

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190510001

不同工作环境下 CrN 涂层的摩擦磨损性能

夏虎峰¹, 田广科¹, 陈庆春¹, 吴贵智², 张广安²

(1. 兰州交通大学 国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心, 兰州 730070; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所 国家固体润滑重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 为探索研究 CrN 硬质涂层材料在复杂工况条件下的使用特性, 采用多弧离子镀技术在 304 不锈钢基板表面沉积 CrN 薄膜, 并分析了其不同工作环境下的摩擦磨损性能。采用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析了薄膜的相结构, 采用冷场发射扫描电子显微镜 (FESEM) 观察了薄膜的微观形貌, 并用其能谱分析 (EDS) 功能分析了磨痕磨粒的化学成份, 采用纳米压痕仪和纳米划痕仪测试了薄膜的机械性能。摩擦试验研究结果表明, 在干摩擦环境中, 随氧分压增高, CrN 薄膜摩擦因数和钢球磨损率均增大, 说明粘着磨损和氧化反应形成第三体磨粒磨损应是 CrN 薄膜发生破坏的主要原因; 在真空环境中, CrN 薄膜的摩擦因数维持在 0.3 左右; 增大工作环境湿度, CrN 薄膜的摩擦因数降低; 在去离子水浸润环境中其摩擦因数可降低至 0.1 左右, 说明 CrN 薄膜可应用于高湿度环境或真空环境中的减摩抗磨防护。

关键词: 多弧离子镀; CrN 薄膜; 摩擦磨损; 真空环境

中图分类号: TG174.44; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)06-0056-07

Friction and Wear Properties of CrN Films in Different Working Environments

XIA Hufeng¹, TIAN Guangke¹, CHEN Qingchun¹, WU Guizhi², ZHANG Guangan²

(1. National Engineering Research Center for Technology and Equipment of Green Coating, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To investigate the performance of CrN hard coatings working in harsh environment, the CrN films were deposited onto polished SUS304 substrates using multi-arc ion plating. Friction and wear properties of the CrN films were measured in different environmental conditions. The phase structure of the films was analyzed by X-ray diffraction (XRD), and their microscopy morphology were observed by cold field emission scanning electron microscopy (FESEM), and the chemical compositions of the abrasive particles and wear track were detected by equipped energy dispersive spectroscopy (EDS). The mechanical properties of the films were tested by nano-indentation instrument and nano-scratch instrument. The friction and wear properties of CrN films working in different environments were analyzed. The results show that: both the friction coefficient and the wear rate of the coupled steel ball increased with the increment of the oxygen part pressure when the films work in dry environment. It can be ascribed to the abrasive friction and oxidation of the abrasive particles in the sliding process. In vacuum environment, the friction coefficient of the CrN films decreases to 0.3. The friction coefficient of the CrN films declines with increasing the humidity of the working environment. As the coupled pairs worked under the lubrication of deionized water, the friction coefficient can be reduced to about 0.1. It can be concluded that CrN films can be used in high humidity environment or vacuum environment.

Keywords: multi-arc ion plating; CrN films; friction and wear; vacuum environment

收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-10-19

通信作者: 田广科 (1968—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 功能薄膜材料制备及性能研究; **E-mail:** tiangke@mail.lzjtu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51862021); 甘肃省自然科学基金 (18JR3RA382); 兰州市人才创新创业项目 (2018-RC-17)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51862021), Natural Science Foundation of Gansu Province (18JR3RA382) and Lanzhou Talent Innovation and Entrepreneurship Project (2018-RC-17)

引用格式: 夏虎峰, 田广科, 陈庆春, 等. 不同工作环境下 CrN 涂层的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(6): 56-62.

XIA H F, TIAN G K, CHEN Q C, et al. Friction and wear properties of CrN films in different working environments[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(6): 56-62.

