

## 表面摩擦磨损与润滑

斜撑式超越离合器用  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层和  
GCr15 基体的磨损行为研究雷美娟<sup>1,2</sup>, 田凌<sup>1,2</sup>, 石金大<sup>3</sup>, 刘钊钊<sup>3</sup>

(1.清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2.精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084; 3.陆军航空兵研究所, 北京 101121)

**摘要:**目的 研究斜撑式超越离合器用  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层和 GCr15 基体与合金钢 9310 对磨时的摩擦性能和磨损机理。方法 在 GCr15 基体上利用化学气相沉积技术制备  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层样件。利用带有能谱分析仪的扫描电镜、X 射线衍射仪和纳米压痕仪分析测量涂层的厚度和物相组成以及有无  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层时样件的显微硬度。利用球-盘接触式 SRV-4 高温摩擦磨损试验机考察  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层和 GCr15 基体的摩擦磨损性能。采用三维白光干涉形貌仪和扫描电镜系统地分析材料的磨痕情况。结果  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层厚度约为 4~6  $\mu\text{m}$ , 主要包含  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  和  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$  两种相。涂层的平均显微硬度为 22.709 GPa, 约为 GCr15 基体 (11.198 GPa) 的 2 倍。在试验参数下,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的摩擦系数为 0.18~0.24, GCr15 基体的摩擦系数为 0.15~0.20。当滑动速度为 60 mm/s, 法向载荷为 20 N~60 N 时, GCr15 的磨损率约是  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的 4~6 倍; 当滑动速度为 100 mm/s 时, GCr15 基体的磨损率约是  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的 7~11 倍。当滑动速度为 100 mm/s, 法向载荷为 60 N 时, GCr15 基体的磨损机理为典型的犁沟磨损。 $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层主要为犁沟磨损和一定的疲劳磨损。结论  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层具有较高的硬度和良好的耐磨性, 有助于改善基体的耐磨性能和斜撑式超越离合器的使用性能。

**关键词:**  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层; GCr15 基体; 磨损机理; 耐磨性; 显微硬度; 斜撑式超越离合器**中图分类号:** TG174.444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0090-08**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.014Wear Behavior of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  Coating and GCr15 Substrate for  
Sprag Overrunning ClutchLEI Mei-juan<sup>1,2</sup>, TIAN Ling<sup>1,2</sup>, SHI Jin-da<sup>3</sup>, LIU Bei-bei<sup>3</sup>

(1.Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Beijing Key Lab of Precision/Ultra-precision Manufacturing Equipment and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3.Institute of Army Aviation, Beijing 101121, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study friction property and wear mechanism of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating or GCr15 substrate being rubbed with 9310 alloy steel for sprag overrunning clutch.  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating sample was prepared on GCr15 substrate by adopting chemical

收稿日期: 2018-01-19; 修订日期: 2018-03-26

Received: 2018-01-19; Revised: 2018-03-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51175287)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51175287)

作者简介: 雷美娟 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程、多学科仿真。

Biography: LEI Mei-juan (1993—), Female, Master, Research focus: surface engineering, multi-disciplinary simulation.

通讯作者: 田凌 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为 IC 设备、产品生命周期管理以及计算机辅助设计和工程。

Corresponding author: TIAN Ling (1963—), Female, Doctor, Professor, Research focus: IC equipment, product life-cycle management and computer-aided design and engineering.

vapor deposition technology. The thickness and phase composition of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating and microhardness of both samples (with and without  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating) were analyzed by scanning electron microscope (SEM) (with EDS analysis), X-ray diffractometer (XRD) and nano-indenter. Friction and wear properties of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating and GCr15 substrate were investigated with ball-on-disk SRV-4 high temperature tribotester. Wear scar conditions of the materials were characterized systematically with 3D white light interferometer surface profiler and SEM. It was calculated that the thickness of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating was about 4~6  $\mu\text{m}$ . And it was mainly composed of phase  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  and phase  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ . Average surface microhardness of the  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating was 22.709 GPa, nearly twice that of GCr15 substrate (11.198 GPa). Under experimental parameters, friction coefficient of the  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating ranged between 0.18~0.24 while that of GCr15 substrate ranged between 0.15~0.20. Wear rate of GCr15 was about 4~6 times that of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating at the sliding speed of 60 mm/s and normal load of 20~60 N, but 7~11 times that of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating at the sliding speed of 100 mm/s. The wear mechanism of GCr15 substrate was typical furrow wear, and that of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating was mainly furrow wear and fatigue wear at the sliding speed of 100 mm/s and normal load of 60 N.  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating has high microhardness and excellent wear resistance, which can contribute to better wear resistance of the substrate and higher usability of sprag overrunning clutch.

