

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.06.008

铬掺杂碳基自润滑薄膜与铝合金的高温磨损机理*

梁斐珂, 孙德恩, 陈思琦, 黄佳木, 裴晨蕊

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: 为了研究不同结构铬掺杂碳基薄膜在高温下与铝合金的磨损机理, 采用非平衡磁控溅射在YT15刀具表面沉积Cr/CrC/DLC单周期和Cr/(CrC-DLC)_n多周期多层膜, 在24、200和400℃下与A319和A390铝合金进行摩擦试验。采用扫描电子显微镜、原子力显微镜、纳米压痕仪、拉曼光谱仪、销盘磨损仪对薄膜的形貌结构、力学和摩擦学性能进行测试。研究表明: 多周期多层膜结构打断薄膜柱状生长, 提高膜基结合力。两种薄膜表面粗糙度和硬度分别为4.3 nm和5.4 nm、9.8 GPa和9.0 GPa。磨球表面转移层由硅、石墨以及剥落的薄膜碎片组成, 连续的转移层降低摩擦因数; 但随着温度升高, 转移层的连续性被破坏, 导致摩擦因数升高。在高温摩擦过程中, 多周期多层膜磨损逐渐释放出DLC子膜层, 通过DLC子膜层的石墨化转变来保持低摩擦因数, 提高薄膜寿命。薄膜磨损由室温的磨料磨损转变为高温的粘着磨损和犁沟磨损, 其中由于A390含有初晶硅使磨损以犁沟磨损为主。

关键词: 碳化铬; 类金刚石; 摩擦因数; 高温磨损; 铝合金

中图分类号: TG174.44; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)06-0052-08

High Temperature Wear Mechanism of Chromium Doped Carbon-based Self-lubrication Thin Films Against Aluminum Alloy

LIANG Fei-ke, SUN De-en, CHEN Si-qi, HUANG Jia-mu, PEI Chen-rui

(School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: In order to research the wear mechanism of different structural chromium doped carbon-based thin films against aluminum alloy under high temperatures, Cr/CrC/DLC single period multilayer and Cr/(CrC-DLC)_n multilayer were deposited by unbalance magnetron sputtering, the wear properties of Cr/CrC/DLC and Cr/(CrC-DLC)_n against A319 and A390 ball under 24, 200 and 400℃ were tested. The surface morphology, microstructure, hardness, and wear resistance were measured by SEM, AFM, nanoindentation test, Raman and Pin on disc tribometer. The results show that the multilayer structure can enhance the adhesion of thin films due to the interruption of columnar structure. The surface roughness and hardness of two types of films are 4.3 nm and 5.4 nm, 9.8 GPa and 9.0 GPa, respectively. The surface transfer layer consists of silicon particles, graphite and stripped fragment of films, and the continuous transfer layer can reduce the friction coefficient. As the temperature increases, the continuity of the transfer layer is destroyed, leading the increase of the friction coefficient. During high temperature wear test, the DLC coating is gradually released with the wear out of the multilayer, the life span of films increase with the decrease of the friction coefficient. Wear of the films in the form of abrasive wear from room temperature changes into a high temperature adhesive wear and plowing wear, and due to the primary silicon of A390, the wear is determined by plowing wear.

Keywords: CrC; diamond like carbon(DLC); friction coefficient; high temperature wear; aluminum alloy

收稿日期: 2016-07-28; 修回日期: 2016-11-15; 基金项目: *中央高校基本科研业务费科研专项(CDJZR14135502); 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA70005)

通讯作者: 孙德恩(1974—), 男(汉), 研究员, 博士; 研究方向: 类金刚石薄膜及其应用; Tel: (023) 6512 7340; E-mail: deen_sun@cqu.edu.cn

网络出版日期: 2016-12-12 09:18; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20161212.0918.017.html>

引文格式: 梁斐珂, 孙德恩, 陈思琦, 等. 铬掺杂碳基自润滑薄膜与铝合金的高温磨损机理[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 52-59. LIANG F K, SUN D E, CHEN S Q, et al. High temperature wear mechanism of chromium doped carbon-based self-lubrication thin films against aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 52-59.

0 引言

铝合金广泛应用于航空航天和汽车行业, 其中A319和A390两种铝合金大量应用于汽车发动机缸体及缸盖。但是在干式加工过程中, 由于铝合金较软, 塑性高, 在缺少冷却剂的情况下将引起切削热的积累, 容易发生粘刀现象(积屑瘤, Build up edge, BUE), 降低加工质量, 缩短刀具寿命^[1]。研究表明^[2-3]: 铝合金加工过程中刀具表面BUE的产生是由于铝合金在加工区高温高压和苛刻摩擦环境共同作用下, 铝与刀具或刀具涂层中的某些原子由于亲和力而在刀具前刀面相互粘团聚集而成。BUE的存在导致刀具在加工过程中切削力波动增大, 对表面加工质量和刀具寿命造成影响。