0 引 言

一般而言, 当工件之间存在摩擦性相对运动时, 就会产生磨损, 严重的磨损有可能直接导致工件失效。影响工件磨损的因素有很多, 如摩擦件的材质、表面形状、摩擦运动形式、工况及润滑方式等。近年来, 为提高摩擦件的使用寿命, 国内外研究者已开发出各种硬质涂层, 通过将 TiN、TiCN、TiAlN、CrTiAlN、CrN、CrCN 以及 DLC 等涂层材料涂镀在摩擦件表面可以达到减摩抗磨效果^[1-4]。Jin Qiangling 等^[5-6]研究发现, TiN 和 CrN 复合涂层具有高硬度 (28 GPa) 和低应力特性而有望用于金属基底的防护; Ying Kong 等^[7-8]研究发现 CrN/CrCN 多层膜涂镀在切削刀具上可增加其切削性能及延长其使用寿命。上述硬质涂层在工模具行业的应用亦产生了极其壮观的经济效益和社会效益, 如 CrN 薄膜目前已被广泛应用于金属成型模具和塑料成型模具摩擦表面的强化处理等^[9-11]。但随着空间探测技术和机器人应用技术的快速发展, 越来越多的运动摩擦件所工作的环境不再是单一的条件, 而是在不同环境中工作^[12-13], 相应地对工件表面涂层材料的耐环境变化性提出了新的要求。一些即使在大气环境中具有优异耐磨性能及耐蚀性能的涂层材料, 能否经受住复杂工况条件的考验, 往往还需要通过模拟实际工况条件来检验其耐磨特性。

文中采用多弧离子镀技术在 304 不锈钢表面沉积 CrN 薄膜, 对比研究了其在大气环境、真空环境、不同分压纯氮和纯氧环境、不同湿度及去离子水浸润环境中的摩擦磨损性能, 以期拓展 CrN 硬质涂层的应用范围提供理论与试验依据。

1 样品制备及性能表征

1.1 CrN 薄膜样品制备

所有 CrN 薄膜样品均在 Flexicoat@850 型多弧离子镀沉积系统中制备。选用晶向 (100) 单晶硅片和尺寸 30 mm×30 mm×2 mm 的 304 不锈钢作为基片, Cr 靶直径为 Φ 104.8 mm, 纯度为 99.99%, 工作气体为纯度 99.999% 氩气, 反应气体为纯度 99.99% 氮气。薄膜沉积之前先将 304 不锈钢基片机械抛光至表面粗糙度 R_a 小于 4 nm, 然后将单晶硅基片和不锈钢基片置于超声波中分别用丙酮和乙醇超声洗涤 20 min, 用干燥氮气吹

干备用。将备好的基片固定在多弧离子镀设备的基片台, 基片台可同时自转和公转。开启抽真空机组将镀膜腔室真空度抽至优于 5×10^{-5} Pa, 加热基片台至 400 ℃。开启进气系统和电源, 按表 1 参数在基片上依次沉积纯 Cr 层和 CrN 层, 镀膜时长分别为 10 min 和 3 h。纯 Cr 层作为过渡层, 旨在提高 CrN 涂层与不锈钢基体的粘着强度。

表 1 CrN 涂层的沉积参数

Table 1 Deposition parameters of CrN coating	
Parameter	Value
Voltage / V	22
Current / A	60
Bias voltage / V	5
Flowrate of Ar : N ₂	2:1
Pressure / Pa	2
Time / h	3

1.2 薄膜表征分析

采用 BRUKER D8 Advance 型 X 射线衍射仪分析薄膜的相组成, X 射线衍射采用 Cu 靶材, 电压 45 kV, 电流 40mA, 衍射角范围 10°~90°, 步长 0.1°; 采用 JSM-6710 型场发射扫描电子显微镜 (FESEM) 观察薄膜的表面形貌和断面形貌; 采用纳米压痕仪 (TTX-NHT2) 测量涂层的硬度, 多次测量求平均值; 采用 RST³ 划痕仪在加载力 50 N 情况下测试薄膜与基底的结合力大小, 薄膜临界载荷值用 L_{c1} 表示, 金刚石针尖半径 200 μ m, 针尖加载速率为 49 N/min, 针尖移动速度 5 mm/min, 划痕行程长度 5 mm。采用 TRN 型往复式摩擦磨损试验机考察薄膜在大气环境、不同湿度及去离子水环境的摩擦学性能, 采用 HVTRB 真空往复式摩擦磨损试验机考察薄膜在真空环境、不同分压纯氮和纯氧环境中的摩擦学性能, 真空环境真空度为 5×10^{-3} Pa。摩擦对偶球均选用 Φ 6 mm GCr15 钢球, 法向载荷 $F_N=2$ N, 单向滑动距离为 $S=5$ mm, 滑动频率为 5 Hz, 单组样品摩擦时长 4000 s。摩擦试验后采用 SEM 观察钢球的磨斑形貌及薄膜磨痕形貌, 并对磨痕元素进行分析。采用下列公式计算出不同条件下钢球的磨损率:

$$K = \frac{V}{SF} \tag{1}$$
$$V = \left(\frac{\pi th}{6}\right)\left(\frac{3d^2}{4} + h^2\right) \tag{2}$$

