

CrSiN 纳米复合薄膜的摩擦学性能^{*}

王海新¹, 耿中荣¹, 张广安²

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 兰州 730070; 2. 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)

摘 要: 采用中频非平衡反应磁控溅射技术在单晶硅 P(111) 基材上制备了 CrSiN 纳米复合薄膜。利用 X 射线衍射仪 (XRD)、X 射线光电子能谱仪 (XPS)、Kevex 能谱仪 (EDX)、高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM) 和纳米压痕仪对薄膜的相结构、化学成分组成和力学性能进行了测试分析。利用球-盘式摩擦磨损试验机 (UMT-2) 考察了薄膜和 GCr15 钢球对磨的摩擦学性能并采用扫描电镜 (SEM) 观察磨痕形貌。结果表明: CrN 薄膜中 Si 元素的掺杂改变了薄膜晶体结构, 所制备的 CrSiN 复合薄膜为多相复合结构, 即 nc-CrN/a-Si₃N₄ 所组成的纳米晶/非晶复合结构。CrSiN 纳米复合薄膜的力学性能均优于 CrN 薄膜, 其硬度均高于 CrN 薄膜的硬度, 其中 Si 原子数分数为 12.6% 时薄膜的硬度达到最大, 对应纳米晶/非晶复合强化。CrSiN 纳米复合薄膜的摩擦因数低于 CrN 薄膜, 具有很好的抗磨损性能, 并具有一定的润滑作用。

关键词: CrSiN; 纳米复合薄膜; 摩擦学性能; 润滑

中图分类号: TG174.44; TG115.58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)05-0024-07

Tribological Properties of CrSiN Nanocomposite Films

WANG Hai-xin¹, GENG Zhong-rong¹, ZHANG Guang-an²

(1. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: The CrSiN films with various Si contents were deposited on silicon (111) by middle frequency unbalanced reactive magnetron sputtering. The crystal construction, chemical composition, cross sectional structure and mechanical properties of the resultant films were studied by X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), Kevex spectroscopy (EDX) and nano-indentation instrument, respectively. The tribological properties of the films sliding against GCr15 balls were investigated by ball-on-disk tribometer (UMT-2). The results show that the CrSiN films present the nanocomposite structure of nc-CrN/a-Si₃N₄, composed of CrN crystal and amorphous Si₃N₄ matrix. The mechanical properties of the CrSiN films are enhanced owing to the nanocomposite structure. The hardness of CrSiN film with 12.6% Si reaches the maximum owing to the formation of nanocomposite structure. The low friction coefficient and high wear resistance are presented in the CrSiN films compared with the CrN film.

Key words: CrSiN; nanocomposite films; tribological property; lubrication

0 引 言

磨损是机械零部件、工程构件的主要破坏形式一,也是造成材料和能源损失的重要原因,70%

以上的设备故障源于磨损引起的零件失效^[1-2]。润滑是减少材料摩擦磨损最为有效的技术之一,例如液体润滑。绝大多数机械都是在润滑油条件

收稿日期: 2013-06-06; 修回日期: 2013-08-20; 基金项目: * 国家自然科学基金(11104126)

作者简介: 王海新(1986-), 男(汉), 黑龙江绥化人, 硕士生; 研究方向: CrSiN 纳米复合薄膜

网络出版日期: 2013-09-26 10:33; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130926.1033.001.html>

引文格式: 王海新, 耿中荣, 张广安. CrSiN 纳米复合薄膜的摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 24-30.

下运行,润滑油对维持机构的运行及提高机械寿命起到关键的作用^[3],因此研究润滑油条件下的摩擦磨损材料尤为重要。

硬质薄膜材料作为耐磨涂层被广泛应用于现代制造业,有利于提高工件的耐磨、耐腐蚀性能以及延长其使用寿命。CrN 薄膜是典型的硬质薄膜,具有较高的硬度和耐磨性,其高温抗氧化性和耐腐蚀性优良,不但可作为耐磨涂层用于工模具和切削工具的表面强化,而且在表面防腐和装饰等许多工业领域也有重要用途^[4-5]。虽然 CrN 薄膜由于上述优良性能而使其具有广阔的应用前景,然而随着机械加工技术迅速发展,对薄膜质量亦提出了越来越高的要求,特别是抗磨减摩性能提出了更高求,而传统的耐磨涂层已经无法满足实际需求。多元氮化物逐渐引入工业生产中,Al^[6-8]、Si^[9-11]、W^[12]、Ni^[13]、B^[14]等元素作为常见的掺杂元素极大的改善了薄膜的性能。为此,为了进一步改善薄膜的性能,有必要通过复合化和纳米化等来进一步改善 CrN 基薄膜的性能。因此,文中利用 S. Veprek^[15-17]的纳米晶/非晶强化的材料设计方法,采用中频反应磁控溅射技术制备了 Cr-Si-N 三元复合纳米薄膜,着重考察了 Cr-Si-N 复合薄膜在大气和润滑油环境下的摩擦磨损性能,并讨论了摩擦磨损制。

