

表面摩擦磨损与润滑

CrAlSiN 涂层与不同材料配副时的摩擦学特性

韦春贝, 唐明, 林松盛, 代明江, 侯惠君, 李洪

(广东省新材料研究所 现代材料表面工程技术国家工程实验室
广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510651)

摘要: **目的** 研究 CrAlSiN 涂层分别与 304 不锈钢、TC4 钛合金、Al₂O₃ 陶瓷和 GCr15 钢四种不同材料配副时的摩擦学特性。**方法** 采用阴极电弧离子镀技术在 M35 高速钢上制备了 CrAlSiN 涂层, 采用扫描电镜 (SEM)、显微硬度计、划痕仪、球-盘式摩擦磨损试验仪和 3D 轮廓仪分别测试了涂层的结构和性能。**结果** CrAlSiN 涂层与 304 不锈钢、TC4 钛合金和 GCr15 钢配副时的磨损形式为粘着磨损和磨粒磨损, 其中与亲和性高的 304 不锈钢、TC4 钛合金粘着磨损严重。CrAlSiN 涂层与不锈钢对磨时, 摩擦系数最高, 达到 0.71; 与 GCr15 钢对磨时, 摩擦系数最低, 但摩擦系数波动大; 与钛合金对磨时, 摩擦系数介于两者之间。CrAlSiN 涂层与亲和性较差的 Al₂O₃ 陶瓷之间的磨损形式为磨粒磨损, 随着磨损的进行, 摩擦系数逐渐降低。**结论** CrAlSiN 涂层与亲和性较高的材料对磨时, 磨损形式为粘着磨损和磨粒磨损, 与亲和性较差的 Al₂O₃ 对磨时为磨粒磨损。

关键词: CrAlSiN 涂层; 304 不锈钢; TC4 钛合金; GCr15 钢; Al₂O₃ 陶瓷; 摩擦磨损特性

中图分类号: TG174.4; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0181-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.026

Tribological Properties of CrAlSiN Coatings Sliding Against Different Counterparts

WEI Chun-bei, TANG Ming, LIN Song-sheng, DAI Ming-jiang, HOU Hui-jun, LI Hong

(Key Lab of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, National Engineering Laboratory for Modern Materials
Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510651, China)

ABSTRACT: The work aims to study tribological properties of CrAlSiN coatings sliding against 304 stainless steel, TC4 titanium alloy, GC15 steel and Al₂O₃ ceramic, respectively. CrAlSiN coatings were fabricated on M35 high speed steel by adopting cathodic arc ion plating technology. Structure and properties of the coatings were tested with scanning electron microscope (SEM), microhardness tester, scratch tester, ball-on-disc friction-wear tester and 3D profiler. Wear forms of CrAlSiN coatings sliding against 304 stainless steel, TC4 titanium alloy and GCr15 steel were adhesive wear and abrasive wear. Serious adhesive wear was observed on the coatings sliding against high affinity materials such as 304 stainless steel and TC4 titanium alloy. The friction coefficient was the highest (0.71) when the CrAlSiN coatings slid against stainless steel; the friction coefficient was the lowest but fluctuated greatly when the CrAlSiN coatings slid against GCr15 steel; the friction coefficient fell in between when the CrAlSiN coatings slid against TC4 titanium alloy. Wear form of the CrAlSiN coatings sliding against poor affinity Al₂O₃ ceramic was abrasive wear, and the friction coefficient decreased gradually as wear continued. Adhesive wear and abrasive wear

收稿日期: 2017-12-07; 修订日期: 2018-03-11

Received: 2017-12-07; Revised: 2018-03-11

基金项目: 国家重大研发专项 (2016YFB0300403); 广东省科技计划项目 (2015B090923006)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0300403) and Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2015B090923006)

作者简介: 韦春贝 (1977—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: WEI Chun-bei (1977—), Female, Doctor, Senior engineer, Research focus: surface engineering.

occur when CrAlSiN coatings slide against high affinity materials, and abrasive wear occurs when the coatings slide against poor affinity Al_2O_3 ceramic.

KEY WORDS: CrAlSiN coatings; 304 stainless steel; TC4 titanium alloy; GCr15 steel; Al_2O_3 ceramic; friction-wear characteristic