P.Eh.Hovsepian^[4]等人对氮化钛、钛铝氮化物、氮化铬、类金刚石(Diamond like carbon, DLC)4种涂层进行了铝合金切削试验, 发现DLC能够有效减少BUE, 但是由于磨粒磨损使涂层的寿命变短, 对于DLC磨损失效机理还有待深入研究, 其它涂层由于掺杂了与铝亲和力较高的Ti、Al等元素以及没有在被加工铝合金表面形成减磨转移层, 容易产生BUE, 降低了表面加工精度。S. Bhowmick^[5]等人发现DLC涂层由于摩擦因数(Friction coefficient, COF)较低, 能够有效减少BUE的形成, 减轻加工过程进给力的波动, 降低了加工温度。虽然DLC薄膜具有低摩擦因数, 但DLC薄膜的热稳定性很差, 在高温下不能稳定工作^[6]。CrC薄膜具有良好的耐磨性和高温稳定性, 常作为过渡层或涂层来提高薄膜的耐磨性和热稳定性^[7]。常家东^[8]等人对CrC薄膜在轴承方面应用进行了研究, 发现CrC薄膜提高了轴承的稳定性和抗温变能力, 但是摩擦因数较高。

因此, 为了使薄膜具有较低摩擦因数的同时保持良好的热稳定性和较长寿命, 文中对CrC和DLC两种薄膜进行组合优化, 以实现降低薄膜摩擦因数和延长薄膜寿命的目的。

1 材料与方法

1.1 薄膜制备

采用中频直流非平衡磁控溅射制备DLC薄膜, 射频反应磁控溅射制备CrC薄膜。基材为YT15硬质合金刀具和单面抛光P型(100)单晶硅, 试样经过无水乙醇超声清洗20 min后吹干放入真空

腔悬挂在试样架上。溅射用石墨靶纯度为99.99%, 铬靶纯度99.99%, 尺寸400 mm×100 mm×6 mm, 靶基距50 mm。溅射气体为高纯氩气(99.999%), 反应气体乙炔纯度为99.99%。当腔室真空度达到 5×10^{-3} Pa后加热到 (100 ± 5) °C保温, 真空度达到 3×10^{-3} Pa后在该温度下进行后续工艺。

镀膜前用氩离子轰击基材15 min, 氩气流量为60 mL/min, 偏压-600 V, 阳极层离子源电流1 A。氩离子轰击能去除基材表面的氧化物等杂质, 提高基材表面能^[9-10]。在薄膜沉积前, 先在基材沉积100 nm的铬金属层, 以提高膜基结合力, 降低基材与硬质薄膜的硬度梯度和应力差^[11-12]。结合层制备完成后分别进行Cr/CrC/DLC单周期多层膜(单周期膜)和Cr/(CrC-DLC)_n多周期多层膜(多周期膜)的制备。其中单周期膜先沉积1 μm的CrC, 再沉积1 μm的DLC; 多周期膜的调质周期为200 nm, 制备时CrC和DLC薄膜交替沉积9个周期, 详细制备参数如表1所示。

表 1 薄膜的制备参数

Table 1		Deposition parameters of the thin films			
Layer	Power / kW	Current / A	Bias / V	Ar / (mL·min ⁻¹)	C ₂ H ₂ / (mL·min ⁻¹)
Cr	1.8 (RF)		-100	60	0
CrC	1.8 (RF)		-100	60	20
DLC		4 (DC)	-100	100	0

1.2 薄膜结构与性能表征

薄膜形貌及结构采用FEI Nova 400型场发射扫描电子显微镜(Field-emission scanning electron microscopy, FE-SEM)进行观察。薄膜厚度采用Veeco Dektak 150型表面轮廓仪进行测量, 对预先制得的台阶进行扫描, 扫描长度为1 000 nm。薄膜表面粗糙度采用Bruker D3100型原子力显微镜(Atomic force microscope, AFM)进行测量, 测量范围为20 μm×20 μm。薄膜的硬度采用TI900 Triboindenter型纳米压痕进行测量, 压头为Berkovich压头, 压入深度为180 nm, 不超过膜厚1/10, 消除基材对薄膜硬度的影响。薄膜膜基结合力采用汇锦梯尔HT-3002型自动划痕仪进行测量, 最大载荷40 N, 划痕长度3 mm。采用LabRAM HR Evolution型激光拉曼光谱仪对铝球表面转移层进行拉曼分析, 激光光源波长为532 nm, 功率为10 mW。

1.3 球盘磨损测试

采用汇锦梯尔公司POD-1型销盘磨损仪进行球盘磨损测试，磨球为直径5 mm的A319(Si, 5.5%~6.5%)和A390(Si, 16%~18%)铝合金，载荷5 N，磨痕直径5 mm，线速度0.12 m/s，测试时间1 800 s，环境湿度RH为50%，测试温度分别为24、200和400 ℃。磨球表面成分及磨损形貌采用TESCAN VEGA 3 LMH型钨灯丝扫描电子显微镜(配备Oxford EDS探头)进行测试。

2 结果与讨论

2.1 薄膜的形貌与结构

薄膜截面和表面形貌如图1所示，图1(a)中可以观察到CrC以颗粒团聚形式呈柱状结构，由于沉积温度低(100±5) ℃，CrC没有结晶，而是以碳包覆铬(CrC/C)的形式存在^[13-14]。顶层DLC在CrC上继续沉积，由于模板效应^[15-16]，DLC延续了CrC的组织生长形式，能观察到截面的柱状结构。薄膜在摩擦磨损过程中柱状结构的间隙容易成为失效位