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \quad (3)$$

式中: K 为磨损率 (mm^3/Nm); V 为磨损体积 (mm^3); S 为滑动总距离 (m); F 为试验载荷 (N); d 是磨痕直径, mm; r 是钢球半径, mm; h 为钢球磨斑的磨秃高度, mm。

2 结果与讨论

2.1 薄膜微观组织结构

图 1 为 CrN 薄膜的 XRD 衍射图谱。可见 CrN 薄膜在 2θ 角为 37.5° 、 43.6° 、 63.4° 、 76.0° 和 80.1° 处形成多个衍射峰, 比对 PDF 标准卡片 (77-0047), 可以标定其分别对应为 CrN 的 (111)、(200)、(220)、(311) 和 (222) 晶面, 说明 CrN 薄膜呈多晶结构, 且薄膜在 (200) 晶面上表现出一定的择优取向^[14]。

图 2 为 CrN 薄膜的 SEM 表面形貌和截面形貌。从图 2(a) 中可以清晰地看出, 薄膜表面镶嵌

有较多微米量级的粗大颗粒, 呈现出多弧离子镀技术制备薄膜的固有属性^[15]。从图 2(b) 中可以看出, CrN 薄膜由明显晶界且致密的柱状晶生长构成, 薄膜与基底之间结合良好, 厚度约为 $12\text{ }\mu\text{m}$ 。

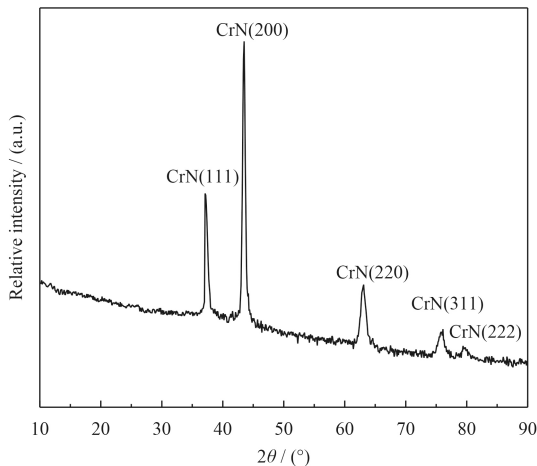
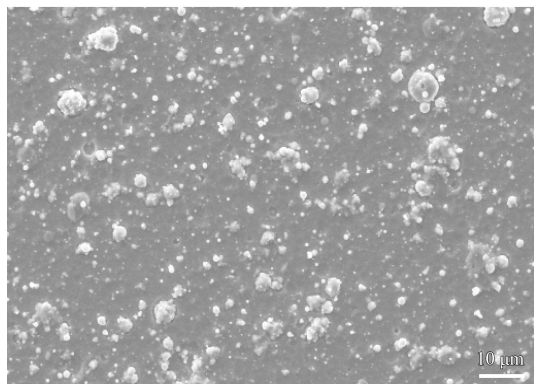
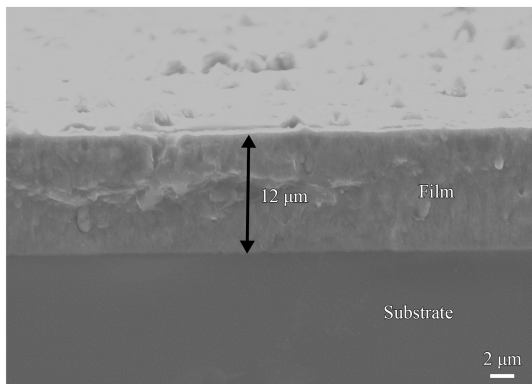


