

两种 TiAlN 涂层的往复滑动摩擦学性能研究*

徐 轶¹, 朱旻昊¹, 莫继良¹, 雷 斌^{1,2}, 周仲荣¹

(1.西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2.自贡硬质合金有限责任公司 成都分公司, 四川 成都 610100)

摘 要: 采用 PLINT 磨损试验机, 对比考察了 2 种磁控溅射 TiAlN 涂层在往复滑动条件下的摩擦磨损性能。在摩擦动力学分析基础上, 并利用扫描电子显微镜(SEM)、激光共焦显微镜(LCSM)、电子能谱(EDX)和 X 射线衍射 XRD 进行了微观分析, 探讨了 TiAlN 涂层的摩擦磨损机理。结果表明: TiAlN 涂层的摩擦学性能与涂层本身微结构密切相关; 较低的摩擦因数对应着较好的耐磨性; 涂层的往复滑动磨损表现为磨粒磨损、剥层和氧化磨损的共同作用的机制。

关键词: TiAlN 涂层; 往复滑动; 摩擦; 磨损; 干态

中图分类号: TG174.444

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)02-0013-04

Study on Tribological Properties of two TiAlN Coatings Under Reciprocating Sliding Condition

XU Yi¹, ZHU Min-hao¹, MO Ji-liang¹, LEI Bin^{1,2}, ZHOU Zhong-rong¹

(1.The Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials (Ministry of Education), Southwest Jiaotong University; Chengdu 610031, China; 2.Zigong Cemented Carbide (Chengdu) Corp., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The tribological properties under reciprocating sliding condition of two TiAlN coatings, prepared by magnetic sputtering, had been tested on a PLINT wear tester. Some micro-examination methods, such as scanning electron microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray spectrum (EDX) and X-ray diffraction (XRD), were used to analyze the friction and wear mechanism of two TiAlN coatings. The experimental results showed that the tribological properties of TiAlN coatings were deeply dependent on their microstructures, and the lower friction coefficient was corresponding to the better wear-resistance. The mechanism of reciprocating sliding wear for TiAlN was the combination of abrasive wear, oxidation wear and delamination.

Key words: TiAlN coating; reciprocating sliding; friction; wear; dry condition

0 引 言

TiN 涂层特有的性能, 如高硬度、高耐磨性和低的摩擦因数等, 使其在工业生产中获得了广泛的应用^[1-3]。但随着应用的深入, TiN 涂层在性能方面表现出的不足, 如与基体的结合力较弱、脆性大、易剥落, 特别是在高温性能方面存在的缺陷, 限制了它的进一步发展。Al 的引入, 使 TiAlN 涂层在硬度、耐磨性、高温氧化性及与基体之间结合力等方面表现出比 TiN 涂层更优异的性能, 使其逐渐成为 TiN 涂层的替代品, 特别是在刀具领域, 使使用性

能及寿命得到显著提高。在切削速度很高、冷却困难等恶劣的加工条件下, TiAlN 涂层都能保持良好的性能^[4-7]。文中对比研究了 2 种商业化 TiAlN 涂层在干态往复滑动摩擦条件下的摩擦学特性, 这对全面认识该涂层摩擦学性能具有重要实际意义。

1 试验材料和方法

研究所用的 2 种 TiAlN 涂层(分别记为 1# 和 2#)均用磁控溅射法沉积, 是在目前商业化硬质合金刀具 TiAlN 涂层的设备上, 完全按产业化工艺制备的, 其中 1# 和 2# 涂层表面粗糙度分别为 $Ra=1.9 \mu\text{m}$ 和 $Ra=1.6 \mu\text{m}$ 。硬质合金基体材料牌号为: KFK40UF, 硬度为 1 600 HV。

