

CrN 和 CrAlN 薄膜的微观结构及在不同介质中的摩擦学性能^{*}

付英英^{1,2}, 李红轩¹, 吉 利¹, 刘晓红¹, 周惠娣¹, 陈建敏¹

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 采用中频非平衡反应磁控溅射技术在单晶硅 P(111) 和不锈钢 (1Cr18Mn8Ni5N) 基材上制备了 CrN 和 CrAlN 薄膜。利用 X 射线衍射仪 (XRD)、X 射线光电子能谱仪 (XPS)、原子力显微镜 (AFM)、场发射扫描电子显微镜 (FESEM) 和纳米压痕仪对薄膜的相结构、化学组成、表面形貌、断面结构和力学性能进行了测试分析。利用球-盘式摩擦磨损试验机 (CSM) 考察了两种薄膜在不同介质 (空气、自来水、oil-1(TAO-40) 及 oil-2(150BS)) 中和 Al₂O₃ 球对磨的摩擦学性能。结果表明: CrN 薄膜中 Al 元素的掺杂并未改变薄膜晶体结构, 但却降低了薄膜的表面粗糙度、增强了薄膜的致密性、提高了薄膜的力学性能、改善了水润滑和油润滑条件下薄膜的摩擦学性能。由于 CrN 和 CrAlN 薄膜的摩擦磨损性能显著依赖于测试介质, 因此重点讨论了它们在不同介质中的摩擦磨损机理。

关键词: 磁控溅射; CrN 薄膜; CrAlN 薄膜; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2012)06-0034-08

Microstructure and Tribological Properties of CrN and CrAlN Films Under Different Contact Conditions

FU Ying-ying^{1,2}, LI Hong-xuan¹, JI Li¹, LIU Xiao-hong¹, ZHOU Hui-di¹, CHEN Jian-min¹

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: CrN and CrAlN films were deposited on silicon and stainless steel substrates by middle frequency unbalanced reactive magnetron sputtering. The crystal construction, chemical composition, surface morphologies, cross-sectional structure and mechanical properties of the resultant films were studied by X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), atomic force microscope (AFM), field emission scanning electron microscopy (FESEM) and nano-indentation instrument, respectively. The tribological properties of the studied films under different contact conditions (air, running water, oil-1(TAO-40) and oil-2(150BS)) sliding against Al₂O₃ balls were investigated by ball-on-disk tribometer (CSM). The results show that the doping of CrN film with Al element does not change its crystal construction, however decreases its surface roughness, enhances its compactness, and improves its mechanical properties and tribological behaviors under water- and oil-lubricated conditions. As the tribological properties of the CrN and CrAlN films are strongly dependent on contact conditions, special attention is being paid to the friction and wear mechanisms of the films under different test environments.

Key words: magnetron sputtering; CrN film; CrAlN film; friction and wear

收稿日期: 2012-09-06; **修回日期:** 2012-11-13; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51175491); 中国科学院创新群体基金(50421502)

作者简介: 付英英(1989-), 女(汉), 甘肃庆阳人, 硕士生; **研究方向:** 材料表面工程与摩擦学

网络出版日期: 2012-11-28 16:29; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20121128.1629.017.html>

引文格式: 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, 2012, 25 (6): 34-41.

0 引言

高新技术的快速发展,对苛刻工况条件下使用的涂层材料性能,特别是抗磨减摩性能提出了更高要求,而传统的耐磨涂层已经无法满足实际需求。因此,新型耐磨涂层的研发显得势在必行。在众多的耐磨涂层当中,过渡族二元金属氮化物薄膜因具有硬度高、内应力低、韧性好、耐磨性佳、抗氧化性良、耐腐蚀性好以及化学稳定性好等优势而备受研究人员的关注,并相继涌现出大量的研究报道^[1-8]。虽然二元氮化物薄膜由于上述优良性能而使其具有广阔的应用前景,然而在实际应用中人们逐渐发现二元氮化物薄膜自身存在一些缺陷,例如快速切割刀具及高速运转机械元件运行时温度可高达 700 ℃,在这种高温条件下二元氮化物薄膜硬度提高效应明显减弱甚至完全消失,这就大大限制了二元氮化物薄膜的应用范围^[9]。为了进一步改善薄膜的性能,三元氮化物薄膜受到研究者的迫切关注^[10-13]。在这些三元氮化物薄膜中,CrAlN 薄膜因 Al 原子固溶在 CrN 晶格中形成了不同于单纯 CrN 的结构,从而表现出更佳的机械性能和抗氧化性能^[14-15]。目前,研究人员对于 CrN 和 CrAlN 薄膜的微观结构、高温抗氧化性能及机械性能研究较多^[14, 16-20],而对它们在不同介质中的摩擦磨损性能研究相对较欠缺。

因此,采用中频反应磁控溅射技术制备了 CrN 和 CrAlN 薄膜,对比研究了所制备薄膜的化学成分、物相组成、断面结构、力学性能和摩擦学性能,并详细探讨了两种薄膜在不同介质(空气、自来水、oil-1(TAO-40)及 oil-2(150BS))中与 Al₂O₃ 小球对磨时的摩擦磨损机理。