**KEY WORDS:**  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating; GCr15 substrate; wear mechanism; wear resistance; microhardness; sprag overrunning clutch

斜撑式超越离合器是直升机传动系统中的核心部件,由内环(从动件)、外环(主动件)、斜撑块、弹簧和内外保持架组成,主要依靠斜撑块与内外环之间的楔紧作用传递扭矩<sup>[1]</sup>。由于离合器长时间处于高温、大转速、高扭矩的状态,斜撑块与内外环高副接触,易发生摩擦磨损,尤其在差速超越模式或过载状态运行时,磨损问题已成为离合器失效的主要原因。因此研究超越离合器的摩擦磨损对于控制摩擦过程具有重要意义<sup>[2-5]</sup>。

严宏志等<sup>[6-7]</sup>分析了斜撑式超越离合器斜撑块的疲劳寿命,并对斜撑块曲面进行了优化设计。他还研究了不同摩擦条件下离合器的工作性能,结果表明,优化调整摩擦系数可以保证离合器在良好的状态下运行。盖小涛等<sup>[8]</sup>研究了离合器磨损后斜撑块的弹出现象,发现磨损导致楔角增大,从而斜撑块弹出,造成离合器输出转速剧烈波动。朱楚等<sup>[9-10]</sup>对斜撑超越离合器的结构设计,以及磨损对斜撑块力学性能的影响进行了详细分析。李慎华等<sup>[11]</sup>验证了在超越离合器上安装阻尼卡和阻尼弹簧片,能减少斜撑块的磨损,提高离合器的寿命。李继峰等<sup>[12]</sup>针对不同种类的斜撑式超越离合器用斜撑块的工作特点和加工成形方法进行了分析。近年来国外关于超越离合器的研究有: Vernay P 等<sup>[13]</sup>针对离合器的失效问题,利用实验手段对比分析斜撑块出现滑动的原因,得出斜撑块在锁紧工况下出现微动磨损; Peeken H J 等<sup>[14]</sup>利用实验方法得出斜撑块在离合器急速楔合的过程中容易飞出,造成内环破坏; Xu T 等<sup>[15]</sup>计算了斜撑块与内外环之间的赫兹接触应力,并建立了超越离合器斜撑块的数学模型。

斜撑式超越离合器的耐磨损设计中,产品结构设计及力学模型分析至关重要,材料的选配以及材料的磨损性能研究也同等重要<sup>[4]</sup>。而目前关于斜撑超越离合器用材料的摩擦磨损性能的研究较少,特别是斜撑

块与内外滚道用材料的摩擦磨损性能分析更少。碳化铬系金属陶瓷材料因其超强的抗氧化能力、优异的耐磨性能、较高的高温硬度、膨胀系数与钢近似以及密度低等独特的优异性能,被广泛应用于航空航天、电力、核能等行业<sup>[16-17]</sup>。化学气相沉积技术绕镀性好,结合力强,工艺简单,适应于复杂形状的工件,且在较大范围内易控制薄膜化学成分和膜结构,因此得到了广泛的重视和研究。目前,该技术在冶金、光电、航空航天和军工等领域已经得到了广泛的应用<sup>[18-21]</sup>。但使用化学气相沉积技术制备碳化铬涂层,并应用于斜撑式超越离合器的研究甚少。

本文利用 SRV-4 高温摩擦磨损试验机,对斜撑超越离合器斜撑块用  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层(化学气相沉积制得)、GCr15 基体和内外环用合金钢 9310 进行对磨试验,通过三维白光干涉表面形貌仪和扫描电镜对磨痕进行表征。对两种材料的磨损性能进行对比分析,并探究其磨损机理,为研究斜撑块材料的磨损机制以及提高斜撑块的使用寿命提供参考依据。

## 1 试验

### 1.1 试验设计

基体材料为轴承钢 GCr15,尺寸为  $\phi 24 \text{ mm} \times 7.88 \text{ mm}$ 。利用化学气相沉积技术在其表面制备  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层,作为摩擦副的下试样;摩擦副的上试样为  $\phi 10.2 \text{ mm}$  的合金钢 9310 钢球;摩擦副接触形式为点接触;润滑形式为油浴润滑,试验油采用航空机油。试验前,用丙酮和酒精依次超声清洗样件表面 10~15 min,吹干后放在培养皿中待用。试验结束后,利用石油醚超声清洗样件表面的油污。结合飞参数据和有限元力学仿真结果,设定摩擦磨损的试验工作参数如表 1 所示。

表 1 摩擦学试验参数  
Tab.1 Parameters of tribological tests

Load/N	Frequency/Hz	Temperature/℃	Time/s	Stroke/mm	Sliding speed/(mm·s <sup>-1</sup> )
20	15	90	3600	2	60
40	15	90	3600	2	60
60	15	90	3600	2	60
20	25	90	3600	2	100
40	25	90	3600	2	100
60	25	90	3600	2	100

## 1.2 材料表征与性能测试

利用自带 EDS 能谱分析的场发射环境扫描电子显微镜 (QUANTA 200 FEG, 荷兰 FEI 公司) 观察材料表面的形貌特征。Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层的晶相结构利用 X 射线衍射仪 (D8, CuK $\alpha$ ,  $\lambda=0.154059$  nm, Bruker, 德国) 分析, 加速电压为 40 kV, 电流为 200 mA, 采用连续扫描, 扫描角度范围为 20°~90°, 扫描速度为 10 (°)/min。利用纳米划痕仪 (NHT3, CSM, 瑞士) 对 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层和 GCr15 基体的硬度指标进行测量, 最大加载载荷为 20 mN, 加载和卸载速度为 40 mN/min,