往复滑动摩擦磨损试验在高精度 PLINT 摩擦试

收稿日期: 2006-02-23; 修回日期: 2006-03-02

基金项目: *教育部新世纪创新人才支持计划(NCET-04-0885); 四川省科技攻关计划(04CN032-009)资助项目。

作者简介: 徐轶(1980-), 男(汉), 湖南湘乡人, 硕士研究生。

试验机上进行(室温 (20 ± 2) , 干态相对湿度 $RH=(60\pm 10)\%$)。试验装置如图1所示,其中1为平面试样;2为平面试样夹具;3为球试样及其夹具;悬臂4将球试样及其夹具连接在试验机活塞系统5上;6和7分别为摩擦力与位移测量传感器;8为配重以消除球试样及其夹具系统的自重;法向载荷通过钢丝绳由弹簧系统施加。采用球/平面接触,球试样选择 $\phi 12$ mm的 Si_3N_4 陶瓷球($\rho=3.25$ g/cm³, 硬度为1 500 HV, 表面粗糙度 $R_a=0.02$ μ m);平面试样为涂层试样,其尺寸为10 mm \times 10 mm \times 20 mm。摩擦试验主要参数为:位移幅值 D 分别为200、500和1 000 μ m,法向载荷 F_n 分别为30、50和100 N,往复循环次数 $N=10^3$ 次,频率 f 为10 Hz。摩擦磨损试验后用扫描电子显微镜(SEM, Quanta2000)观察磨痕形貌,用电子能谱仪(EDX, 7760/68ME)进行成分分析,用3014X射线衍射仪(XRD)进行物相分析,利用激光共焦显微镜(LCSM, Olympus OLS 1100)进行磨痕尺寸测量。

2 摩擦特性分析

TiAlN 涂层在干态往复滑动条件下,摩擦因数随循环次数的变化曲线均呈现5个阶段的特征,即:跑合阶段,摩擦因数维持在较低值;摩擦因数上升阶段,随着两接触表面膜(污染和吸附膜)的逐渐去除,实际接触面积增大,摩擦力迅速增加,摩擦因数开始增大,同时,随着磨损产生磨粒,磨粒的犁沟作用会使摩擦因数上升更快;摩擦因数峰值阶段,此时摩擦因数在磨粒和犁沟作用下达到最大值;摩擦因数下降阶段,在随后的循环中,磨粒逐渐增多,形成第三体,两接触体表面被有效分隔,摩擦因数下降;摩擦因数稳定阶段,进入摩擦表面的磨粒数和离开表面的磨粒数大致相等,达到动态平衡,摩擦因数趋于平稳。

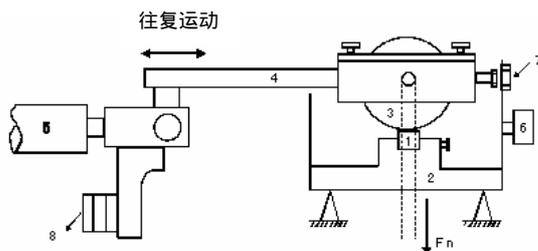


图1 PLINT 磨损试验机的示意图
Fig.1 Sketch of PLINT wear tester

图2示出了1#和2# TiAlN涂层在法向载荷50 N、位移幅值500 μ m时的摩擦因数变化曲线,可见在 10^3 次循环时摩擦刚进入稳定阶段。对于两种TiAlN涂层,由于基底硬质合金表面粗糙度较高,粗糙的涂层表面,在摩擦初期,涂层的摩擦因数在较少的循环次数下开始上升。对比1#和2#涂层,可见1#涂层较早进入摩擦的第II到V阶段,并且从第II阶段以后,1#涂层的摩擦因数整体低于2#涂层(见图2,1#涂层的最大值约0.6,而2#涂层的最大值约0.8),而且达到稳定阶段后,摩擦因数仍是1#涂层明显小于2#涂层。改变法向载荷得到相同的结果,即在30 N和100 N时,1#涂层的摩擦因数最大值和稳定值也低于2#涂层,如图3所示。改变试验的位移幅值,也有相同的结果。

