

等离子喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ 金属陶瓷基高温 润滑涂层的摩擦学行为研究

周琪^{1,2}, 卢礼灿¹, 易戈文², 王文珍², 贾均红²

(1.湘潭大学 化学学院, 湖南 湘潭 411100; 2.中国科学院
兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: **目的** 探讨和研究 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{Ag}-\text{MoO}_3-\text{CaF}_2$ 和 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{CaF}_2$ 金属陶瓷涂层与 ZrO_2 配副在宽温域 (室温~800 °C) 内的摩擦磨损行为和磨损机理。**方法** 以 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ 作为基底材料, CaF_2 、Ag、 MoO_3 作为固体润滑剂, 采用大气等离子喷涂技术在 718 高温合金钢基体表面, 制备 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{Ag}-\text{MoO}_3-\text{CaF}_2$ 和 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{CaF}_2$ 金属陶瓷涂层。采用 UMT-3 高温摩擦磨损试验机评价涂层从室温~800 °C 的摩擦磨损性能, 采用显微硬度计和万能材料试验机测试涂层的显微硬度和粘结强度, 采用 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 和拉曼光谱仪分析涂层的显微结构、物相组成和磨痕的微观形貌。**结果** $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{CaF}_2$ 和 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{Ag}-\text{MoO}_3-\text{CaF}_2$ 金属陶瓷涂层结构致密, 显微硬度和结合强度均随着固体润滑剂含量的增加而有所下降, 结合强度分别为 46.45、36.65 MPa, 显微硬度分别为 524.61HV_{0.3}、478.29HV_{0.3}。涂层的摩擦系数和磨损率均随着温度的升高而降低, 800 °C 时 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{CaF}_2$ 和 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{Ag}-\text{MoO}_3-\text{CaF}_2$ 涂层的摩擦系数和磨损率最低, 最低摩擦系数分别为 0.30 和 0.19, 最低磨损率分别为 3.84×10^{-5} 、 $2.89 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。**结论** CaF_2 可以改善 600 °C 以上的摩擦学性能, Ag、 CaF_2 、 MoO_3 在涂层磨损表面发生摩擦化学反应生成的钼酸银和钼酸钙, 可以有效地改善 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ 涂层在 600 °C 以上的摩擦学性能。

关键词: 大气等离子喷涂; $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ 金属陶瓷涂层; 摩擦化学反应; 润滑涂层; 高温涂层; 摩擦学行为

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0212-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.028

Tribological Behavior of Plasma Sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ Cermet Based High Temperature Lubrication Coatings

ZHOU Qi^{1,2}, LU Li-can¹, YI Ge-wen², WANG Wen-zhen², JIA Jun-hong²

(1.School of Chemistry, Xiangtan University, Xiangtan 411100, China; 2.State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou
Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate and study the friction behavior and wear mechanisms of $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{Ag}-\text{MoO}_3-\text{CaF}_2$ and $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{CaF}_2$ cermet coatings sliding against ZrO_2 ceramic ball at room temperature of 800 °C. $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ cermet coatings containing CaF_2 , Ag and MoO_3 were prepared on the surface of Inconel 718 steel by atmospheric plasma spraying

收稿日期: 2019-03-22; 修订日期: 2019-06-02

Received: 2019-03-22; Revised: 2019-06-02

基金项目: 国家自然科学基金 (51575505, 51675508)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51575505, 51675508)

作者简介: 周琪 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为涂层摩擦学。

Biography: ZHOU Qi (1993—), Male, Master, Research focus: tribology of coatings.

通讯作者: 贾均红 (1974—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为摩擦学及表面技术。邮箱: jhjia@licp.cas.cn

Corresponding author: JIA Jun-hong (1974—), Male, Ph. D., Professor, Doctoral supervisor, Research focus: tribology and surface technology.
E-mail: jhjia@licp.cas.cn