置，从而降低Cr/CrC/DLC薄膜的性能。图1(b)中CrC和DLC各子膜层由于相互制约导致柱状生长情况减缓，这有助于薄膜在摩擦磨损过程中保持较高的寿命和稳定性^[17-18]。由于导电性差异，所以CrC呈灰色，DLC呈黑色。CrC和DLC子膜层构成多周期膜结构能够使DLC润滑层在摩擦磨损过程中交替呈现，起到自润滑效果。对比图1(c)(d)发现，多周期膜比单周期膜表面间隙少，致密性好，在高温摩擦磨损时，间隙减少可以延缓薄膜氧化，有助于薄膜耐磨性提高^[17-19]。此外，薄膜表面间隙与柱状生长情况有关，多周期膜的柱状生长被子膜层打断；而单周期膜的柱状生长明显，所以间隙是薄膜柱状生长过程中界面间隙的延续。

薄膜AFM表面形貌如图2所示，两种薄膜的表面形貌相差不大，单周期膜表面粗糙度为(4.3±0.1) nm，多周期膜表面粗糙度为(5.4±0.1) nm。图2(b)中多周期膜的凸起较多，表面粗糙度比单周期膜高但相差不大，这说明薄膜的表面形貌受薄膜柱状生长影响小，单周期膜由于DLC较厚，在沉积过程