1 试验

1.1 薄膜制备

采用自行研制的中频反应磁控溅射装置,在氩气和氮气的混合气氛中,通过溅射纯 Cr 靶(99.98%)和组装 CrAl 靶,在 P(111)单晶硅和不锈钢(1Cr18Mn8Ni5N)基材上分别沉积厚度约为 2.5 μm 的 CrN 和 CrAlN 薄膜。在沉积薄膜之前,基材依次在水和丙酮中各超声清洗一次和两次,每次清洗 15 min,然后用干燥的氮气吹干并迅速放入腔室中。将腔室加热到 100 ℃的同时抽真空到 4×10^{-3} Pa,紧接着在 600 V 负偏压和

1.6 Pa 气压下用 Ar⁺ 等离子体对基材清洗 20 min 以清除表面的氧化物及其它污染物。然后沉积约 200 nm 左右的 Cr 层作为过渡层,以提高薄膜与基底之间的结合强度。通入 Ar/N₂(其中体积流量比 Ar/N₂ = 53/53)混合气进行反应溅射沉积 CrN 和 CrAlN 薄膜,工作气压为 3.0×10^{-1} Pa,沉积时间为 3 h,沉积偏压 -150 V,脉冲占空比 60%,溅射电流 25 A。

1.2 薄膜结构及性能表征

利用 PHI-5702 多功能电子能谱仪(XPS)和 Philips X'Pert-MRD X-ray Diffractometer 对薄膜成分及相组成进行分析测定;采用 JSM-6701F 冷场发射扫描电镜(FESEM)对薄膜断面结构进行分析;采用 Hysitron 公司原位纳米力学测试系统测试薄膜硬度,压入深度为 200 nm(略小于薄膜厚度的 1/10);利用 Nanoscope IIIa Multimode 原子力显微镜观测薄膜的表面形貌。

采用球-盘式摩擦磨损试验机(CSM)考察了两种薄膜在不同介质(空气、自来水、oil-1(TAO-40)及 oil-2(150BS))中和陶瓷对偶球(Al₂O₃, Φ 10 mm)对磨时的摩擦学性能。摩擦磨损试验条件为:采用往复式滑动,平均滑动速度为 14.14 cm/s,振幅为 2.5 mm,法向载荷 5 N,试验时间为 30 min,环境温度约为 15 ℃,湿度(45±5)%。试验结束后,利用三维表面轮廓仪(Micro XAM-3D surface profiler)和光学显微镜(OLMPUS STM6)对薄膜和对偶的磨损表面进行观测分析,并利用公式 $K=V/SF$ 计算薄膜磨损率,式中 K 为磨损率(mm³/Nm), V 为磨损体积(mm³), S 为滑动总距离(m), F 为试验载荷(N)。每种条件下薄膜的摩擦磨损试验重复 3 次,给出的摩擦因数和磨损率等数值均为 3 次试验数据的平均值。

2 结果与讨论

2.1 CrN 和 CrAlN 薄膜的微观结构和力学性能

XPS 分析表明,CrAlN 薄膜中 Al 的原子数分数为 28.0%。

图 1 是所制备的 CrN 和 CrAlN 薄膜的 XRD 谱图。如图所示,CrN 和 CrAlN 薄膜都呈现 B1-NaCl 的晶体结构,表明 CrAlN 薄膜的晶体结构与 CrN 薄膜的晶体结构基本相似;同时还可以看出,两种薄膜的晶体都沿着 CrN(200)晶面择优生长,结合薄膜组成可以说明 Al 元素在薄膜中的原子

数分数并没有超过 CrN 立方结构向 AlN 的纤维状结构转变的量(约 77%)^[21]。但是,CrAlN 薄膜的所有衍射峰均向高角度方向位移,表明和 CrN 薄膜相比,CrAlN 薄膜的晶格常数减小。造成这一现象的主要原因是原子半径较小的 Al 原子取代了 CrN 晶格中原子半径较大的 Cr 原子,使薄膜的晶粒尺寸减小所致。