technology with Cr₃C₂/NiCr as substrate materials and CaF₂, Ag and MoO₃ as solid lubricants. Friction and wear behavior of cermet coatings were studied by UMT-3 high temperature friction and wear tester at room temperature to 800 °C. The micro-hardness and bond strength of the coating were tested by micro-hardness tester and universal material testing machine. The microstructure, phase composition and microscopic morphology of the wear track of the cermet coating were analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and Raman spectroscopy. The Cr₃C₂/NiCr-CaF₂ and Cr₃C₂/NiCr-Ag-MoO₃-CaF₂ cermet coatings had dense microstructure, the micro-hardness and bonding strength of cermet coatings decreased with the increase of solid lubricant content and the bonding strength and micro-hardness of cermet coating was 46.45 MPa and 524.61HV_{0.3}, 36.65 MPa and 478.29HV_{0.3}, respectively. The friction coefficient and wear rate of the cermet coatings decreased with the increase of temperature and reached the lowest at 800 °C, 0.30 and 0.19, 3.84×10⁻⁵ mm³/(N·m) and 2.89×10⁻⁵ mm³/(N·m), respectively. CaF₂ can obviously improve the tribological performances of Cr₃C₂/NiCr cermet coating above 600 °C. The improved the triboloical properties of Cr₃C₂/NiCr cermet coatings above 600 °C are mainly attributed to the synergistic lubricating effect of molybdates formed on the worn track by tribo-chemical reaction of Ag, CaF₂ and MoO₃.

KEY WORDS: atmospheric plasma spraying; Cr₃C₂/NiCr cermet coating; tribo-chemical reaction; lubrication coatings; high temperature coatings; tribological behavior

热喷涂 Cr₃C₂/NiCr 复合涂层是最常见的碳化物耐磨陶瓷涂层，在核电、钢铁和航空航天等领域获得了广泛应用^[1-3]。但在干摩擦条件下，热喷涂 Cr₃C₂/NiCr 复合涂层的摩擦系数和磨损率都较高而难以应用^[4-8]。将一些固体润滑剂添加到复合涂层中，可改善 Cr₃C₂/NiCr 涂层的润滑性能。常用的固体润滑剂 Ag，由于在磨损表面的扩散系数大、剪切强度低，可以降低 400 °C 以下的摩擦系数和磨损率，而 CaF₂ 可以在 500 °C 以上提供有效的润滑^[9-10]。曹玉霞等^[11]研究了 h-BN 的添加对 NiCr-Cr₃C₂ 复合涂层摩擦学性能的影响，结果表明，高温下，金属氧化物和 h-BN 润滑膜的形成是使磨损率和摩擦系数降低的主要原因。陈东等^[12]研究了 Ni 包覆 MoS₂ 粉末添加到 NiCr-Cr₃C₂ 复合涂层中对摩擦磨损性能的影响，当 Ni 包覆 MoS₂ 粉末添加比例为 30% 时，复合涂层的摩擦学性能最好。Ouyang 等^[13]采用低压等离子喷涂技术制备了 ZrO₂-CaF₂ 复合涂层，研究表明 CaF₂ 在 600 °C 以上可以降低涂层的摩擦系数和磨损率。单一的固体润滑剂难以在宽温域内提供有效的润滑，所以在研究中采用中低温和高温润滑剂复配，期望能够在宽温域内改善 Cr₃C₂/NiCr 金属陶瓷涂层的摩擦学性能。由此，在本研究中添加 CaF₂、MoO₃、Ag，低温下，Ag 作为润滑剂，而高温下，MoO₃ 可以和 CaF₂ 发生化学反应生成 CaMoO₄，而后与 Ag 摩擦并发生化学反应生成钼酸银，高低温润滑剂协同润滑可改善 Cr₃C₂/NiCr 金属陶瓷涂层在宽温域内的摩擦学性能。采用大气等离子喷涂技术分

别制备了 Cr₃C₂/NiCr-Ag-MoO₃-CaF₂ 和 Cr₃C₂/NiCr-CaF₂ 金属陶瓷涂层，研究金属陶瓷涂层与 ZrO₂ 陶瓷球配副在室温到 800 °C 范围内的摩擦磨损行为，探究摩擦化学反应生成的钼酸盐高温润滑相对涂层摩擦学性能的影响及摩擦磨损机理。

1 试验

1.1 材料和方法

热喷涂基材材料选用 Inconel 718 高温合金，经机械加工成 φ25 mm×8 mm 圆形片。涂层基底材料选用 75%Cr₃C₂-25%NiCr (北京矿冶研究总院)，粉末粒径为 10~45 μm，CaF₂ 和 MoO₃ 采用烧结破碎法制备而成，粉末粒径为 20~90 μm。喷涂金属陶瓷涂层前，粉末材料用 M-10 三维混合装置进行均匀混合，再对基材表面进行喷砂预处理，保证基体表面获得规定的粗糙度，然后用丙酮对表面进行超声清洗。