保载时间为 10 s, 压痕深度为 3000 nm。在样件表面随机选取 6 个点测量, 将其平均值作为材料的显微硬度值。

摩擦磨损试验在 SRV-4 高温摩擦磨损试验机 (Optimol 公司, 德国) 上进行。试验设备的原理: 在马达驱动力的作用下, 主轴带动上试件钢球作水平往复运动, 下试件圆盘固定不动, 往复运动的行程和频率可调。试验结束后, 利用扫描电镜对 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层和 GCr15 基体的磨痕形貌进行观察。采用三维白光干涉表面形貌仪 (NeXView, 翟柯莱姆达公司) 对磨痕进行分析, 并测量相应的磨损体积。材料的磨损率用单位载荷单位滑动距离的磨损体积表示。

## 2 结果及分析

### 2.1 涂层成分与微观形貌

图 1a 是涂层的表面形貌图。从图中可以看出, 涂层微观表面较为粗糙, 存在显微微孔, 但无微裂纹等微观缺陷。从图 1b 可以看出, 涂层和基体结合界面良好, 有过渡层, 涂层厚度约为 4~6  $\mu\text{m}$ 。由图 1c 可知, 涂层主要由 Cr、C 和 Fe 元素组成, 结合图 1d 的 XRD 图谱可以看出, 涂层主要包含 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 和

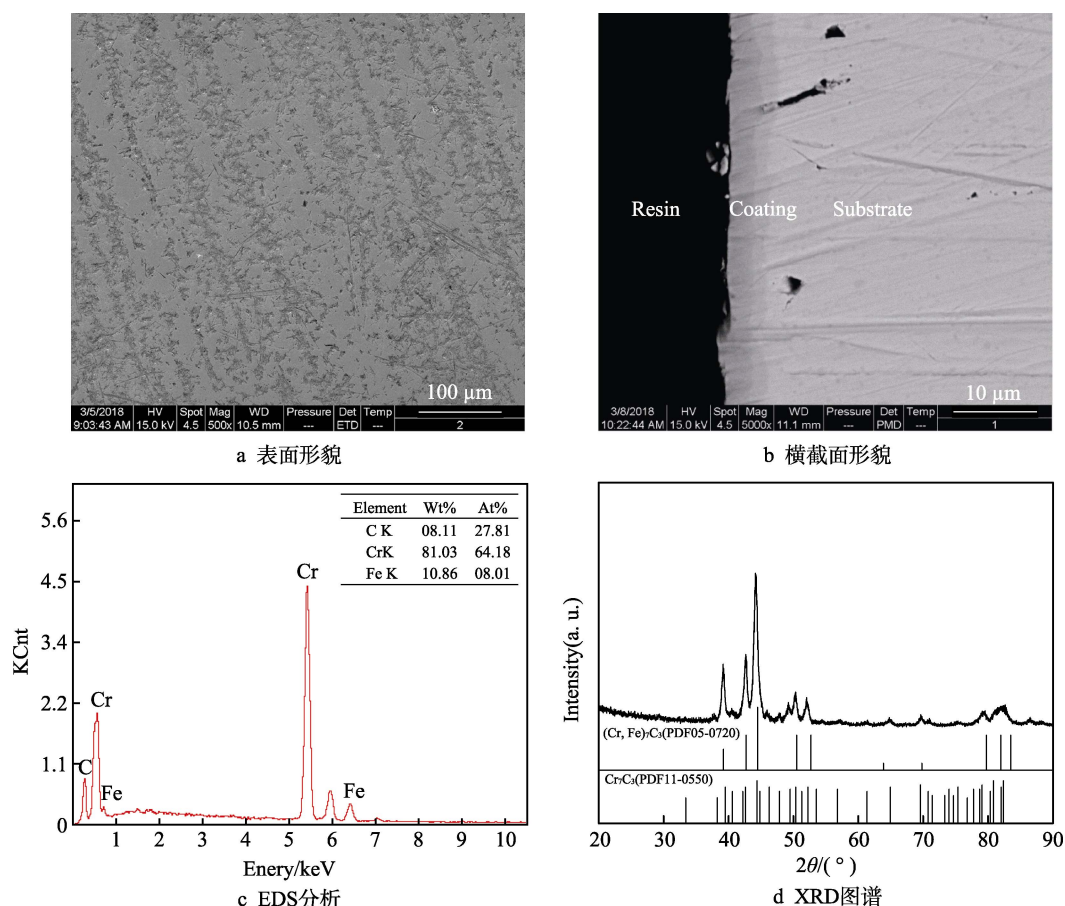


图 1 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 样品的形貌图、EDS 分析和 XRD 图谱

Fig.1 Surface morphology (a), cross-sectional morphology (b), EDS analysis (c) and XRD spectrum (d) of sample

(Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 两种相。这是因为在涂层制备过程中，C 元素进入 Cr 的体心立方晶格中，使其晶体结构发生畸变，从而形成了 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 结构，原子间通过 Cr—C 键结合<sup>[22]</sup>。同时在化学气相沉积过程中，具有复杂六方点阵结构的 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 溶解了来自基体的 Fe 原子，Fe 原子固溶到 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 晶格中，占据 Cr 的晶格位置，以化合物 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (M=Fe,Cr) 形式存在，生成具有密排六方点阵结构的(Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>。

2.2 材料显微硬度

硬度是衡量材料耐磨性的重要指标之一。在加载

过程中，给压头施加载荷，使其压入材料表面，压入深度随着载荷的增加而增加，当载荷达到设置的最大值时，移除载荷。通过连续的加载、卸载及载荷-位移曲线，可得材料的硬度指标<sup>[23]</sup>。表 2 为两种材料的显微硬度测量结果。由表 2 数据可知，Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层显示出较高的显微硬度，最高可达 24.413 GPa，平均硬度为 22.709 GPa，约为 GCr15 基体平均硬度（11.198 GPa）的 2 倍。由此可见，Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层可以有效地提高斜撑块表面的硬度，改善材料表面的力学性能，这对于延长斜撑块在高副接触条件下的服役寿命具有重要意义。

表 2 材料表面硬度测量结果  
Tab.2 Test results of surface hardness

Materials	Hardness/GPa						Mean/GPa
	1	2	3	4	5	6	
Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	24.413	21.911	21.991	22.302	23.373	22.265	22.709
GCr15	11.346	11.214	11.164	10.332	10.902	12.234	11.198

2.3 摩擦磨损特性

图 2 为 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层和 GCr15 基体在不同载荷及不同滑动速度下的摩擦磨损特性变化关系图。由图 2 分析知，在实验参数下，Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层的摩擦系数在 0.18~0.24，GCr15 的摩擦系数在 0.15~0.20，两种材料的摩擦系数均随着载荷的增大而减小。当载荷从 20 N 增大到 40 N 时，两种材料的摩擦系数下降均比较明显。而载荷从 40 N 增大到 60 N 时，摩擦系数下降得较为缓慢。由图 2b 可以看出，当滑动速度为 100 mm/s 时，载荷从 20 N 增大到 40 N，Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层和 GCr15 的摩擦系数下降率分别为 10.93%和 8.03%；而载荷从 40 N 增大到 60 N，下降率分别为 6.05%和 1.99%。

当载荷增加时，随着摩擦的进行，摩擦表面的微凸体发生了变形，使得摩擦接触面积增大。由于两种材料均具有较高的硬度，使得法向载荷增加的比例大

于剪切强度和摩擦副接触面积增加的比例之积，因此摩擦副的摩擦系数随着载荷的增加而减小<sup>[24]</sup>。相同试验条件下，Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层的摩擦系数都高于基体 GCr15。通过三维白光形貌仪测量两种材料表面未磨损区域的粗糙度发现，带涂层的样件表面粗糙度（Ra）平均值为 0.11 μm，大于无涂层样件的表面粗糙度（Ra=0.07 μm）。带有涂层的材料表面粗糙峰多，使得摩擦副在相对滑动时的阻力增大，因而摩擦系数更大。但由于涂层表面的显微硬度更大，因此粗糙峰很难被磨损，磨损更轻。

图 3 是滑动速度为 100 mm/s 时，不同载荷条件下 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层和 GCr15 的整体磨痕形貌。可以看出，随着载荷的增加，GCr15 的磨痕形貌变化比 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层明显很多，尤其是磨痕深度变化非常显著。通过测量计算，载荷为 60 N 时，Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层的最大磨痕深度约为 0.62 μm，GCr15 的磨痕深度为 4.9 μm，且由图

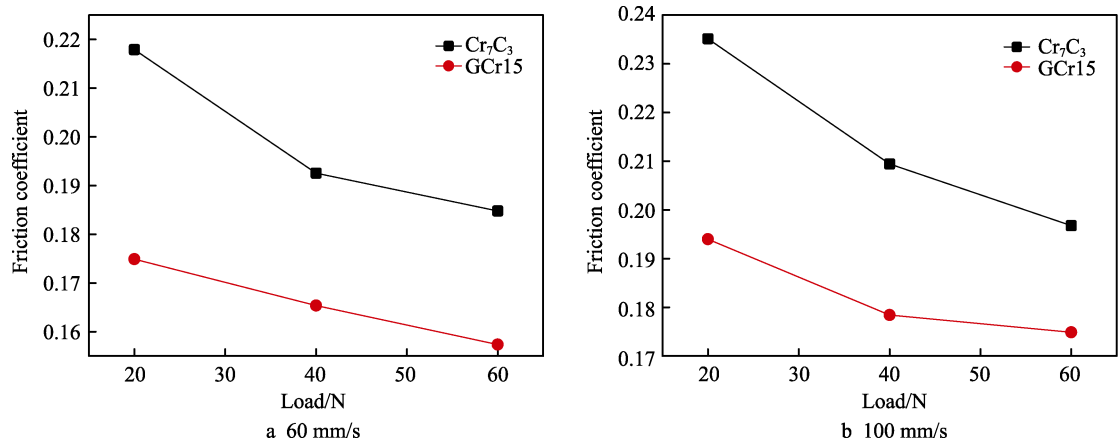


图 2 不同载荷及不同滑动速度下 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 涂层和 GCr15 的摩擦系数  
Fig.2 Friction coefficient of Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> coating and GCr15 at different loads and different sliding speed