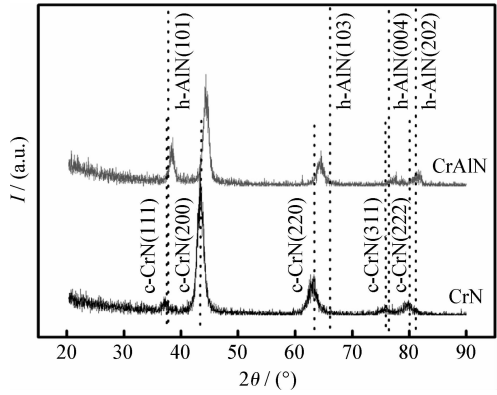
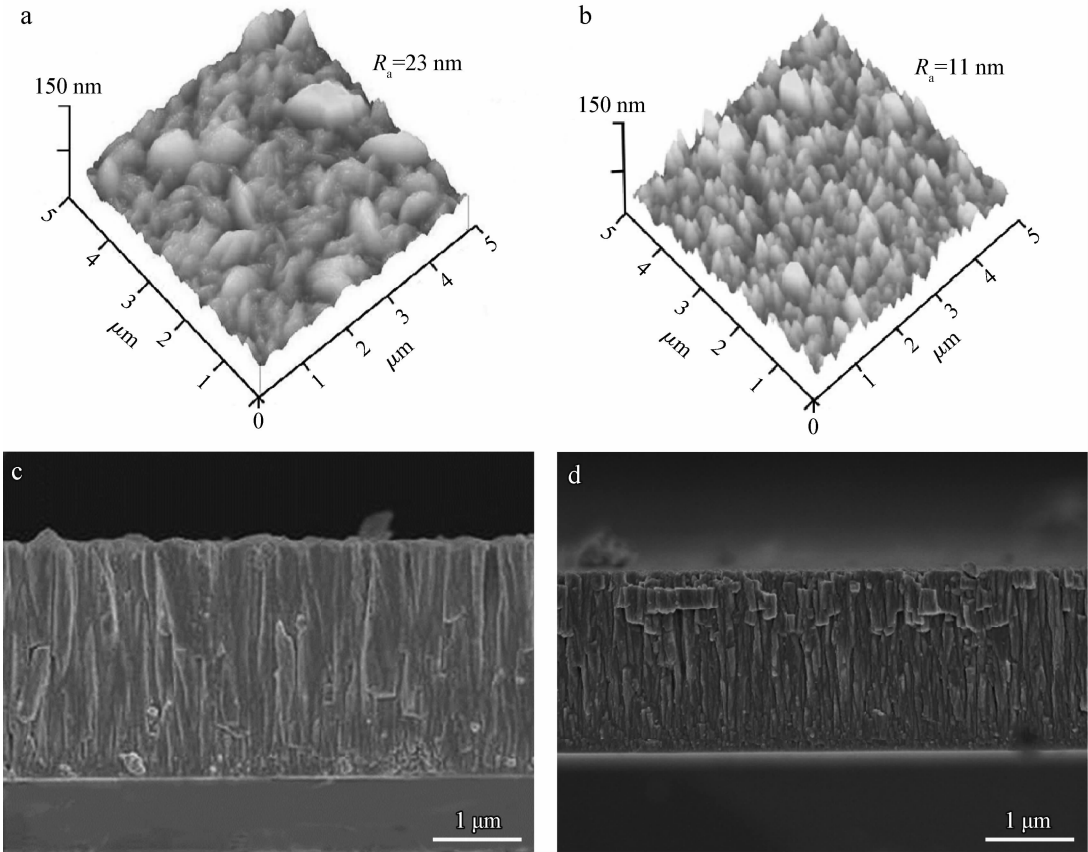


图 1 CrN 和 CrAlN 薄膜的 XRD 谱图
Fig.1 XRD patterns of the CrN and CrAlN films

图 2 给出的是两种薄膜的表面和断面微观形貌图。如图 2(a)和 2(b)所示,CrAlN 薄膜表面致密,晶粒细小且均匀,而 CrN 薄膜表面结构疏松、晶粒粗大不一;这是由于相对于 CrN 薄膜,CrAlN 薄膜表面缺陷少,加之晶格畸变导致的晶粒尺寸减小,所以它的表面粗糙度(R_a)为 11 nm,小于 CrN 薄膜的表面粗糙度(23 nm)。图 2(c)和 2(d)给出了两种薄膜的断面形貌,可以看出,CrN 和 CrAlN 薄膜均呈现柱状晶结构,不同的是 CrN 薄膜的柱状结构粗大疏松,而 CrAlN 薄膜柱状结构细小致密。

表 1 给出了 CrN 和 CrAlN 薄膜的力学性能测试值。其中 H 表示薄膜硬度, E 表示薄膜弹性模量。如表 1 所示,CrN 薄膜的硬度和弹性模量分别为 11.35 GPa 和 212.9 GPa,而 CrAlN 薄膜的硬度和弹性模量高达 20.23 GPa 和 246.43 GPa,这表明 Al 元素的掺杂显著的改善了薄膜的力学性能。这是由于更小的 Al 原子固溶到 CrN 晶格中,使得原本为 B1-NaCl 结构的 CrN 薄膜的晶格发生



(a) CrN (b) CrAlN (c) CrN (d) CrAlN
图 2 CrN 和 CrAlN 薄膜的 AFM 表面和 FESEM 断面形貌
Fig.2 AFM and FESEM images of the CrN and CrAlN films

不对称畸变或扭曲,有效的抑制了位错移动,从而使薄膜的硬度得到提高^[22]。另外,复合薄膜中存在的交变应力场也可能是复合膜硬度增加的原因之一^[23]。

Y. Leyland 等^[24]的研究表明,在表面接触下, H/E 和 H^3/E^2 分别联系着薄膜的弹性应变失效能力和抗塑性变形能力,这两个值越大,则薄膜对应的性能就越好。由此可知,相比于 CrN,CrAlN 薄膜具有更强的弹性应变失效能力和抗塑性变形能力。

