

# 添加 Y 对电弧离子镀 TiAlN 薄膜结构和摩擦磨损性能的影响

郭策安<sup>1,2</sup>, 赵宗科<sup>1</sup>, 胡明<sup>1,3</sup>, 尚光明<sup>4</sup>, 周峰<sup>1</sup>, 张健<sup>1</sup>

(1.沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159; 2.重庆建设工业(集团)有限责任公司, 重庆 400054; 3.中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 4.北方华安工业集团有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161046)

**摘要:** 目的 为进一步提高电弧离子镀 TiAlN 薄膜的摩擦磨损性能, 研究添加元素 Y 对 CrNi3MoVA 钢表面电弧离子镀 TiAlN 薄膜微观组织结构、硬度、弹性模量及摩擦磨损性能的影响。方法 采用 Ti-50Al 和 Ti-49Al-2Y 合金靶, 利用电弧离子镀技术在 CrNi3MoVA 钢表面制备两种氮化物薄膜, 利用纳米压痕仪和摩擦磨损试验机分别测试了两种薄膜的硬度、弹性模量和摩擦系数, 并用 SEM、TEM、EDS、GIXRD 分析了两种薄膜磨损前后的形貌、成分、相结构。结果 添加 Y 降低了 TiAlN 薄膜的晶粒尺寸, 使其由柱状晶结构转变为近似等轴晶结构。TiAlYN 薄膜的硬度较 TiAlN 薄膜提高了约 25%, 其弹性模量与 TiAlN 薄膜相近。与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 对磨时, 在加载载荷为 20 N、往复行程为 10 mm、往复速率为 400 r/min 的条件下, TiAlN 薄膜的稳定摩擦系数为 0.70~0.75, 而 TiAlYN 薄膜的稳定摩擦系数为 0.60~0.65, TiAlYN 薄膜的磨损率较 TiAlN 薄膜的磨损率减小了约 47%。TiAlN 薄膜与 TiAlYN 薄膜的主要磨损机制均为刮擦磨损, TiAlN 薄膜的失效机制主要是脆性裂纹导致的剥落。结论 添加 Y 对 TiAlN 薄膜具有明显的减摩耐磨作用, 并提高了 TiAlN 薄膜在摩擦磨损过程中的抗开裂和抗剥落性能。

**关键词:** TiAlN 薄膜; TiAlYN 薄膜; CrNi3MoVA 钢; 电弧离子镀; 硬度; 弹性模量; 摩擦磨损

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)10-0139-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.018

## Influence of Y on Microstructure and Performance of Friction and Wear of Arc Ion Plated TiAlN Film

GUO Ce-an<sup>1,2</sup>, ZHAO Zong-ke<sup>1</sup>, HU Ming<sup>1,3</sup>, SHANG Guang-ming<sup>4</sup>, ZHOU Feng<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>

(1.School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2.Chongqing Jianshe Industry (Group) LLC, Chongqing 400054, China; 3.School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 4.North Huaan Industry Group Co., Ltd, Qiqihar 161046, China)

**ABSTRACT:** This work aims to further increase performance of friction and wear of arc ion plated TiAlN film, and study the

收稿日期: 2018-04-04; 修订日期: 2018-07-23

Received: 2018-04-04; Revised: 2018-07-23

基金项目: 辽宁省自然科学基金 (201602643); 沈阳理工大学辽宁省兵器科学与技术重点实验室开放基金 (4771004kfs25)

Fund: Supported by National Science Foundation of Liaoning Province of China (201602643) and Open Fund of Liaoning Province Armament Science and Technology Key Laboratory of Shenyang Ligong University (4771004kfs25)

作者简介: 郭策安 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程。

Biography: GUO Ce-an (1979—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 张健 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程。邮箱: zhangjian6165@aliyun.com