图 1 CrN 薄膜的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of the CrN films



(a) Surface morphology



(b) Cross-sectional morphology

图 2 CrN 薄膜的 SEM 形貌

Fig.2 SEM images of the CrN films

2.2 薄膜的力学性能

硬度和弹性模量是衡量薄膜材料耐磨性能的重要指标。薄膜的典型载荷-位移曲线如图 3(a) 所示。随加载力增大, 薄膜经历弹性形变和塑性形变, 加载力达到 100 mN 时压头的压入深度达到 520 nm , 完全去载荷后压痕深度回复至 300 nm 。由于 CrN 薄膜的厚度达 $12\text{ }\mu\text{m}$, 当薄膜厚度大时, 变形行为主要由薄膜的固有力学性能决定。压痕测试结果表明 CrN 薄膜硬度为 $(19.2\pm 3)\text{ GPa}$, 弹性模量为 $(332\pm 30)\text{ GPa}$, 与文献 [16-18] 所述基本一致。图 3(b) 给出 CrN 薄膜在 50 N 载

荷下的纳米划痕声波探测信号曲线及划痕形貌。在载荷为 33 N 处开始出现明显的破裂声波信号, 即薄膜失效的临界值 L_{c1} 可达 33 N , 此时可在划痕形貌上观察到划痕边缘发生轻微崩裂; 载荷增加至 50 N 时划痕边缘崩裂较为明显, 但是并未出现大块扩展裂纹, 也未发现薄膜剥落基底等现象, 表明 CrN 薄膜与基体之间附着力极好, 可对不锈钢基体形成良好的保护作用。CrN 优异的膜基结合性得益于金属 Cr 过渡层和较高 ($400\text{ }^\circ\text{C}$) 的成膜温度, 在该条件下 CrN 生长致密, 晶粒细小, 内应力较低^[8]。

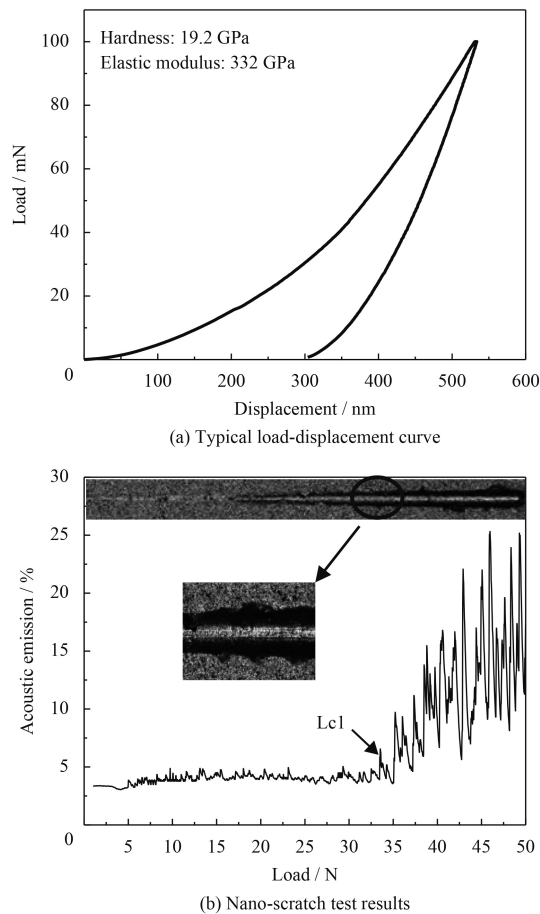


图3 CrN 薄膜典型载荷-位移曲线和纳米划痕测试结果
Fig.3 Typical load-displacement curve and nano-scratch test results of CrN films

2.3 CrN 薄膜的摩擦磨损性能

图4 给出 CrN 薄膜在大气环境和真空环境下的摩擦因数曲线。可见在大气环境中随摩擦时间延长, 摩擦次数增多, 薄膜的摩擦因数逐渐增大。一方面, 由于 CrN 薄膜硬度远高于对偶 GCr15 钢球硬度 ($H_{GCr15}=7\text{ GPa}$), 在摩擦过程中机械驱动力和粘附力共同作用于干摩擦界面, 使钢球在摩擦过程中易磨损形成磨屑, 磨屑与薄膜接触粘着处产生轻微剪切, 因而在随后的滑动过程中摩擦副接触面粘着处被剪切, 随后又被转移, 剪切, 如此循环进行, 形成粘着-剪切-转移-再粘着的过程, 使得摩擦过程中摩擦面变大, 导致摩擦因数持续上升。另一方面, 干摩擦界面产生的热量激发了大气环境中的氧元素与摩擦偶物质特别是剪切铁屑等物质发生氧化反应, 形成又脆又硬的氧化物颗粒分布在摩擦界面上进一步加剧了钢球与薄膜的磨损。所以在大气环境中 CrN 薄膜的摩擦行为主要表现为氧化磨损和磨粒磨损机制^[19]。与