表 1 CrN 和 CrAlN 薄膜的力学性能
Table 1 Mechanical properties of the CrN and CrAlN films

Films	H/GPa	E/GPa	H/E	H^3/E^2
CrN	11.35	212.90	0.05	0.03
CrAlN	20.23	246.43	0.08	0.14

2.2 CrN 和 CrAlN 薄膜的摩擦学性能

图 3 给出了 CrN 和 CrAlN 薄膜在不同介质

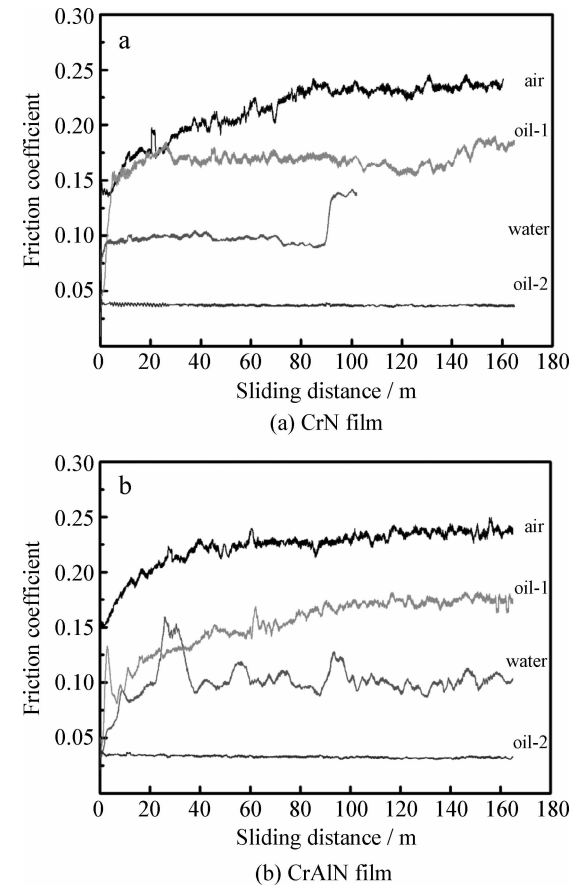


图 3 CrN 和 CrAlN 薄膜在不同介质中的摩擦因数曲线
Fig. 3 Friction coefficient curves of the CrN and CrAlN films in different contact conditions

中和 Al_2O_3 小球对磨时的摩擦因数随滑行距离变化的关系曲线。如图 3 所示,两种薄膜在空气中均具有最大的摩擦因数,同时摩擦曲线波动明显,而在水润滑和油润滑条件下摩擦因数显著减小,尤其是在粘度较小的 oil-2 中,摩擦因数最小可达 0.034,这说明油对两种薄膜具有良好的润滑效果。需要指出的是,在水润滑环境中,当滑行距离达到 82 m,CrN 薄膜摩擦因数突然增大,说明薄膜已经被磨穿,而 CrAlN 薄膜在水环境中的摩擦因数虽然波动明显,但始终保持在较低范围内,表明它在水中具有更好的抗磨性能。

CrN 和 CrAlN 薄膜在不同介质中的平均摩擦因数和磨损率由图 4(a)和 4(b)给出。可以看出,CrAlN 和 CrN 薄膜在大气环境中具有相似的平均摩擦因数和磨损率,而在其他 3 种介质中,CrAlN 薄膜具有更小的平均摩擦因数和磨损率,尤其是在水润滑环境中,CrAlN 薄膜的磨损率要比 CrN 小 60 倍之多,说明 CrAlN 薄膜在水润滑环境下的磨损性能远远优于 CrN 薄膜。

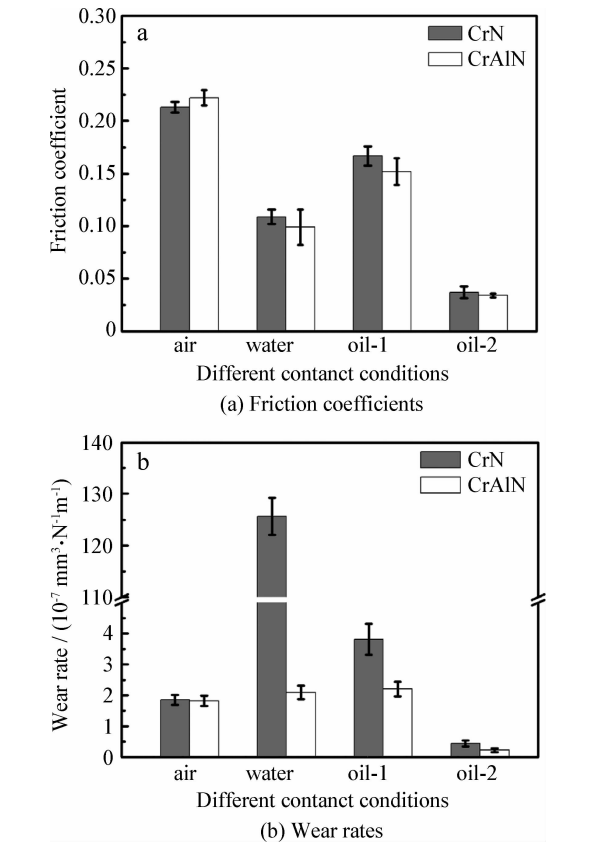


图 4 CrN 和 CrAlN 薄膜在不同介质中的平均摩擦因数和磨损率
Fig. 4 The average friction coefficients and wear rates of the CrN and CrAlN films in different contact conditions