Corresponding author: ZHANG Jian (1961—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering. E-mail: zhangjian6165@aliyun.com

influence of element Y on microstructure, hardness, elasticity modulus and friction and wear performance of arc ion plated TiAlN film on CrNi3MoVA steel. Two nitride films were prepared on CrNi3MoVA steel by arc ion plating technology with Ti-50Al and Ti-49Al-2Y (at.%) alloy targets. The hardness, elasticity modulus and friction coefficient of the two films were tested by the nanoindenter and the friction and wear testing machine, respectively. Then the morphologies, composition and phase structure before and after wearing were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscope (TEM), energy dispersive X-ray spectrum (EDS) and grazing incidence X-Ray diffraction (GIXRD). Y reduced the grain size of the TiAlN film and made the TiAlN film transform from the columnar microstructure to the nearly equiaxed one. The hardness of the TiAlYN film was about 25% more than that of the TiAlN film and the elasticity modulus of the TiAlYN film was close to that of TiAlN film. When the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball was used as one of the friction pair under the wear condition that the load was 20 N, the reciprocating travel was 10 millimeter and the velocity was 400 rounds per minute, the steady friction coefficient of the TiAlN film was 0.70~0.75, while that of the TiAlYN film was 0.60~0.65. The wear rate of the TiAlYN film was about 47% less than that of the TiAlN film. The wear mechanism of both the TiAlN film and the TiAlYN film was mainly characterized as scrape abrasion, and the failure mechanism of the TiAlN film was mainly the spalling caused by brittle cracks. The Y added in TiAlN film has a significant function of antifriction and wear resistance, and increases the cracking and spalling resistance of the TiAlN film in the course of frictional wear.

**KEY WORDS:** TiAlN film; TiAlYN film; CrNi3MoVA steel; arc ion plating; hardness; elasticity modulus; friction and wear

三元系 TiAlN 薄膜因具有高硬度、高耐磨性能和抗高温氧化性能,被广泛应用于机械、汽车、航天军工等领域<sup>[1-5]</sup>。然而,随着使用工况环境越来越苛刻,对 TiAlN 薄膜的使用性能提出更高要求,提高 TiAlN 薄膜性能的有效途径是在薄膜中引入新组元。如 Jung 等<sup>[6]</sup>在磁控溅射 TiAlN 薄膜中分别引入 Si、B 和 Cr,三种薄膜的硬度均高于 TiAlN 薄膜的硬度,引入组元 B 的 TiAlN 薄膜具有最高的硬度和最低的摩擦系数。Feng 等<sup>[7]</sup>在电弧离子镀 TiAlN 薄膜中分别引入 Si 和 Hf,两种组元的引入均提高了 TiAlN 薄膜的硬度和摩擦磨损性能。Chen 等<sup>[8]</sup>和 Rachbauer 等<sup>[9]</sup>分别在磁控溅射 TiAlN 薄膜中加入 Zr、Ta 后,也显著提高了 TiAlN 薄膜的硬度。

Pflüger 等<sup>[10]</sup>首次在磁控溅射 TiAlN 薄膜中加入双组元 Cr、Y,在高温干摩擦条件下, TiAlCrYN 薄膜较 TiAlN 薄膜具有更好的摩擦磨损性能,但关于其摩擦磨损机制仍有待于进一步研究。电弧离子镀技术较磁控溅射技术具有高离化率、高沉积速率等优点<sup>[7,11]</sup>,已被广泛用于制备 TiAlN 薄膜。目前,关于添加 Y 对电弧离子镀 TiAlN 薄膜摩擦磨损机制的影响仍未见报道。为此,本文研究添加 Y 对电弧离子镀 TiAlN 薄膜微观组织结构、硬度、弹性模量以及摩擦磨损性能的影响,揭示 Y 对 CrNi3MoVA 钢表面电弧离子镀 TiAlN 薄膜摩擦磨损的作用机制。

## 1 试验

### 1.1 薄膜的制备

实验用基体材料为 CrNi3MoVA 钢,其化学成分如表 1 所示。将 CrNi3MoVA 钢在线切割机上加工成尺寸为 20 mm×10 mm×5 mm 的长方体小试样,并在

