAN Kai, HE De-yan. Study for optical performance degradation of ZnO thermal control coatings under electronic irradiation based on monolayer model[J]. Journal of functional materials, 2010, 41(6): 1001-1004.
- [12] HEYDARI V, BAHREINI Z, HEIDARI M, et al. Synthesis of Zn-SBA-15 as new pigment for spacecraft white thermal control coatings[J]. Progress in organic coatings, 2003, 47(3): 432-442.
- [13] 张文林, 范德松, 李强. 一种新型热控涂层材料[C]//第十三届空间热物理会议论文集. 烟台: 中国宇航学会飞行器总体专业委员会, 2017: 453-456.
ZHANG Wen-lin, FAN De-song, LI Qiang. A new type of thermal control coatings material[C]// Proceedings of the 13th space thermophysics conference. Yantai: Chinese Society of Spacecraft System Engineering, 2017: 453-456.
- [14] 孙辉, 王君, 范德松. 高紫外反射型颜料与热控涂层的制备与性能研究[J]. 涂料工业, 2019, 49(6): 1-6.
SUN Hui, WANG Jun, FAN De-song. Preparation and performance study of highly ultraviolet reflective pigments and thermal control coatings[J]. Paint & coatings industry, 2019, 49(6): 1-6.
- [15] 张立功, 赵贵梅, 吴晓宏. ZnO/SiO₂ 核壳结构热控涂层制备研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(4): 33-35.
ZHANG Li-gong, ZHAO Gui-mei, WU Xiao-hong. Preparation of thermal control coatings of ZnO/SiO₂ core-shell[J]. Materials science and technology, 2011, 19(4): 33-35.
- [16] HEYDARI V, BAHREINI Z. Synthesis of silica-supported ZnO pigments for thermal control coatings and analysis of their reflection mode[J]. Journal of coatings technology & research, 2018, 15(1): 223-230.