CrN 由于具有高硬度、良好的耐磨性能和耐腐蚀性能而被广泛应用。然而 CrN 的高温性能不足,最高使用温度仅有 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$,不能满足高速切削和干式切削对涂层高热稳定性的要求。研究表明,在 CrN 中添加 Al 元素可以明显提高涂层的抗氧化性能,CrAlN 涂层在高温氧化时形成 Al_2O_3 ,使薄膜抗氧化温度可以达到 $800\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$,是传统 CrN 涂层良好的替代品^[1-3]。近年来,已有研究在 CrAlN 涂层中添加 Si、B、V、Y 等元素形成四元或更多元的涂层材料,或与其他功能型薄膜复合形成纳米多层膜,进而提升 CrAlN 涂层的抗氧化性能和力学性能^[4-6]。在 CrAlN 涂层中添加 Si 形成非晶 Si_3N_4 中镶嵌纳米晶 CrN、AlN 的致密结构,这种结构可以明显提高涂层的性能,包括硬度、韧性和抗氧化性能^[7]。Tomas Polcar 等人^[8]研究发现 CrAlSiN 涂层在氧化过程中形成了 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 和 SiO_2 混合氧化物层,混合氧化物层阻止了多孔氧化物结构的形成,从而阻碍了氧的内扩散以及金属元素的外扩散,薄膜的抗氧化性能可超过 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而添加 Si 细化了涂层晶粒,这也可以延长氧和金属原子扩散路径,有利于提高涂层的抗氧化性能^[9-10]。Chun-Chi Chang 等人^[11]研究了不同 Si 含量的 CrAlSiN 涂层的摩擦磨损性能,发现 Si 含量对涂层摩擦磨损性能有很大影响,摩擦系数随着 Si 含量的增加而降低,在 Si 含量为 9.0% 时,薄膜具有最低的磨损率。Yin-Yu Chang 等人^[12]进行了 TiAlN、TiAlSiN 和 CrAlSiN 涂层切削钛合金性能对比研究,发现相对于 TiAlN 和 TiAlSiN 涂层,CrAlSiN 涂层可以降低粘着磨损的发生,刀具涂层表面只有磨粒磨损,CrAlSiN 涂层的耐磨性能最好。而在 CrAlSiN 涂层中添加 Mo 或 Nb,使得涂层具有一定的自润滑效果,可以进一步提高涂层的耐磨性能,涂层具有更长的使用寿命^[13]。

目前已有大量关于 CrAlSiN 涂层结构、性能等的研究及应用报道。涂层与不同材料配副时的摩擦磨损性能是影响涂层使用寿命的关键,然而关于 CrAlSiN 涂层与不同材料间的摩擦磨损性能研究很少。由于材料特性差异,CrAlSiN 涂层与不同材料对磨时将会出现不同的磨损机理以及涂层破坏形式,因此有必要研究 CrAlSiN 涂层与不同材料配副时的磨损特性。

1 试验

1.1 涂层制备

选用的基体材料为 M35 高速钢,尺寸为 $\phi 30\text{ mm}\times 7\text{ mm}$ 。试样经过不同粒度的金相砂纸打磨后进

行抛光,然后分别采用丙酮和无水乙醇超声清洗,烘干后待用。

采用电弧离子镀技术进行 CrAlSiN 涂层的制备,电弧靶成分(原子数分数)为 40%Cr-50%Al-10%Si,纯度为 99.8%。沉积过程中,真空室本底真空低于 $5\times 10^{-3}\text{ Pa}$,通入高纯 Ar 气,在试样表面沉积 Cr 打底层,然后逐渐增加 N_2 流量,开启 CrAlSi 靶获得 CrAlSiN 层,具体工艺参数为:偏压 100 V,气压 2 Pa,时间 4 h,靶功率 60 A,温度 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 性能测试及组织观察

采用 NOVA NanoSEM450 型场发射扫描电子显微镜观察涂层的表面形貌和截面形貌,使用能谱仪 EDS 分析涂层的成分。采用 MH-5D 型显微硬度计测试涂层的显微硬度,试验载荷为 50 g,保载时间为 15 s,测量 5 个点,取平均值。采用划痕法评价涂层的膜/基结合力,试验仪器为 MFT-4000 多功能材料表面性能试验仪,划痕长度为 5 mm,加载速度为 5 mm/min,加载力范围为 0~100 N,用划痕形貌判断临界载荷。采用 MTS-3000 球-盘式摩擦磨损试验机对涂层的摩擦磨损性能进行测试,条件:大气环境,室温为 $(24\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $(53\pm 5)\%$,载荷为 1 kg,线速度为 0.2 m/s,行程为 1000 m,配副材料直径为 $\phi 4\text{ mm}$,配副材料分别为 304 不锈钢、TC4 钛合金、GCr15 轴承钢、 Al_2O_3 陶瓷。采用 Bruker Dektak XT 三维表面轮廓仪测试磨痕深度。

2 结果及分析

2.1 涂层结构及力学性能

图 1 为 CrAlSiN 涂层的表面形貌和截面形貌。涂层表面有明显的针孔、凹坑和白色大颗粒。白色大颗粒是涂层沉积过程中液滴粘附到涂层中形成的,而针孔及凹坑是涂层表面被轰击溅射掉一些结合力较差的颗粒而形成的。截面形貌显示涂层结构致密,没有出现柱状晶结构,厚度为 $(2.53\pm 0.03)\text{ }\mu\text{m}$ 。CrAlSiN 涂层的 EDS 成分见表 1 所示。涂层的显微硬度为 $(2445\pm 156)\text{ HV}$,结合力为 $(54\pm 2)\text{ N}$,具有较好的膜/基结合力。

2.2 摩擦系数

图 2 为 CrAlSiN 涂层与不同配副材料对磨后的摩擦系数曲线。其中与 304 不锈钢配副时的摩擦系数最高,达到 0.71;与 GCr15 配副时的摩擦系数最低,为 0.48,但摩擦过程波动较大;与 TC4 配副时的摩

