

含 Mo 的 PVD 涂层结构及其摩擦学特性的研究进展

齐元青^{a,b},付永强^{a,b},张懋达^{a,b},王谦之^{a,b},周飞^{a,b}

(南京航空航天大学 a. 直升机传动技术重点实验室; b. 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:从含 Mo 元素的代表性涂层入手,综述了二元、三元再到多元含 Mo 系列 PVD 涂层的研究现状和进展,探究了不同元素添加、不同制备参数等对涂层微观结构、力学性能和摩擦学性能等的影响。在涂层组分从二元发展到多元的过程中,改变掺杂元素种类、含量,制备参数会引起涂层微观结构的变化进而提升涂层力学性能和摩擦学性能。涂层性能的改善,有利于增强对机械设备中关键传动零部件的保护,延长机械设备使用寿命,对军工及社会发展具有重大意义。

关键词:含 Mo 涂层;PVD 涂层;微观结构;力学性能;摩擦学性能

中图分类号:TH117.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)02-0001-06

Progress of Researching on Structure and Tribological Properties of Mo-containing PVD Coatings

QI Yuanqing^{a,b}, FU Yongqiang^{a,b}, ZHANG Maoda^{a,b}, WANG Qianzhi^{a,b}, ZHOU Fei^{a,b}

(a. National Key Laboratory of Helicopter Transmission Technology and b. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper starts with the representative coatings containing Mo element and researches on the status and progress of binary, ternary and multi-component Mo-containing PVD coatings and the effects of different element additions and different preparation parameters on the microstructure, mechanical properties and tribological properties of the coating. In the process of the coating composition changing from binary to multi-component, the change of the microstructure of the coating is caused by changing the type and content of doping elements and the preparation parameters, which can improve its mechanical and tribological properties. The improvement of the coating performance is beneficial to enhance the protection of key transmission components in mechanical equipment and prolong the service life. It is of great significance to military industry and social development.

Keywords: coatings containing Mo; PVD coatings; microstructure; mechanical properties; tribological properties

0 引言

当今社会,摩擦磨损^[1]一直是各类机械设备关键传动零部件产生失效的主要原因。另外,部署在海防前线的舰载直升机和先进舰船等设备长期处于高温、高湿、高盐度环境中,同时也面临海水腐蚀^[2]的威胁。针对海洋环境中零部件的摩擦防护,近年来已进行了大量研究^[3-6]。Mo 作为一种耐高温、耐腐蚀、耐磨损并且强度较高的金属已经在工业领域得到关注度很高应用^[7],但是,Mo 在高温工作环境下易发生氧化^[8]。探究能够改良含 Mo 涂层特性的制备工艺^[9]已成为一个关注度很高的研究课题。二元含 Mo 合金涂层^[9] Mo-C 涂层独特的六方结构能够明显提高涂层的耐磨性^[10-11]。改变 N 含量,可细化 Mo-N 涂层的晶粒,提高硬度到 32.5 GPa,降低摩擦因数^[12]。同样具有致密微观结构的 Mo-Si 涂层,显微硬度可达到 1 100~1 350 HV^[13],但是抗氧化性差。为改善 Mo-Si 涂层的抗氧化性, YAO^[14]等

人掺杂 Al 元素制备获得 Mo-Si-Al 涂层,相较于 Mo-Si 涂层,改善抗氧化性和力学性能。另外, Mo-Si-N 涂层抗氧化性相较于 MoSi₂ 涂层也明显提升^[15]。在 Cr-N 基涂层^[16]的基础上,针对三元 Cr-X-N 涂层的研究发现,三元涂层通常形成阳离子固溶体或阴离子固溶体^[17],从而具有优异的摩擦学特性。优化制备工艺,可制备获得 Ti-Al-Mo-N、Cr-Mo-Si-N、Cr-Mo-Si-C-N 等多元涂层^[18-20]。随着元素含量的增加,晶粒尺寸变小^[21],另外 Si 元素的掺杂,以及 Si 和 C 元素的同时添加会影响微观粒子的成长,改善涂层的各项性能。在对 Cr-Mo-Si-C-N 涂层的研究中发现,涂层独特的纳米复合微观结构可以显著地提高涂层的硬度^[22]。HONG^[23]等人发现 Cr-Mo-16.9 at.% Si-N 涂层在负载为 1 N,滑动速度为 0.157 m/s,在潮湿环境中与钢球对磨时摩擦化学反应生成 SiO₂ 和 Si(OH)₄ 润滑层,摩擦因数从 0.49 降低到 0.3。由此可见,研究制备多元新型涂层替代传统涂层,具有广阔的发展前景。

基金项目:国家自然科学基金项目(51775271);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20180509);直升机传动技术重点实验室自主课题资助项目(HTL-A-19G04)