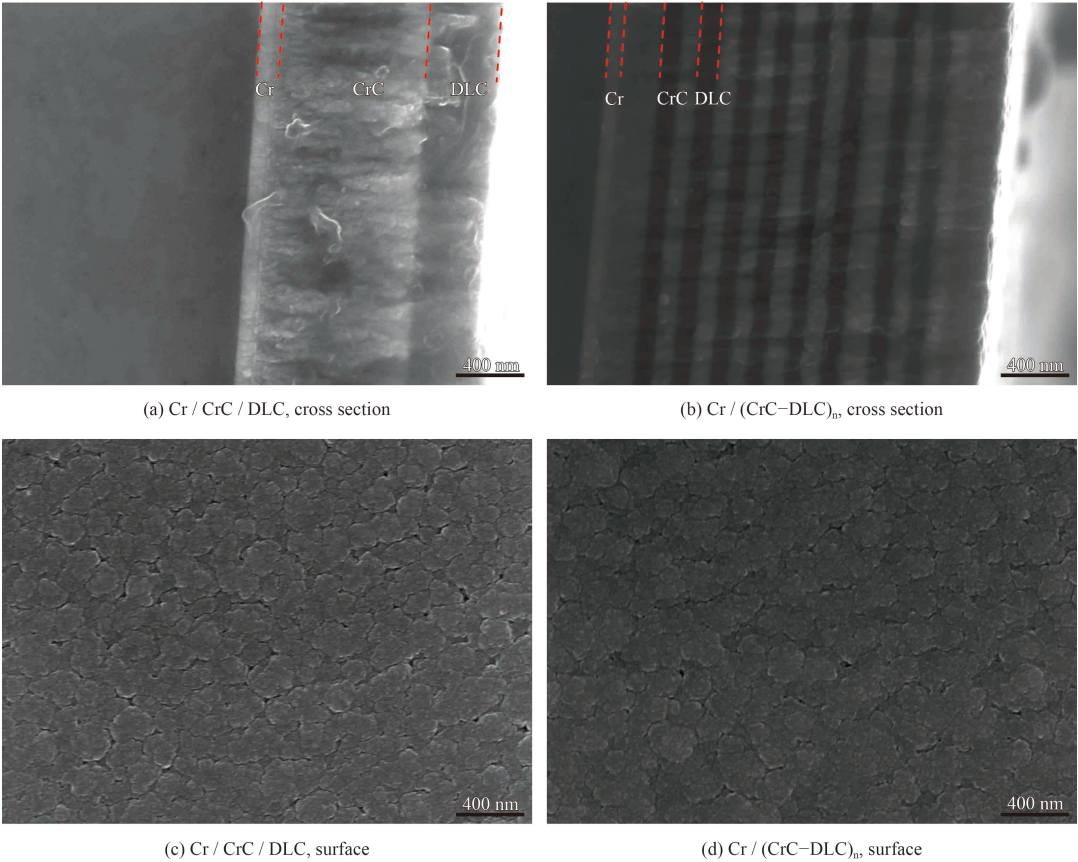


图1 薄膜的截面与表面形貌

Fig.1 Cross section and surface morphologies of the thin films

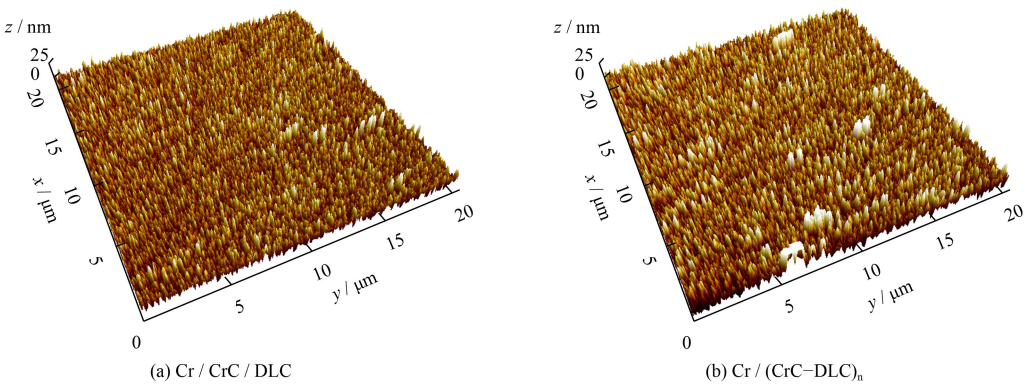


图 2 薄膜的AFM表面形貌

Fig.2 AFM morphologies of the thin films

中薄膜表面趋向于平整状态, 表面粗糙度小。

2.2 薄膜的力学性能

薄膜部分性能参数如表2所示, 两种薄膜厚度接近, 能够消除薄膜厚度差对薄膜测试结果的影响。CrC/C薄膜的硬度比不含氢DLC略低^[20], 所以在180 nm压入深度下, 多周期膜的硬度比单周期膜硬度低0.8 GPa, 两种薄膜的 H/E 相差很小, 表明两者的室温抗裂性相近, 但是多周期膜的 H^3/E^2 更低, 说明多周期膜具有更好的抗塑性变形能力^[19-21]。结合力结果说明多周期膜界面致使裂纹

偏转等达到多层膜增韧效果, 多周期膜减轻了薄膜连续生长造成的内应力, 降低了硬度, 显著提高了薄膜的膜基结合力^[22-23]。

2.3 薄膜的摩擦学性能

不同结构薄膜在不同温度下的COF见图3。图3(a)是24 ℃下的COF, 其中YT15基材与两种铝合金磨球的COF在0.65上下波动, 而镀有兩種结构薄膜的YT15其COF在0.15~0.22范围内变化, 稳定性良好。图3(b)是200 ℃下的COF, 由于硅含量不同, 硅在铝合金中的存在形式也不同, 对薄膜的COF有很大影响^[24]。单周期膜与A390对磨过程中, 由于A390含有较多的初晶硅, 增加了薄膜的刮伤, 导致COF在600 s以前比A319高。在600 s后, 由于DLC层破损, A319磨球与CrC层摩擦, 导致COF高于A390。多周期膜在与A390薄膜对磨时, 初晶硅颗粒对薄膜的刮伤导致COF增加更加明显, 在200 s时COF升高到0.2左右。而A319铝合金没有初晶硅颗粒的刮擦, 在磨球与薄膜间保持一个稳定的转移层, 从而保持较低的COF。

表 2 薄膜的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the thin films		
Properties	Cr/CrC/DLC	Cr/(CrC-DLC) _n
Thickness / μm	2.0±0.1	1.9±0.1
Hardness / GPa	9.8±0.2	9.0±0.4
Elastic modulus / GPa	120±3	110±2
H/E	0.081 6	0.081 8
(H^3/E^2) / GPa	0.065	0.060
Adhesion / N	20	25

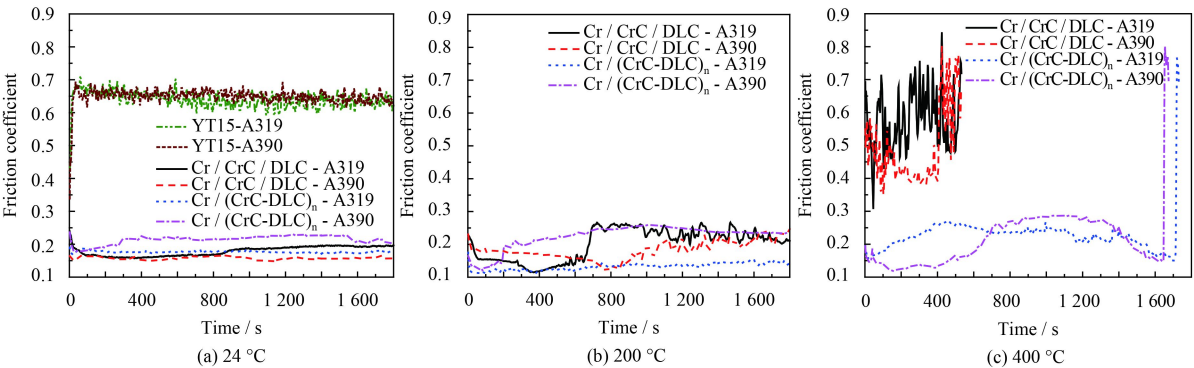


图 3 不同温度下薄膜与A319和A390铝合金的摩擦因数

Fig.3 Friction coefficient of the thin films against A319 and A390 aluminum alloy under different temperature