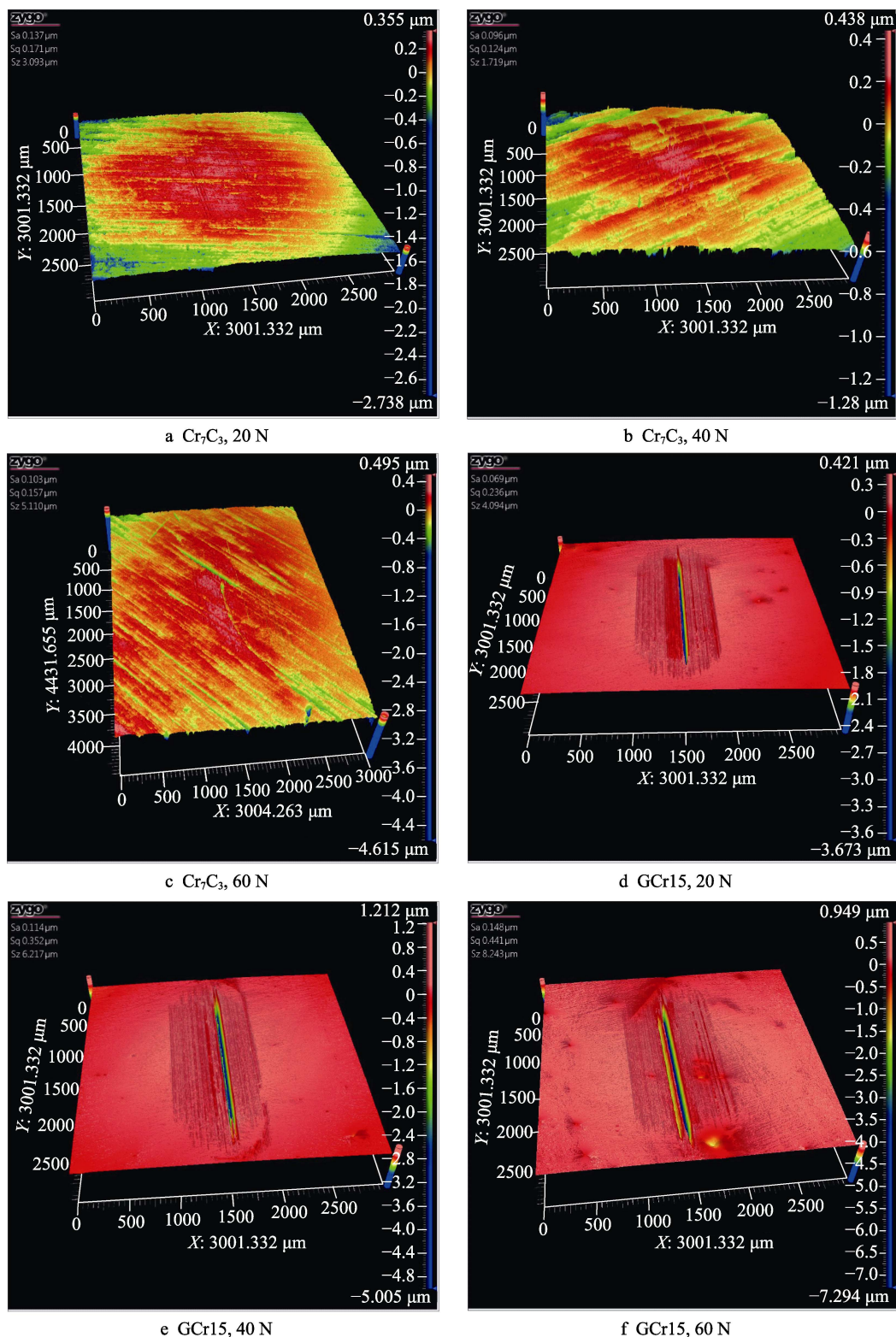


图3 不同载荷下  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层和 GCr15 表面磨痕形貌的三维白光干涉图像  
Fig.3 Three-dimensional white-light interference images of wear scar morphology of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating and GCr15 at different loads

3f可以看出, GCr15 基体上有两道比较深的磨痕。

两种材料在试验条件下的磨损率对比结果如图4所示。由图4分析计算可得,当滑动速度为 60 mm/s,法向载荷为 20、40、60 N 时, GCr15 基体的磨损率约是  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的 4~6 倍;且载荷为 20 N 时, GCr15

和  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的磨损率均为最大值,分别是  $46.6 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 、 $10.4 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。GCr15 的磨损率最小值在法向载荷为 60 N 时取得,为  $28.3 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。当滑动速度为 100 mm/s 时, GCr15 基体的磨损率约是  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的 7~11 倍。涂层的磨