第一作者简介:齐元青(1994—),男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为机械工程。

通信作者简介:周飞(1969—),男,教授,博士,博士生导师,主要研究方向为表面工程和摩擦学。

1 二元 Mo-C、Mo-N 涂层结构及其摩擦学特性

1.1 Mo-C、Mo-N 涂层结构及力学性能

DINESH^[24] 等人使用直流磁控溅射技术,利用活性 CH₄ 气体在 316L 基板上可以获得具有纳米晶立方结构和优异力学性能的 Mo-C 涂层。Mo-N 涂层由于稳定的力学性能,也一直是研究的热点^[25]。KAZMANLI^[26] 等人对 Mo-N 涂层的研究表明,在较低的氮气压力和较高的基底偏压下,立方 γ -Mo₂N 是涂层的主要相,而较低的基底温度则可促进 δ -MoN 相的形成;调节制备参数,可改变涂层 γ -Mo₂N 和 δ -MoN 相的比例,可以实现硬度从 3 372 kg/mm² 提高为 5 085 kg/mm²。BOUAOUINA^[27] 等人研究中发现,N 含量增加,会使涂层呈现多晶结构而且对 (111) 晶面有优选的倾向。如图 1 所示,当 N/Mo = 1.1 时,涂层生成较小的微晶,进而改变涂层力学性能。由图 2 可知,面心立方 (fcc) γ -Mo₂N 相是在 20 % ~ 40 % 氮的浓度范围内唯一相,在 50 % 氮浓度下观察到压应力和力学性能(硬度和弹性模量)的变化与涂层从 γ -Mo₂N 到 δ -MoN 和 B1-MoN 的结构变化有关。

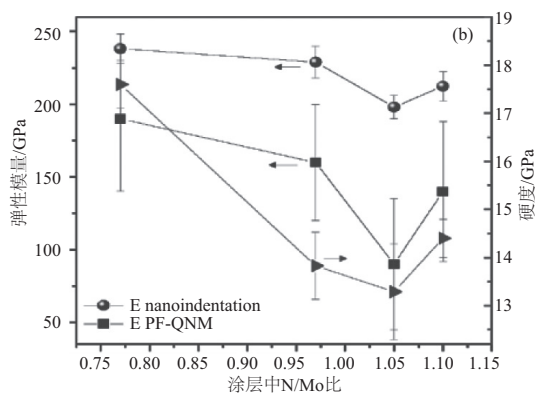


图 1 作为 N/Mo 原子比函数的涂层硬度和弹性模量的演变

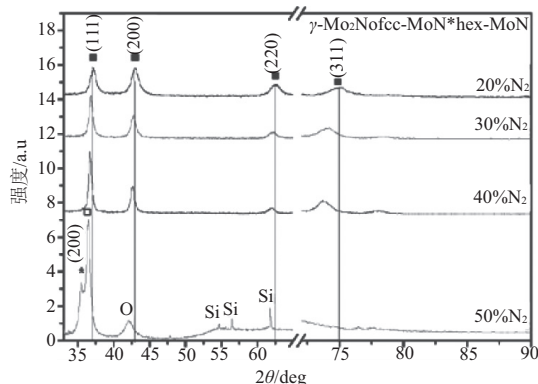


图 2 不同氮气浓度下涂层 XRD 图谱

1.2 Mo-C、Mo-N 涂层摩擦学性能

Mo-C 涂层与 100Cr6 钢小球在负载为 1 N, 滑动速度

为 1.04 cm/s 条件下对磨后检测到了包含 Mo-O、 α -C 和 Mo-C 相滑膜的形成。润滑膜降低了摩擦和磨损,改善了湿润大气条件下摩擦学性能。由图 3 可知,在湿润大气条件下涂层摩擦因数可以降低至 0.16,并且具有更高的耐磨损率 ($1.42 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$)^[24]。