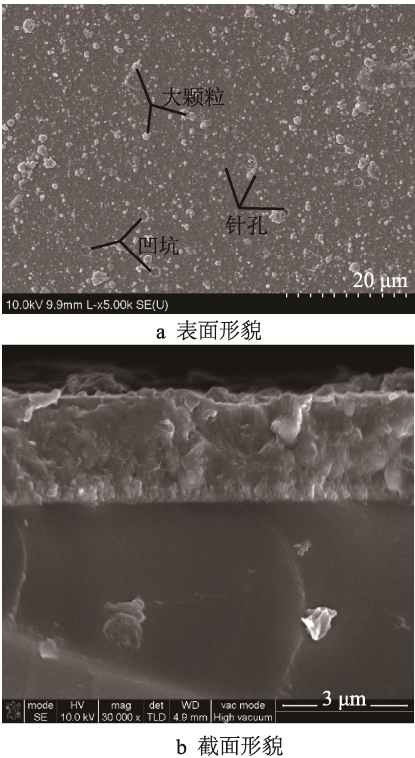
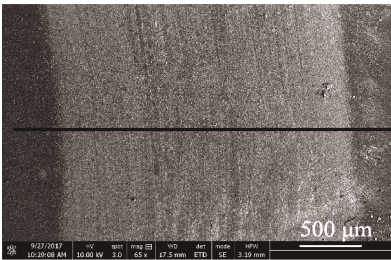


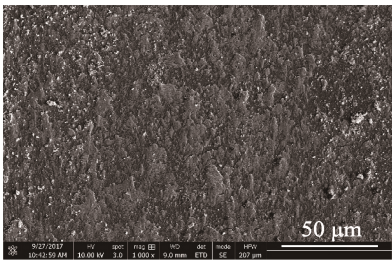
图 1 CrAlSiN 涂层的表面形貌和截面形貌
Fig.1 Surface morphology(a) and cross-sectional morphology (b) of CrAlSiN coatings

表 1 CrAlSiN 涂层的成分
Tab.1 Chemical composition of CrAlSiN coatings

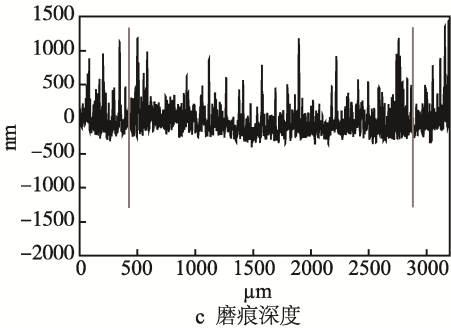
Elements	Cr	Al	Si	N
Content /at. %	28.40	26.95	4.59	40.05



a 低倍照片



b 高倍照片



c 磨痕深度

图 3 与 304 不锈钢对磨后 CrAlSiN 涂层表面磨痕形貌

Fig.3 Wear tracks morphology of CrAlSiN coatings sliding against 304 stainless steel: a) low magnification image, b) high magnification image, c) depth of wear track

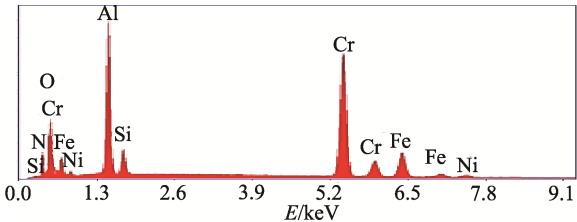


图 4 CrAlSiN 涂层与 304 对磨后表面磨痕内 EDS 能谱图
Fig.4 EDS spectra of wear track on CrAlSiN coatings after grinding with 304 stainless steel

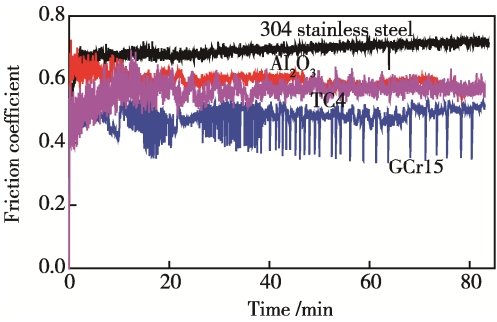


图 2 CrAlSiN 涂层与不同材料配副时的摩擦系数曲线
Fig.2 Friction coefficient curves of CrAlSiN coatings sliding against different counterparts

擦系数介于两者之间；与 Al_2O_3 对磨时，初始摩擦系数较大，随着摩擦的进行，摩擦系数逐渐减小。

2.3 与 304 不锈钢配副时的摩擦磨损特性

图 3 为 CrAlSiN 涂层与 304 不锈钢对磨后的磨痕形貌和磨痕深度。涂层表面磨痕较宽，测量磨痕深度（图 3c，测量示意图见图 3a 黑色线）发现涂层磨损程度很轻，无法测出磨痕深度。磨痕内存在犁沟是磨粒磨损所致，从放大图（图 3b）中可以看到涂层表面有大量的粘着物。从图 4 的磨痕内 EDS 能谱结果可知，除了 Cr、Al、Si、N 涂层成分外，磨痕内有 Fe、Ni 等元素，这表明不锈钢配副材料粘着转移到了涂层表面。另外在磨损过程中，在磨痕边缘发现有大量的黑色松散磨屑，经 EDS 分析发现为 Fe、Cr、Ni 和 O 等元素，说明磨损主要发生在不锈钢配副表面，磨屑在磨损过程中被排出摩擦界面。

