

三种热喷涂工艺制备 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 涂层的结构与性能

黄传兵¹, 杜令忠¹, 张伟刚¹, 王璐², 侯广库²

(1. 中国科学院过程工程研究所 多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190; 2. 沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司, 沈阳 110043)

摘要: 采用大气等离子喷涂、爆炸喷涂和超音速火焰喷涂三种热喷涂技术制备了 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 涂层, 分析比较了涂层的显微组织、物相组成、孔隙率、硬度、结合强度及其摩擦学性能。结果表明, 与大气等离子喷涂相比, 超音速火焰喷涂和爆炸喷涂技术制备的涂层具有更高的致密度、硬度和结合强度。采用包覆法制备的粉末进行喷涂, 碳化物失碳明显减少, 涂层中氧化物含量低。三种 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 热喷涂涂层的摩擦系数都随着温度的升高而减小, 爆炸喷涂和超音速火焰喷涂涂层的摩擦系数比等离子喷涂涂层的摩擦系数更低, 耐磨性得到提高。高温下 $\text{BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 润滑膜的形成均可有效降低三种涂层的摩擦系数, 从而降低涂层和对磨球 Si_3N_4 的磨损率。

关键词: 热喷涂; $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$; 微观结构; 力学性能; 摩擦磨损

DOI 10.3969/j.issn.1005-5053.2009.6.014

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2009)06-0070-07

航空航天、热能电力工业装备中许多在高温腐蚀性气氛条件下工作的摩擦运动副零部件, 不仅要求材料具有优异的高温耐磨性与抗氧化性, 同时由于高温条件下无法实现外加润滑而必须具有优异的高温自润滑性能^[1]。热喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层具有较高的显微硬度, 较好的耐磨性, 是广泛应用的耐磨涂层。与整体材料比较它具有工艺简单、成本低廉等优点, 且在不影响工件力学性能的情况下, 保证部件在高温条件下长期可靠地运转, 同时还能防止工件氧化和腐蚀, 一直是高温摩擦学研究的热点^[2~7]。但在实际工作环境中, 正是由于其较高的硬度, 摩擦副产生比较严重的磨损。实践证明, 通过向涂层中添加润滑剂可以降低其摩擦系数, 在使用过程中润滑剂可以扩散到涂层与摩擦副试样之间, 从而减少磨损^[8]。常用的高温固体润滑剂包括 MoS_2 、软质贵金属 (Au 、 Ag 等)、无机氟化物 (LiF 、 CaF_2 等)、金属氧化物 (PbO 、 MgO 等) 等^[9~12]。 BaF_2 、 CaF_2 等氟化物性能稳定, 在高温下软化而具有润滑性, 并且有不擦伤对偶件的特性。 $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$ 共晶体因为有更

低的熔点和剪切力, 其应用更广泛。美国 NASA 等研究机构对含 $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$ 共晶润滑材料进行了深入研究, 制备了性能十分优良的高温自润滑涂层^[13~16], 但其公开资料较少。等离子喷涂 (APS)、爆炸喷涂 (DS) 和超音速火焰喷涂 (HVOF) 在制备涂层方面各有优缺点。一般说来, APS 技术通用性好, 超音速火焰喷涂技术成本较低, 爆炸喷涂操作简便, 但噪声较大。目前无人开展应用三种热喷涂技术制备同一涂层的研究, 从而制约了涂层制备工艺的选型。本研究采用以上三种热喷涂技术来制备 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 耐磨自润滑涂层, 并考查其结构、力学性能及摩擦学性能, 期望获得最佳工艺。

1 实验

1.1 粉体制备

因为三种热喷涂技术对粉体粒度要求差异较大, 同时由于火焰温度和停留时间相差非常大, 不能采用一种尺寸的粉体来制备涂层。等离子喷涂粉体采用包覆的 Cr_3C_2 和包覆的 $\text{BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 共晶混合的方法制备, 爆炸喷涂和超音速火焰喷涂粉末采用 $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 造粒后进行 NiCr 包覆的方法制备。三种粉末组成和基本性能见表 1。由于共晶含量对超音速火焰喷涂涂层结合性能影响最大, 因此