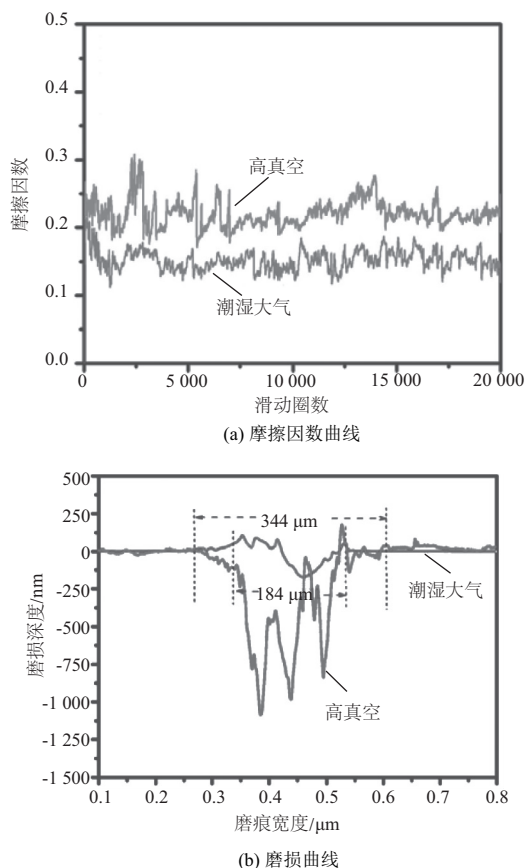


图 3 潮湿-大气和高真空条件下 Mo-C 涂层的摩擦因数曲线

GILEWICZ^[28] 等人利用磁控溅射方法制备 Mo-N 涂层,在载荷为 20 N, 滑动速度为 0.2 m/s, 滑动距离为 1 500 m 条件下测试 Mo-N 涂层的磨损率^[29]。由图 4 可知,在氮气压力为 1.8 Pa 和 100 °C 下获得的 Mo-N 涂层具有最佳的耐磨性,磨损率在 $1 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 的范围内。

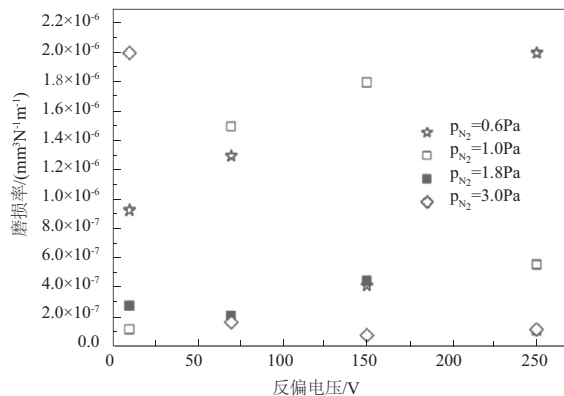


图 4 不同基板偏置电压和氮气压力 Mo-N 涂层的磨损率

2 三元 Mo-Si-Al、Mo-Si-N、Cr-Mo-N 涂层结构及其摩擦学特性

2.1 三元 Mo-Si-Al、Mo-Si-N、Cr-Mo-N 涂层结构及力学性能

继续掺杂元素,例如 Al、N 掺杂对 MoSi₂ 性能的影响已成为广泛研究的课题^[30-35]。由于 MoSi₂ 中化学键特点,MoSi₂ 虽然具有优异的抗氧化性^[36],但是在低温下缺乏延展性^[37],材料是脆性的。添加 Al 时,MoSi₂ 晶格中的 Si 被 Al 取代,增加了金属键合的程度,提升了材料的可塑性。BLINKOV^[38] 等人使用电弧物理气相沉积工艺制备获得具有均匀分布等轴晶粒的 Mo-Si-Al 涂层。研究发现,由 MoSi₂ 和 Mo 组成的 Mo-Si-Al 涂层的硬度为 18 GPa,临界载荷可以达到 63 N。HIRVONEN^[15] 等人制备了不同 N 含量的 Mo-Si-N 涂层,发现结晶温度随着氮浓度的增加而增加,在 50 at.% N 的浓度下,1 000 ℃ 也不发生结晶,结晶温度与 Si-N 相互作用和与 N 键合的 Si 量有关。由于无定形的结构和 Si-N 相互作用,Mo-Si-N 涂层的抗氧化性优于纯 MoSi₂ 涂层。Mo-Si-50 at.% N 涂层的弹性模量为 257 GPa,800 ℃ 退火后模量仍为 273 GPa^[39]。在 Cr-N 涂层^[16] 研究的基础上,齐东丽^[40] 等人采用直流溅射技术制备不同 Mo 含量的 Cr-Mo-N 涂层。随着 Mo 含量的增加,涂层的相结构由以 (fcc) Cr-N 相为基础的 (Cr, Mo) N 置换固溶体变化为以 (fcc) γ -Mo₂N 相为主的混合相,特别是当 Mo 含量为 69.3 at.% 时,伴有少量的 bcc-Mo 相生成。如表 1 所示,涂层硬度与 Mo 含量表现为“抛物线”式的关系,当 Mo 含量在 45.4 at.% 时,涂层的显微硬度达到最大值 2 714 HV。

表 1 Mo 含量变化对 Cr-Mo-N 涂层性能的影响

样品 序号	元素成分/%		厚度/ μm	沉积率/ (nm·s ⁻¹)	晶粒尺寸/ nm	硬度/ HV
	Cr	Mo				
1	100.0	0.0	1.58	0.44	19.0	1 802
2	79.6	20.4	1.66	0.23	16.3	1 910
3	68.7	31.3	1.70	0.24	15.2	1 993
4	61.6	45.4	1.80	0.25	12.5	2 714
5	45.8	54.2	1.57	0.22	14.5	2 235
6	30.7	69.3	1.52	0.20	18.0	2 206