样品边缘打  $\phi 1.5$  mm 的通孔,用 SiC 砂纸打磨至 1000#,再用粒度为 2.5  $\mu\text{m}$  的金刚石研磨膏抛光,然后经丙酮酒精混合液超声清洗,立刻用风筒吹干,待用。在 DH-4 型电弧离子镀膜机上制备 TiAlN 和 TiAlYN 薄膜,使用的靶材分别为 Ti-50Al 和 Ti-49Al-2Y (原子数分数)合金靶。镀膜前,试样在 -1000 V 偏压下离子轰击 5 min,以去除表面污物。所用反应气体为 N<sub>2</sub>,主要沉积参数如表 2 所示。

表 1 CrNi3MoVA 钢的化学成分<sup>[12]</sup>  
Tab.1 Chemical composition of the CrNi3MoVA steel<sup>[12]</sup>

wt%								
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	S	P
0.40	0.41	0.25	1.28	3.14	0.37	0.20	0.001	0.012

表 2 电弧离子镀膜参数  
Tab.2 Arc ion plating film parameters

Arc current /A	Substrate temperature /°C	Base pressure /Pa	N <sub>2</sub> partial pressure /Pa	Substrate bias/V	Plating time/h
70	400	$7 \times 10^{-3}$	1.2	-600	1

### 1.2 薄膜的性能及表征

用纳米压痕仪 (Nano Indentaion G200) 测量薄膜的硬度和弹性模量,压痕采用 Berkovich 压头,通过加载曲线,利用 Oliver-pharr 模型计算得出材料的硬度和弹性模量。测量值取 5 个平行点的平均值。摩擦磨损试验中,对磨件采用  $\phi 4$  mm 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 球,往复行程为 10 mm,往复速率为 400 r/min,加载载荷为 20 N,运行时间为 20 min。两种薄膜的耐磨性用式(1)表示。

$$W_r = \frac{V}{FD} \quad (1)$$

式中:  $W_r$  为磨损率;  $V$  为磨损体积,  $V = \Delta m / \rho$ ,  $\Delta m$  为试样磨损质量,  $\rho$  为材料密度, TiAlN 薄膜的密度近似取 TiN 和 AlN 密度的平均值  $4.34 \text{ g/cm}^3$ , 由于 Y 为少量添加, 近似认为 TiAlYN 薄膜的密度与 TiAlN 薄膜的密度相当;  $F$  为施加的载荷;  $D$  为滑动行程。试样在磨损前后均经丙酮和酒精混合液超声清洗 60 min, 后用精度为 0.1 mg 的天平进行称量, 计算试样的磨损质量。

用 Philips FEI-Inspect F 型带能谱的场发射扫描电镜 (SEM/EDS) 分析初始态和磨损态薄膜的形貌及成分。用 Jeol JEM 2010E 型透射电子显微镜 (TEM) 分析薄膜的截面组织结构。用掠入射 X 射线衍射 (GIXRD) 确定薄膜的相结构, 采用 Cu 靶辐射,  $K\alpha 1$  射线的波长为  $0.154\,059\,8 \text{ nm}$ ,  $K\alpha 2$  射线的波长为  $0.154\,442\,6 \text{ nm}$ ,  $2\theta$  扫描范围  $20^\circ \sim 90^\circ$ , 步长  $0.04^\circ$ , 掠入射角  $0.6^\circ$ , 加速电压  $40 \text{ kV}$ , 电流  $40 \text{ mA}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 薄膜的组织结构