图3(c)是400 ℃下的COF, 单周期膜的COF波动很大, 并且接近YT15在24 ℃时的COF, 说明单周期膜在400 ℃下不稳定, 很快就磨损失效。多周期膜COF波动较小, 但COF比200 ℃和24 ℃更高, 稳定性变差, 在1 650 s时出现了COF急剧增加, 说明薄膜失效。多周期膜在600 s前与A390对磨时的COF比A319低, 这是由于初晶硅颗粒刮伤薄膜, 促进了薄膜在高温下的石墨化, 降低了COF, 随着时间增加, 铝球磨损增加, 接触面积增大, 磨屑增多, COF逐渐升高。与单周期膜相比, 多周期膜在高温下能够较长时间保持较低COF, 这是由于各子膜层在摩擦过程中逐渐破裂, DLC子膜层逐渐石墨化, 通过DLC子膜层的石墨化以及各子膜层的破裂形成转移层, 降低了摩擦因数, 达到自润滑的效果, 从而增加薄膜的寿命。对比图3(a)(b)(c), 在400 ℃下多周期膜具有较低的COF和较长寿命, 说明多周期膜应用于铝合金干式加工中能够减轻BUE, 提高刀具寿命和加工表面质量^[5]。

对400 ℃下多周期膜与A319磨球表面对磨黑色转移层进行拉曼测试, 结果见图4。在505 cm^{-1} 位置是Si的特征峰^[25]。在1 050 cm^{-1} 位置的峰称为T峰, 由C-C sp^3 伸缩振动造成的, 在1 200 cm^{-1} 和1 455~1 460 cm^{-1} 左右出现的峰是相互关联的, 由于在组织界面和表面的反式聚乙炔 $(-\text{CH}=\text{CH}-)_n$ 造成的, 在1 342 cm^{-1} 出现的峰是D峰, 在1 582 cm^{-1} 出现的峰是G峰^[26]。拉曼分析说明黑色转移层中含有Si, 石墨转移层以及DLC薄膜磨屑。

400 ℃下A390磨球与单周期膜和多周期膜的

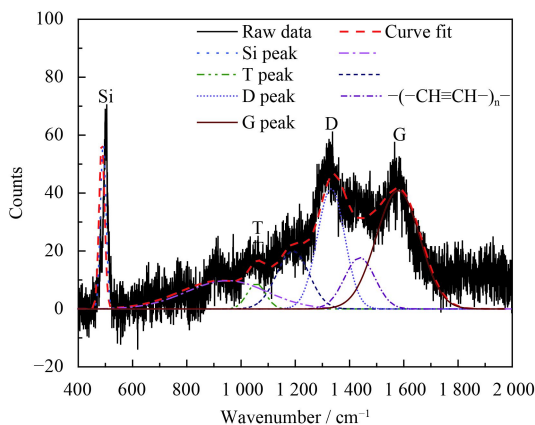


图4 400 ℃下Cr/(CrC-DLC)_n-A319磨球表面磨屑的拉曼光谱

Fig.4 Raman spectra of the wear debris on Cr/(CrC-DLC)_n-A319 ball surface under 400 ℃

磨球表面形貌和磨道如图5所示。图5(a)中A390磨球表面有很多薄膜碎屑和由于塑性变形凸起的铝, 具有粘着磨损的特性。图5(b)中薄膜破损后露出了基材, 在磨道上存在一些残留的薄膜颗粒, 边缘的剥落不平整。由于A390铝合金含有很多初晶硅, 对薄膜刮伤作用明显, 导致薄膜在400 ℃下快速破损, 导致COF很高。

图5(c)中A390磨球表面有很多犁沟磨损形貌特征, 犁沟宽, 贯穿了整个磨损面, 在犁沟里面有很多颗粒状磨屑, 在滑动方向后部存在很多磨屑。图5(d)中多周期膜磨道边缘也有很多磨屑, 在磨道中间由于磨损不均存在犁沟, 和图5(c)中的犁沟形貌相吻合。由于多周期膜的抗裂性及逐步破损释放出DLC子膜层, DLC子膜层在400 ℃迅速石墨化, 保持了较低的COF, 后期磨球磨损增加了接触面积加上犁沟磨损导致了COF升高。对比图5(a)(c)发现: 由于单周期膜很快失效, 铝球测试时间短, 磨损小, 磨损平面面积比多周期膜小, 没有明显的犁沟形貌, 但是存在很多由于塑性变形凸起的铝, 这是由于薄膜破损后没有了薄膜保护, 在与基体摩擦时以粘着磨损为主。对比图5(b)(d)发现: 薄膜早期的碎裂剥落导致了单周期膜的失效, 多周期膜在长时间的磨损下才失效, 和单周期膜相比, 多周期膜能够显著降低COF并提高薄膜寿命。涂层刀具在铝合金干式加工过程中, 较低的COF能够抑制BUE的形成, 转移层也能够减轻涂层刀具刃部BUE。