图 5 为不锈钢球表面磨痕形貌，可以看出表面磨损严重，磨痕内存在大量的犁沟，边缘堆积有大量磨屑。对不同区域成分进行分析（如图 5b 所示）发现，不锈钢球磨痕表面以及边缘堆积的磨屑成分一致，都为 Fe、Cr、Ni 等不锈钢材料成分，这说明在 CrAlSiN 涂层与不锈钢对磨过程中，主要是不锈钢配副发生磨损，同时部分材料转移到涂层表面。

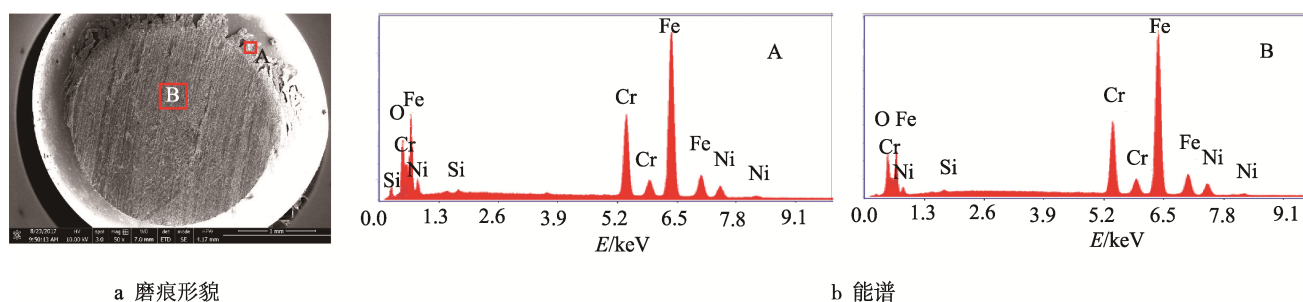


图5 304不锈钢球表面磨痕形貌及EDS能谱图

Fig.5 Morphology and EDS spectra of wear track on 304 stainless steel ball: a) morphology, b) EDS of wear track

2.4 与TC4钛合金配副时的摩擦磨损特性

图6为CrAlSiN涂层与TC4钛合金对磨后的磨痕形貌。涂层表面的磨痕较宽，但从磨痕深度测量结果（如图6c，测量示意图见图6a黑色线）可知，涂层磨损程度很轻。由放大图（图6b）可以看到，磨痕内粘着有大量的撕裂块。根据EDS能谱分析结果

（图7）可知，磨痕内除了Cr、Al、Si、N涂层成分，还存在大量的Ti，这应是磨损过程中发生了较严重的粘着磨损，使得钛合金配副材料被撕拽转移到了CrAlSiN涂层表面。同时磨痕表面存在犁沟，这是由于涂层内存在的硬质颗粒在磨损过程中剥落，在磨痕内形成磨粒磨损所致。

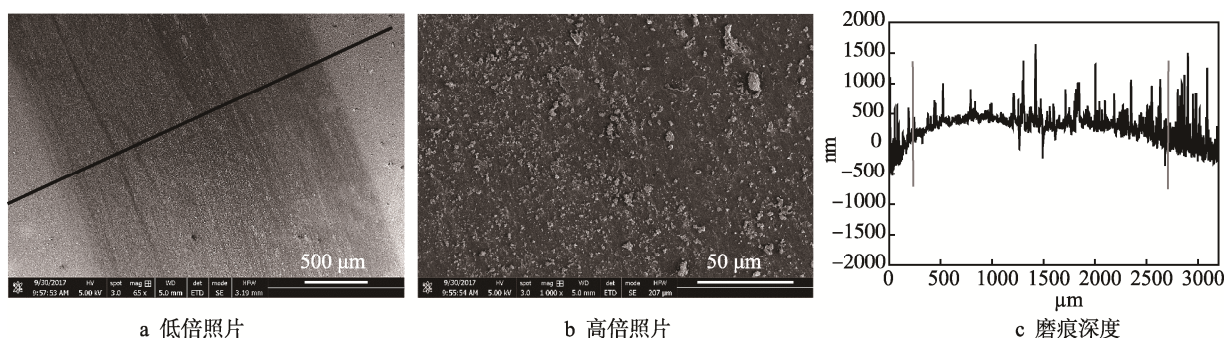


图6 与TC4钛合金对磨后CrAlSiN涂层表面磨痕形貌

Fig.6 Wear track morphology of CrAlSiN coatings sliding against TC4 titanium alloy: a) low magnification image, b) high magnification image, c) depth of wear track