图 1 为两种薄膜的微观形貌。由图 1a 可以看出, 两种薄膜的表面均有微米级尺寸的大颗粒, 这是电弧离子镀技术本身所固有的特征缺陷。TiAlYN 薄膜表面的大颗粒数量比 TiAlN 薄膜的明显减少, 由此可见, 添加 Y 改善了 TiAlN 薄膜的表面质量。由图 1b 两种薄膜的截面 SEM 形貌可以看出, 两种薄膜内部组织致密, 与 CrNi3MoVA 钢基体结合良好, 厚度相当, 约为  $4 \mu\text{m}$ 。由图 1c 两种薄膜的截面 TEM 形貌可以看出, TiAlN 薄膜为典型的柱状晶组织, 而 TiAlYN 薄膜为近似等轴晶组织。Pflüger 等<sup>[10]</sup>在利用磁控溅射技术制备 TiAlCrYN 薄膜时, 也发现了添加 Y 能够使薄膜由柱状晶向等轴晶转变。这主要是因为活性元素 Y 的添加增加了薄膜沉积的形核率, 抑制了晶粒的长大, 从而使薄膜内部组织由柱状晶向等轴晶转变。

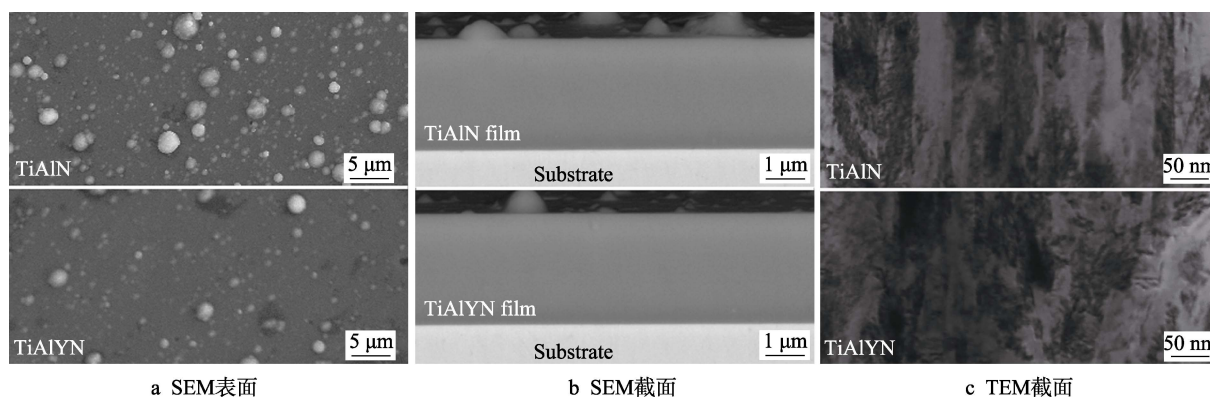


图 1 两种薄膜的微观形貌

Fig.1 SEM surface, cross-section and TEM cross-section morphologies of two films

图 2 为两种薄膜的 GIXRD 谱图。由图 2 可以看出, 两种薄膜均为 B1-NaCl 结构。利用 Jade 6 软件对 GIXRD 谱进行寻峰拟合, 得到 TiAlN 和 TiAlYN 薄膜的晶粒尺寸分别约为  $21 \text{ nm}$  和  $15 \text{ nm}$ 。由此可见,