为进一步探讨 CrN 和 CrAlN 薄膜与 Al_2O_3 小球在不同介质中对磨时的摩擦磨损机理,利用三维表面轮廓仪和光学显微镜分别观测在不同介质中对磨后薄膜和小球的磨损表面,结果见图 5 和图 6。

从图 5 可以看出,在干摩擦条件下,CrN 和 CrAlN 薄膜磨痕较浅($\sim 300\text{ nm}$),且有较多深浅

不一的犁沟,对偶小球磨损明显,磨斑直径约为 $200\text{ }\mu\text{m}$,同时磨痕四周有明显的磨屑。在水润滑环境中,CrN 薄膜发生严重的分层剥离现象,磨痕深度超过薄膜厚度,说明薄膜已被磨穿,CrAlN 薄膜磨痕内有大量的细微犁沟,磨痕深度约 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。另外,与 CrN 薄膜对磨的小球表面有明显的划伤和犁沟,而与 CrAlN 薄膜对磨后,对偶球

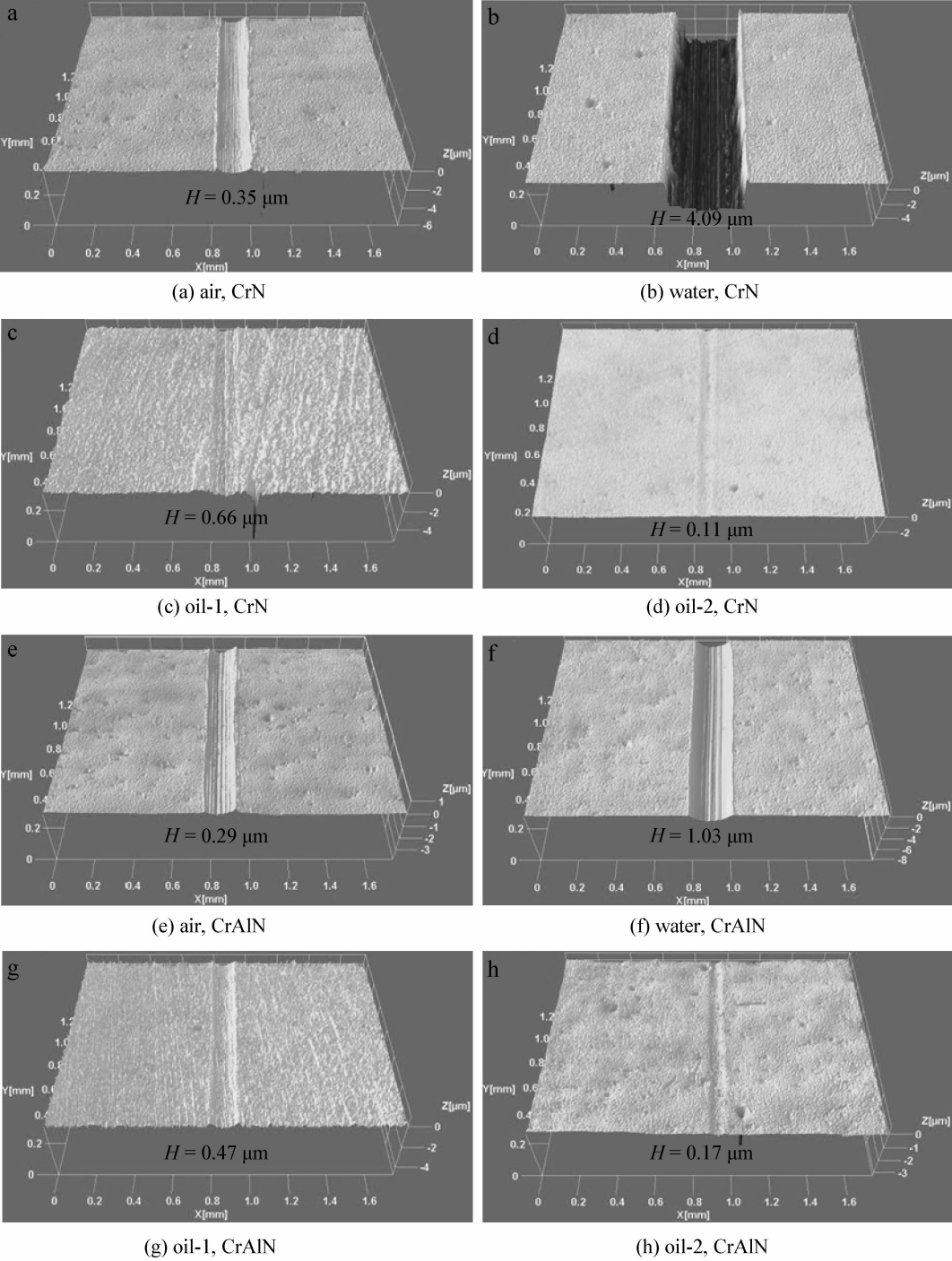


图 5 不同介质中 CrN 和 CrAlN 薄膜的磨损形貌

Fig. 5 Worn morphologies of the CrN and CrAlN films in different contact conditions