KIM^[41] 等人使用电弧离子镀 (AIP) 将三元 Cr-Mo-N 涂层沉积到钢基板上,涂层在 21 at.% Mo 下的硬度值增加约为 3 GPa,而纯 Cr-N 的硬度值为 18 GPa,证明一定含量 Mo 的掺杂会有效改善涂层的力学性能^[42]。总之,Mo 元素掺杂引起的固溶作用对涂层力学性能产生明显改善^[43]。

2.2 三元 Mo-Si-Al、Mo-Si-N、Cr-Mo-N 涂层摩擦学性能

对于不同温度下摩擦行为的研究发现,在 20 ℃ 时 Mo-Si-Al 涂层的摩擦因数为 0.67~0.69,在 550 ℃ 时为

0.52~0.56。与 Mo-Si-Al-N 涂层相比,Mo-Si-Al-N 涂层表现出更优异的力学性能(硬度为 41 GPa),其耐磨性在 20 ℃ 和 550 ℃ 时也分别高出 Mo-Si-Al 涂层 3 个和 2 个数量级^[38]。HEO 等人^[33] 通过磁控溅射与电弧离子镀结合的方式制备了不同 Si 含量的 Mo-Si-N 涂层。研究发现,由于涂层中的无定形 Si₃N₄ 可与 H₂O 发生摩擦化学反应^[38],生成 SiO₂ 或 Si(OH)₄ 自润滑层^[44],Mo-15 at.% Si-N 涂层的平均摩擦因数可以从 0.65 (Mo₂N 涂层) 下降到 0.4。Si 含量的增加,有助于自润滑层的形成,降低摩擦因数。齐东丽^[40] 等人的研究发现,当 Mo 含量 > 45.4 at.% 时,涂层的硬度、摩擦因数、磨损率同时达到协调的机制,不仅硬度、摩擦因数开始降低,磨损率也开始升高。

结合 Cr-Mo-N 涂层与钢球对磨时的摩擦因数(图 5)^[41] 与磨痕的 EDS 分析可知,磨损过程中 Cr 和 Mo 发生氧化,即发生氧化磨损。涂层中 Mo 含量增加到 30.4 at.% 时摩擦因数可以降低到 0.37。在摩擦过程中涂层中 Mo 元素与水发生摩擦化学反应生成的 MoO₃ 薄层也能够起固体润滑剂的作用^[31-32],有效降低摩擦因数。

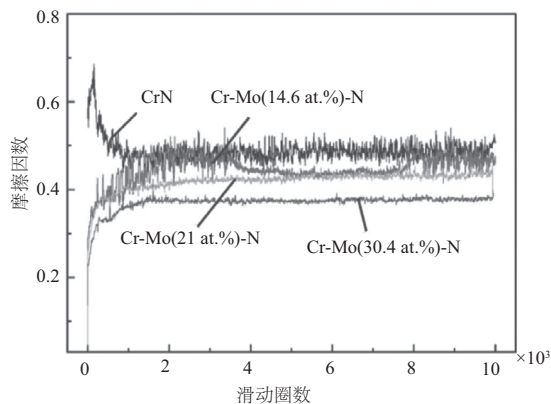


图 5 不同 Mo 含量的 Cr-Mo-N 涂层的摩擦因数

3 多元 Cr-Mo-Si-N、Ti-Al-Mo-N、Cr-Mo-Si-C-N 涂层结构及其摩擦学特性

3.1 多元 Cr-Mo-Si-N、Ti-Al-Mo-N、Cr-Mo-Si-C-N 涂层结构及力学性能

YUN^[42] 对 Cr-Mo-N 和 Cr-Si-N 涂层的对比研究发现,由 Cr-N 微晶和无定形 Si₃N₄ 组成的复合微观结构改善了力学性能和抗氧化性^[45-46];同时还发现由 Cr-Mo-N 微晶和非晶 Si₃N₄ 组成的纳米复合材料的微观结构也会使涂层具有高显微硬度和低摩擦因数^[40]。HONG^[23] 等人通过电弧离子镀和磁控溅射的混合系统在不同基底偏压下制备 Cr-Mo-Si-N 涂层。由于再溅射现象^[47],随着偏压的增加,Cr-Mo-Si-N 涂层的沉积速率从约 2.2 μm/h 逐渐降低至 1.6 μm/h。平均晶粒尺寸从偏压为 0 V 时的约 14 nm 减小到 -20 V~200 V 的基底偏压下最小值 3~4 nm。如图 6 所示,随着基底偏压的增加,涂层的显微硬度从 42 GPa 提升到最大值约为 49 GPa (-50 V) 后下降至约