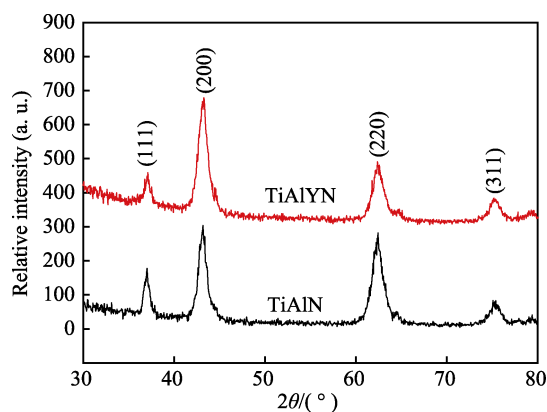


图 2 两种薄膜的 GIXRD 谱

Fig.2 GIXRD patterns of two films

添加 Y 降低了 TiAlN 薄膜的晶粒尺寸。由图 2 还可以看出, 添加 Y 使 TiAlYN 薄膜 (200) 方向衍射峰的相对强度增强。TiAlN 薄膜的峰强比  $I_{(200)}/I_{(111)}=1.7$ , 而 TiAlYN 薄膜的峰强比  $I_{(200)}/I_{(111)}=3.2$ , 峰强比  $I_{(200)}/I_{(111)}$  的提高与晶粒生长过程中的表面能和应变能有紧密联系, 薄膜倾向于沿低应变能的方向生长, 从而使不断增加的应力和应变最小化<sup>[13-15]</sup>。添加 Y 抑制了薄膜沿 (111) 方向的生长, 从而使薄膜晶粒不能连续长大, 表明薄膜内部产生的应力和应变能不再决定择优方向。因此, 薄膜沿着最低表面能方向 (200) 生长, 从而形成细小的近似等轴晶结构。

### 2.2 薄膜的硬度和弹性模量

表 3 为两种薄膜的硬度及弹性模量。由表 3 可以看出, 两种薄膜的弹性模量相当, 而 TiAlYN 薄膜的硬度较 TiAlN 的硬度提高了约 25%。添加 Y 提高了 TiAlN 薄膜的硬度主要有以下原因: 一是添加 Y 降低了薄膜的晶粒尺寸, 根据 Hall-Petch 关系, 晶粒细化

可以提高薄膜的硬度；二是 Y 原子的加入导致薄膜内晶格畸变，引起位移滑移阻力增大，使薄膜硬度提高。此外，Y 原子在薄膜内的固溶强化作用和引起薄膜内的微应变，也会使薄膜的硬度增加<sup>[3]</sup>。

表 3 两种薄膜的硬度及弹性模量  
Tab.3 Hardness, elasticity modulus of two films

Samples	Hardness/GPa	Elasticity modulus/GPa
TiAlN	29.09	474.6
TiAlYn	36.32	478.1

## 2.3 薄膜的摩擦磨损行为

图 3 为两种薄膜的摩擦系数。由图 3 可以看出，在起始阶段，两种薄膜的摩擦系数均较大，这与薄膜原始表面状态较粗糙有关。TiAlN 薄膜摩擦稳定时的摩擦系数为 0.70~0.75，而 TiAlYn 薄膜摩擦稳定时的摩擦系数为 0.60~0.65。由此可见，添加 Y 降低了薄膜的摩擦系数。经计算，TiAlN 薄膜的磨损率为  $1.65 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ，而 TiAlYn 薄膜的磨损率仅为  $8.72 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ，较 TiAlN 薄膜的磨损率减小了约 47%。由此可见，添加 Y 提高了 TiAlN 薄膜的耐磨性能。

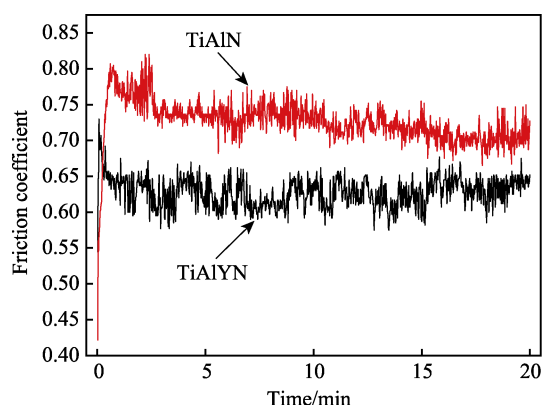
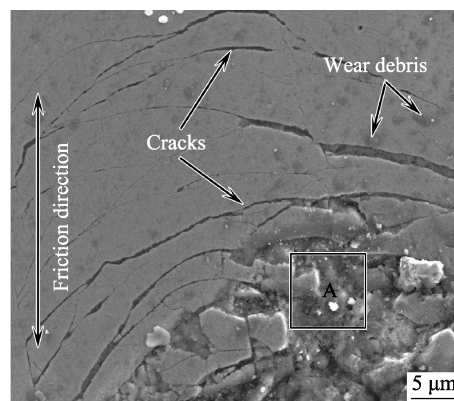