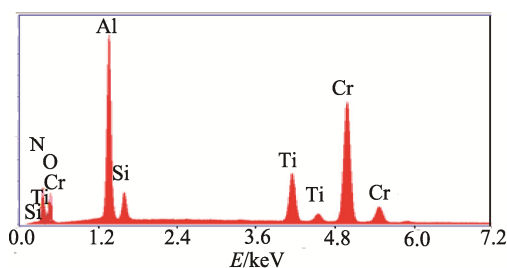


图7 CrAlSiN涂层与TC4对磨后表面磨痕内EDS能谱图

Fig.7 EDS spectra of wear track on CrAlSiN coatings after grinding with TC4 titanium alloy

图8为TC4钛合金球表面磨痕形貌。钛合金球磨痕表面磨损严重，磨痕内存在大量犁沟，边缘堆积了大量磨屑。对磨屑成分进行分析（图8b）发现，钛合金球磨痕表面和边缘磨屑都为TC4钛合金材料成分，这表明磨损主要发生在较软的钛合金球表面。另外，在与钛合金对磨过程中，磨痕边缘未堆积大量磨屑，钛合金磨屑全部粘着在涂层表面磨痕内以及配副表面。

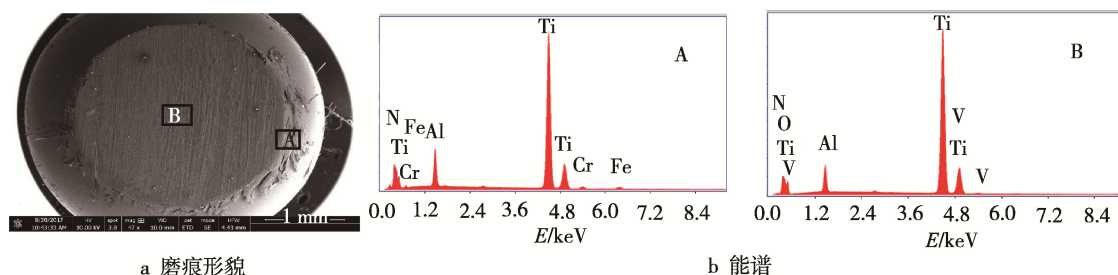


图8 TC4钛合金球表面磨痕形貌及能谱图

Fig.8 Wear track morphology and EDS analysis of TC4 titanium alloy counter body: a) wear track morphology, b) EDS

2.5 与 GCr15 钢配副时的摩擦磨损特性

图 9 为与 GCr15 钢对磨后 CrAlSiN 涂层表面磨痕形貌, 可以观察到粘着物附着于涂层表面。测量磨痕深度发现, 涂层基本没有磨损。图 10 是磨痕表面 EDS 能谱图, 磨痕内除了涂层成分外, 还有 Fe 元素, Fe 应是 GCr15 钢球被磨损转移到涂层表面的粘着物,

但粘着程度比 304 不锈钢和 TC4 钛合金轻。在摩擦过程中观察到了大量的红色松散磨屑堆积在磨痕外, 这是 GCr15 钢球发生磨损后, 磨屑被氧化并不断被推出摩擦界面。可见 CrAlSiN 涂层与 GCr15 钢摩擦副的磨损形式为粘着磨损和磨粒磨损。图 11 为 GCr15 钢球表面磨痕形貌, 可以观察到对磨球表面没有粘着物, 可见粘着磨损程度相对较轻, 主要发生磨粒磨损。

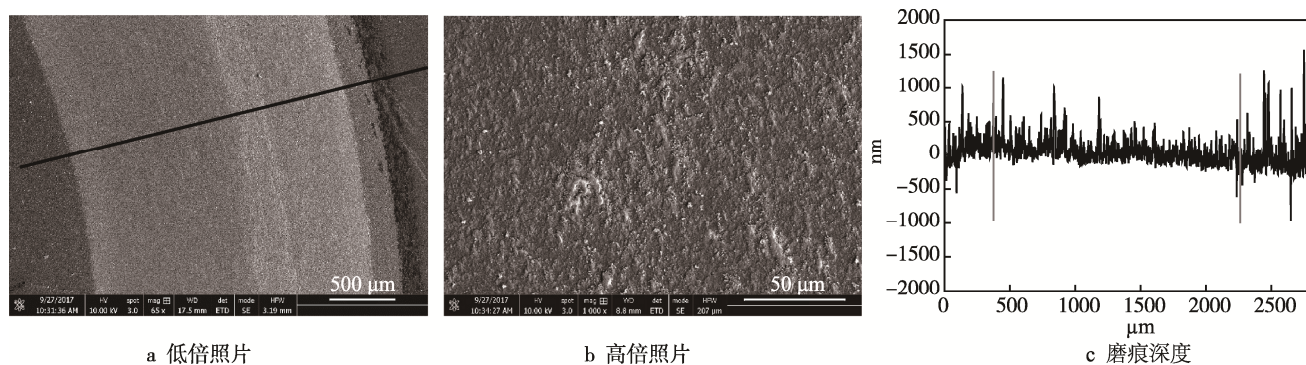


图 9 与 GCr15 钢对磨后 CrAlSiN 涂层表面磨痕形貌

Fig.9 Wear track morphology of CrAlSiN coating sliding against GCr15 steel: a) low magnification image, b) high magnification image, c) depth of wear track