采用 SulZerMetco9M 等离子喷涂设备制备金属陶瓷涂层。制备金属陶瓷涂层前，先喷涂 NiAl 作为粘结层，喷涂厚度约为 0.1 mm，用于增加涂层和基材之间的结合强度。制备涂层的喷涂工艺参数为：喷涂电流 500 A，喷涂电压 45 V，喷涂距离 60 mm，送粉速率 40 g/min。Cr₃C₂/NiCr 金属陶瓷涂层的组成和力学性能如表 1 所示。将 Cr₃C₂/NiCr-CaF₂ 和 Cr₃C₂/NiCr-Ag-MoO₃-CaF₂ 金属陶瓷涂层分别命名为 NCC、NCAMC。

表 1 金属陶瓷涂层的组成和力学性能
Tab.1 Composition and mechanical properties of cermet coatings

Composite coating	Compositions/wt. %				Vickers hardness (HV)	Bonding strength/MPa
	Cr ₃ C ₂ /NiCr	CaF ₂	Ag	MoO ₃		
NCC	90	10	0	0	524.61±19.6	46.45±2.27
NCAMC	75	10	10	5	478.29±14.3	36.65±1.55

1.2 性能表征

采用扫描电子显微镜 (FE-SEM, Tescan Mira 3) 观察涂层磨痕形貌。采用 XRD (X'Pert PRO, PAN-Alytical, Almelo) 和 micro-Raman 衍射仪 (Czemy-Tumer Labram HR800) 研究磨损表面的化学组成。参照 ASTM C633-01 标准^[14], 采用拉伸法在 SANS 万能材料试验机 (SANS Testing Machine Co. Ltd, China) 上测试涂层的结合强度, 拉伸速率为 0.5 mm/min。采用 UMT-3 型球-盘式高温摩擦磨损试验机 (UMT Bruker Corp, America), 对涂层进行摩擦磨损实验。摩擦磨损测试前, 试样需要在抛光机上使用 80#、400#、600#、800#、1000# 氧化铝砂纸进行打磨, 并在绒布上进行水磨抛光。每个温度下的摩擦试验至少重复 3 次, 以确保实验结果的再现性。摩擦磨损实验参数为: 载荷 10 N, 磨痕半径 5 mm, 转速 200 r/min, 磨损时间 60 min, 测试温度 25、200、400、600、800 °C。对偶材料为 $\phi 10$ mm 的 ZrO_2 陶瓷球 (硬度为 12.5 GPa, 密度为 6.01 g/cm^3)。采用 MH-5-VM 显微硬度计测量复合涂层的显微硬度, 所用压头是顶角 136° 正棱型的金刚石压头, 加载载荷为 300 g, 保压时间为 5 s, 取涂层表面任意 10 个点的平均值。采用非接触式三维表面轮廓仪测定磨痕体积, 每个试样测试 3 次, 取平均值。

2 结果和分析

2.1 金属陶瓷涂层的显微结构和力学组成

从表 1 可以看出, 固体润滑剂 MoO_3 和 Ag 的添加会导致 NCAMC 涂层的结合强度和显微硬度有所下降, NCAMC 涂层的显微硬度和结合强度分别为 $478.29\text{HV}_{0.3}$ 和 36.65 MPa , 具有较好的硬度和结合强度 ($> 35 \text{ MPa}$)^[15-16]。

图 1 为 NCC 和 NCAMC 的 XRD 图谱, 可以发现涂层成分主要是 NiCr 、 Cr_3C_2 以及在喷涂过程中 Cr_3C_2 失碳所形成的 Cr_7C_3 , CaF_2 、 MoO_3 和 Ag 以单相形式存在, 说明润滑相已经成功沉积到涂层中, 且在喷涂过程中没有发生化学反应。

图 2 为 NCC 和 NCAMC 金属陶瓷涂层截面形貌图, 根据能谱 (EDS) 分析, 灰色区域是 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$, 亮色区域是 Ag 和 MoO_3 , 黑色区域是 CaF_2 。同时还发现, 除了由热喷涂技术固有性质引起的孔隙外, 所有金属陶瓷涂层结构致密。然而, 在喷涂过程中, 一部分颗粒由于在高速火焰中的停留时间短而不及熔化, 导致涂层由完全熔化区域 (FM) 和部分熔化区域 (PM) 组成 (图 2b 的插图), 形成金属陶瓷涂层典型的双区微结构, 硬度较高且较致密的 FM 区可以弥补 PM 区的强度, 而软韧的 PM 区可以改善 FM 区的脆性, FM 区和 PM 区可以形成性能互补的特