之截然不同的是, 图4 中对比给出的 CrN 薄膜在真空环境下的摩擦因数一直维持在 0.35 左右, 说明通过抑制氧元素参与摩擦化学反应可形成低摩擦^[20]。该特性也可间接为大气环境中摩擦界面发生氧化反应的机理分析提供有力的佐证。

为了进一步分析氧元素对 CrN 薄膜的摩擦行为的影响机制, 图5 给出 CrN 薄膜在不同氧气和氮气分压下的摩擦因数曲线。可见随氧气分压增加, 薄膜摩擦因数增大, 意味着摩擦界面氧化程度更为严重, 反应形成更多的磨屑聚集在摩擦界面形成第三体磨粒参与摩擦^[9]。而氮气分压对摩擦因数的影响明显低于氧气环境。

图6 给出 CrN 薄膜在 $O_2\ 500\text{ Pa}$ 和 $N_2\ 500\text{ Pa}$ 分压条件下摩擦 4000 s 的磨痕 SEM 形貌和 EDS 面扫描。可见氧气环境中磨痕更宽, 磨屑量更

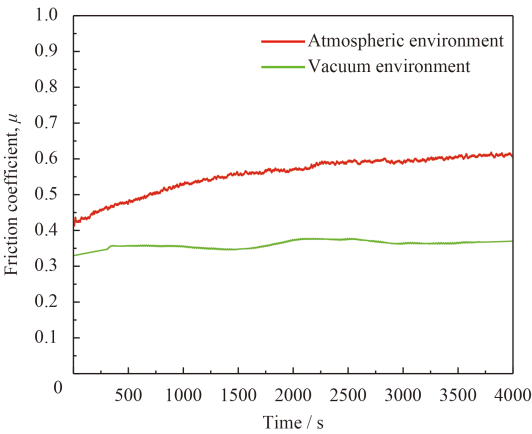


图4 CrN 薄膜在室温大气环境和真空环境下的摩擦因数曲线
Fig.4 Friction coefficient curves of CrN films at room temperature under atmospheric environment and vacuum environment

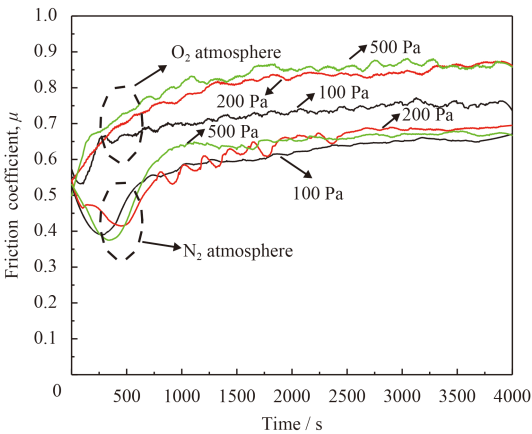


图5 CrN 薄膜在不同氧气和氮气分压下的摩擦因数曲线
Fig.5 Friction coefficient curves of CrN films under different nitrogen and oxygen separation pressure

多; EDS 分析结果表明磨痕及磨屑中分布着大量的 O 元素与 Fe 元素, 证明在摩擦过程中, 确实是钢球被粘着剪切且被氧化形成氧化铁脆性磨屑分布在摩擦界面上, 导致摩擦因数升高^[21]。CrN 薄膜在 N₂ 500 Pa 分压条件下的磨痕宽度明显窄于氧气环境, EDS 面扫描中也可发现较弱的 O 元素与 Fe 元素, 说明氮气环境中残余的微量氧也在摩擦界面上发生了氧化反应。相关文献表明, 氮气环境摩擦过程中, 在摩擦界面处会形成 N₂ 吸附层, 即使滑动摩擦过程中吸附层在机械剪切作用力下解吸, 其它 N₂ 分子又会占据它们的位置并形成新吸附的层, 从而有利于在氮气摩擦环境中呈现出相对较低的摩擦因数^[22]。

