

等离子喷涂制备 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 自润滑 耐磨涂层及其高温摩擦性能

袁建辉¹, 祝迎春², 雷强¹, 占庆¹, 黄晶¹, 丁思月¹

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江宁波 315201; 2. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘要: 通过大气等离子喷涂方法, 使用自制的含有 WC-Co、Cu 和 BaF₂/CaF₂ 共晶体的复合喷涂粉末, 制备出 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 自润滑耐磨涂层。在 200 °C、400 °C 和 600 °C 下进行 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层和 WC-Co 涂层的高温摩擦试验, 用扫描电镜观察涂层磨损表面微观形貌。结果表明: 200 °C 时, 由于 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层摩擦产物层中含有的 WC 硬质颗粒引起磨粒磨损, 该涂层摩擦因数和磨损率相对较高。而 400 °C 和 600 °C 时, WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的摩擦产物层中均无 WC 颗粒存在, 且由于涂层中 Cu 和 BaF₂/CaF₂ 等固体润滑剂的作用, 生成的摩擦产物层光滑且致密, 涂层的摩擦因数和磨损率均较低, 在 400~600 °C 下表现出比 WC-Co 涂层优异的耐磨性能。

关键词: 等离子喷涂; 自润滑; 高温摩擦; 磨损机理

中图分类号: TG174.442; TG115.58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)02-0031-06

Fabrication and High Temperature Tribological Properties of Plasma Sprayed WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ Self-lubricating Wear Resistant Coatings

YUAN Jian-hui¹, ZHU Ying-chun², LEI Qiang¹, ZHAN Qing¹, HUANG Jing¹, DING Si-yue¹

(1. Ningbo Institute of Material Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo Zhejiang 315201; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract: WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ self-lubricating wear resistant coating was deposited by atmospheric plasma spraying (APS) process using homemade feedstock powders composed of WC-Co, Cu and BaF₂/CaF₂ eutectic. The high temperature tribological properties of the WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ and WC-Co coatings were investigated at 200 °C, 400 °C and 600 °C. Microscopic observation of the coatings after wear was performed using SEM. It is found that the hard WC particles in the triboreaction layers of WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ coating induce abrasive wear and result in higher friction coefficient and wear rate at 200 °C. The triboreaction layers without any hard WC particles were formed in 400 °C and 600 °C wear tests. With the help of Cu and BaF₂/CaF₂ eutectic which acted as solid lubricants in the coating, the triboreaction layers became smooth and compact. Lower friction coefficient and wear rate of WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ coating were achieved at these temperatures. The wear resistant behavior of WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ coating was superior to that of WC-Co coating at relatively high temperature (400~600 °C).

Key words: plasma spraying; self-lubricating; high temperature tribological; wear mechanism

收稿日期: 2011-10-26; 修回日期: 2012-03-23

作者简介: 袁建辉(1981—), 男(汉), 湖南益阳人, 博士生; 研究方向: 热喷涂功能涂层

网络出版日期: 2012-03-27 22:08; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120327.2208.002.html>

引文格式: 袁建辉, 祝迎春, 雷强, 等. 等离子喷涂制备 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 自润滑耐磨涂层及其高温摩擦性能 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 31-36

0 引言

当今科技的发展特别是各国对航天技术和空间技术的高度重视,迫切需要研究开发出在高温及苛刻环境下具有良好摩擦性能的结构材料^[1]。一般的润滑油脂在高温环境下容易蒸发,传统的润滑方式已无法满足高温极端条件下摩擦副的润滑要求,因而需要运用高温固体润滑技术发展新一代耐高温抗磨材料,以及与之相适应的润滑材料和新型耐高温润滑剂^[2-3],以解决宇航、热动力机械和金属热加工等领域高温条件下的润滑问题。Sloney^[4]曾经指出,在1000℃或更高温度下,应当使用自润滑金属陶瓷和无机复合材料。其中等离子喷涂金属陶瓷涂层由于同时具有高硬度、低比重、耐高温、耐腐蚀和高韧性、易加工等优良特性,日益受到人们的重视^[5-6]。