殊结构, 这种结构可以为复合涂层提供很好的耐磨性^[17-20]。

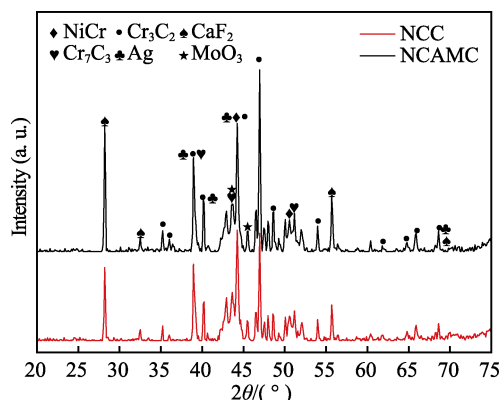
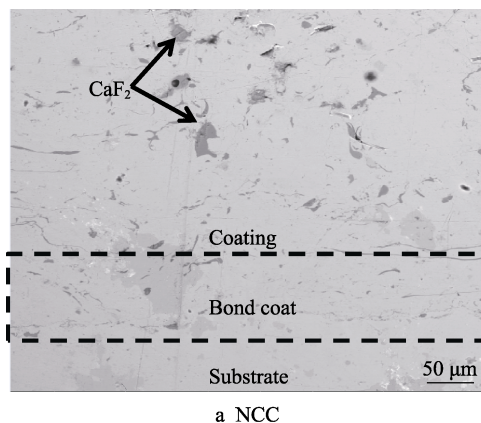
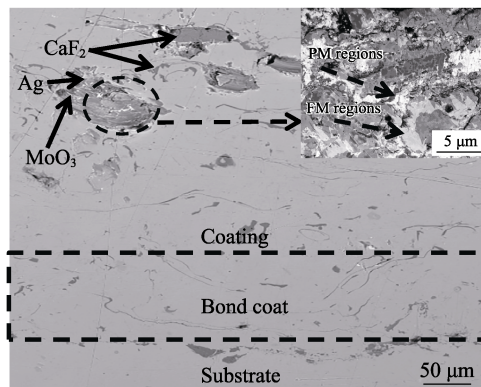


图 1 金属陶瓷涂层的 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of cermet coatings



a NCC



b NCAMC

图 2 金属陶瓷涂层截面形貌

Fig.2 Cross-sectional morphologies of cermet coatings

2.2 金属陶瓷涂层的摩擦学性能

图 3 为 NCC 和 NCAMC 金属陶瓷涂层在室温到 800 °C 的摩擦系数, 可以看出两种涂层在室温下的摩擦系数最高, 且均随着温度的升高而降低, NCAMC 金属陶瓷涂层在宽温域下的摩擦系数均低于 NCC。当温度低于 400 °C 时, Ag 可以降低 400 °C 以下的摩擦系数。图 4 为 NCC 和 NCAMC 涂层在不同测试温

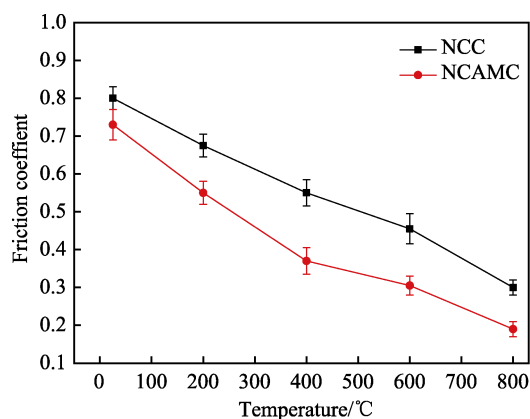


图 3 金属陶瓷涂层不同测试温度下的摩擦系数
Fig.3 Friction coefficients of cermet coatings at different test temperature

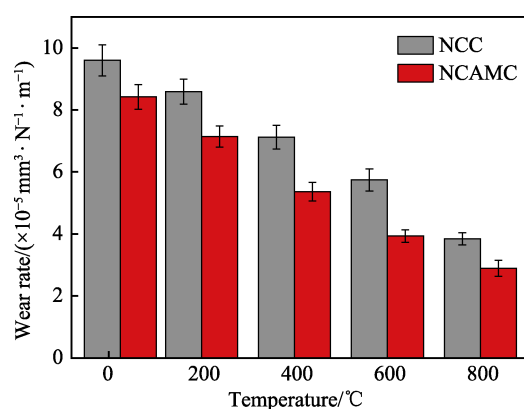


图 4 金属陶瓷涂层不同测试温度下的磨损率
Fig.4 Wear rates of cermet coatings at different test temperature