1 试验方法

采用 20 kHz 中频反应磁控溅射系统在 (111) 硅片表面沉积了 CrN 和 CrSiN 复合薄膜。通过共溅射 Cr 和 Si 靶沉积^[18]获得 CrSiN 复合薄膜。

采用 Philips X'perts X 射线衍射仪分析薄膜的晶体结构,采用 Kevex 能谱仪分析薄膜化学成分,采用 JSM-6701F 冷场发射扫描电镜 (SEM)

观察薄膜厚度,采用 JEOL 3010 TEM 高分辨透射电镜 (HRTEM) 观察 CrSiN 复合薄膜的微观结构,采用 Perkin-Elmer PHI-5702 多功能光电子能谱仪分析 CrSiN 复合薄膜表面元素的化学态,表面经过溅射排除表面氧化,采用 Nanotest 550 型纳米压痕仪测定薄膜的硬度,每个样品选取 5 个点,压入深度为 100 nm,测 5 次后取平均值。

在大气环境和油润滑 (PAO) 条件下,采用 UMT-2MT 型多功能微摩擦磨损测试系统考察薄膜的摩擦磨损性能,对偶件为 Φ 3 mm 的 GCr15 钢球 (表面粗糙度 $<Ra$ 0.05 μm , 硬度 580 HV)。摩擦磨损试验条件为:法向载荷 1 N、滑动频率为 2 Hz、单次滑动行程 5 mm、试验时间 10 min。测试结束后,采用 JSM-5600LV 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样磨损表面形貌,采用 MicroXAM-3D 型三维轮廓仪观察磨痕三维轮廓并计算薄膜磨损率。

2 试验结果和讨论

2.1 薄膜结构

表 1 为制备的 CrSiN 薄膜的成分,CrSiN 复合薄膜中 Si/(Si+Cr) 的相对原子数分数为 8.4%, 12.6%, 17.9%。

图 1 给出了不同 Si 原子数分数的 CrSiN 复合薄膜的 XRD 图谱。可以看出,薄膜出现了 CrN 的 (111)、(200)、(222) 衍射峰,说明薄膜的结晶性很好,结构没改变仍为面心立方结构。Cr-SiN 复合薄膜的衍射峰强度变弱,半高宽也明显增大,说明薄膜的晶粒尺寸减小,结晶程度变差。而含硅化合物如 CrSi₂ 与 Si₃N₄ 的衍射峰均没有出现,这说明在薄膜中可能没有形成 CrSi₂ 相或 Si₃N₄ 可能以非晶形式存在。

表 1 CrSiN 薄膜的成分、硬度、摩擦因数及磨损率

Table 1 Chemical composition, hardness, friction coefficient and wear rate of CrSiN films

Sample	Si a/%	Cr a/%	Thickness/ μm	Hardness/ GPa	Friction coefficient		Wear rate / ($\mu\text{m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)	
					in air	in oil	in air	in oil
A	0	100.0	1.1	13.95	0.816	0.194	0.094 4	0.003 5
B	8.4	91.5	1.5	16.08	0.677	0.112		
C	12.6	87.4	1.6	25.64	0.483	0.126	0.001 6	
D	17.9	82.1	1.8	18.22	0.564	0.111	0.001 1	

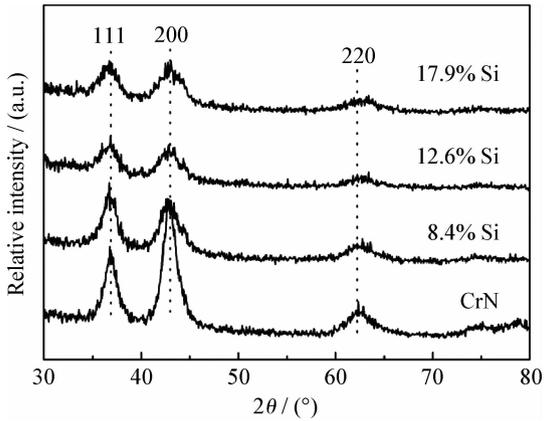


图1 CrSiN复合薄膜的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of CrSiN films

图2为所制备的CrSiN复合薄膜的 Si_{2p} 的X光电子能图谱。图中Si-N的结合能为101.8 eV,根据文献[10-11]中的报道 Si_3N_4 的 Si_{2p} 的结合能为101.6~102.2 eV,可认为在所制备的CrSiN薄膜中Si是以 Si_3N_4 的非晶态存在。