400 ℃下A319磨球与多周期膜的磨球表面形貌及EDS如图6所示。在400 ℃下的磨球磨损边缘没有磨屑存在, 沿着滑动方向能够观察到细小交错的犁沟、磨粒和凸起, 说明在高温下薄膜的磨损转变为粘着磨损和犁沟磨损。和A390磨球表面形貌相比, 由于A319铝合金没有初晶硅的存在, 对薄膜的刮伤作用小, 没有图5(c)所示的明显的犁沟。图6(b)中EDS结果表明: 在磨损平面主要由Al和O元素组成, 说明在高温下铝合金磨损面发生了高温氧化, 在磨损面周围的磨屑中有C的富集, 在磨损面C含量较少, 说明磨损面的转移层较少, 随着磨球磨损的增加, 磨球与薄膜接触面变得粗糙, 破坏了转移层的连续性, 导致高温下薄膜的COF比其它两个温度下的要高^[21]。

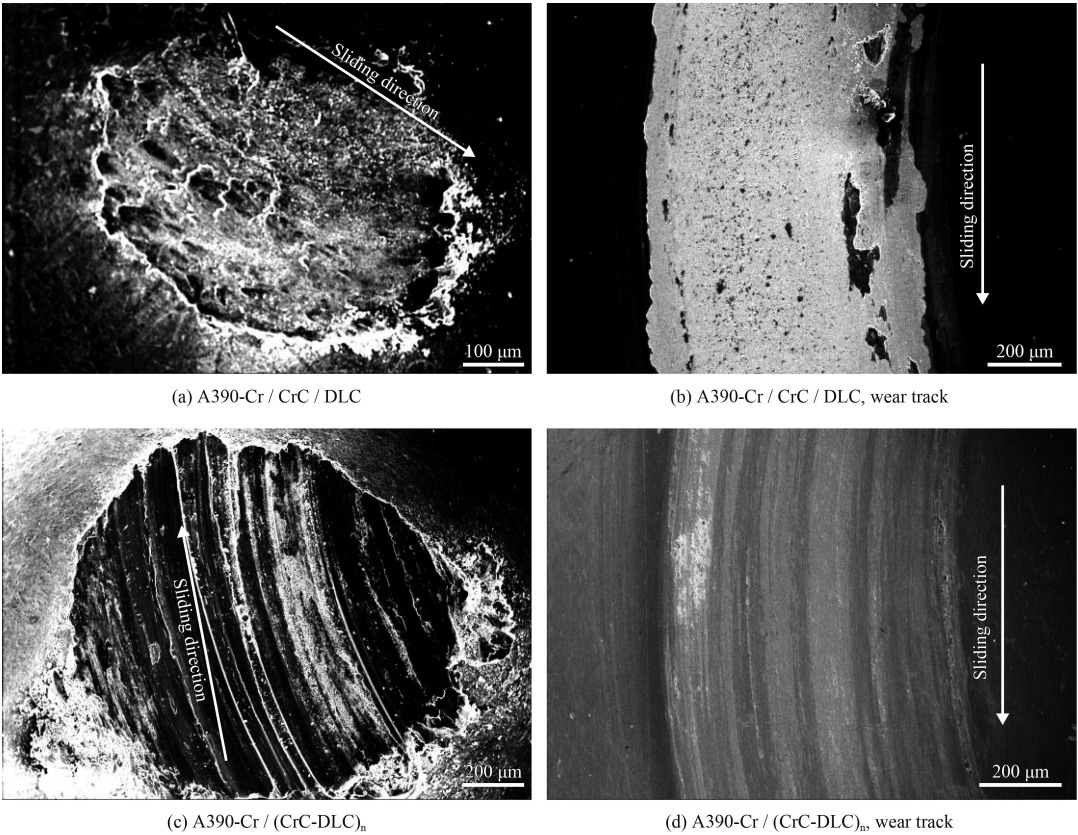


图 5 400 °C 下 A390 磨球与不同结构薄膜的磨损形貌
Fig.5 Wear morphologies of the A390 ball against different thin films under 400 °C

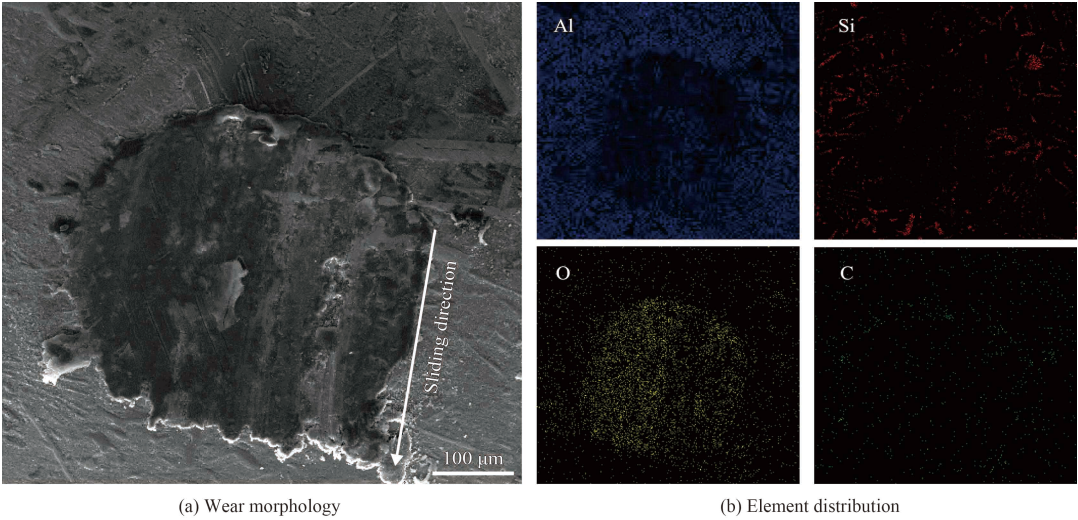


图 6 400 °C 下 Cr/(CrC-DLC)_n-A319 磨球的表面磨损形貌及成分图
Fig.6 Wear morphology and element distribution of the A319 ball against Cr/(CrC-DLC)_n under 400 °C