度下的磨损率, 同样可以看出, NCAMC 金属陶瓷涂层在宽温域下的磨损率均低于 NCC, 且随着温度的上升, NCC 和 NCAMC 涂层的磨损率逐渐下降, 当温度升至 800 °C 时, NCC 和 NCAMC 的磨损率最低, 分别为 $3.84 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 和 $2.89 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。400 °C 以上时, NCC 涂层的磨损率和摩擦系数下降, 可能是由于涂层中 CaF_2 发生脆-粘转变, 在滑动表面形成自润滑膜, 降低了复合涂层在高温下的摩擦系数和磨损率。而 NCAMC 涂层的磨损率和摩擦系数下降, 可能是摩擦过程中摩擦化学反应形成的钼酸银和钼酸钙高温润滑相的协同效应所致。

图 5 为金属陶瓷涂层不同测试温度下的磨损表面形貌, 在室温摩擦磨损过程中, NCC 与 NCAMC 涂层磨损表面相比出现很多磨粒, 磨损机理是磨粒磨损 (图 5a), 而 NCAMC 涂层磨损表面出现了层状薄片, 磨损机理为剥落磨损 (图 5e)。随着温度升高到 400 °C, NCC 涂层磨损表面的磨粒逐渐减少, 形成犁沟 (图 5c)。温度从 200 °C 上升到 400 °C 时, NCAMC 涂层磨损表面出现了连续的扁平面, 形成了润滑膜 (图 5g), 原因可能是固体润滑剂 Ag 在 400 °C 以下有润滑作用。当温度从 400 °C 升高到 600 °C 时, NCC 和 NCAMC 涂层的磨损表面都出现了不连续的润滑膜并伴有磨粒。NCC 涂层磨损表面可能是 CaF_2 在滑动磨损表面形成的自润滑膜 (图 5d); 而 NCAMC 磨损表面出现的润滑膜, 可能是 600 °C 时在磨损表面开始生成钼酸银和钼酸钙高温润滑相 (图 5h)。

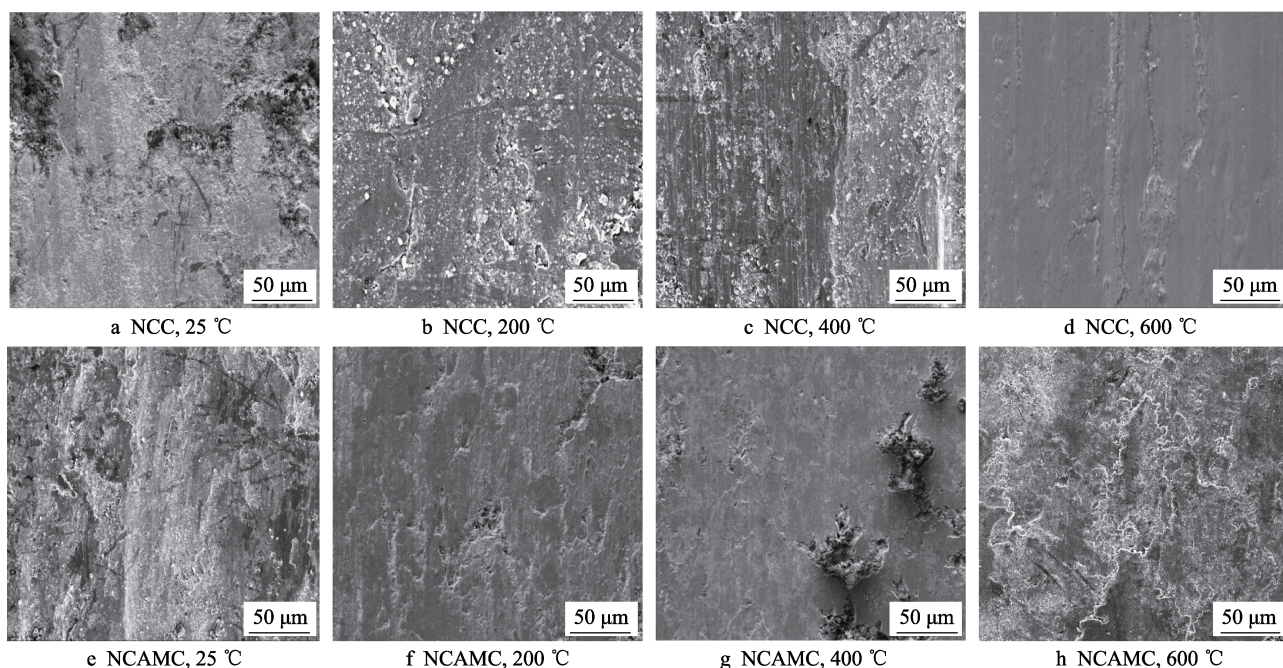


图 5 金属陶瓷涂层不同测试温度下的磨损表面形貌
Fig.5 Wear surface morphology of cermet coatings at different test temperature