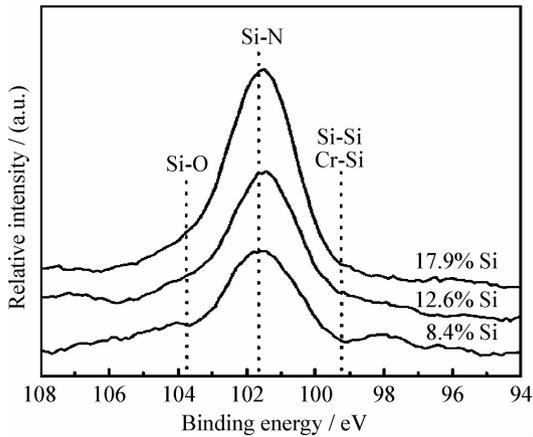
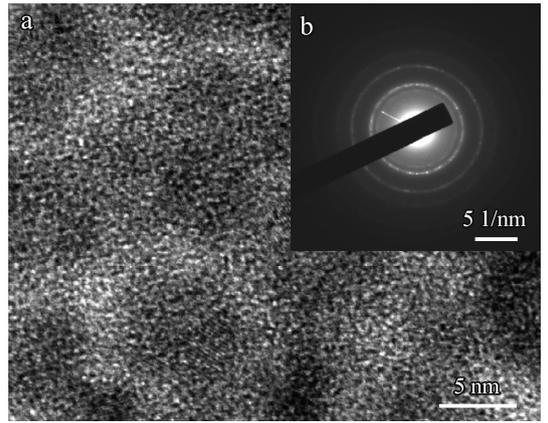


图2 CrSiN复合薄膜的XPS图谱

Fig. 2 XPS spectra of CrSiN films

图3为CrSiN复合薄膜的HRTEM形貌及选区电子衍射图。HRTEM的观察结果表明薄膜中存在小晶粒(尺寸约为3~5 nm)(图3(a)),通过标定选取电子衍射环(图3(b)),该小晶粒是CrN相。结合XPS的分析结果,HRTEM中的非晶区域是非晶氮化硅相。

根据上述的结构分析,可认为在所制备的CrSiN薄膜中Si是以 Si_3N_4 的非晶态存在。试验所得的CrSiN复合薄膜为多相复合结构,由晶态的CrN与非晶态的 Si_3N_4 组成,即nc-CrN/a- Si_3N_4 所组成的纳米晶/非晶复合结构。



(a) HRTEM (b) SAED images of CrSiN film

图3 CrSiN复合薄膜(12.6%Si)的HRTEM形貌及选区电子衍射图

Fig. 3 HRTEM and SAED image of CrSiN films(12.6%Si)

2.2 纳米硬度

试验制备的CrN薄膜的硬度为13 GPa,随着硅的加入,薄膜的硬度增大,这是由于晶粒细化。硅原子数分数为12.6%时,薄膜的硬度达到极大(25.64 GPa),这是因为形成了纳米复合结构(Fig. 3)。文献[19]中报道,硅原子数分数在8%~15%之间,对应纳米晶/非晶复合薄膜中晶体晶界非晶层的厚度约为1 nm左右,此时的非晶层的厚度能有效阻止纳米晶粒内部的位错及微裂纹不易通过无定形相而传播,同时可以避免晶界滑移,起到硬度增强作用。继续增大硅原子数分数,薄膜的硬度降低,硅原子数分数为17.9%时,薄膜的硬度约为18 GPa,这是由于非晶相增加使得硬度降低。

2.3 摩擦学性能

图4为大气环境下CrN薄膜与CrSiN复合薄膜同GCr15钢球对摩的摩擦因数随滑动时间变化的关系曲线。可以看出掺入Si后的CrSiN复合薄膜摩擦因数明显低于CrN薄膜的摩擦因数,摩擦性能明显改善。CrN薄膜在很短的时间内(50 s)即达到稳定磨损阶段,但摩擦因数较高;而CrSiN复合薄膜跑合时间均比较长,然后才达到稳定磨损阶段,摩擦因数均降低。这是由薄膜硬度或者具有润滑特性的化学组织的原子数分数决定的,图中Si原子数分数为8.4%的CrSiN复合薄膜跑合时间较长(200 s),且达到稳定磨损后,摩擦因数较高,这是因为薄膜硬度高,但薄膜