3 结 论

(1) 采用磁控溅射技术制备了不同结构铬掺杂碳基自润滑薄膜 Cr/CrC/DLC 和 Cr/(CrC-DLC)_n, 薄膜厚度分别为 2.0 μm 和 1.9 μm, 薄膜表面致密, 表面粗糙度分别为 4.3 nm 和 5.4 nm。Cr/CrC/DLC 单

周期薄膜的 CrC 膜层具有明显的柱状结构, 而 Cr/(CrC-DLC)_n 多周期膜由于各子膜层的相互制约没有明显的柱状结构。

(2) 在 24 °C 下, Cr/CrC/DLC 单周期膜和 Cr/(CrC-DLC)_n 多周期膜的 COF 保持较高的稳定

性。温度升高, $\text{Cr}/(\text{CrC-DLC})_n$ 多周期膜表现出比 $\text{Cr}/\text{CrC}/\text{DLC}$ 单周期膜更稳定的摩擦因数。当温度达到 400°C 时, 单周期膜快速破损而失效, 多周期膜依然能够保持较长时间。多周期膜通过各膜层摩擦过程中的不断破裂, 逐渐释放出 DLC 子膜层, 利用 DLC 子膜层的石墨化转变来保持较低摩擦因数, 达到自润滑效果。在涂层刀具加工过程中, 这有助于抑制 BUE 的形成, 提高刀具寿命。

(3) 在磨球表面形成的碳质转移层降低了摩擦因数, 但是随着测试温度增加, 转移层连续性被打断, 造成了摩擦因数升高, 摩擦因数不稳定。磨损形式由室温下的磨粒磨损转变为粘着磨损和犁沟磨损。由于 A390 铝合金含有初晶硅, 对薄膜刮伤显著, 使磨球表面具有贯穿磨损表面的犁沟, 而 A319 磨球没有初晶硅的刮伤, 表面犁沟较浅。涂层刀具在切削不同硅含量的铝合金过程中, 高硅铝合金的初晶硅会划破涂层, 促进涂层失效, 导致在失效位置容易形成 BUE。

参考文献

- [1] BHOWMICK S, ALPAS A T. The performance of hydrogenated and non-hydrogenated diamond-like carbon tool coatings during the dry drilling of 319 Al[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(7/8): 802-814.
- [2] FOX-RABINOVICH G, DASCH J M, WAGG T, et al. Cutting performance of different coatings during minimum quantity lubrication drilling of aluminum silicon B319 cast alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205(16): 4107-4116.
- [3] SUGIHARA T, ENOMOTO T. Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(2): 229-237.
- [4] HOVSEPIAN P E, LUO Q, ROBINSON G, et al. TiAlN/VN superlattice structured PVD coatings: a new alternative in machining of aluminium alloys for aerospace and automotive components[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201(1/2): 265-272.
- [5] BHOWMICK S, LUKITSCH M J, ALPAS A T. Tapping of Al-Si alloys with diamond-like carbon coated tools and minimum quantity lubrication[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(15): 2142-2153.
- [6] JAHANMIR S, HESHMAT H, HESHMAT C. Evaluation of DLC coatings for high-temperature foil bearing applications[J]. *Journal of Tribology*, 2009, 131(1): 5-7.
- [7] CORTE C D, SLINNEY H E. Composition optimization of self-lubricating chromium carbide-based composite coatings

for use to 760°C [J]. *Tribology Transactions*, 1987, 30(1): 77-83.