文中采用大气等离子喷涂方法制备了 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 自润滑耐磨金属陶瓷涂层,涂层的高温摩擦磨损特性是其作为工程应用材料的关键性指标,因此,采用高温摩擦磨损试验机对比考察了 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层和 WC-Co 涂层与不锈钢球对偶件在不同温度下的摩擦磨损性能,并分析了这种自润滑耐磨涂层的高温摩擦磨损机理,期望为这种涂层的应用提供试验依据。

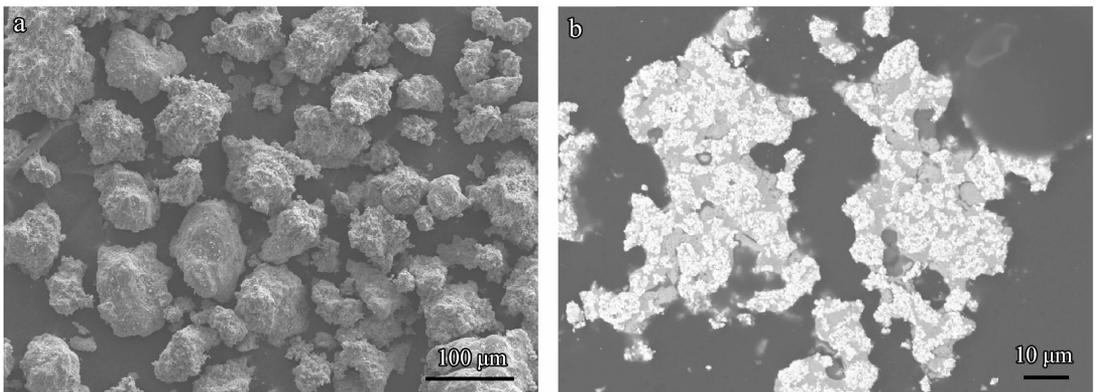
1 试验材料与方法

1.1 试验材料

原料粉末为碳化钨钴(WC-Co)粉末(成都大光热喷涂材料有限公司),其平均粒度为15~45 μm,Co含量为12%(质量分数),余量为WC。铜粉平均粒度为15~50 μm(中国医药集团化学试剂有限公司)。氟化钡/氟化钙(BaF₂/CaF₂)共晶体粉末平均粒度1~6 μm(上海恩莱保贸易有限公司)。以Q235低碳钢板为喷涂基材,尺寸为Φ50 mm×6 mm。为增强涂层与基体之间的结合强度,等离子喷涂前采用SiC砂粒对喷涂基材表面进行喷砂预处理,预处理后,2 h内进行大气等离子喷涂。

1.2 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 复合粉体的制备

将 WC-Co 粉、Cu 粉和 BaF₂/CaF₂ 共晶体粉末按质量比 8:1:1 的比例混合,在无水乙醇介质中进行球磨,球磨转速为 150 r/min,混合时间为 36 h。混合粉末在 60℃ 下烘干后于真空中烧结,烧结温度为 1 100℃,恒温时间为 2 h。将烧结后块体破碎过筛形成粉体,其粒径不大于 75 μm。所得复合粉体的表面和截面 SEM 形貌分别如图 1 所示,以该复合粉体作为等离子喷涂的原料。



(a) Surface (b) Polished cross-section

图1 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 复合粉体 SEM 形貌

Fig. 1 SEM images of WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ composite powder

1.3 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的制备

等离子喷涂系统由 Sulzer Metco 公司的 F4-MB 型等离子喷枪安装在 ABB 公司 S3 型机械手臂上组成。采用该系统制备 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层时,以氩气和氢气分别作为主气

和辅气,同时以氩气为送粉气。调整喷涂相关参数,同时控制喷涂时间和次数,使得所制备涂层厚度为 100~500 μm。文中采用优化后的喷涂参数如表 1 所示。制得的涂层依次使用不同粒径的 Al₂O₃ 磨料进行表面研磨,并用金刚石研磨膏抛光至表面粗糙度 Ra=0.5 μm。

表 1 大气等离子喷涂 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层喷涂参数Table 1 The atmospheric plasma spraying parameters for WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ coating