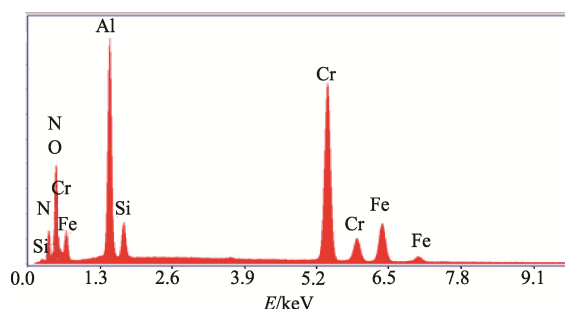


图 10 CrAlSiN 涂层与 GCr15 钢球对磨后表面磨痕内 EDS 能谱图

Fig.10 EDS spectra of wear track on CrAlSiN coating after grinding with GCr15 steel ball

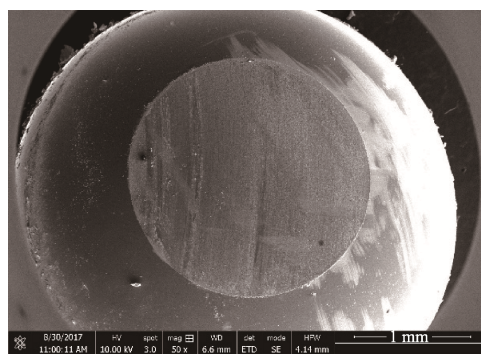


图 11 GCr15 钢球表面磨痕形貌

Fig.11 Morphology of wear track on GCr15 steel ball

2.6 与 Al₂O₃ 陶瓷配副时的摩擦磨损特性

图 12 为与 Al₂O₃ 陶瓷球对磨后 CrAlSiN 涂层表面磨痕形貌, 磨痕边缘有少量的松散磨屑, 相对于 304 不锈钢和 TC4 钛合金, 与 Al₂O₃ 陶瓷对磨后, 磨

痕宽度明显减小, 但磨痕较深, 涂层磨损深度达到 0.82 μm。由于 Al₂O₃ 陶瓷的硬度较高, 与 CrAlSiN 涂层对磨时, 陶瓷球的磨损量较小, 因而磨痕较窄。从放大照片图 12b 中可以看出, 磨痕表面光滑, 没有粘

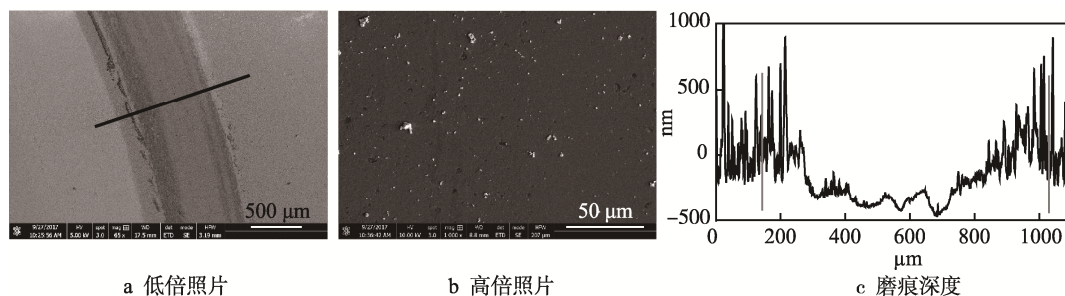


图 12 与 Al₂O₃ 陶瓷对磨后 CrAlSiN 涂层表面磨痕形貌

Fig.12 Morphology of wear track on CrAlSiN coatings sliding against Al₂O₃ ceramic: a) low magnification image, b) high magnification image, c) depth of wear track

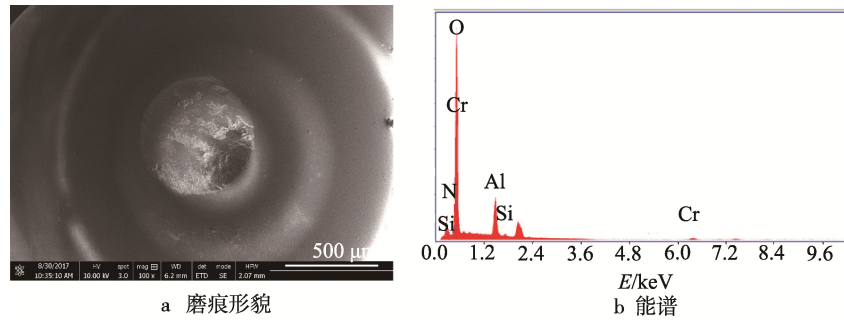


图 13 Al_2O_3 陶瓷球表面磨痕形貌及 EDS 能谱图

Fig.13 Morphology (a) and EDS spectra (b) of wear track on Al_2O_3 ceramic ball

着磨损痕迹，可见表面主要发生磨粒磨损。

图 13 为 Al_2O_3 陶瓷球对磨后的表面磨痕形貌和表面能谱图。 Al_2O_3 陶瓷球的磨痕较小，表面几乎没有涂层材料转移膜。涂层表面的硬质颗粒在摩擦力作用下剥落产生磨粒磨损，使得涂层以及 Al_2O_3 陶瓷球表面都发生不同程度的磨损。随着摩擦的不断进行，表面一些大颗粒被推出摩擦界面，因此摩擦系数不断减小。