38 GPa。内部应力是压缩的,幅度范围为-1.2~-2 GPa。

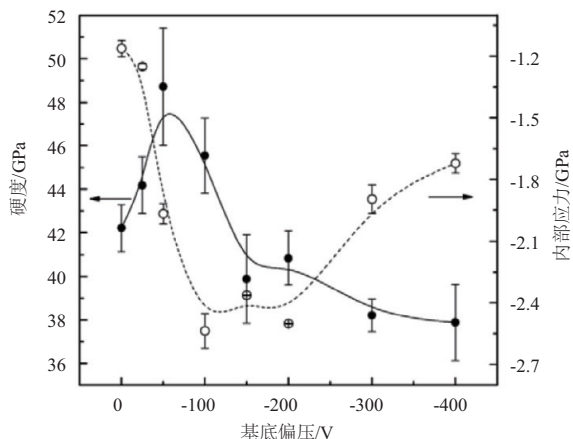


图6 Cr-Mo-Si-N涂层的显微硬度值和内部应力随基底偏压的变化

研究 Si 含量(0~11.1 at.%)对 Cr-Mo-Si-N 涂层的影响^[48]时观察到涂层微观结构随着 Si 含量升高而更加致密,衍射强度比(111)/(200)也增大,无定形相 Si₃N₄ 的增长会导致(111)方向的强化。SERGEVNIN^[18]团队重点研究基底偏压 V_b 和氮气气压 $p(N_2)$ 对 Ti-Al-Mo-N 涂层结构生长的影响时发现,将 V_b 从-120 V 调整到-140 V,提高了沉积离子的能量,将 $p(N_2)$ 从 0.3 Pa 增加到 0.5 Pa,会促进更完全的氮化钼的形成,使(Ti,Al)N-Mo-Mo₂N 组合物向(Ti,Al)N-Mo₂N 转变,涂层表现出高断裂韧性和高硬度(37 GPa)。多循环冲击载荷下测试表明,与 TiAlN 涂层相比,Ti-Al-Mo-N 涂层具有更高抗冲击负荷。在对 Mo-Si-C-N 涂层研究中发现,硬度可在 9 at.% C 含量时达到最大值约 27 GPa^[49]。YUN^[22]等人通过电弧离子镀与磁控溅射相结合的方法制备 Cr-Mo-Si-C-N 涂层,发现 Cr-Mo-Si-C-N 涂层是由纳米级柱状 Cr-Mo-C-N 微晶嵌入到非晶 Si₃N₄ 和 Si-C 基质中组成的纳米复合结构。Cr-Mo-9.3 at.%Si-C-N 涂层硬度可达到约 53 GPa,远高于 Cr-Mo-C-N 涂层的硬度。FU^[50]等人对 Cr-Mo-Si-C-N 薄膜的研究发现,随着 Mo 含量的上升,薄膜的柱状结构更加致密,掺杂的 Mo 原子代替 CrN 晶格中的 Cr 原子,形成(Cr,Mo)N 置换固溶体。当 Mo 靶电流为 2 A 时,薄膜硬度、 H/E 、 H^3/E^2 同时达到最大,分别为 24.8 GPa, 0.077 和 0.147。

3.2 多元 Cr-Mo-Si-N、Ti-Al-Mo-N、Cr-Mo-Si-C-N 涂层摩擦学性能

如图 7 所示,由于高于 795 °C (MoO₃ 的熔点),MoO₃ 变成液态,流体润滑显著降低了摩擦因数。其次,在 750 °C 和 800 °C 下,含 Si 的 Cr-Mo-N 涂层摩擦因数可分别表现出最低值 0.31 和 0.21,这可归因于 Mo 的含量越高,能够生成的 MoO₃ 越多,有助于摩擦因数降低^[48]。总之,添加 Si 的 Cr-Mo-Si-N 与 Mo 配合使摩擦因数和磨损率均较低。

向高耐磨性 TiN 保护涂层中添加 Al 可提高硬度^[51],而涂层中的 Mo 由于在摩擦过程中形成 MoO₃ 作为固体润滑剂可改善摩擦性能,摩擦因数降低为 0.3^[52]。

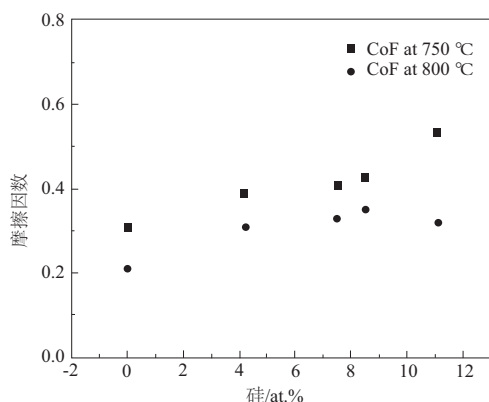


图7 不同温度下不同 Si 含量的 Cr-Mo-Si-N 涂层摩擦因数

SERGEVNIN^[18]获得的 4 μm 厚 Ti-Al-Mo-N 涂层具有 (Ti,Al)N 和 Mo-N 交替的层状结构。研究发现,Ti-Al-Mo-N 涂层在摩擦过程中伴随着 MoO₃ 的形成,如图 8 所示,涂层的磨损在负载 40 N 以内时没有明显的开裂。