图 6 为 800 °C 时 NCC 涂层磨损表面和磨痕区域的拉曼光谱图。从图 6a 中可以观察到, NCC 涂层磨

损表面出现不连续的润滑膜并伴有塑性变形; 从图 6b 中可以看到, 磨损表面出现了 CaF_2 的拉曼峰, 这

可能是 600 °C 时 CaF_2 在滑动表面形成了自润滑膜^[13] (图 5d)。 ZrO_2 峰的出现说明在摩擦磨损过程中,摩擦对偶 ZrO_2 转移到磨损表面^[21-23]。同时, NiO 和 Cr_2O_3 拉曼峰的出现,说明基体相在高温下发生氧化,形成了有高温润滑作用的氧化物润滑膜。所以,涂层磨损表面形成的 CaF_2 自润滑膜和氧化物润滑膜,为高温下 NCC 涂层提供了有效的润滑^[13,24],从而改善了 NCC 涂层在 800 °C 时的摩擦学性能。

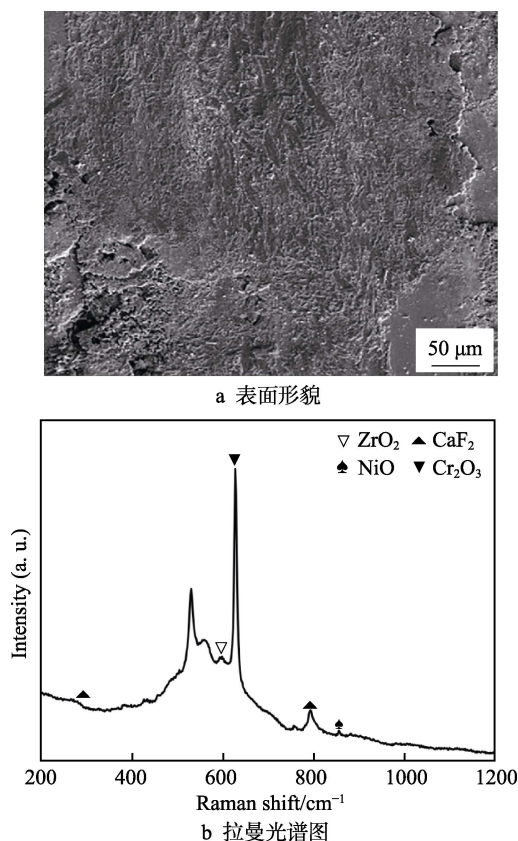


图 6 800 °C 时 NCC 金属陶瓷涂层
磨损表面形貌及拉曼光谱图

Fig.6 Surface morphology (a) and Raman spectrum (b) of wear track of the NCC cermet coating at 800 °C

图 7 为 800 °C 时 NCAMC 涂层磨损形貌和磨痕区域的拉曼光谱图。从图 7a 可以观察到, NCAMC 金属陶瓷涂层磨损表面形成了相对连续的润滑薄膜且呈薄层堆积状,这可能与 ZrO_2 陶瓷球自身的高绝热性能有关,在摩擦磨损过程中,摩擦产生的热量无法扩散到周围环境^[22],使 NCAMC 涂层磨损轨道内形成更多的碎片,被捕获的碎片会被压碎成极细的颗粒,由于极细颗粒的高表面能使颗粒会重新附在磨损表面,进而生成薄的层状润滑膜^[23],而润滑膜在反复摩擦磨损过程中又会被破坏,表明润滑膜的形成和破裂在摩擦磨损过程中是交替进行的。从图 7b 可以看出,在 800 °C 条件下的摩擦磨损过程中,磨损表面出现了钼酸银 (Ag_2MoO_4 、 $\text{Ag}_2\text{Mo}_4\text{O}_{13}$)、 NiMoO_4 、 CaMoO_4 和 NiO 的拉曼峰,钼酸钙和钼酸银作为高温