Current /A	Voltage /V	Ar flowrate /(L·min ⁻¹)	H ₂ flowrate /(L·min ⁻¹)	Powder feedrate /(r·min ⁻¹)	Spraying distance /mm
400	55	50	3	14	100

1.4 涂层性能测试

摩擦磨损试验在 UMT 多功能摩擦磨损测试仪上进行,采用电炉将涂层样品加热至指定温度,通过球-盘接触方式测试涂层高温下摩擦磨损性能。试验所用对磨球为 302 不锈钢球,硬度为 39 HRC,直径为 10 mm。其他试验参数如下:试验载荷 10 N,滑动线速度 0.5 m/s,摩擦时间 20 min,摩擦行程 600 m。采用 HOMMEL WERKE, T8000 型表面轮廓仪测出磨痕截面积,截面积与磨痕周长相乘得出磨损体积,磨损率由公式(1)计算得出,摩擦因数和磨损率值均取 5 次重复试验的平均值。

$$W = \frac{\Delta V}{FL} \quad (1)$$

式中:W—磨损率; ΔV —磨损体积;F—正压力;L—摩擦行程。

在 JEOL JXA-8100 扫描电镜(SEM)上观察涂层磨损后表面形貌,并利用扫描电镜上配备的能谱仪(EDS)进行能谱定点分析。

2 试验结果与分析

2.1 涂层高温摩擦性能

分别测试了 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 复合涂层和 WC-Co 涂层在 200 °C、400 °C 和 600 °C 下的摩擦因数和磨损率,3 个温度点的摩擦因数平均值如图 2 所示。可以看出,在较低温度范围内(200~400 °C),WC-Co 涂层的平均摩擦因数随温度的增加有降低的趋势(从 0.41 降至 0.33),而在高温范围内(400~600 °C),平均摩擦因数随温度的增加而上升,特别是在 600 °C 时,平均摩擦因数最高达 0.43 左右,且高温下摩擦性能极不稳定,摩擦因数有较大波动。相同试验条件下,添加了 Cu 和 BaF₂/CaF₂ 复合涂层的平均摩擦因数在各温度下都比 WC-Co 涂层低,表明 Cu 和 BaF₂/CaF₂ 固体润滑剂能显著改善复合涂层的高温摩擦性能。当温度由 200 °C 上升至 400 °C 时,复合涂层的平均摩擦因数有较明显的降

低(由 0.36 降低至 0.29);而当温度从 400 °C 上升至 600 °C 时,该涂层的平均摩擦因数相差不大。同时,从摩擦因数值的误差线长度可以看出,WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的摩擦因数波动较小,说明该涂层高温滑动摩擦过程较平稳。

从 200 °C 上升至 400 °C 过程中,WC-Co 涂层的磨损率变化不明显,还略有降低,但 400 °C 以上开始迅速上升,特别是 600 °C 时该涂层磨损率急剧增加,达到 $40.7 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$,约为 400 °C 时的 7 倍,如图 3 所示。同时,随着试验温

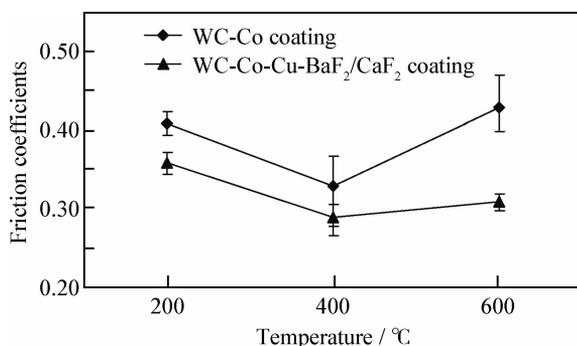


图 2 WC-Co 涂层和 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层在不同温度下的平均摩擦因数

Fig. 2 Average friction coefficients of WC-Co coating and WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ coating at different temperatures