图 7 为不同氧气分压和氮气分压环境中钢球磨斑 SEM 形貌和钢球磨损率。可见氧气环境中钢球的磨斑尺寸和磨损率都远远大于氮气环境, 这和图 6 所述氧气环境中 CrN 薄膜上的磨痕宽度大于氮气环境的结论一致。需要指明的是在氧气环境中随氧气分压增高, 钢球磨损率也同步上升, 说明工作环境中氧元素越多, 摩擦界面的氧化程度越严重, 形成的氧化物磨粒也更多, 因而磨损更严重。而在氮气环境中随氮气压增高, 钢球磨损率略有下降趋势, 可能是因为更多的氮气分子阻隔了残余氧分子与摩擦界面 Fe 原子的结合。

结果表明, 环境湿度也会对硬质涂层的摩擦

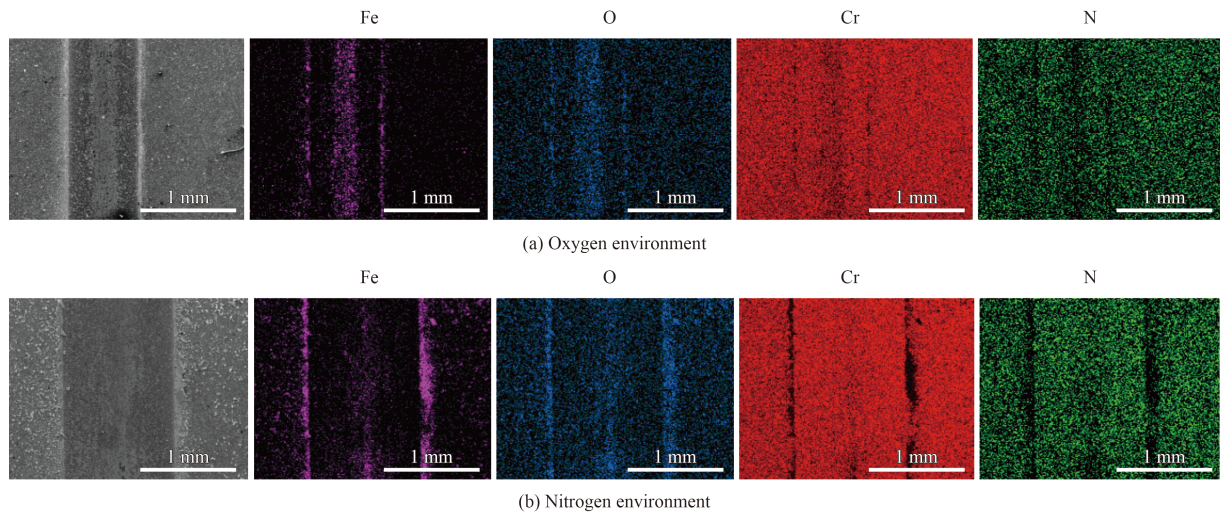


图 6 CrN 薄膜在 500 Pa 氧气环境和氮气环境下的磨痕形貌和 EDS 结果

Fig.6 Wear morphologies and EDS of CrN films in the oxygen environment and nitrogen environment at 500 Pa

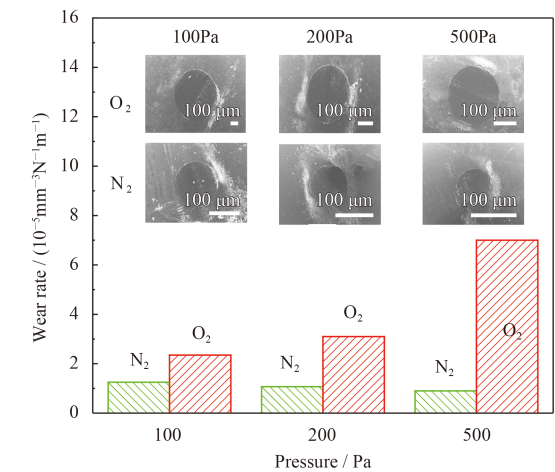
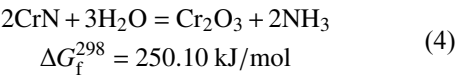


图 7 不同氧气分压和氮气分压下钢球磨斑 SEM 形貌和磨损率
Fig.7 SEM images and wear rate of steel ball in different pressure-divided oxygen and nitrogen environments