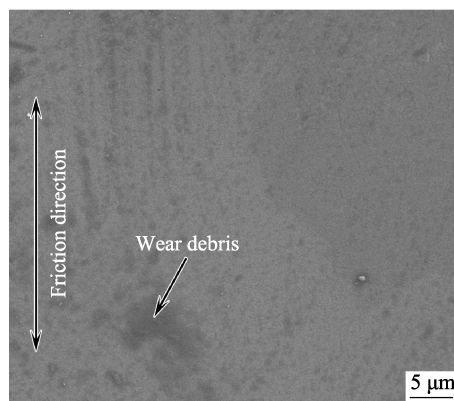
图 3 两种薄膜的摩擦系数  
Fig.3 Friction coefficients of two films

图 4 为两种薄膜的表面磨损形貌。由图 4a 中 TiAlN 薄膜的磨损表面可以看出，薄膜的磨损表面光滑，但出现了裂纹，且薄膜表面有的区域甚至发生大面积剥落。对图 4a 中方框区域 A 进行能谱分析，发现其主要成分为基体元素，表明该区域薄膜已完全剥落。在图 4a 中光滑磨损表面还分布着细小磨屑，成分分析发现其含有 Si 元素，这表明磨屑为薄膜与对磨件接触摩擦磨损的产物。由此可见，TiAlN 薄膜的磨损机制主要为刮擦磨损，其失效机制主要是由于脆性裂纹导致的剥落。由图 4b 中 TiAlYn 薄膜的磨损表面可以看出，磨损表面光滑，未出现因摩擦而产生的裂纹。对图 4b 中箭头所指的磨屑进行成分分析，发现与 TiAlN 薄膜磨屑的成分相当，这表明 TiAlYn

薄膜的磨损机制也主要为刮擦磨损。综上，添加 Y 避免了薄膜开裂和局部剥层，提高了 TiAlN 薄膜的磨损性能。



a TiAlN



b TiAlYn

图 4 两种薄膜的表面磨损形貌  
Fig.4 Surface worn morphologies of two films

图 5 为两种薄膜的截面磨损形貌。由图 5 可以看出，TiAlN 薄膜在沿着与基体垂直的方向发生贯穿开裂，裂纹深入到基体内部。由图 5b 可以看出，TiAlYn 薄膜未发生开裂，但与沉积态薄膜和基体平直的结合界面（图 1b）不同，磨损后 TiAlYn 薄膜与基体的结合界面因薄膜部分嵌入基体内部而不再平直。这主要是因为 CrNi3MoVA 钢的硬度仅为 5.57 GPa，远小于两种薄膜的硬度，在摩擦过程中因不能支持薄膜而发生屈服。

图 6 为两种薄膜应力状态及开裂分析。由图 6a 可以看出，薄膜在沿着与基体表面垂直的方向受单向压应力  $\sigma_p$  作用，在平行于基体表面受双向拉应力  $\sigma_{t1}$ 、 $\sigma_{t2}$  作用。由图 6b 可以看出，由于 TiAlN 薄膜沿垂直于基体方向为柱状晶组织，摩擦磨损过程中，在拉应力  $\sigma_{t1}$ 、 $\sigma_{t2}$  作用下，会沿着结合最弱的柱状晶晶界开裂（黑色箭头所示），尔后在压应力  $\sigma_p$  作用下压入基体或在摩擦力的切向力作用下剥落。由图 6c 可以看出，由于 TiAlYn 薄膜为等轴晶组织，即使在双向拉应力  $\sigma_{t1}$ 、 $\sigma_{t2}$  作用下结合最弱的晶界处开裂（黑色箭头所示），但其裂纹向下扩展到基体要经过多个晶粒