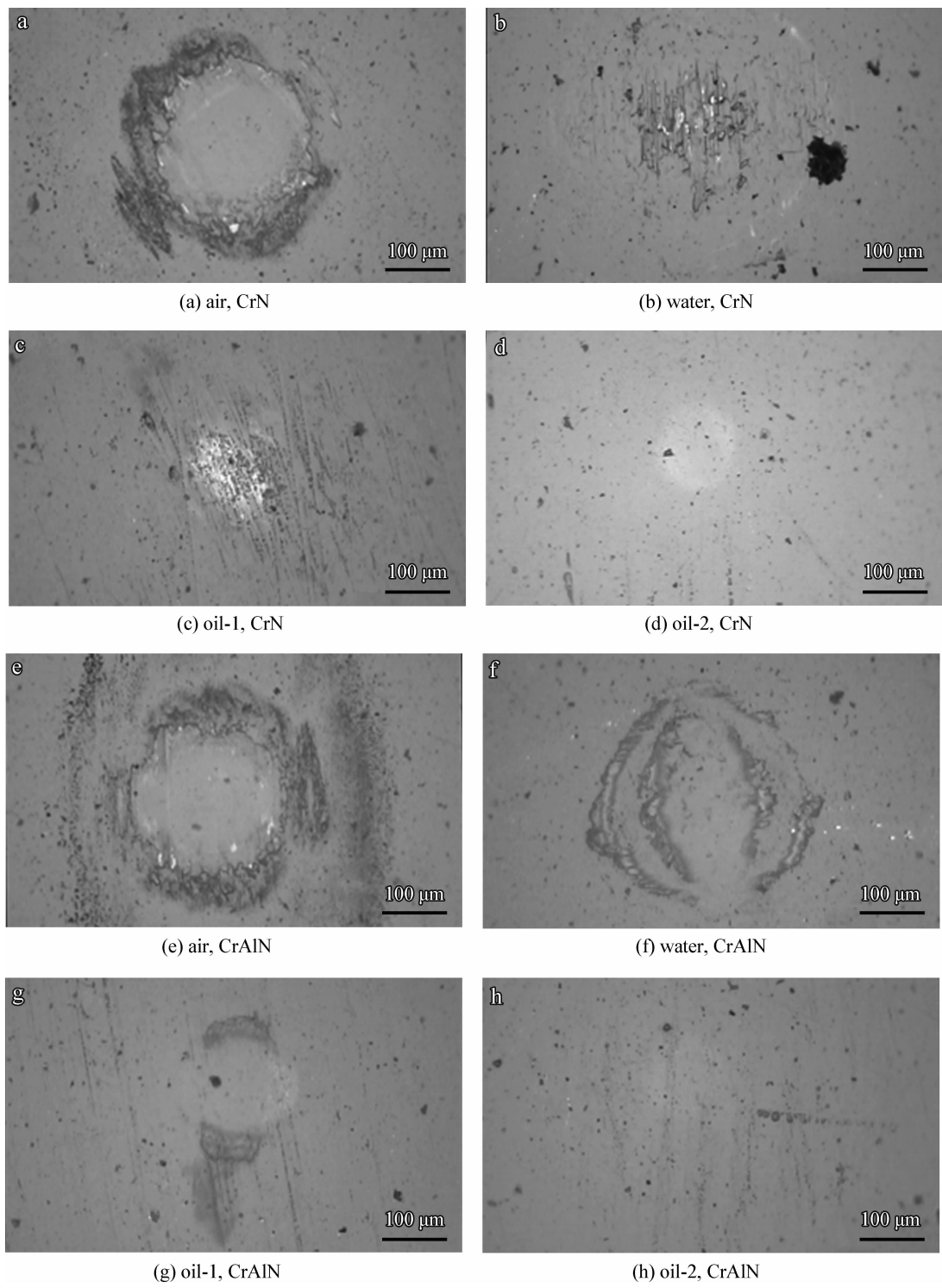


图 6 Al_2O_3 球与 CrN 和 CrAlN 薄膜在不同介质中对磨后的磨损表面形貌

Fig. 6 Worn morphologies of the Al_2O_3 ball slides against the CrN and CrAlN films in different contact conditions