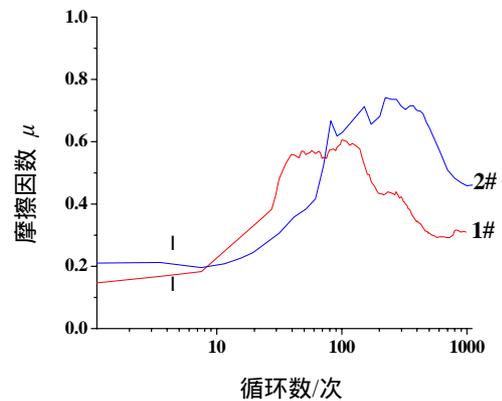


图2 1#和2#涂层摩擦因数变化曲线

Fig.2 Friction coefficient of 1# and 2# coating

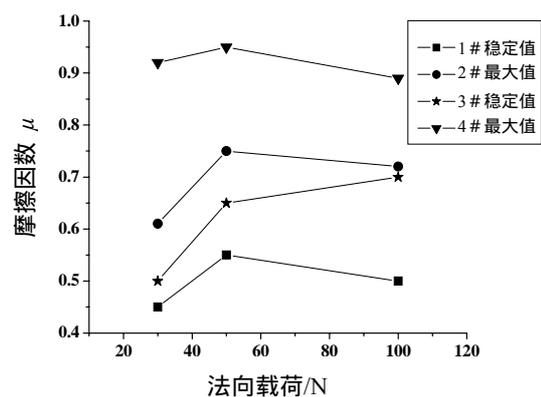


图3 摩擦因数的特殊值: $D=500$ μ m

Fig.3 Special values of friction coefficient: $D=500$ μ m

3 磨损形貌分析

图4示出了两种TiAlN涂层磨痕的SEM形貌,其中A区域为涂层未磨损区域,B区域为涂层磨损

区，C 区域为磨痕中心（涂层已被磨去）。如图 4(a) 所示，1# 涂层的磨损表面较平整。在 B 区域可观察到一些较浅的犁沟痕迹且磨痕边缘清晰，涂层呈现按剥层机制片状剥落的特征；由于基材表面粗糙度较高，C 区的粗糙凹峰处涂层保留的痕迹仍清晰可见。如图 4(b) 所示，2# 涂层的磨损表面比较粗糙，磨痕中心 C 区域存在着较多磨屑微粒，并且形成一定厚度的磨屑堆积层，但是由于 TiAlN 的磨粒

较基体材料硬，对涂层的剪切作用更加明显，致使磨损表面发生更为严重的磨粒磨损，这可能是导致摩擦因数较高的原因；B 区涂层裂纹明显，也有磨粒磨损的痕迹，图 4(c) 更清楚地示出了涂层剥层剥落的特征。1# 和 2# 涂层磨痕形貌上存在很大差异，主要是由于 1# 涂层损伤较轻微起到了较好的防护作用，而 2# 涂层较早失效，是基材磨损严重的结果。

两种涂层在 B 区的 EDX 成分分析结果相似，

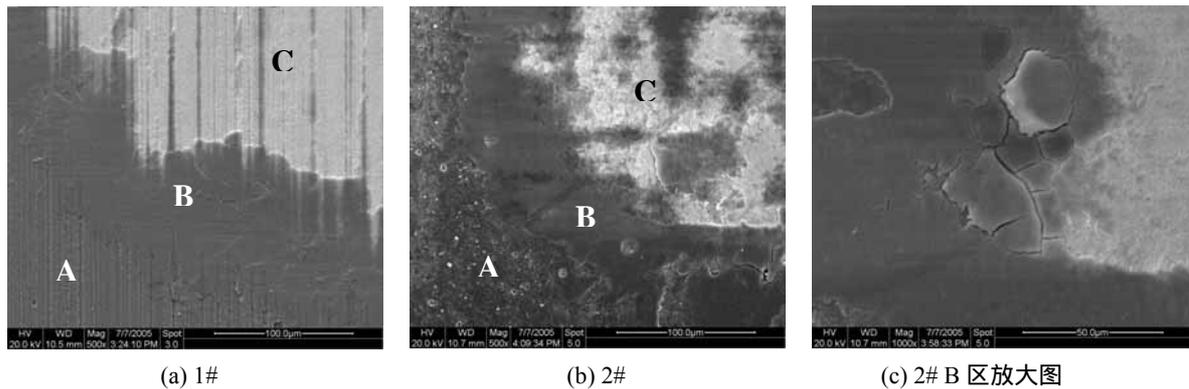


图 4 位移幅值 500 μm 和法向载荷 50 N 下的磨损表面 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of worn surface: $D=500\ \mu\text{m}$ and $F_n=50\ \text{N}$