损率随着载荷的变化而增大,当法向载荷为 20 N 时,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的磨损率最小,约为  $2.76 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。当载荷为 60 N 时, GCr15 基体的磨损率最大,约为  $37.0 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

## 2.4 磨损表面形貌和磨削分析

在滑动速度为 100 mm/s, 法向载荷为 60 N 时,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层和 GCr15 的磨痕形貌如图 5 所示。由图 5b 可以看出, GCr15 材料表面犁沟密集, 基本覆盖整个

磨损区域, 宽度大, 深度也较大, 磨损机理为典型的犁沟磨损。从图 5c 和图 5d 可以看出,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层因制备操作原因, 表面出现孔洞, 但  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的摩擦磨损界面基本完好, 涂层表面仅有断断续续不太明显的犁沟, 宽度窄, 深度浅, 犁沟密集程度较低。涂层磨损表面的粘着现象严重, 这是因为  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层组织主要由  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  和  $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$  两种硬质相组成, 在磨损过程中, 涂层中的硬质相会加剧上试样对偶钢球的磨损, 使得上试样在磨损过程中产生较多的块状磨屑,

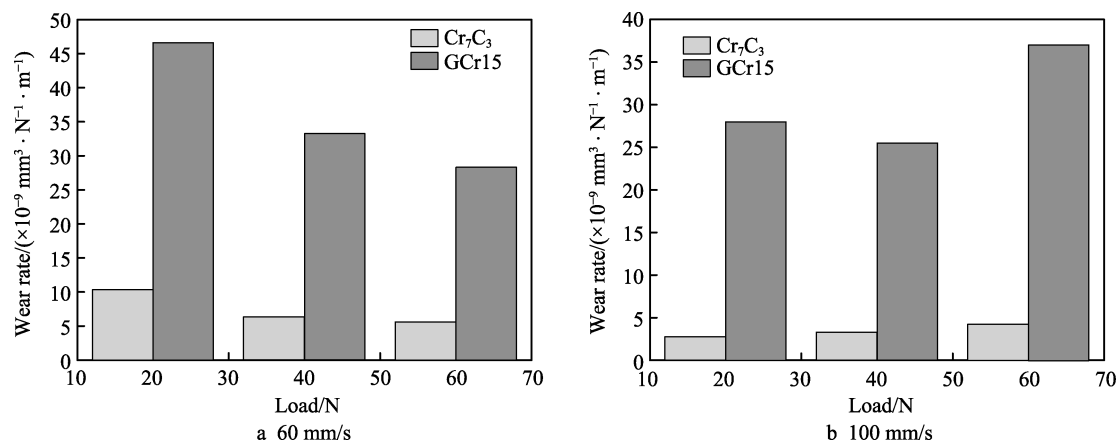


图 4 不同滑动速度下  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层和 GCr15 的磨损率  
Fig.4 Wear rates of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating and GCr15 at different sliding speed