中的硅原子数分数相对较低,在摩擦过程中不易与摩擦副之间形成稳定的转移膜与具有润滑特性的化学组织^[20]。而 Si 原子数分数为 12.6% 的 CrSiN 复合薄膜,由于硬度很高,滑动 400 s 后才达到稳定磨损,达到稳定磨损阶段后,又由于薄膜中的 Si 原子数分数较高,在摩擦过程中, Si 与空气中的氧气和水蒸气发生化学反应生成具有润滑作用的 SiO_x 或者 Si(OH)₂ 薄膜^[9,21-22],因此薄膜的摩擦因数很低,达到稳定磨损后摩擦因数低于 0.3。Si 原子数分数为 17.9% 的 CrSiN 复合薄膜由于薄膜硬度不太高而 Si 原子数分数相对较高,因此在摩擦过程中容易与摩擦副之间形成稳定的转化膜而达到稳定磨损,跑合时间较短(100 s)。

图 5 为 CrN 薄膜与 CrSiN 复合薄膜与 GCr15 钢球对摩后磨痕表面形貌 SEM 照片,可以看出 CrN 薄膜磨损表面呈严重的磨损变形,局部出现明显的剥落,磨痕边缘也出现明显的剥落,说明薄

膜在摩擦试验过程中,薄膜从基体表面剥落(图 5(a)),主要是一方面薄膜中晶粒较大,在摩擦过程

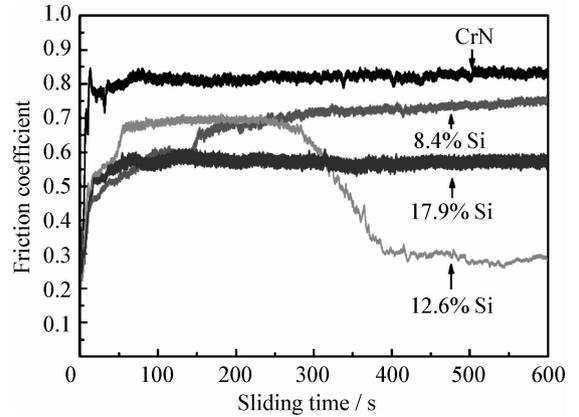
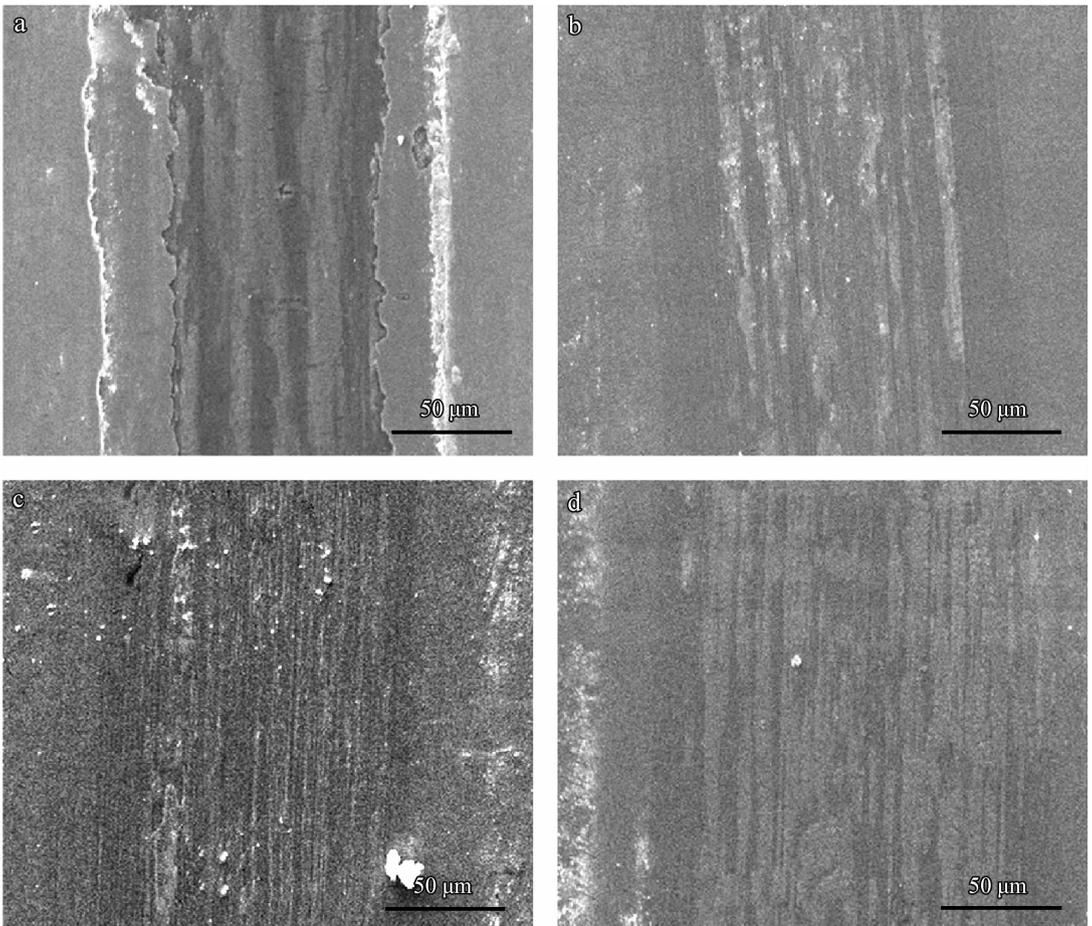