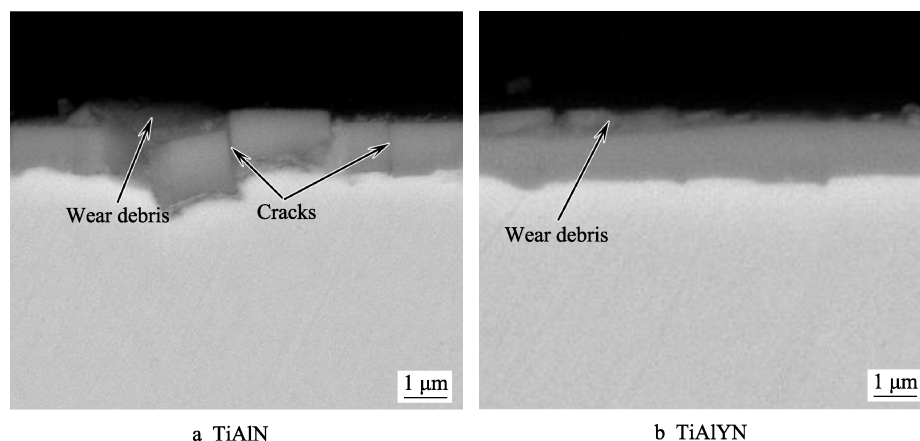


图 5 两种薄膜的截面磨损形貌

Fig.5 Cross-section worn morphologies of two films

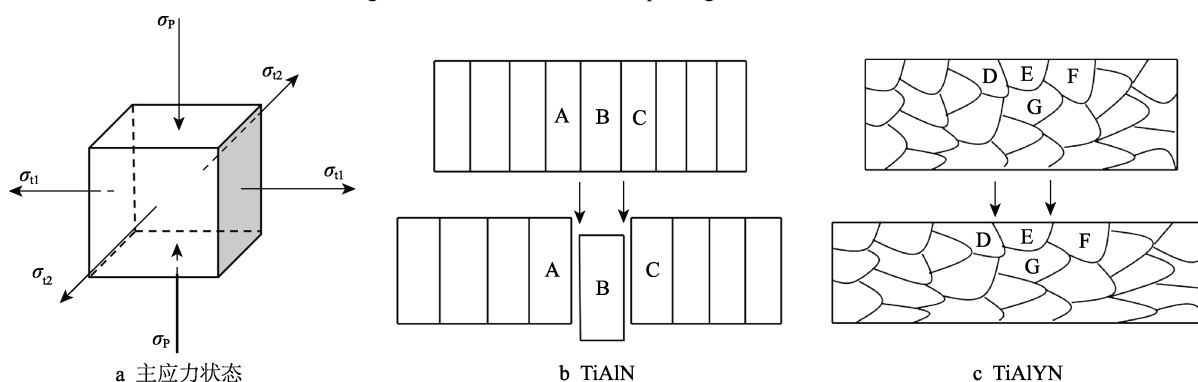


图 6 两种薄膜主应力状态及开裂分析

Fig.6 Principal stress state and cracking analysis of two films

晶界, 裂纹扩展路径加长, 裂纹扩展功大大增加。此外, TiAlYN 薄膜中更加细小的晶粒具有更好的塑性变形能力, 能够进一步减小裂纹的萌生和开裂, 从而进一步提高了薄膜的抗剥落性能。

### 3 结论

1) TiAlYN 薄膜与 TiAlN 薄膜具有相近的弹性模量, 其硬度较 TiAlN 薄膜提高了约 25%。

2) TiAlN 薄膜的稳定摩擦系数为 0.70~0.77, 而 TiAlYN 薄膜的稳定摩擦系数为 0.60~0.67, TiAlYN 薄膜的磨损率较 TiAlN 薄膜的磨损率减小了约 47%。添加 Y 降低了 TiAlN 薄膜的摩擦系数, 提高了 TiAlN 薄膜耐磨性。

3) TiAlN 薄膜与 TiAlYN 薄膜的主要磨损机制均为刮擦磨损, TiAlN 薄膜的失效机制主要是由于脆性裂纹导致的剥落。

4) 添加 Y 降低了 TiAlN 薄膜的晶粒尺寸, 并使其由柱状晶向近似等轴晶转变, 从而提高了 TiAlN 薄膜的抗开裂和抗剥落性。

### 参考文献:

[1] RAMADOSS R, KUMAR N, PANDIAN R, et al. Tri-

biological properties and deformation mechanism of TiAlN coating sliding with various counter bodies[J]. Tribology international, 2013, 66(7): 143-149.