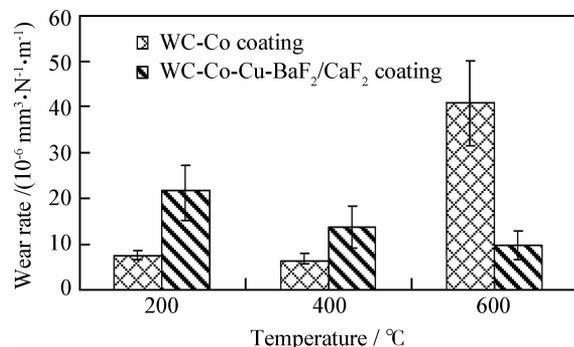


图 3 WC-Co 涂层和 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层在不同温度下的磨损率

Fig. 3 Wear rates of WC-Co coating and WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ coating at different temperatures

度的升高, WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 复合涂层的磨损量呈现逐渐下降的趋势, 表明该复合涂层具有较优异的高温耐磨性, 当温度达到 600 ℃ 时, 涂层磨损率 $9.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, 为 200 ℃ 时其磨损率的一半。可见加入 Cu 和 BaF₂/CaF₂ 固体润滑剂可以有效防止温度升高时严重磨损的发生。

2.2 涂层高温磨损表面形貌及元素分析

200 ℃ 时, WC-Co 涂层的磨损表面粗糙不平, 且存在大量较大的剥落坑和裂纹, 如图 4(a) 所示。磨损表面的剥落坑表明摩擦过程中该涂

层的扁平粒子脱落较为严重, 其磨损机理主要是发生疲劳磨损。在 400 ℃ 和 600 ℃ 下, WC-Co 涂层磨损表面未见剥落坑和裂纹, 相对较光滑平整。且 400 ℃ 下该涂层磨损表面仅存在少量细小犁沟, 如图 4(b) 所示。其机理是由涂层中硬质颗粒的微切削造成的。在 600 ℃ 时, WC-Co 涂层磨损表面的犁沟槽较 400 ℃ 时的槽要宽且深, 如图 4(c), 说明此时涂层的摩擦损失较为严重。可见, 在 400 ℃ 和 600 ℃ 时, WC-Co 涂层主要发生磨粒磨损。

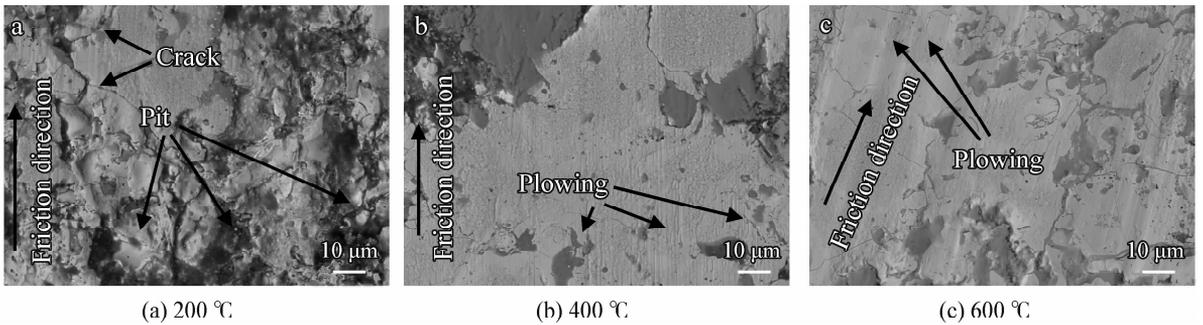


图 4 WC-Co 涂层与不锈钢球对磨试验后磨损表面 SEM 形貌

Fig. 4 SEM morphologies of worn surface of the WC-Co coating against the stainless steel at elevated temperature

与 WC-Co 涂层不同的是, WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 复合涂层在 3 个温度下的磨损表面均覆盖一层摩擦产物层, 如图 5。且在试验中用脱脂棉反复擦洗和超声波清洗均未使其脱落, 说明该摩擦产物层具有一定的强度, 与涂层表面间的结合强度较大。其中, 200 ℃ 时, WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的磨损表面沿摩擦方向分布着深浅不一、形状不规则的犁沟, 某些部位被掀起并撕裂, 且磨损表面的摩擦产物层中分布着大量细小的近等轴状颗粒, 其尺寸小于 $5 \mu\text{m}$, 如图 5(a₁)。而在 400 ℃ 和 600 ℃ 摩擦试验时的磨损表面均没有明显犁沟, 摩擦产物层中也都没有粉状颗粒存在, 同时, 该摩擦产物层均比 200 ℃ 时光滑致密(图 5(b₁) 和 (c₁)), 且 600 ℃ 时摩擦产物层覆盖的涂层表面范围比 400 ℃ 时大。