- [8] 常家东, 贾贵西, 李振. 磁控溅射 CrC 复合镀层对轴承性能可靠性的影响[J]. *功能材料*, 2012, 43(4): 484-486.
- CHANG J D, JIA G X, LI Z. Effect of magnetron sputtered CrC composite coatings on performance reliability of bearing[J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(4): 484-486 (in Chinese).
- [9] WASY A, BALAKRISHNAN G, LEE S H, et al. Argon plasma treatment on metal substrates and effects on diamond-like carbon (DLC) coating properties[J]. *Crystal Research and Technology*, 2014, 49(1): 55-62.
- [10] JONES B J, ANGUILANO L, OJEDA J J. Argon plasma treatment techniques on steel and effects on diamond-like carbon structure and delamination[J]. *Diamond and Related Materials*, 2011, 20(7): 1030-1035.
- [11] 孙丽丽, 代伟, 张栋, 等. Cr 掺杂及 Cr 过渡层对类金刚石薄膜附着力的影响[J]. *中国表面工程*, 2010, 23(4): 26-28.
- SUN L L, DAI W, ZHANG D, et al. The effect of Cr-doped and Cr buffer layer on the adhesion of DLC film[J]. *China Surface Engineering*, 2010, 23(4): 26-28 (in Chinese).
- [12] BOUZAKIS K D, MAKRIMALLAKIS S, KATIRTZO-GLOU G, et al. Adaption of graded Cr/CrN-interlayer thickness to cemented carbide substrates' roughness for improving the adhesion of HPPMS PVD films and the cutting performance[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205(5): 1564-1570.
- [13] HENDERER W, XU F. Hybrid TiSiN , CrC/C PVD coatings applied to cutting tools[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 215(2): 381-385.
- [14] KUMAR D D, KUMAR N, KALAISELVAM S, et al. Reactive magnetron sputtered wear resistant multilayer transition metal carbide coatings: microstructure and tribo-mechanical properties[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(100): 81790-81801.
- [15] ANOKHIN D V, LESHANSKAYA L I, PIRYAZEV A A, et al. Towards understanding the behavior of indigo thin films in organic field-effect transistors: a template effect of the aliphatic hydrocarbon dielectric on the crystal structure and electrical performance of the semiconductor[J]. *Chemical Communications*, 2014, 50(57): 7639-41.
- [16] EKLUND P, SRIDHARAN M, SILLASSEN M, et al. $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ template-texture effect on $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ thin-film growth[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(21): 7447-7450.
- [17] 曾群锋, 刘官, 董光能, 等. 类金刚石碳膜高温摩擦学性能的研究进展[J]. *真空科学与技术学报*, 2014, 34(10): 1024-1029.
- ZENG Q F, LIU G, DONG G N, et al. Latest development of

- high-temperature tribological properties of diamond-like-carbon coatings[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(10): 1024-1029 (in Chinese).
- [18] 卓国海, 柯培玲, 李晓伟, 等. 不同过渡层对DLC薄膜力学性能和摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 39-47.
- ZHUO G H, KE P L, LI X W, et al. Influences of different interlayers on mechanical and tribological properties of DLC films[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 39-47 (in Chinese).
- [19] MUSIL J, VLČEK J, ZEMAN P. Hard amorphous nanocomposite coatings with oxidation resistance above 1000 °C[J]. Advances in Applied Ceramics, 2013, 107(3): 148-154.
- [20] BOBZIN K, BAGCIVAN N, THEIß S, et al. Behavior of DLC coated low-alloy steel under tribological and corrosive load: effect of top layer and interlayer variation[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 215(2): 110-118.
- [21] MATTHEWS A, FRANKLIN S, HOLMBERG K. Tribological coatings: contact mechanisms and selection[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(18): 5463-5475.
- [22] 张文勇, 孙德恩, 裴晨蕊, 等. 调制周期对CrAlN/ZrN纳米多周期多层膜韧性的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 55-61.
- ZHANG W Y, SUN D E, PEI C R, et al. Effect of modulation period on toughness of CrAlN/ZrN nano-multilayer films[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 55-61 (in Chinese).
- [23] 裴晨蕊, 孙德恩, Sam Zhang, 等. 硬质陶瓷涂层增韧及其评估研究进展[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 1-9.
- PEI C R, SUN D E, ZHANG S, et al. Toughening and toughness evaluation of hard ceramic coatings: a critical review[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 1-9 (in Chinese).
- [24] BHOWMICK S, BANERJI A, ALPAS A T. Tribological behavior of Al-6.5%, -12%, -18.5% Si alloys during machining using CVD diamond and DLC coated tools[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 284: 353-364.
- [25] HASHIGUCHI H, TAKEI M, KOSEMURA D, et al. Stress evaluation in thin strained-Si film by polarized Raman spectroscopy using localized surface plasmon resonance[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(17): 172101.
- [26] FERRARI A C, ROBERTSON J. Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon[J]. Physical Review B Condensed Matter, 2001, 64(7): 075414.

(责任编辑: 黄艳斐)

• 本刊讯 •

《中国表面工程》被《日本科学技术振兴机构(中国)数据库》(JSTChina)收录

近日接到国际检索系统咨询部通知,《中国表面工程》正式被《日本科学技术振兴机构(中国)数据库》(JSTChina)收录。这是继美国工程索引(EI Compendex)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)以及美国《乌利希国际期刊指南》(UPD)等国际重要数据库收录之后,我刊再次取得的又一重大成绩。

2016年,JSTChina经过遴选新增加了187种(含更名)中国期刊。《日本科学技术振兴机构(中国)数据库》(原日本科学技术社数据库)是在日本《科学技术文献速报》(CBST,被誉为世界六大著名检索期刊)的基础上发展起来的网络版,由日本科学技术振兴机构出版,于2007年首次建立,不接受推荐期刊。

《中国表面工程》的进步与发展离不开广大专家、作者和读者的关注与支持!希望大家的共同努力下,我刊能够更好地为大家服务,充分发挥交流平台作用,承担起宣传中国科研工作者学术成果的责任和使命,为中国科学事业的发展做出贡献。

(本刊编辑部 供稿)