[2] KALIN M, JERINA J. The effect of temperature and sliding distance on coated (CrN, TiAlN) and uncoated nitrided hot-work tool steels against an aluminium alloy[J]. Wear, 2015, S330-331: 371-379.

[3] RIEDL H, HOLEC D, RACHBAUER R, et al. Phase stability, mechanical properties and thermal stability of Y alloyed Ti-A-N coatings[J]. Surface & coatings technology, 2013, 235(22): 174-180.

[4] 陈强, 张而耕, 张锁怀. TiAlN, TiAlSiN 涂层的制备及其切削性能[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 118-124.

CHEN Qiang, ZHANG Er-geng, ZHANG Suo-huai. Preparation and cutting performance of TiAlN and TiAlSiN coating [J]. Surface technology, 2017, 46(1): 118-124.

[5] 单磊, 汪陇亮, 孙润军, 等. 恒电位对 TiAlN 涂层在海水环境中磨蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 165-171.

SHAN Lei, WANG Long-liang, SUN Run-jun, et al. Effects of constant potentials on abrasion resistance of TiAlN coating in seawater[J]. Surface technology, 2017, 46(11): 165-171.

[6] JUNG D H, MOON K I, SHIN S Y, et al. Influence of ternary elements (X=Si, B, Cr) on TiAlN coating deposited by magnetron sputtering process with single alloying

- targets[J]. Thin solid films, 2013, 546(6): 242-245.
- [7] FENG C J, ZHU S L, LI M S, et al. Effects of incorporation of Si or Hf on the microstructure and mechanical properties of Ti-Al-N films prepared by arc ion plating (AIP)[J]. Surface & coatings technology, 2008, 202(14): 3257-3262.
- [8] CHEN L, HOLEC D, DU Y, et al. Influence of Zr on structure, mechanical and thermal properties of Ti-Al-N[J]. Thin solid films, 2015, 275(16): 289-295.
- [9] RACHBAUER R, HOLEC D, MAYRHOFER P H. Increased thermal stability of Ti-Al-N thin films by Ta alloying[J]. Surface & coatings technology, 2012, 211(42): 98-103.
- [10] PFLÜGER E, SCHRÖER A, VOUMARD P, et al. Influence of incorporation of Cr and Y on the wear performance of TiAlN coatings at elevated temperatures[J]. Surface & coatings technology, 1999, 115(1): 17-23.
- [11] WANG J L, CHEN M H, YANG L L, et al. Comparative study of oxidation and interdiffusion behavior of AIP NiCrAlY and sputtered nanocrystalline coatings on a nickel-based single-crystal superalloy[J]. Corrosion science, 2015, 98: 530-540.
- [12] 杨君宝, 郭秋萍, 赵博远, 等. CrNi3MoVA 钢表面电火花沉积 W-Ni-Fe-Co 涂层的摩擦磨损性能[J]. 材料导报, 2017, 31(12): 35-38.
- YANG Jun-bao, GUO Qiu-ping, ZHAO Bo-yuan, et al. Friction and wear performance of W-Ni-Fe-Co coating electrospark deposited on CrNi3MoVA steel[J]. Mater review, 2017, 31(12): 35-38.
- [13] OH U C, JE J H. Effects of strain energy on the preferred orientation of TiN thin films[J]. Journal of applied physics, 1993, 74(3): 1692-1696.
- [14] CHEKOUR L, NOUVEAU C, CHALA A, et al. Growth mechanism for chromium nitride films deposited by magnetron and triode sputtering methods[J]. Surface & coatings technology, 2005, 200(1-4): 241-244.
- [15] CHEN H W, CHAN Y C, LEE J W, et al. Oxidation resistance of nanocomposite CrAlSiN under long-time heat treatment[J]. Surface & coatings technology, 2011, 206(7): 1571-1576.