图 5 示出了 1# 涂层磨损区的 EDX 谱图，可见基材峰较弱，主要为 TiAlN 涂层，其中 Si 元素是对磨件 Si_3N_4 在涂层表面形成转移膜的结果；值得注意的是能谱中有明显的 O 峰，这说明磨损过程存在氧化。进一步，对两种涂层的磨痕中心进行了微区 x 射线衍射分析，如图 6(b) 所示，TiAlN 涂层的峰已消失而基材 WC 的峰明显，这是涂层已被磨穿的结果；此外，两种涂层的磨痕均存在 Al_2O_3 、VO 和 TiO 峰，对比磨损前的 XRD 谱线（见图 6(a)），可以判断磨

损过程伴随着明显的氧化，至少有 Al_2O_3 和 VO 形成，其中 V 元素来自于基材。摩擦磨损产生摩擦热，不可避免地会与周围活性介质（空气）发生化学作用（氧化），氧化物是涂层失效的产物，但通常认为 TiAlN 涂层摩擦过程生成的 Al_2O_3 膜具有高硬度和高温抗氧化性，在后续的摩擦过程中起到了固体润滑剂的作用^[8]，是其比 TiN 涂层性能好的重要原因。

综上所述，两种涂层的磨损机制均为磨粒磨损、剥层和氧化磨损的共同作用。

4 磨痕深度分析

用激光共焦显微镜对两种 TiAlN 涂层在不同位移幅值、不同法向载荷下的磨损表面形貌进行磨痕的深度测量，图 7 为磨痕深度结果。可以看到，在相同位移幅值下，法向载荷越大，磨痕的深度就越大，这是由于高载荷加速了磨粒的形成及其氧化，令磨损更易发生；在相同载荷条件下，在位移幅值 200 和 500 μm 情况下的磨损量均比位移幅值为 100 μm 情况下的磨损量低，这可能是由于位移幅值相对较小的情况下，磨粒不易排出，从而使得磨损加剧。对比两种 TiAlN 涂层的磨痕深度，非常明显，1# 涂层的磨痕深度均小于相同试验条件下的 2# 涂层，

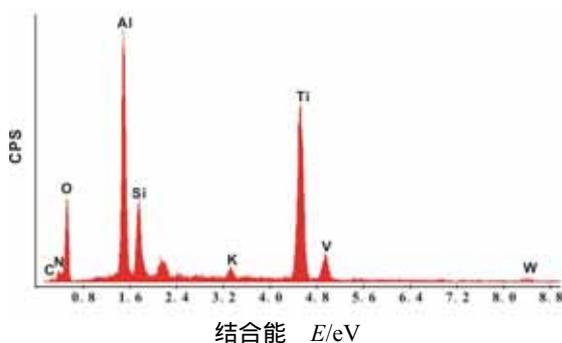


图 5 位移幅值 500 μm 和法向载荷 50 N 下的 1# 涂层磨损表面 EDX 能谱

Fig.5 EDX spectrum of worn surface of coating 1#: $D=500\ \mu\text{m}$ and $F_n=50\ \text{N}$