图 4 在大气环境下 CrN 与 CrSiN 薄膜同 GCr15 钢球对摩的摩擦因数

Fig. 4 Friction coefficient of CrN and CrSiN films against GCr15 ball in air

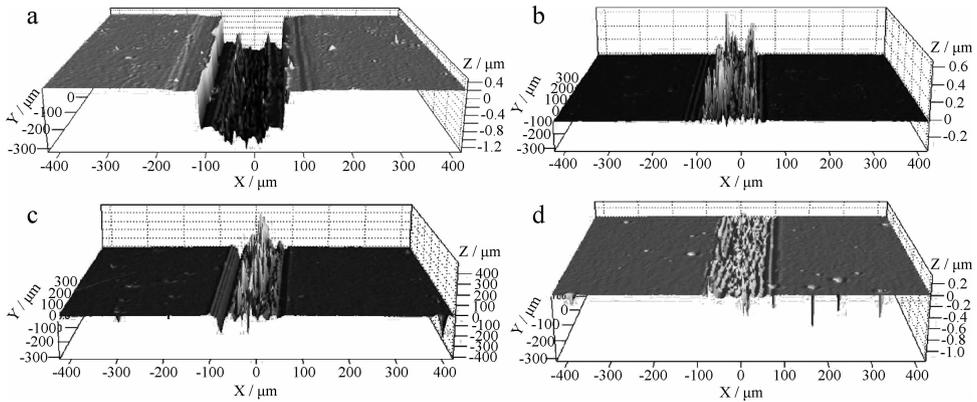


(a) 0% Si (b) 8.4% Si (c) 12.6% Si (d) 17.9% Si

图 5 CrN 薄膜与 CrSiN 复合薄膜同 GCr15 钢球在大气环境下对摩后磨痕形貌

Fig. 5 Wear tracks morphologies of CrN and CrSiN films against GCr15 ball in air

中较大的晶粒不能有效阻止裂纹,导致薄膜表面出现严重的磨损变形,薄膜出现剥落;另一方面摩擦磨损过程中由微凸体与增强颗粒接触面承受载荷,必然在两者的界面上形成较高的应力集中,这一局部的高应力使部分薄膜颗粒剥落^[23]。而 CrSiN 复合薄膜的磨痕表面,均没有出现明显的剥落,但磨痕内布满大量的细小沟槽(图 5(b)(d))。分析其可能的原因是: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 GCr15 钢球表面进行切削产生大量的犁沟,从而导致 CrSiN 薄膜擦伤或带状脱落,磨痕内部布满细小沟槽;



(a) 0% Si (b) 8.4% Si (c) 12.6% Si (d) 17.9% Si

图 6 大气环境下 CrN 薄膜与 CrSiN 复合薄膜同 GCr15 钢球对摩后磨痕的三维轮廓图

Fig. 6 3D images of wear tracks of CrN and CrSiN films against GCr15 ball in air

图 7 为油润滑下 CrN 与 CrSiN 薄膜同 GCr15 钢球对摩的摩擦因数曲线,可以看出,相对于干摩擦条件,在油润滑条件下 CrN 和 CrSiN 薄膜的摩擦因数均降低。这是因为在油润滑条件下,摩擦过程中油分子与摩擦表面相互作用,在薄膜与摩擦对偶件之间形成油的吸附膜或转移层,避免了摩擦副之间的直接接触,降低了摩擦因数^[24]。同时从另一方面可以看出, CrSiN 薄膜很快达到稳定状态(100 s)并且摩擦因数低于 CrN,这是由于 CrN 薄膜硬度低和表面粗糙度高。