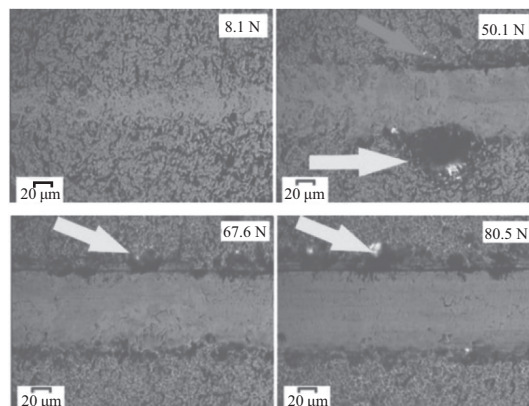


图8 在各种载荷下 Ti-Al-Mo-N 涂层上划痕显微图像

较高温度下摩擦学性能的劣化是由于摩擦表面的 MoO₃ 升华。随着 Mo 含量的增大,结构上形成 Mo 对 Cr 的置换固溶体(Cr,Mo)N,摩擦因数和磨损率均有显著降低,耐磨性能增强。Mo 含量的增加使涂层由磨粒磨损变为疲劳磨损^[21,53]。HONG^[23]等人对 Mo-Si-C-N 涂层的研究表明,随着 C 含量的增加,涂层的摩擦因数降低。在 Cr-Mo-C-N 涂层中添加 Si 也会使涂层的平均摩擦因数明显降低。FU^[50]发现含有较多 Mo 的 Cr-Mo-Si-C-N 涂层由于摩擦化学磨损而具有低摩擦因数,但磨损率高。通过控制沉积过程中的 Mo 靶电流,可以优化 Cr-Mo-Si-C-N 涂层的摩擦学性能。

4 结语

本文综述了含 Mo 的 PVD 涂层的发展历程,总结了涂层组成元素种类、含量及制备参数等对涂层微观结构、力学性能和摩擦学性能的影响机制。利用组成元素的特性,对涂层进行有针对性的掺杂改性,配合制备参数的改变,能够改变涂层的结构,进而使涂层的性能得到明显的提

升。涂层多元化已经成为当今研究的趋势,在极少的对多元Cr-Mo-Si-C-N涂层的研究中已经初步发现了涂层表现出的优良特性^[50],但是对多元含Mo涂层和Cr-Mo-Si-C-N涂层的研究还较少,需要广大学者更加努力探索不同Mo元素掺杂对Cr-Mo-Si-C-N涂层的力学性能、摩擦学性能以及电化学腐蚀性能的影响机制,探究涂层的制备工艺。

参考文献:

- [1] 朱炼,尹亮,陈正刚,等. W-S-C(N)涂层结构及摩擦学性能研究进展[J]. 中国科技论文,2017,12(16):1913-1920.
- [2] MELCHERS R E, JEFFREY R. Early corrosion of mild steel in seawater [J]. Corrosion Science,2005,47(7):1678-1693.
- [3] 黄桂桥. 碳钢在我国不同海域的海水腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术,2001,13(2):81-84.
- [4] QIAN B, HOU B, ZHENG M. The inhibition effect of tannic acid on mild steel corrosion in seawater wet/dry cyclic conditions [J]. Corrosion Science,2013,72(4):1-9.
- [5] MU X, WEI J, DONG J, et al. In situ corrosion monitoring of mild steel in a simulated tidal zone without marine fouling attachment by electrochemical impedance spectroscopy [J]. Journal of Materials Science & Technology,2014,30(10):1043-1051.
- [6] 刘世念,苏伟,魏增福,等. 碳钢在自然海水和灭菌海水中的腐蚀行为分析[J]. 装备环境工程,2013(4):16-19.
- [7] 周小军,郑金凤,赵刚. 钼及其合金高温抗氧化涂层的制备[J]. 金属材料与冶金工程,2008,36(2):6-10.
- [8] 王敬生,韩红卫. 钼材在玻璃工业中的应用[J]. 中国钼业,2003,27(6):28-31.
- [9] BELTOWSKA-Lehman E, BIGOS A, INDYKA P, et al. Electrodeposition and characterization of nanocrystalline Ni-Mo coatings [J]. Surface & Coatings Technology,2012,211(3):67-71.
- [10] 马宝平. 超微碳化钼粉体的制备及其形成涂层的磨损性能研究[J]. 金属材料与冶金工程,2010,38(2):3-7.
- [11] 任宝江. 超微碳化钼涂层的制备及其耐磨性能的研究[J]. 中国钼业,2012,36(1):49-52.
- [12] WANG T, ZHANG G, REN S, et al. Effect of nitrogen flow rate on structure and properties of MoN_x coatings deposited by facing target sputtering[J]. Journal of Alloys and Compounds,2017,701:1-8.
- [13] HOU S X, LIU Z D, LIU D Y, et al. Microstructure and oxidation resistance of Mo-Si and Mo-Si-Al alloy coatings prepared by electro-thermal explosion ultrahigh speed spraying[J]. Materials Science & Engineering A,2009,518(1/2):108-117.
- [14] YAO D, GONG W, ZHOU C. Development and oxidation resistance of air plasma sprayed Mo-Si-Al coating on an Nb_{ss}/Nb₅Si₃ in situ composite[J]. Corrosion Science,2010,52(8):2603-2611.
- [15] HIRVONEN J P, SUNI I, KATTELUS H, et al. Crystallization and oxidation behavior of Mo-Si-N coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 1995,74/75(1/2/3):981-985.
- [16] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 第3版. 北京:清华大学出版社,2008.
- [17] CHOI E Y, KANG M C, KWON D H, et al. Comparative studies on microstructure and mechanical properties of CrN, Cr-C-N and Cr-Mo-N coatings [J]. Journal of Materials Processing Technology,2007,187/188:566-570.
- [18] SERGEVNIN V S, BLINKOV I V, BELOV D S, et al. Phase formation in the Ti-Al-Mo-N system during the growth of adaptive wear-resistant coatings by arc PVD [J]. Inorganic Materials,2016,52(7):735-742.
- [19] HONG S G, KWON S H, KANG S W, et al. Influence of substrate bias voltage on structure and properties of Cr-Mo-Si-N coatings prepared by a hybrid coating system [J]. Surface & Coatings Technology,2008,3(5):624-627.
- [20] YUN J H, KWON S H, CHOI J H, et al. Synthesis and mechanical properties of Cr-Mo-Si-C-N coatings by a hybrid coating system [J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2009,10: S112-S115.
- [21] YUAN Z G, YANG J F, WANG X P, et al. Characterization and properties of quaternary Mo-Si-C-N coatings synthesized by magnetron sputtering technique [J]. Surface & Coatings Technology,2011,205(10):3307-3312.
- [22] YUN J H, AHN S K, KIM K H. Microstructure and mechanical properties of cr-Mo-Si-C-N coatings deposited by a hybrid coating system [J]. Journal of the Korean Institute of Surface Engineering,2007,40:279-282.
- [23] HONG S G, SHIN D W, KIM K H. Syntheses and mechanical properties of quaternary Cr-Mo-Si-N coatings by a hybrid coating system [J]. Materials Science and Engineering A,2008,487(1):586-590.
- [24] DINESH Kumar D, KUMAR N, PANDA K, et al. Tribochemistry of contact interfaces of nanocrystalline molybdenum carbide films [J]. Applied Surface Science,2018,447:677-686.
- [25] VALLI, J. Tribological properties of MoN_x coatings in contact with copper [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films,1986,4(6):2850-2853.
- [26] KAZMANLI M K, M Ürgen, ÇAKIR A F. Effect of nitrogen pressure, bias voltage and substrate temperature on the phase structure of Mo-N coatings produced by cathodic arc PVD [J]. Surface & Coatings Technology,2003,167(1):77-82.
- [27] BOUAOUINA B, BESNARD A, ABAIDIA S E, et al. Correlation between mechanical and microstructural properties of molybdenum nitride thin films deposited on silicon by reactive R.F. magnetron discharge [J]. Surface and Coatings Technology, 2018,333:32-38.
- [28] GILEWICZ A, WARCHOLINSKI B, MURZYNSKI D. The properties of molybdenum nitride coatings obtained by cathodic arc evaporation [J]. Surface and Coatings Technology,2013,236:149-158.
- [29] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics,1953,24(8):981-988.
- [30] ZHANG G J, YUE X M, WATANABE T. Addition effects of aluminum and in situ formation of alumina in MoSi₂ [J]. Journal of Materials Science,1999,34:997-1001.
- [31] SADANANDA K, FENG C R, MITRA R, et al. Creep and fatigue properties of high temperature silicides and their composites [J]. Materials Science & Engineering A,1999,261(1/2):223-238.
- [32] MITRA R, RAO V V R, RAO A V. Effect of small aluminum additions on microstructure and mechanical properties of molybdenum di-silicide [J]. Intermetallics,1999,7(2):213-232.
- [33] HEO S J, KIM K H, KANG M C, et al. Syntheses and mechanical properties of Mo-Si-N coatings by a hybrid coating system [J]. Surface and Coatings Technology,2006,201:4180-4184.