润滑剂已有很多研究报道^[9,13,24-26],说明钼酸盐和 NiO 的协同润滑作用明显改善了 NCAMC 涂层在 800 °C 时的摩擦学性能。

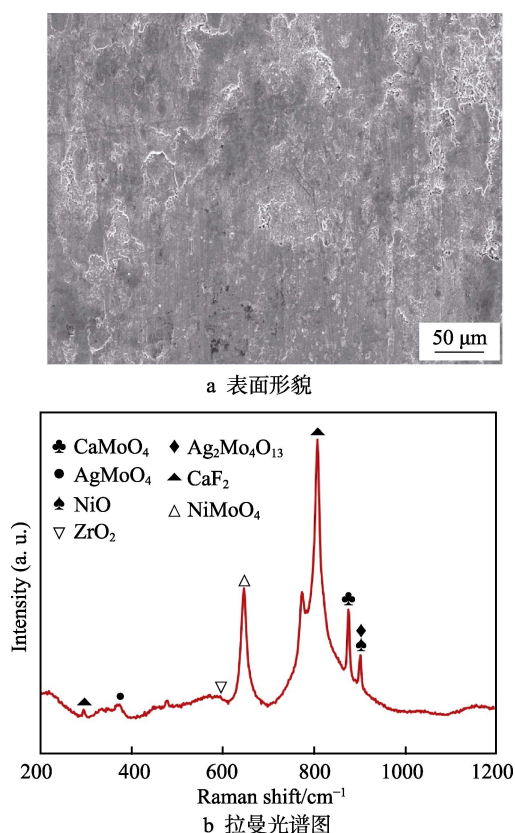


图 7 800 °C 时 NCAMC 金属陶瓷
涂层磨损表面形貌及拉曼光谱图

Fig.7 Surface morphology (a) and Raman spectrum (b) of wear track of the NCAMC cermet coating at 800 °C

3 结论

1) 等离子喷涂制备的 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{CaF}_2$ 和 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{Ag}-\text{MoO}_3-\text{CaF}_2$ 金属陶瓷涂层结构致密,具有较高的结合强度和显微硬度。

2) $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{CaF}_2$ 金属陶瓷涂层在 600 °C 以上的润滑机理是, CaF_2 在滑动表面生成了自润滑膜,可以改善涂层在高温下的摩擦性能。

3) $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}-\text{Ag}-\text{MoO}_3-\text{CaF}_2$ 金属陶瓷涂层在摩擦磨损的过程中, Ag 、 CaF_2 和 MoO_3 会通过摩擦化学反应生成钼酸银和钼酸钙润滑膜,能有效降低涂层在 600 °C 以上的摩擦系数和磨损率,改善其摩擦学性能。

参考文献:

- [1] ZAVAREH M A, SARHAN A A D M, ZAVAREH P A, et al. Development and protection evaluation of two new, advanced ceramic composite thermal spray coatings, $\text{Al}_2\text{O}_3-40\text{TiO}_2$ and $\text{Cr}_3\text{C}_2-20\text{NiCr}$ on carbon steel petroleum