图 8 为油润滑下 CrN 薄膜与 CrSiN 复合薄膜与 GCr15 钢球对摩后磨痕表面形貌。可以看出与其他 3 种薄膜相比, CrN 薄膜磨损最严重。然而相对于干摩擦,磨痕表面磨损轻微,没有裂纹和剥落现象出现。这是因为在油润滑条件下,对偶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,润滑油膜有效的隔开了两摩擦

又由于 CrSiN 薄膜的硬度较高,在摩擦过程中使 GCr15 摩擦副磨损严重,这就导致在稳定磨损过程中, CrSiN 复合薄膜与 GCr15 钢球摩擦副间所发生的磨损在更大的接触面积上进行,使得磨痕表面较宽。

图 6 为大气环境下 CrN 薄膜与 CrSiN 复合薄膜与 GCr15 钢球对摩后磨痕表面三维轮廓图。可以看出 CrN 薄膜磨痕很深(约 1 μm),底部出现局部剥落,而复合薄膜磨痕都很浅,磨痕内布满大量的细小沟槽,尤其薄膜(图(c)),磨痕深度约在 100 nm,这可能是因为在薄膜表面发生化学反应生成了具有润滑作用的 SiO_x 或者 $\text{Si}(\text{OH})_2$,降低了磨损^[17,19]。

面,减小了它们直接接触的几率,减缓了薄膜的摩擦和磨损^[24-25],由于表面不直接接触,不会出现粘着磨损和磨粒磨损,因此磨痕表面几乎无磨损。

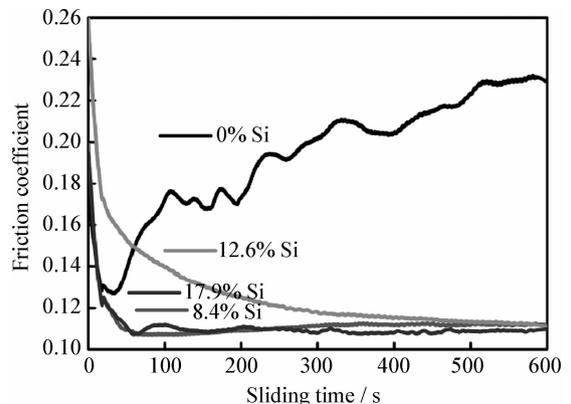
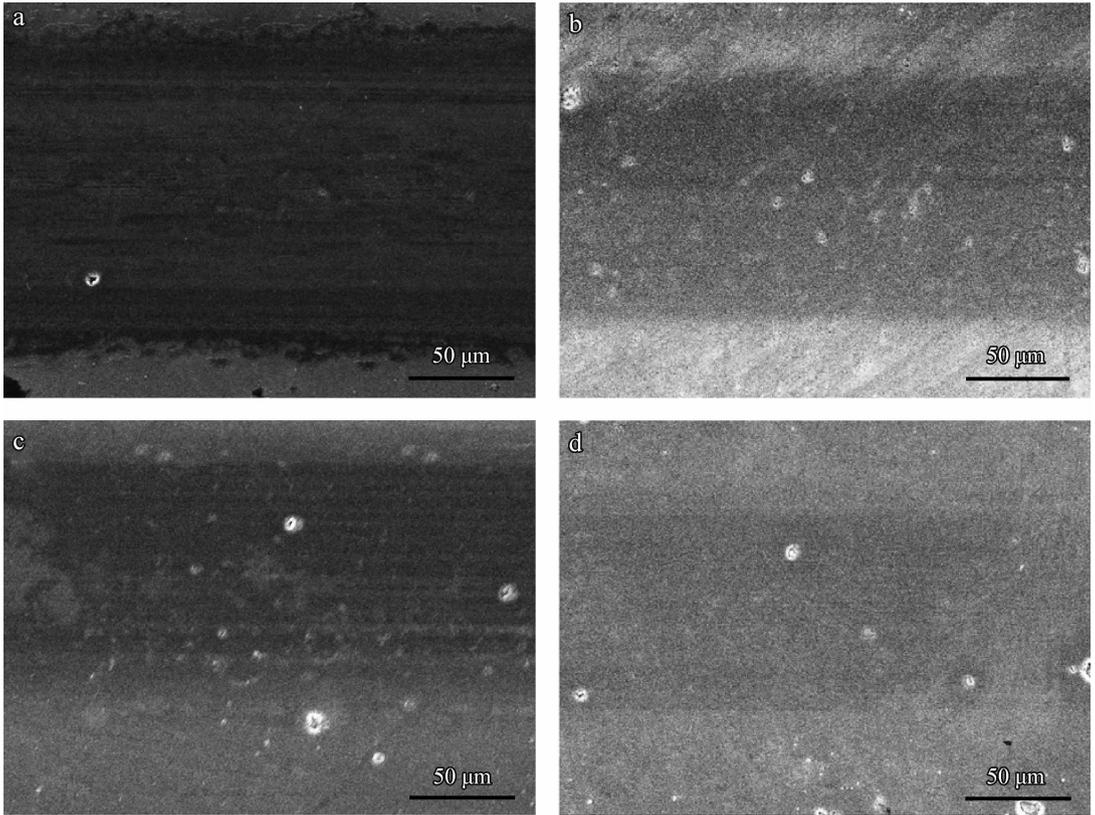