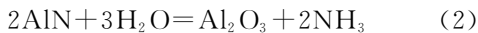
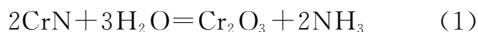
的磨斑中心呈现抛光效应,磨痕周边有少量的转移膜。在粘度较大的 oil-1 中,CrAlN 薄膜磨痕呈现抛光效应,对偶球磨损轻微,而 CrN 薄膜磨痕有明显的犁沟,对偶球划伤明显。在粘度较小

的油-2 中,薄膜和对偶球磨损均很轻微,磨痕深度均不超过 200 nm。

综合以上分析,说明在干摩擦过程中,薄膜和对偶小球间的接触面由于长时间处于相对运

动状态,使得表面原子键断裂形成大量松脱的磨粒,这些硬质的磨粒在接下来的摩擦过程中不断压入摩擦副表面进行切削产生大量的犁沟,从而致使摩擦磨损增强。因此在空气中薄膜主要表现为磨粒磨损^[25]。相对于 CrN 薄膜,CrAlN 薄膜具有更高的硬度,这有助于提高其抗磨性能,然而在摩擦过程中 CrAlN 薄膜的磨损会产生硬质磨粒,这些硬质磨粒对 CrAlN 薄膜的破坏作用会部分的抵消高硬度对薄膜抗磨性能的贡献,致使二者具有相似的磨损率。

在水环境中,薄膜的水解反应使其表面的微凸起很快被溶蚀,表面变得光滑,降低了机械互锁的几率,使得摩擦磨损减小,同时薄膜、对偶小球和水之间发生反应,能在薄膜表面形成转移膜,转移膜的形成避免了对偶与薄膜的直接接触,这种极薄的、低剪切强度的转移膜将会显著减小对偶对薄膜的摩擦^[25-26]。此外,在水环境中,摩擦生成的热将使接触表面温度升高,从而有助于发生如下化学反应:



从以上反应可知, NH_4^+ 和 OH^- 的生成将使水介质中离子浓度增大,这些离子会和水分子一起沿着缺陷进入薄膜内部,在局部形成微型原电池,加速对薄膜的腐蚀磨损^[27],又因为试验采用的水是含有大量离子的自来水,这将使腐蚀效应更为显著,从而使 CrN 薄膜很快磨穿失效。CrAlN 薄膜因具有致密的结构,使水分子进入薄膜内部形成微型原电池的几率大为减小,这是 CrAlN 薄膜在水润滑条件下磨损性能优于 CrN 薄膜的根本原因。

在油润滑条件下,小球和薄膜之间存在一层厚度与它们复合表面粗糙度相仿的油膜,这层油膜将二者局域的隔离开来,减小了它们直接接触的几率,从而大大减小了薄膜和对偶之间的磨损,这属于边界润滑。众所周知,在边界润滑下油的粘度系数越小,则它的流动性越好。因此,在粘度较小的 oil-2 中,由于润滑油较强的流动性,使其在对偶球滑移过后能够及时重新覆盖在磨痕表面,等对偶球再次滑过时仍能形成油膜起到对薄膜的保护作用。而在粘度较大的 oil-1

中,由于润滑油的粘度大导致流动性变差,无法及时有效的覆盖磨痕表面,因此油的润滑效应有限,最终使摩擦磨损较为严重^[28]。在油润滑条件下,薄膜摩擦性能强烈的依赖于摩擦对偶间形成的油膜的稳定性^[29],金属元素的掺杂将会提高薄膜的活性^[29],这将有助于在薄膜表面形成结合更好的、更为稳定的油膜,从而使薄膜在油润滑条件下具有更好的抗磨性。

3 结 论

(1) CrN 薄膜中 Al 元素的掺杂显著提高了薄膜的力学性能,减小了薄膜的表面粗糙度,并改善了薄膜在水润滑和油润滑条件下的摩擦学性能。

(2) CrN 和 CrAlN 薄膜的摩擦学性能显著依赖于测试介质,不同介质中薄膜的摩擦磨损机理不同。

(3) CrN 和 CrAlN 薄膜在大气环境中以磨粒磨损为主;在水介质中主要以腐蚀磨损为主;在油润滑环境中以边界润滑为主,但在粘度较大的油中伴随有一定的磨粒磨损。

参考文献

- [1] Rebenne H E, Bhat D G. Review of CVD TiN coatings for wear-resistant application: deposition processes, properties and performance [J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 63(1): 1-13.
- [2] Rebholz C, Ziegele H, Leyland A, et al. Structure, mechanical and tribological properties of nitrogen-containing chromium coatings prepared by reactive magnetron sputtering [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 115(2/3): 222-229.
- [3] Subramanian C, Strafford K N. Review of multicomponent and multilayer coatings for tribological applications [J]. Wear, 1993, 165(1): 85-95.
- [4] Zhang G A, Wang L P, Wang S C, et al. Structure and mechanical properties of reactive sputtering CrSiN films [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(8): 4425-9.
- [5] Zhang Y J, Yan P X, Wu Z G, et al. Preparation and characterization of high-quality TiN films at low temperature by filtered cathode arc plasma [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2004, 22(6): 2419-3.
- [6] 蔡志海, 底月兰, 张平. 活塞环表面 CrAlN 涂层的微观组织与高温氧化性能 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 16-19.
- [7] 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): 102-109.
- [8] 徐轶, 朱昊旻, 莫继良, 等. 两种 TiAlN 涂层的往复滑动摩