- oil piping[J]. *Ceramics international*, 2016, 42(4): 5203-5210.
- [2] CAO X Q, VASSEN R, STOEVE D. Ceramic materials for thermal barrier coatings[J]. *Journal of the european ceramic society*, 2004, 24(1): 1-10.
- [3] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. *Science*, 2002, 296(5566): 280-284.
- [4] ESPALLARGAS N, BERGET J, GUILMANY J M, et al. Cr_3C_2 -NiCr and WC-Ni thermal spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion-corrosion resistance[J]. *Surface and coatings technology*, 2008, 202(8): 1405-1417.
- [5] MATTHEWS S, HYLAND M, JAMES B. Microhardness variation in relation to carbide development in heat treated Cr_3C_2 -NiCr thermal spray coatings[J]. *Acta materialia*, 2003, 51(14): 4267-4277.
- [6] SADEGHIMERESHT E, MARKOCSAN N, NYLEN P, et al. Corrosion performance of bi-layer Ni/ Cr_2C_3 -NiCr HVOF thermal spray coating[J]. *Applied surface science*, 2016, 369: 470-481.
- [7] JANKA L, BERGER L M, NORPOTH J, et al. Improving the high temperature abrasion resistance of thermally sprayed Cr_3C_2 -NiCr coatings by WC addition[J]. *Surface and coatings technology*, 2018, 337: 296-305.
- [8] MATTHEWS S, BERGER L M. Inter-diffusion between thermally sprayed Cr_3C_2 -NiCr coatings and an Alloy 625 substrate during long-term exposure at 500 °C, 700 °C and 900 °C[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2019, 770: 1078-1099.
- [9] WANG J Y, SHAN Y, GUO H J, et al. Friction and wear characteristics of hot-Pressed NiCr-Mo/ MoO_3/Ag self-lubrication composites at elevated temperatures up to 900 °C [J]. *Tribology letters*, 2015, 59(3): 48.
- [10] SLINNEY H E. Solid lubricant materials for high temperatures—a review[J]. *Tribology international*, 1982, 15(5): 303-315.
- [11] 曹玉霞, 黄传兵, 杜令忠, 等. 等离子喷涂 NiCr/ Cr_3C_2 -hBN 复合涂层的制备及摩擦性能研究[J]. *表面技术*, 2015, 6(6): 27-31.
CAO Yu-xia, HUANG Chuan-bing, DU Ling-zhong, et al. Preparation and tribological properties of atmospheric plasma-sprayed NiCr/ Cr_3C_2 -hBN wear-resistant coating [J]. *Surface technology*, 2015, 6(6): 27-31.
- [12] 陈东, 罗明波, 陈晓琴, 等. 等离子喷涂 NiCr- Cr_3C_2 基复合自润滑涂层的组织及摩擦学性能[J]. *表面技术*, 2013, 42(3): 52-55.
CHEN Dong, LUO Ming-bo, CHEN Xiao-qin, et al. Microstructure and tribological properties of plasma sprayed NiCr- Cr_3C_2 based composite self-lubricating coatings[J]. *Surface technology*, 2013, 42(3): 52-55.
- [13] OUYANG J H, SASAKI S, UMEDA K. Low-pressure plasma-sprayed ZrO_2 - CaF_2 composite coating for high temperature tribological applications[J]. *Surface and coatings technology*, 2001, 137(1): 21-30.
- [14] ASTM C. Standard test method for adhesion or cohesion strength of thermal spray coatings[J]. *ASTM International*, 2008, 78: 564.
- [15] LI B, JIA J H, GAO Y M, et al. Microstructural and tribological characterization of NiAl matrix self-lubricating composite coatings by atmospheric plasma spraying[J]. *Tribology international*, 2017, 109: 563-570.
- [16] LI B, JIA J H, GAO Y M, et al. Influence of silver contents on the tribological properties of Ni-based self-lubricating coatings by atmospheric plasma spraying[J]. *Acta metallurgica sinica (english letters)*, 2017, 30(8): 801-808.
- [17] GOBERMAN D, SOHN Y H, SHAW L, et al. Microstructure development of Al_2O_3 -13wt.% TiO_2 plasma sprayed coatings derived from nanocrystalline powders[J]. *Acta materialia*, 2002, 50(5): 1141-1152.
- [18] LIN X H, ZENG Y, LEE S W, et al. Characterization of alumina-3wt.% titania coating prepared by plasma spraying of nanostructured powders[J]. *Journal of the european ceramic society*, 2004, 24(4): 627-634.
- [19] SINGH V P, SIL A, JAYAGANTHAN R. A study on sliding and erosive wear behaviour of atmospheric plasma sprayed conventional and nanostructured alumina coatings[J]. *Materials & design*, 2011, 32(2): 584-591.
- [20] WANG X P, FENG X C, LU C, et al. Mechanical and tribological properties of plasma sprayed NiAl composite coatings with addition of nanostructured $\text{TiO}_2/\text{Bi}_2\text{O}_3$ [J]. *Surface and coatings technology*, 2018, 349: 157-165.
- [21] DENG W, LI S, HOU G L, et al. Comparative study on wear behavior of plasma sprayed Al_2O_3 coatings sliding against different counterparts[J]. *Ceramics international*, 2017, 43(9): 6976-6986.
- [22] SUH M S, CHAE Y H, KIM S S. Friction and wear behavior of structural ceramics sliding against zirconia[J]. *Wear*, 2008, 264(9-10): 800-806.
- [23] AJAYI O O, LUDEMA K C. Mechanism of transfer film formation during repeat pass sliding of ceramic materials[J]. *Wear*, 1990, 140(2): 191-206.
- [24] LIUE Y, WANG W Z, GAO Y M, et al. Tribological properties of adaptive Ni-based composites with addition of lubricious Ag_2MoO_4 at elevated temperatures[J]. *Tribology letters*, 2012, 47(1): 21-30.
- [25] 李珍, 张亚丽, 周健松, 等. Ni-Mo 基高温自润滑复合材料摩擦学性能的研究[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(2): 161-169.
LI Zhen, ZHANG Ya-li, ZHOU Jian-song, et al. Study on Tribological properties of Ni-Mo based high temperature self-lubricating composites[J]. *Tribology*, 2018, 38(2): 161-169.
- [26] KONG L Q, ZHU S Y, BI Q L, et al. Friction and wear behavior of self-lubricating ZrO_2 (Y_2O_3)- CaF_2 -Mo-graphite composite from 20 °C to 1000 °C[J]. *Ceramics international*, 2014, 40(7): 10787-10792.