特性产生影响^[23]。图 8 给出 CrN 薄膜在不同湿度环境及去离子水浸润环境中的摩擦因数曲线。可见增加环境湿度可使 CrN 薄膜的摩擦因数降低, 分析其原因应是湿度增大改善了大气环境的干摩擦状况, 水汽分子在摩擦界面起到了一定的润滑作用。但是整体上因氧气与水汽等活性介质仍有可能参与摩擦氧化反应, 所以不同湿度条件下 CrN 薄膜的摩擦因数仍处于较高水平。当摩擦副工作在去离子水环境时, 摩擦界面被去离子水浸润, 一方面水膜起到良好的润滑作用。另一方面水分子与 CrN 薄膜可能会发生如下的化学反应^[24]:



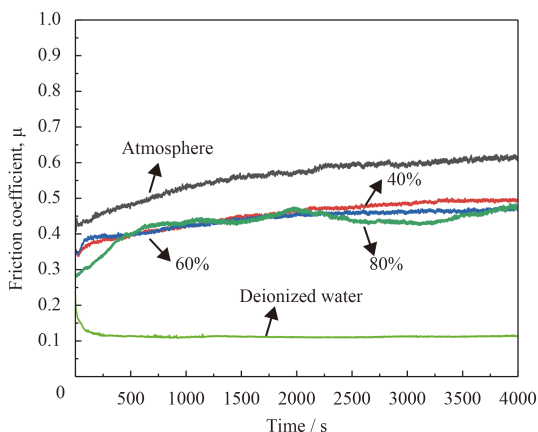


图8 CrN薄膜在去离子水环境和不同湿度条件下的摩擦因数
Fig.8 Friction coefficient curves of CrN films at deionized water environment and different humidity conditions

反应式中 ΔG_f^{298} 为在温度为298 K时发生以上化学反应的吉普斯自由能。

从上面的反应式可以看出, CrN与水反应生成 Cr_2O_3 转移膜,极薄的转移膜避免了摩擦副与CrN薄膜的直接接触,从而降低了摩擦因数。除此之外,去离子水对摩擦界面的清洗冷却以及对形成磨屑的移出作用,也有益于降低摩擦磨损。

3 结 论

(1) 采用多弧离子镀技术在304不锈钢基板上制成的CrN薄膜呈细小致密柱状晶多晶结构,硬度可达19.2 GPa,弹性模量达到332 GPa,薄膜与基板结合性能优良,可对不锈钢基板形成良好的保护作用。

(2) 摩擦试验研究结果表明,在干摩擦环境中,随氧分压增高, CrN薄膜的摩擦因数和GCr15钢球磨损率均增大,说明粘着磨损和氧化反应形成第三体磨粒磨损应是CrN薄膜磨损破坏的主要机制。

(3) 在真空环境中CrN薄膜的摩擦因数可维持在0.3左右;在去离子水浸润环境中CrN薄膜摩擦因数可降低至0.1,说明CrN薄膜可应用于高湿度环境或真空环境中的减摩抗磨防护。

参考文献

[1] PAULITSCH J, SCHENKEL M, SCHINTLMEISTER A, et al. Low friction CrN/TiN multilayer coatings prepared by a hybrid high power impulse magnetron sputtering/DC magnetron sputtering deposition technique[J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(19): 5553-5557.

[2] FUENTES G G, RODRIGUEZ R, AVELAR-BATISTA J C, et al. Recent advances in the chromium nitride PVD process for forming and machining surface protection[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167(2): 415-421.

[3] LI L U, WANG Q, CHEN B, et al. Microstructure and cutting performance of CrTiAlN coating for high-speed dry milling[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(6): 1800-1806.

[4] CUI L C, LU Z B, WANG L P. Toward low friction in high vacuum for hydrogenated diamondlike carbon by tailoring sliding interface[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(13): 5889-5893.

[5] JIN Q L, WANG H D, LI G L, et al. Microstructures and mechanical properties of TiN/CrN multilayer films[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(10): 2857-2862.

[6] LI Z C, WANG Y X, CHENG X Y, et al. Continuously growing ultrathick CrN coating to achieve high load-bearing capacity and good tribological property[J]. *ACS Applied Mater Interfaces*, 2018, 10(3): 2965-2975.

[7] KONG Y, TIAN X B, GONG C Z, et al. Enhancement of toughness and wear resistance by CrN/CrCN multilayered coatings for wood processing[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2018, 344: 204-213.