图 7 油润滑下 CrN 与 CrSiN 薄膜同 GCr15 钢球对摩的摩擦因数曲线

Fig. 7 Friction coefficient curves of CrN and CrSiN films against GCr15 ball in oil

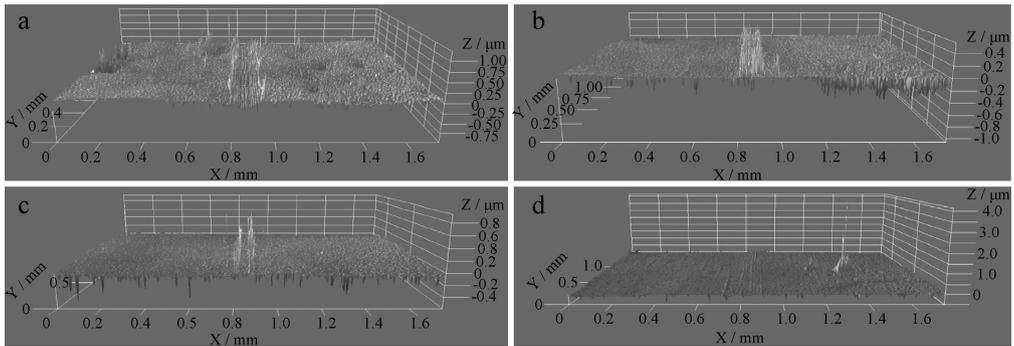


(a) 0% Si (b) 8.4% Si (c) 12.6% Si (d) 17.9% Si

图 8 油润滑下 CrN 薄膜与 CrSiN 复合薄膜同 GCr15 钢球对摩后的磨痕形貌
Fig. 8 Wear tracks morphologies of CrN and CrSiN films against GCr15 ball in oil

图 9 为油润滑下 CrN 薄膜与 CrSiN 复合薄膜与 GCr15 钢球对摩后磨痕表面三维轮廓图。可以看出相对于干摩擦,磨痕都很浅,其中 CrN 薄膜磨痕最深(250 nm),磨痕边缘出现了一定的

挤压变形,这是由于 CrN 薄膜硬度较低。而 CrSiN 复合薄膜磨痕磨损轻微,尤其薄膜(图 d)磨痕表面接近原始表面无磨损,可以看出 CrSiN 复合薄膜比 CrN 薄膜具有更好的耐磨性。



(a) 0% Si (b) 8.4% Si (c) 12.6% Si (d) 17.9% Si

图 9 油润滑下 CrN 薄膜与 CrSiN 复合薄膜同 GCr15 钢球对摩后磨痕的三维轮廓图
Fig. 9 3D images of wear tracks of CrN and CrSiN films against GCr15 ball in oil

3 结 论

(1) 采用磁控共溅射 Cr 与 Si 制备出 CrSiN

纳米复合薄膜,即由晶态的 CrN 与非晶态的 Si₃N₄ 组成的纳米晶(nc)-CrN/非晶(a)-Si₃N₄ 复合结构。由于 CrSiN 薄膜的特殊结构,其硬度均高

于CrN薄膜的硬度,其中Si原子数分数为12.6%时薄膜的硬度达到极大,对应纳米晶/非晶复合强化。

(2) 大气环境下CrSiN纳米复合薄膜的摩擦因数均远低于CrN薄膜,薄膜主要为磨粒磨损,在摩擦磨损过程中具有较强的抗形变能力,能够有效阻止裂纹,抗磨损性能较CrN薄膜均有不同程度的提高,具有很好的抗磨损性能。