经 EDS 分析发现, 不同温度下的摩擦产物层中主要成分均为 W、Ca、Ba、F、Cu、Co、Fe 和 O (图 5(a₂) (b₂) (c₂)), 其中 W、Ca、Ba、F、Cu 和 Co 来自 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层, Fe 来自不锈钢对磨球, O 的出现表明摩擦副表面物质发生了氧化反应。进一步分析发现, 200 ℃ 的摩擦产物层中 W 和 C 的元素配比约为 1:1, 接近

WC 的原子比。结合图 5(a₁) 中观察到的白亮细小颗粒, 表明该摩擦产物层中含有大量 WC 硬质颗粒。而 400 ℃ 和 600 ℃ 的摩擦产物层中 O 含量明显提高, 且无 C 元素存在, 表明这两种摩擦产物层均发生了严重氧化, 其中无 WC 硬质颗粒存在。

2.3 涂层高温摩擦机理分析

由于大气等离子喷涂制得的 WC-Co 涂层中存在大量的孔隙和缺陷, 且由于涂层中复杂碳化物(Co₆W₆C 等)的本征脆性^[7], 200 ℃ 时 WC-Co 涂层的主要磨损破坏机理是扁平粒子的剥层脱落。在法向载荷与切向摩擦力的共同作用下在涂层近表面产生裂纹, 之后裂纹沿着扁平粒子的边界萌生和扩展, 最终导致扁平粒子的整体脱落或破碎, 呈现典型的疲劳磨损特征(图 4(a))。400 ℃ 时 WC-Co 涂层开始软化, 且在摩擦过程中由于裂纹扩展某些涂层物质与基体分离开来, 进而破碎成为磨屑。磨屑上的作用力可构成一力偶来使其滚动, 此时涂层的磨损主要表现为磨粒磨损^[8](图 4(b))。这种第三体颗粒在摩擦表面滚动有利于降低摩擦因数, 这也是 400 ℃ 时 WC-Co 涂层的摩擦因数和磨损率都较低的原因。随

着温度的升高, 600 °C 时 WC-Co 涂层中的热应力急剧增大, 涂层中裂纹迅速扩展, 产生大量的磨屑, 磨粒磨损十分剧烈, 在涂层表面形成深且宽的犁沟(图 4(c)), 导致涂层摩擦因数和磨损率又急剧上升。可见, 随着温度的升高, WC-Co 涂层的磨损机制由疲劳磨损转化为磨粒磨损。

与 WC-Co 涂层不同, WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的磨损表面均覆盖一层摩擦产物层(图 5)。由上述分析结果可知, 在滑动摩擦磨损过程中摩擦产物层经过以下两个阶段而形成^[9]:

(1) 磨屑的破碎和氧化。留在滑动磨损轨道上比较粗大的磨屑在对磨球的反复碾压作用下发生塑性变形并逐渐破碎、细化, 成为球形的小颗粒。这些小颗粒在摩擦过程中将发生动态氧化, 最终形成了氧化物粉末。

(2) 氧化物粉末的挤压粘结。在载荷(在磨损表面将产生等静压力)与高温(环境温度和摩擦闪温)的共同作用下, 粉状氧化物之间发生挤压变形而粘结形成致密的氧化物层。

可见, 该摩擦产物层高温下具有较高的可塑性和附着性, 能隔绝涂层与对磨球的直接接触和焊合, 起到高温润滑剂的作用^[10], 有助于降低摩

擦副的摩擦和磨损, 这也是相同试验条件下, WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的摩擦因数在各温度下均低于 WC-Co 涂层的主要原因。