[8] 费加喜, 赵升升, 吴正涛, 等. $\text{AlTi}_x\text{N}/\text{AlTiN}$ ($x=\text{Cr}, \text{Si}$) 纳米多层涂层的制备及铣削性能研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(3): 199-207.

FEI J X, ZHAO S S, WU Z T, et al. Surface modification of cemented carbide substrates with $\text{AlTi}_x\text{N}/\text{AlTiN}$ ($x=\text{Cr}, \text{Si}$) multilayered coatings[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(3): 199-207 (in Chinese).

[9] 刘爱华. PVD氮化物涂层的高温摩擦磨损特性及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2012: 4-7.

LIU A H. Friction and wear behaviors of PVD nitride coatings at elevated temperatures[D]. Jinan: Journal of Shandong University, 2012: 4-7 (in Chinese).

[10] SONG G H, YANG X P, XIONG G L, et al. The corrosive behavior of Cr/CrN multilayer coatings with different modulation periods[J]. *Vacuum*, 2013, 89: 136-141.

[11] WANG Q M, KWON S H, KIM K H. Formation of nanocrystalline microstructure in arc ion plated CrN films[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21: 73-77.

[12] WILLIAN GRIPS V K, BARSHILIA H C, SELVI V E, et al. Electrochemical behavior of single layer CrN, TiN, TiAlN coatings and nanolayered TiAlN/CrN multilayer coatings prepared by reactive direct current magnetron sputtering[J]. *Thin Solid Films*, 2006, 514(1): 201-211.

[13] LI Z C, GUAN X Y, WANG Y X, et al. Comparative study

- on the load carrying capacities of DLC, GLC and CrN coatings under sliding-friction condition in different environments[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 321: 350-357.
- [14] 付英英, 李红轩, 吉利, 等. CrN 和 CrAlN 薄膜的微观结构及在不同介质中的摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2015, 25(6): 34-41.
- FU Y Y, LI H X, JI L, et al. Microstructure and tribological properties of CrN and CrAlN films under different contact conditions[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 25(6): 34-41 (in Chinese).
- [15] CAI F, ZHANG S H, LI J L, et al. Effect of nitrogen partial pressure on Al-Ti-N films deposited by arc ion plating[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 258(5): 1819-1825.
- [16] LIN J L, SPROUL W D, MOORE J J. Tribological behavior of thick CrN coatings deposited by modulated pulsed power magnetron sputtering[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 206(8-9): 2474-2483.
- [17] ICHIMURA H, ANDO I. Mechanical properties of arc-evaporated CrN coatings: Part I—nanoindentation hardness and elastic modulus[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2001, 145(1): 88-93.
- [18] 王淑庆, 王成彪, 朱丽娜, 等. Si_3N_4 和 52100 钢对磨副材料对 CrN 薄膜干摩擦学行为的影响[J]. *材料导报*, 2017, 31(2): 41-46.
- WANG S Q, WANG C B, ZHU L N, et al. Effects of the counter pair materials of Si_3N_4 and 52100 steel on dry sliding tribological behavior of CrN thin film[J]. *Materials Review*, 2017, 31(2): 41-46 (in Chinese).
- [19] WANG T G, JEONG D, KIM S H, et al. Study on nanocrystalline Cr_2O_3 films deposited by arc ion plating: I. Composition, morphology, and microstructure analysis[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 206(10): 2629-2637.
- [20] DMOVŠEK A, PANJAN P, PANJAN M, et al. The influence of surrounding atmosphere on tribological properties of hard protective coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 267: 15-20.
- [21] CHEN Q C, WU G Z, LI D S, et al. Understanding the unusual friction behavior of TiN films in vacuum[J]. *Tribology International*, 2019, 137: 379-386.
- [22] WANG C B, LI B R, LING X M, et al. Superlubricity of hydrogenated carbon films in a nitrogen gas environment: Adsorption and electronic interactions at the sliding interface[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(5): 3025-3034.
- [23] 单磊, 王永欣, 李金龙, 等. TiN、TiCN 和 CrN 涂层在海水环境下的摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2013, 26(6): 89-62.
- SHAN L, WANG Y X, LI J L, et al. Tribological property of TiN, TiCN and CrN coatings in seawater[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(6): 89-62 (in Chinese).
- [24] ZHOU F, CHEN K M, WANG M L, et al. Friction and wear properties of CrN coatings sliding against Si_3N_4 balls in water and air[J]. *Wear*, 2008, 265(7-8): 1029-1037.