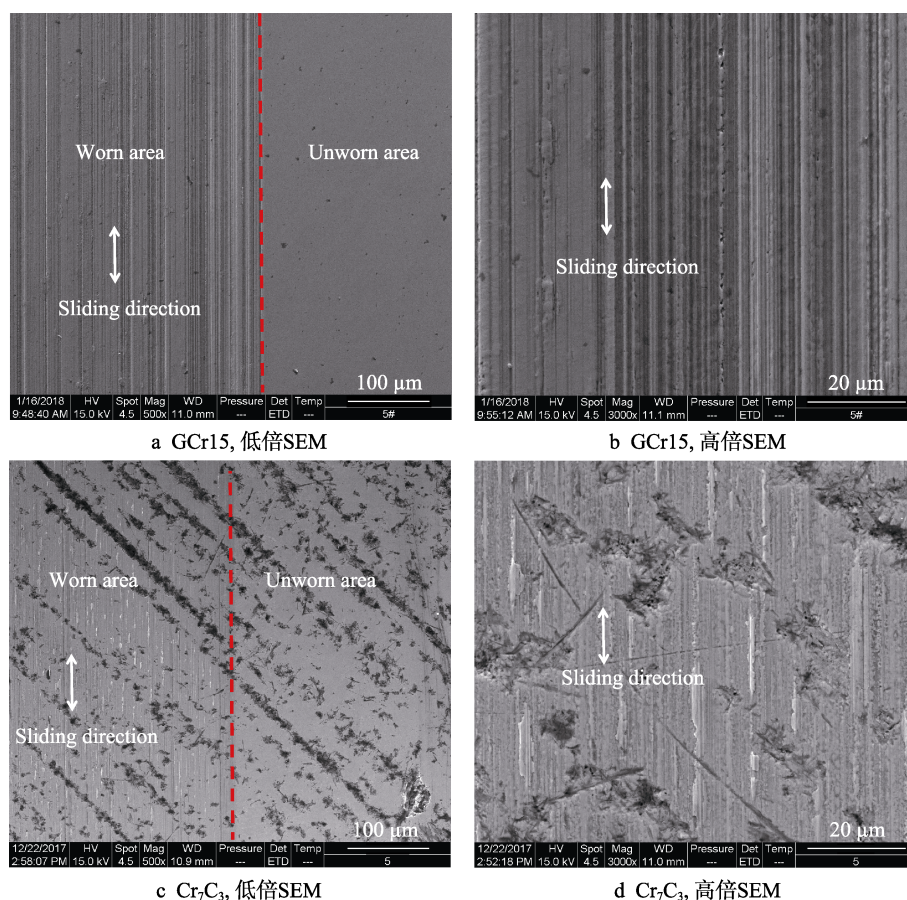


图 5 GCr15 材料和  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层磨损后的磨痕形貌  
Fig.5 SEM micrographs of worn surfaces of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  coating and GCr15

在法向载荷的作用下粘附在  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层表面。由于两种硬质相都具有较高的硬度,能够抵抗对偶钢球的压入,因此划痕很浅。 $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的磨损机理除了犁沟磨损以外,还有一定的疲劳磨损。

### 3 结论

1) 利用化学气相沉积技术在 GCr15 基体表面制得了  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层,涂层和基体结合紧密,结合处有过渡层,结合界面较完整,没有明显的孔隙等缺陷。涂层厚度约为  $4\sim 6\ \mu\text{m}$ ,涂层组织主要由  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  和  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$  两种相组成。GCr15 的显微硬度为 11.198 GPa,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的显微硬度为 22.709 GPa,约为 GCr15 基体的 2 倍。

2) 在试验参数条件下,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的摩擦系数在 0.18~0.24, GCr15 基体的摩擦系数在 0.15~0.20 之间。两种材料的摩擦系数均随着法向载荷的增大而减小。

3) 当滑动速度为 60 mm/s,法向载荷为 20 N~60 N 时, GCr15 的磨损率约是  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的 4~6 倍;当滑动速度为 100 mm/s 时, GCr15 基体的磨损率约是  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的 7~11 倍。 $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层表现出优异的耐磨减摩特性,有助于改善基体的耐磨性能和斜撑式超越离合器的使用性能。在实验条件下,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  涂层的磨损机理主要为犁沟磨损和疲劳磨损; GCr15 的磨损机理为典型的犁沟磨损。

### 参考文献:

- [1] 李慎华, 陈怀刚. 斜撑式超越离合器楔角的计算分析[J]. 轴承, 2011(4): 1-3.  
LI Shen-hua, CHEN Huai-gang. Calculation and analysis on wedge angle of sprag overrunning clutch[J]. Bearing, 2011(4): 1-3.
- [2] 孔炜, 朱春梅. 高转速楔块式超越离合器研究[J]. 轻工机械, 2009, 27(6): 79-81.  
KONG wei, ZHU Chun-mei. Study of the high-speed sprag overrunning clutch[J]. Light industry machinery, 2009, 27(6): 79-81.
- [3] 顾俊, 严宏志, 朱自冰, 等. 斜撑式超越离合器楔块的曲线拟合及寿命预测[J]. 现代制造工程, 2009(3): 79-82.  
GU Jun, YAN Hong-zhi, ZHU Zi-bing, et al. Contact stress analysis of sprag overrunning clutch and life prediction[J]. Modern manufacturing engineering, 2009(3): 79-82.
- [4] 杨林, 曾献智, 张亭亭, 等. 超越离合器的磨损研究[J]. 机械研究与应用, 2008(2): 21-23.  
YANG Lin, ZENG Xian-zhi, ZHANG Ting-ting, et al. Abrasion research of overrunning coupler[J]. Mechanical research & application, 2008(2): 21-23.
- [5] 严宏志, 叶辉, 陈新宇, 等. 超越弹簧离合器的摩擦磨损特性分析[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(4): 630-635.  
YAN Hong-zhi, YE Hui, CHEN Xin-yu, et al. Analyzing friction and wear characteristics of overrunning spring clutch[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2016, 35(4): 630-635.
- [6] 严宏志, 顾俊, 何明生. 强制连续约束超越离合器楔块疲劳寿命分析及楔块结构优化[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(11): 1965-1967, 1972.  
YAN Hong-zhi, GU Jun, HE Ming-sheng. Fatigue life analysis and structural optimization of PCE clutch sprag[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2011, 30(11): 1965-1967, 1972.
- [7] 严宏志, 杨兵, 胡魁贤, 等. 不同摩擦条件对强制连续约束型离合器工作性能的影响[J]. 机械工程学报, 2010, 46(17): 86-92.  
YAN Hong-zhi, YANG Bing, HU Kui-xian, et al. Working performance analysis of positive-continuous-engagement type clutch in different friction conditions[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(17): 86-92.
- [8] 盖小涛, 赵永强, 刘明. 强制连续型超越离合器弹出现象研究[J]. 机械传动, 2017, 41(9): 106-110.  
GAI Xiao-tao, ZHAO Yong-qiang, LIU Ming. Research of the POP-in and out phenomenon of PCE overrunning clutch[J]. Journal of mechanical transmission, 2017, 41(9): 106-110.
- [9] 朱楚. 高速斜撑超越离合器设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
ZHU Chu. Research on design method of high speed sprag overrunning clutch[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [10] 朱楚, 朱如鹏, 靳广虎. 对斜撑超越离合器力学性能的影响分析[J]. 机械制造与自动化, 2012, 41(5): 11-13, 20.  
ZHU Chu, ZHU Ru-peng, JIN Guang-hu. Analysis of effects on mechanical properties of sprag overrunning clutch[J]. Machine building & automation, 2012, 41(5): 11-13, 20.
- [11] 李慎华, 郭鑫, 韩涛, 等. 离心接合型超越离合器磨损特性分析及解决方法[J]. 轴承, 2016(4): 43-45.  
LI Shen-hua, GUO Xin, HAN Tao, et al. Analysis and solution for wear characteristics of centrifugal engagement type overrunning clutch[J]. Bearing, 2016(4): 43-45.
- [12] 李继锋, 宗晓明, 李泽强. 斜撑式超越离合器用楔块的分类及成型方法[J]. 制造技术与机床, 2015(7): 157-160.  
LI Ji-feng, ZONG Xiao-ming, LI Ze-qiang. Processing methods and classification of sprag in overrunning clutch[J]. Manufacturing technology & machine tool, 2015(7): 157-160.
- [13] VERNAY P, FERRARIS G, DELBEZ A, et al. Transient behaviour of a sprag-type over-running clutch: An experimental study[J]. Journal of sound and vibration, 2001, 248(3): 567-572.