说明1#涂层具有较好的耐磨性,这与摩擦特性和形貌分析的结果是一致的。如图6(a)所示,两种涂层的主要衍射峰是一致的,差别主要在氧化的程度和

基材峰上,显然2#涂层的氧化峰和基材峰较明显,这种涂层微结构的差异可能是造成其摩擦磨损性能较差的主要原因。

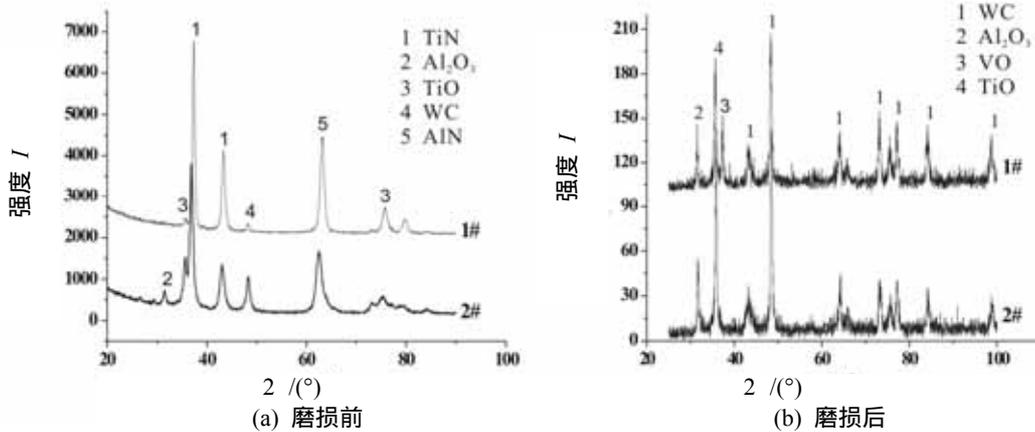


图6 位移幅值 500 μm 和法向载荷 50 N 下的两种涂层磨损表面 XRD 谱线

Fig.6 XRD spectrum of worn surface of two coatings: $D=500 \mu\text{m}$ and $F_n=50\text{N}$

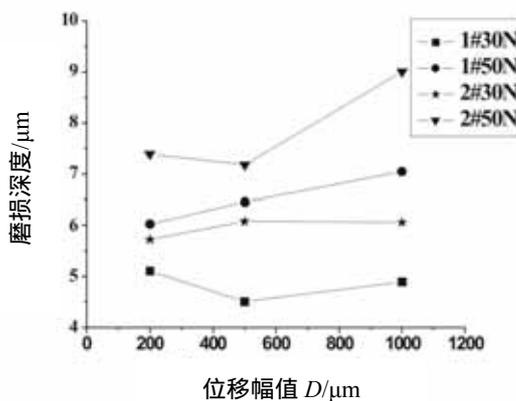


图7 不同试验条件下两种涂层磨痕深度

Fig.7 Wear depth of two coatings under different test conditions

5 结论

(1) TiAlN 涂层的摩擦因数随循环周次的演变呈 5 个阶段的特征,即跑合阶段、上升阶段、峰值阶段、下降阶段和稳定阶段;

(2) 两种 TiAlN 涂层的往复滑动磨损均表现为磨粒磨损、剥层和氧化磨损共同作用的机制;

(3) 对比两种 TiAlN 涂层,其微结构上存在细微差别,表现出较低的摩擦因数对应着较好的耐磨性。

参考文献:

- [1] 冯正, 刘德浚, 王少刚. TiN涂层的组织结构及性能研究 [J]. 航空工艺技术, 1995(1): 14-16.
- [2] 王福贞. 离子镀技术的发展 [J]. 国外金属热处理, 1997 (2): 27-31.
- [3] 谭家俊, 李国俊. 国内外金属材料及热处理技术现状与发展 [M]. 北京:国防工业出版社, 1995:144-157.
- [4] Erkens G, Cremer R, Hamoudi T, et al. Properties and performance of high aluminum containing (Ti,Al)N based supernitride coatings in innovative cutting applications [J]. Surface and Coatings Technology, 2004,177-178:727-734.
- [5] Anne Thobor, Christophe Rousselot, Christine Clement, et al. Enhancement of mechanical properties of TiN/AlN multilayers by modifying the number and the quality of interfaces [J]. Surface and Coatings Technology, 2000,124: 210-221.
- [6] Podob Mark. Physical vapor deposition wear resistant and decorative coatings [C]. Proceedings of the AESF Annual Technical Conference 1996, American Electroplaters & Surface Finishers Soc Inc. Orlando, FL, USA, 1996:591-597.

(下转第20页)