另一方面, EDS 分析表明: 200 °C 时 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的摩擦产物层中含有大量 WC 硬质颗粒。由于碳化钨颗粒的存在, 将导致该温度下涂层出现磨粒磨损, 同时也使摩擦产物层与涂层的热膨胀系数差加大, 加速了覆盖在磨损表面上的摩擦产物层的开裂和脱落, 使 200 °C 时 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的摩擦因数和磨损率相对较大。而 WC 的开始氧化温度约为 400 °C^[11], 因而在 400 °C 和 600 °C 摩擦试验中, WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的摩擦产物层中均无 WC 颗粒存在。再加上涂层自身含有的 Cu 和 BaF₂/CaF₂ 等固体润滑剂在摩擦产物层中的作用, 生成了光滑且致密的摩擦产物层, 所以此时 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的摩擦因数和磨损率均较低。600 °C 时, WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层中材料的分解以及氧化物的形成达到一个动态的平衡, 此时涂层的磨损主要表现为氧化磨损, 摩擦因数比 400 °C 时有少许上升, 磨损率却有所下降。可见, WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层高温下磨损形式主要为氧化磨损。

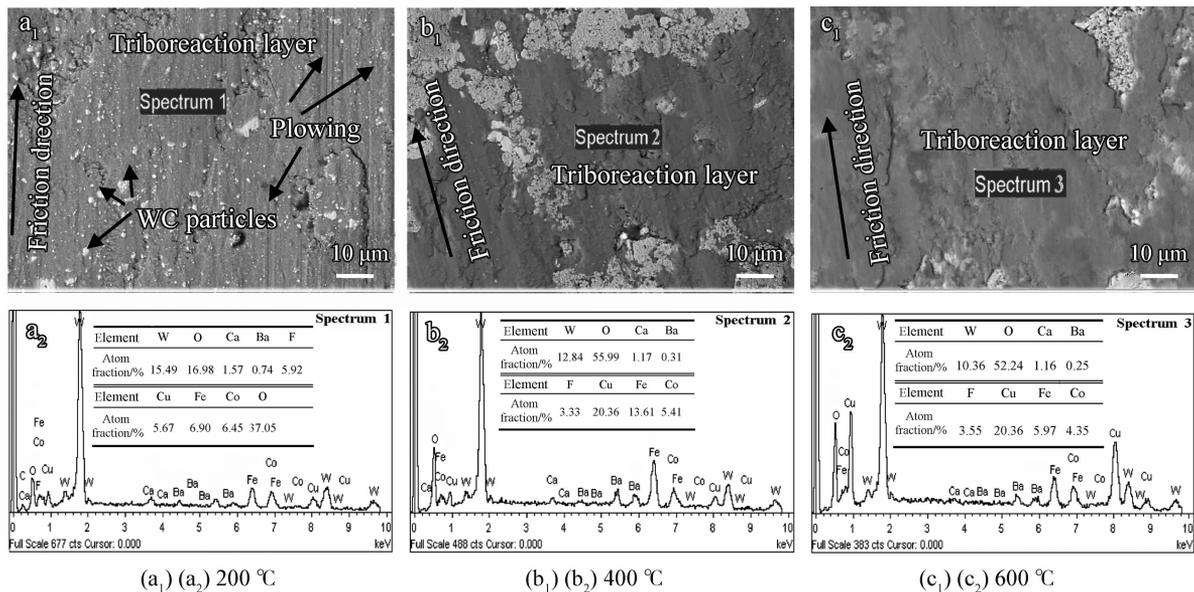


图 5 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层与不锈钢球对磨试验后磨损表面情况 (a₁)、(b₁)、(c₁) 和摩擦产物层的 EDS 分析 (a₂)、(b₂)、(c₂)

Fig. 5 Worn surface of the WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ coating against the stainless steel (a₁), (b₁), (c₁) and EDS of the tribofilm (a₂), (b₂), (c₂)

3 结 论

(1) WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的平均摩擦因数在各温度下都比 WC-Co 涂层低。随着试验温度的升高, WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层的磨损量呈现出逐步下降的趋势, 600 ℃ 时该涂层磨损率下降至 200 ℃ 时磨损率的 50%。

(2) WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层在不同温度下磨损表面覆盖的摩擦产物层在高温下具有较高的可塑性和附着性, 起到高温润滑剂的作用。