- 擦学性能研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(2): 13-20.
- [9] Chim Y C, Ding X Z, Zeng X T, et al. Oxidation resistance of TiN, CrN, TiAlN and CrAlN coatings deposited by lateral rotating cathode arc [J]. Thin Solid Films, 2009, 517(17): 4845-9.
- [10] Bobzin K, Lugseheider E, Knotek O, et al. Investigations of the effect of $(\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$ coatings' micro structure on impact toughness [C]. Symposium on ultrafast lasers for materials science held at the 2004 MRS fall meeting, 2004.
- [11] Hoerling A, Sjölen J, Willmann H, et al. Thermal stability, microstructure and mechanical properties of $\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x\text{N}$ thin films [J]. Thin Solid Films, 2008, 516(18): 6421-1.
- [12] Lee H Y, Jung W S, Han J G, et al. The synthesis of Cr-SiN film deposited using magnetron sputtering system [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(1/2/3/4): 1026-30.
- [13] Panjan P, Navinsek B, Cvelbar A, et al. Oxidation of TiN, ZrN, TiZrN, CrN, TiCrN and TiN/CrN multilayer hard coatings reactively sputtered at low temperature [J]. Thin Solid Films, 1996, 282(1/2): 298-301.
- [14] Li T P, Yin X H, Li M S, et al. Oxidation resistance of a Cr_{0.50}Al_{0.50}N coating prepared by magnetron sputtering on alloy K38G [J]. Oxidation of Metals, 2007, 68(3/4): 193-210.
- [15] Yu C, Wang S, Tian L, et al. Microstructure and mechanical properties of CrAlN coatings deposited by modified ion beam enhanced magnetron sputtering on AISI H13 steel [J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(1): 300-305.
- [16] 余春燕, 王社斌, 尹小定, 等. CrAlN 薄膜高温抗氧化性的研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(6): 1015-8.
- [17] Barshilia H C, Deepthi B, Rajam K S, et al. Growth and characterization of TiAlN/CrAlN superlattices prepared by reactive direct current magnetron sputtering [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2009, 27(1): 29-36.
- [18] Barshilia H C, Selvakumar N, Deepthi B, et al. A comparative study of reactive direct current magnetron sputtered CrAlN and CrN coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 2193-1.
- [19] Brizuela M, Garcia-Luis A, Bracerás I, et al. Magnetron sputtering of Cr(Al)N coatings: Mechanical and tribological study [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(1/2/3/4): 192-197.
- [20] Sánchez-López J C, Martínez - Martínez D, Loópez - Cartes C, et al. Mechanical behavior and oxidation resistance of Cr(Al)N coatings [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2005, 23(4): 681-686.
- [21] Makino Y, Nogi K. Synthesis of pseudobinary Cr-Al-N films with B1 structure by rf-assisted magnetron sputtering method [J]. Surface & Coatings Technology, 1998, 98(1/2/3): 1008-12.
- [22] Zhang S, Sun D, Fu Y Q, et al. Toughening of hard nanostructural thin films: a critical review [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 198(1/2/3): 2-8.
- [23] 李戈扬, 张流强, 许俊华, 等. W/Mo 超晶格薄膜的微观结构研究 [J]. 材料工程, 1999, 0(3): 24-27.
- [24] Kim Y J, Lee H Y, Byun T J, et al. Microstructure and mechanical properties of TiZrAlN nanocomposite thin films by CFUBMS [J]. Thin Solid Films, 2008, 516(11): 3651-5.
- [25] 谢红梅, 聂朝胤, 卢春灿, 等. 不同介质下 CrN_x 薄膜的摩擦学特性研究 [J]. 润滑与密封, 2009, 34(1): 52-55.
- [26] 谢红梅, 聂朝胤. TiN、CrN 的环境摩擦磨损对比研究 [J]. 新技术新工艺, 2010, (6): 63-66.
- [27] 唐宾, 李咏梅, 秦林, 等. 离子束增强沉积 CrN 膜层及其微动摩擦学性能研究 [J]. 材料热处理学报, 2005, 26(3): 58-60.
- [28] Liu X F, Wang L P, Xue Q J. DLC-based solid-liquid synergetic lubricating coatings for improving tribological behavior of boundary lubricated surfaces under high vacuum condition [J]. Wear, 2011, 271(5/6): 889-898.
- [29] Zhang S, Bui X L, Jiang J, et al. Microstructure and tribological properties of magnetron sputtered nc-TiC/a-C nanocomposite [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 198(1/2/3): 206-211.

作者地址: 甘肃省兰州市天水中路 18 号

730000

中国科学院兰州化学物理研究所

Tel: (0931) 4968 284/213

E-mail: yingying.fu@yahoo.cn