- [34] JIA L, XIE H, LU Z L, et al. Microstructure evolution of Mo-Si-Al system during self-propagation high-temperature synthesis[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 554: 127-131.
- [35] INGEMARSSON L, K Hellström, CANOVIC S, et al. Oxidation behavior of a Mo(Si,Al)₂ composite at 900 °C ~ 1 600 °C in dry air[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(4): 1511-1523.
- [36] CHRYSANTHOU A, JENKINS R C, WHITING M J, et al. A study of the combustion synthesis of MoSi₂ and MoSi₂-matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(16): 4221-4226.
- [37] LEE S P, YOSHIDA M, FUKUNAGA H. Interfacial modification and impact properties of Nb/MoSi₂ laminate composites by the addition of ZrO₂, NbSi₂, and SiC particles[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31(8): 2075-2081.
- [38] BLINKOV I V, CHERNOGOR A V, VOLKHONSKII A O, et al. Phase composition, structure, and mechanical properties of arc PVD Mo-Si-Al and Mo-Si-Al-N Coatings[J]. Inorganic Materials, 2017, 53(1): 125-134.
- [39] HIRVONEN J P, SUNI I, KATTELUS H, et al. Microstructure and mechanical properties of nitrided molybdenum silicide coatings[J]. MRS Proceedings, 1993, 322: 279-284.
- [40] 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.
- [41] KIM K H, CHOI E Y, HONG S G, et al. Syntheses and mechanical properties of Cr-Mo-N coatings by a hybrid coating system[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201: 4068-4072.
- [42] YUN J H, AHN S K, KIM K H. Comparative studies on microstructure and mechanical properties of CrN, Cr-Mo-N and Cr-Si-N Coatings [C]// Materials Science Forum, 2008, 569: 101-104.
- [43] KIM K H, CHOI E Y, HONG S G, et al. Indonesia, the United States, and Democracy-Madeleine Albright address-transcript [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(7): 4068-4072.
- [44] SOBOL O V, ANDREEV A A, STOLBOVOI V A, et al. Structural-phase and stressed state of vacuum-arc-deposited nanostructural Mo-N coatings controlled by substrate bias during deposition[J]. Technical Physics Letters, 2012, 38(2): 168-171.
- [45] BABA-Dzakhryapin A A, LAGUTKIN M I, YUSHINA L R, et al. Phase and structural transformations during heating of molybdenum carbide coatings[J]. Metal Science & Heat Treatment, 1978, 20(7): 566-569.
- [46] KIM J W, KIM K H, LEE D.B., et al. Study on high-temperature oxidation behaviors of Cr-Si-N films [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(24): 6702-6705.
- [47] MARTINEZ E, SANJINÉS R, KARIMI A, et al. Mechanical properties of nanocomposite and multilayered Cr-Si-N sputtered thin films [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 180(3): 570-574.
- [48] DAVIS C. A simple model for the formation of compressive stress in thin films by ion bombardment [J]. Thin Solid Films, 1993, 226(1): 30-34.
- [49] LU Y C, CHEN H W, CHANG C C, et al. Tribological properties of nanocomposite Cr-Mo-Si-N coatings at elevated temperature through silicon content modification [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 338: 69-74.
- [50] FU Y Q, ZHOU F, WANG Q Z, et al. The influence of Mo target current on the microstructure, mechanical and tribological properties of CrMoSiCN coatings in artificial seawater [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791: 800-813.
- [51] ANIKIN V N, BLINKOV I V, VOLKHONSKII A O, et al. Ion-plasma Ti-Al-N coatings on a cutting hard-alloy tool operating under conditions of constant and alternating-sign loads [J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2009, 50(4): 424-431.
- [52] V. S. SERGEVIN, I. V. BLINKOV, A. O. VOLKHONSKII, et al. Structure formation of adaptive arc-PVD Ti-Al-Mo-N and Ti-Al-Mo-Ni-N coatings and their wear-resistance under various friction conditions [J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 376: 38-43.
- [53] 徐润翔, 施雯, 陈智勇. Mo 含量对 Cr12MoV 钢表面 CrMoN 涂层磨损性能的影响[J]. 上海金属, 2009, 31(3): 20-23.

收稿日期: 2019-06-04

重要告示

尊敬的作者与读者: 近期发现有一些假网站冒充本刊拦截稿件和骗取钱财, 请您投稿时认真识别, 谨防受骗上当。本刊严正声明, 对此侵权行为保留对侵权者追究法律责任的权利!

本刊合法的、唯一的正式官方网站网址为: www.jxzyzd.com;

投稿邮箱为: editor@njmes.org;

微信公众号为: 机械制造与自动化期刊。

《机械制造与自动化》编辑部

2020 年 4 月