(3) 油润滑条件下,油分子与摩擦表面相互作用,在表面形成保护膜或改性层,使薄膜表面几乎无磨损。

参考文献

- [1] 程江波,梁秀兵,王泽华,等. 油润滑条件下FeBSiNb非晶涂层磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(2): 119-125.
- [2] 杨善林,臧艳,乔玉林,董新宇. 超声振动对GCr15/45钢摩擦副油润滑下的摩擦磨损性能影响[J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 43-46.
- [3] 刘维民,许俊,冯大鹏,等. 合成润滑油的研究现状及发展趋势[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(1): 91-104.
- [4] Zhang G A, Yan P X, Wang P, et al. Influence of nitrogen content on the structural, electrical and mechanical properties of CrN_x thin films [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 460-461: 301-305.
- [5] Thobor-Keck A, Lapostolle F, Dehlinger A S, et al. Influence of silicon addition on the oxidation resistance of CrN coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200 (1/2/3/4): 264-268.
- [6] 吕艳红,孔庆花,吉利,等. 氮气流量对中频非平衡反应磁控溅射制备CrAlN薄膜性能的影响[J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 7-11.
- [7] 蔡志海,底月兰,张平. 活塞环表面CrAlN涂层的微观组织与抗高温氧化性能[J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 15-19.
- [8] Scheerer H, Hoche T H, Broszeit E, et al. Effects of the chromium to aluminum content on the tribology in dry machining using (Cr, Al)N coated tools [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200(1/2/3/4): 203-207.
- [9] Azzi M, Benkahoul M, Szpunar J A, et al. Tribological properties of CrSiN-coated 301 stainless steel under wet and dry conditions, Wear, 2009, 267(5/6/7/8): 882-889.
- [10] Park J H, Chung W S, Cho Y R, et al. Synthesis and mechanical properties of Cr-Si-N coatings deposited by a hybrid system of arc ion plating and sputtering techniques [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188-189: 425-430.
- [11] Lee H Y, Jung W S, Han J G, et al. The synthesis of CrSiN film deposited using magnetron sputtering system [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200 (1/2/3/4): 1026-30.
- [12] Wu W Y, Wu C H, Xiao B H, et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of CrWN films deposited by DC magnetron sputtering [J]. Vacuum, 2013, 87: 209-212.
- [13] Hu M, Sun J Y, Weng L J, et al. Preparation and primary investigation of the tribological properties of ion-plated CrNiN composite films on stainless steel [J]. Tribology, 2005, 25(2): 131-134.
- [14] Zhang G A, Wang L P, Yan P X, et al. Structure and mechanical properties of Cr-B-N films deposited by reactive magnetron sputtering [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486(1/2): 227-232.
- [15] Veprek S, Reiprich S. A concept for the design of novel superhard coatings [J]. Thin Solid Films, 1995, 268(1/2): 64-71.
- [16] Veprek S, Reiprich S, Li S Z. Superhard nanocrystalline composite materials: The TiN/Si₃N₄ system [J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(20): 2640-2642.
- [17] Veprek S. New development in superhard coatings: the superhard nanocrystalline amorphous composites [J]. Thin Solid Films, 1998, 317(1/2): 449-454.
- [18] 张广安,王立平,刘千喜,等. CrN基复合薄膜的结构及摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(2): 181-185.
- [19] Veprek S, Veprek-Heijman M G J, Karvankova P, et al. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites [J]. Thin Solid Films, 2005, 476(1): 1-29.
- [20] Lin H H, Chou C C, Lee J W. Tribological properties of Cr-Si-N nanocomposite film adherent silicon under various environments [J]. Thin Solid Films, 2010, 518(24): 7509-14.
- [21] Lee J W, Chang Y C. A study on the microstructures and mechanical properties of pulsed DC reactive magnetron sputtered Cr-Si-N nanocomposite coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202(4/5/6/7): 831-836.
- [22] Zhang G, Wang L, Wang S C, et al. Structure and mechanical properties of reactive sputtering CrSiN films [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(8): 4425-9.
- [23] 徐轶. 磁控溅射和离子镀TiAlN涂层的往复滑动摩擦学行为研究[D]. 四川: 西南交通大学, 2006.
- [24] 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.
- [25] 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.

作者地址: 甘肃省兰州市城关区天水中路18号 730000
中国科学院兰州化学物理研究所
Tel: (0931) 4986 117
E-mail: haixin5878@126.com