2.7 讨论

表 2 是 CrAlSiN 涂层与不同材料配副时的摩擦磨损结果。可以看出与不锈钢对磨时，摩擦系数最高；

与 GCr15 钢对磨时，摩擦系数最低。与 TC4 钛合金对磨时，配副材料磨损最严重，其次为与 304 不锈钢对磨，与 Al_2O_3 对磨时的磨痕最深。

对于具有较强亲和力的材料，在摩擦过程中的高温与压力作用下很容易产生粘着磨损。不锈钢材料和钛合金材料都属于亲和力较强的材料，并且材料摩擦力大，因此在摩擦过程中容易出现严重的粘着磨损现象^[14-16]。另外，在摩擦过程中，涂层表面颗粒在摩擦力作用下剥落形成硬质颗粒，同时磨屑材料产生加工硬化现象也形成硬质颗粒，这些硬质颗粒又会产生磨粒磨损，进一步加剧界面磨损。在摩擦压应力及剪切应力的作用下，涂层表面的粘着转移膜发生断裂，从

表 2 CrAlSiN 涂层与不同材料配副时的摩擦磨损结果

Tab.2 Friction and wear results of CrAlSiN coatings sliding against different counterparts

对磨球	304 不锈钢	TC4 钛合金	GCr15 钢	Al_2O_3 陶瓷
平均摩擦系数	0.71	0.56	0.48	0.60
配副材料磨痕直径/mm	2.59	2.64	2.07	1.25
涂层磨痕深度/ μm				0.82
粘着程度	严重	严重	不严重	无
磨屑	磨痕边缘大量松散 黑色磨屑	磨痕边缘无磨屑	磨痕边缘大量松散 红色磨屑	少量松散磨屑

涂层表面剥落，同时引起涂层的粘着撕裂或粘着剥落，造成涂层磨损^[17]。在随后的摩擦过程中，新涂层表面又重新被转移膜所覆盖，因此摩擦磨损过程就是转移膜形成、剥落的往复过程，在这种往复过程中涂层不断被磨损。

试验中未发现 CrAlSiN 涂层表面有磨损现象，这可能是由于涂层表面少量被磨损掉的部分被金属转移膜填覆所致。CrAlSiN 涂层与钛合金配副时的磨损形式和 CrAlSiN 涂层与不锈钢配副时的磨损形式相似，都为粘着磨损和磨粒磨损。然而与钛合金对磨时，涂层表面磨痕边缘没有磨屑，可见钛合金的粘性更高，摩擦中产生的粘着转移膜全部粘附在 CrAlSiN 涂层磨痕内以及堆积在磨球边缘，因此钛合金球表面的磨损量最大，粘着磨损最严重^[18-19]。

相对于 304 不锈钢和 TC4 钛合金，GCr15 轴承钢的硬度高，但塑性差，与 CrAlSiN 涂层对磨时粘着

磨损程度轻，因此摩擦系数相对较低。在摩擦过程中，配副材料 GCr15 钢在 CrAlSiN 涂层表面形成粘着转移膜，而转移膜由于粘性差，在压应力和剪切应力作用下很快发生剥落，与剥落的涂层颗粒一起存在于摩擦界面，形成三体摩擦，摩擦过程就是转移膜形成、剥落的往复过程，因此摩擦系数波动较大。

而对于性能稳定的 Al_2O_3 陶瓷，与涂层材料亲和性差，因而不会形成粘着磨损，其磨损形式为磨粒磨损。在摩擦过程中，磨屑以及剥落的硬质颗粒一起在界面形成三体摩擦，加速 CrAlSiN 涂层和 Al_2O_3 陶瓷球表面的磨损。

3 结论

1) CrAlSiN 涂层结构致密，表面存在颗粒、针孔及凹坑，涂层厚度为 $2.53\ \mu\text{m}$ ，硬度为 2445HV，

与基体之间的结合力为 54 N。

2) CrAlSiN 涂层与 304 不锈钢、TC4 钛合金、GCr15 钢配副时的磨损行为均为粘着磨损和磨粒磨损。CrAlSiN 涂层与亲合性高的不锈钢、钛合金对磨时,粘着磨损严重;与 GCr15 钢对磨时,摩擦系数最低,但摩擦系数波动大。

3) CrAlSiN 涂层与 Al_2O_3 陶瓷配副时的磨损形式为磨粒磨损,随着磨损的进行,摩擦系数降低。

参考文献:

- [1] 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): 1015-1018.
YU Chun-yan, WANG She-bin, YIN Xiao-ding, et al. Study on High-temperature Oxidation Resistance of CrAlN Coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(6): 1015-1018.
- [2] 刘爱华,邓建新,崔海冰,等. Ti 基与 Cr 基氮化物涂层的抗氧化性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(6): 147-151.
LIU Ai-hua, DENG Jian-xin, CUI Hai-bing, et al. Oxidation Resistance of Ti-based and Cr-based Nitride Coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(6): 147-151.
- [3] 金浩,张莹莹,时卓,等. 磁控溅射技术制备 CrAlN 涂层的研究进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2016, 30(2): 54-59.
JIN Hao, ZHANG Ying-ying, SHI Zhuo, et al. Recent Developments on Magnetron Sputtering of CrAlN Coating[J]. Materials Review A, 2016, 30(2): 54-59.
- [4] 王来森,刘小龙,张魁,等. $[\text{CrAlSiN}/\text{Si}_3\text{N}_4]_n$ 多层膜的性能和抗氧化行为的研究[J]. 金属功能材料, 2016, 23(4): 17-23.
WANG Lai-sen, LIU Xiao-long, ZHANG Kui, et al. Mechanical Properties and Oxidation Resistance of $[\text{CrAlSiN}/\text{Si}_3\text{N}_4]_n$ Multilayer Coatings[J]. Metallic Functional Materials, 2016, 23(4): 17-23.
- [5] NGUYEN T D, KIM S K, LEE D B. Oxidation of Nano-multilayered CrAlBN Thin Films between 600 and 1000 °C in Air[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205: S373-S378.
- [6] CHANG Yin-yu, CHIU Wen-tung, HUNG Jui-pin. Mechanical Properties and High Temperature Oxidation of CrAlSiN/TiVN Hard Coatings Synthesized by Cathodic Arc Evaporation[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 303: 18-24.
- [7] WANG Y X, ZHANG S, LEE J W, et al. Toward Hard yet Tough CrAlSiN Coatings via Compositional Grading[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 231: 346-352.
- [8] POLCAR T, CAVALEIRO A. High Temperature Properties of CrAlN, CrAlSiN and AlCrSiN Coatings—Structure and Oxidation[J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 129: 195-201.
- [9] LIU C B, PEI W, HUANG F, et al. Improved Mechanical and Thermal Properties of CrAlN Coatings by Si Solid Solution[J]. Vacuum, 2016, 125: 180-184.
- [10] CHEN H W, CHAN Y C, LEE J W, et al. Oxidation Resistance of Nanocomposite CrAlSiN under Long-time Heat Treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206: 1571-1576.
- [11] CHANG C C, CHEN H W, LEE J W, et al. Influence of Si Contents on Tribological Characteristics of CrAlSiN Nanocomposite Coatings[J]. Thin Solid Films, 2015, 584: 46-51.
- [12] CHANG Y Y, LAI H M. Wear Behavior and Cutting Performance of CrAlSiN and TiAlSiN Hard Coatings on Cemented Carbide Cutting Tools for Ti Alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 259: 152-158.
- [13] CHEN Y, DU H, CHEN M, et al. Structure and Wear Behavior of AlCrSiN-based Coatings[J]. Applied Surface Science, 2016, 370: 176-183.
- [14] 王庭俊,周建华. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的切削加工[J]. 工具技术, 2009, 43(7): 63-67.
WANG Ting-jun, ZHOU Jian-hua. Cutting Process of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel[J]. Tool Engineering, 2009, 43(7): 63-67.
- [15] 宋亚林. 奥氏体不锈钢零件切削加工方法的探讨[J]. 江西科技师范学院学报, 2005, 8(4): 69-70.
SONG Ya-lin. A Discussion on the Cutting Methods of Austenite Stainless Steel Pieces[J]. Journal of Jiangxi Science and Technology Normal University, 2005, 8(4): 69-70.
- [16] 魏树国,吴照银,马光锋. 钛合金的切削加工性及其改善方法[J]. 工具技术, 2005, 39(12): 50-52.
WEI Shu-guo, WU Zhao-yin, MA Guang-feng. Machining Feature and Improving Method of Titanium Alloy[J]. Tool Engineering, 2005, 39(12): 50-52.
- [17] 赵兴中,刘家浚,朱宝亮,等. 不同摩擦副中 Si_3N_4 陶瓷摩擦磨损特性研究[J]. 润滑与密封, 1996(4): 11-16.
ZHAO Xing-zhong, LIU Jia-jun, ZHU Bao-liang, et al. Wear Characteristics of Si_3N_4 Ceramic Sliding against Different Metals[J]. Lubrication Engineering, 1996(4): 11-16.
- [18] 隋旭东,李国建,王强,等. 钛合金切削用 $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 涂层的制备及其切削性能研究[J]. 金属学报, 2016, 52(6): 741-746.
SUI Xu-dong, LI Guo-jian, WANG Qiang, et al. Preparation of $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ Coating in Cutting Titanium Alloy and Its Cutting Performance[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(6): 741-746.
- [19] 李安海,赵军,罗汉兵,等. 高速干铣削钛合金时涂层硬质合金刀具磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1): 40-46.
LI An-hai, ZHAO Jun, LUO Han-bing, et al. Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools in High-speed Dry Milling of Titanium Alloy[J]. Tribology, 2012, 32(1): 40-46.