(3) WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 涂层在高温下主要发生氧化磨损, 其高温抗磨性能比 WC-Co 涂层显著提高, 在高温摩擦领域极具实用价值。

参考文献

- [1] 杨丽颖, 刘佐民. TiAl 基金成分对其高温摩擦学性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2006, 30(11): 1-3.
- [2] Cranmer D C. Ceramic tribology, needs and opportunities [J]. Tribol. Trans., 1988, 31: 164-173.
- [3] DellaCorte C, Wood J C. High temperature solid lubricant materials for heavy duty and advanced heat engines [J], NASA TM, 1994, 106570: 239-253.
- [4] Sliney H E. Solid Lubricants, Metals Handbook, Friction, lubrication, and wear technology [J]. ASM International, 1993, 18: 113-122.

- [5] Yin Zhijian, Tao Shunyan, Zhou Xiaming, et al. Tribological properties of plasma sprayed Al/Al₂O₃ composite coatings [J]. Wear, 2007, 263: 1430-1437.
- [6] Lin X H, Zeng Y, Ding C X, et al. Tribological behaviour of nano-structured Al₂O₃-3 % TiO₂ coating against steel in dry sliding [J]. Tribol Lett, 2004, 17: 19-26.
- [7] Yuan Jianhui, Zhu Yingchun, Zheng Xuebing, et al. Improvement in tribological properties of plasma-sprayed WC-Co coating followed by Cu electrochemical impregnation [J]. Applied Surface Science, 2009, 255: 7959-7965.
- [8] 安家财, 杜三明, 肖宏滨, 等. 等离子喷涂 ZrO₂/Al₂O₃ 陶瓷涂层的摩擦磨损性能 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(1): 20-24.
- [9] Yuan Jianhui, Zhu Yingchun, Zheng Xuebing, et al. Fabrication and evaluation of atmospheric plasma spraying WC-Co-Cu-MoS₂ composite coatings [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 2576-2581.
- [10] 高永建, 张世堂, 邓智昌, 等. 激光熔覆高温自润滑覆层的摩擦学特性 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(1): 51-56.
- [11] 孙成琪, 安连彤, 傅迎庆, 等. 喷涂工艺对低能等离子喷涂 WC-Co 的涂层硬度与微观结构的影响 [J]. 中国表面工程, 2007(2): 51-54.

作者地址: 宁波市镇海区庄市大道 519 号 315201
Tel: (0574)8668 5036
E-mail: yuanjh@nimte.ac.cn

• 常务副理事长单位介绍 •

全军装备维修表面工程研究中心简介

全军装备维修表面工程研究中心(以下称“中心”)成立于 1991 年,是在总部领导下为全军装备维修服务的高科技组织,也是国内最早系统开展表面工程技术研究的单位之一,挂靠在装甲兵工程学院。“中心”深入贯彻“主题主线”的战略思想,以科学发展观为指导,以提高我军战斗力为标准,努力研究开发和推广表面工程新技术,加强军内外的学术交流与合作,促进表面工程学科发展,不断提高我军的装备维修水平,为我军装备现代化服务。

“中心”下设低温离子硫化实验室、铝合金表面陶瓷化实验室、表面纳米化强化实验室、复合材料损伤修复实验室、无电焊接技术实验室等 10 余个专业实验室,拥有数十台(套)先进的检测分析仪器及工艺设备,具备良好的科研试验硬件条件,能有效地支撑装备维修和战场抢修技术预先研究、新技术新材料研发以及先进成果的推广应用。

“中心”拥有一支高素质的人才队伍,包括国内知名的表面工程专家,以及一批优秀的中、青年科研骨干。先后承担了数十项国家和军队的科研项目,获得十余项国家和军队科技进步奖励。一批研究成果在我军得到大规模推广应用,有效解决了装备维修和战场抢修的重点难点问题,产生了显著的军事效益。“中心”还积极开展与地方企事业单位的技术合作,运用先进技术手段有效解决了工矿企业装备维修及关键零部件表面处理的难点问题,为国民经济建设做出了贡献。