- [14] PEEKEN H J, GOLD P W. Couplings and clutches state of the art[J]. Vdiberichte, 1996, 1230: 47-62.
- [15] XU T, LOWEN G G. A mathematical model of an over-running sprag clutch[J]. Mechanism & machine theory, 1994, 29(1): 11-23.
- [16] 刘开琪, 徐强, 张会军. 金属陶瓷的制备与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.  
LIU Kai-qi, XU Qiang, ZHANG Hui-jun. Preparation and application of metal ceramic[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [17] 高峰, 徐红艳, 马尧. 超音速火焰喷涂  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ -NiCr、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ -Ni 涂层性能研究[J]. 粉末冶金技术, 2014, 32(5): 335-337.  
GAO Feng, XU Hong-yan, MA Yao. Study on the properties of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ -NiCr and  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ -Ni coatings deposited by HVOF processes[J]. Powder metallurgy technology, 2014, 32(5): 335-337.
- [18] 孙万昌, 张磊, 张晗, 等. 金属表面复合层研究进展[J]. 热加工工艺, 2011, 40(16): 75-77.  
SUN Wan-chang, ZHANG Lei, ZHANG Han, et al. Research progress of composite coating on metal substrate[J]. Hot working technology, 2011, 40(16): 75-77.
- [19] 谢涛, 王杰, 段可, 等. 化学气相沉积法制备  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层及其性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 178-180.  
XIE Tao, WANG Jie, DUAN Ke, et al. Study on preparation and properties of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ceramic coating by chemical vapor deposition[J]. Hot working technology, 2015, 44(4): 178-180.
- [20] 焦星星, 桑可正, 王凡, 等. 化学气相沉积铜涂层及其对氧化铝复相陶瓷/铁复合材料界面的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(6): 135-139.
- JIAO Xing-xing, SANG Ke-zheng, WANG Fan, et al. Effects of coating by chemical vapor deposition copper on interface bonding of alumina composite ceramic/iron composite[J]. Hot working technology, 2017, 46(6): 135-139.
- [21] 黎宪宽, 陈力, 蔡宏中, 等. 化学气相沉积技术及在难熔金属材料中的应用[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(S1): 438-443.  
LI Xian-kuan, CHEN Li, CAI Hong-zhong, et al. Chemical vapor deposition technology and its application in refractory metal materials[J]. Rare metal materials and engineering, 2010, 39(S1): 438-443.
- [22] 贾贵西, 李言, 袁启龙, 等. 磁控溅射制备  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  多层复合镀层及其耐磨性能[J]. 中国机械工程, 2011, 22(3): 363-366.  
JIA Gui-xi, LI Yan, YUAN Qi-long, et al. Preparation and wear resistance performance of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  multilayer composite coatings by magnetron sputtering[J]. China mechanical engineering, 2011, 22(3): 363-366.
- [23] 房金铭, 冯志海, 张中伟. 热解碳微观结构调控与纳米压痕测试[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 82-87.  
FANG Jin-ming, FENG Zhi-hai, ZHANG Zhong-wei. Micro-structure control of pyrocarbon and nano indentation test[J]. Equipment engineering, 2016, 13(3): 82-87.
- [24] 李奇, 王宪成, 蔡志海, 等. 重型车辆发动机电镀 Cr 活塞环的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 91-97.  
LI Qi, WANG Xian-cheng, CAI Zhi-hai, et al. Tribological property of plated Cr piston ring for heavy vehicle engine[J]. China surface engineering, 2013, 26(1): 91-97.