收稿日期: 2009-01-07; 修订日期: 2009-02-24

作者简介: 黄传兵 (1981—), 博士研究生, 主要从事复合粉体和热喷涂涂层研究, (E-mail) chuang@home.ipe.ac.cn

通讯联系人: 张伟刚, 男, 研究员, (E-mail) wzhang@home.ipe.ac.cn

其粉体共晶含量略低于等离子喷涂和爆炸喷涂。

表 1 三种热喷涂粉末的组成及基本性能

Table 1 Composition and properties of three spray powders

Composition and properties	APS	DS	HVOF
$\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ /% (mass fraction)	8~12	8~12	5~9
$\text{NiCrCr}_3\text{C}_2$ /% (mass fraction)	25.75	25.75	25.75
Apparent density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.3~2.5	2.3~2.5	1.8~2.0
Flowability / $\text{s} \cdot (50\text{g})^{-1}$	30~35	30~35	55~60
Particle size / μm	-90+38	-75+38	-15+45

1.2 涂层制备

采用 APS-2000K 等离子喷涂设备、Dnepr-III 型爆炸喷涂设备与 JP-5000 型超音速火焰喷涂设备分别制备 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层。喷涂前对基体 45# 钢进行喷砂预处理, 以获得清洁粗糙、活性高的表面。三种工艺制备涂层的工艺参数如下:

等离子喷涂: 0.1mm 的 NiAl 粘底层, 功率 30~40kW, 喷距 100~110mm, 送粉速率 30~40g/min

爆炸喷涂: 喷涂距离 180mm, 氧气流量 $1.25\text{m}^3/\text{h}$ 乙炔流量 $1\text{m}^3/\text{h}$ 送粉量 25~30g/min

超音速喷涂: 喷涂距离 350mm, 氧气流量 $50\text{m}^3/\text{h}$ 煤油 2L/h 送粉量 30~40g/min

1.3 性能测试

采用标准 Hall 流量计测量喷涂粉末的流动性和松装密度。采用金相显微镜和 FEI Quanta 200 FEG 型环境电子扫描显微镜 (SEM) 进行涂层的组织结构分析。利用 Philips X'Pert Pro X 射线衍射仪 (XRD) 对粉体和涂层材料进行相组成分析。在 WDW-100E 万能材料试验机上按 GB/T 8642-2002 标准测试涂层结合强度 (样品尺寸 $\phi 25\text{mm} \times 5\text{mm}$), 拉伸速率 $1\text{mm}/\text{min}$ 。采用 HX-1000IM 型显微硬度计测试涂层抛光截面的显微硬度, 载荷 200g 保载 15s。

将涂层样品加工成尺寸为 $\phi 25\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的试样, 采用 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机进行球盘接触摩擦实验。参数为载荷 9.8N, 转速 364r/min,

磨痕半径 5mm, 测试温度从室温到 800°C, 对偶材料为 $\phi 6\text{mmSi}_3\text{N}_4$ 陶瓷球 (G5 级), 摩擦时间 20~40min, 摩擦试验结果取三个试样的平均值。采用 Talysurf 5P-120 表面形貌仪测试磨痕的体积, 以体积磨损率来表示涂层的耐磨性。

2 结果与讨论

2.1 粉体的结构与性能

图 1 是三种喷涂用粉末的表面形貌扫描电子显微镜照片。从图 1a 中可以看出等离子喷涂粉末呈不规则角形, 爆炸喷涂和超音速火焰喷涂粉末呈球形和类球形, 粒度分布比较均匀。三种粉末表面均包覆致密的 NiCr 层。在三种喷涂粉末中, Cr_3C_2 是硬质耐磨相, 可以增强涂层的强度和抗磨损性能; $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 共晶为高温固体润滑相; NiCr 合金作为高温粘结相不但提供涂层必需的力学性能和抗氧化、腐蚀性能, 还能够一定程度上隔绝喷涂过程中核心颗粒与空气接触, 减少喷涂过程中碳化物的脱碳、氧化以及氟化物的烧蚀。采用 Hall 流量计测得三种复合粉末均有良好的流动性和松装密度 (结果见表 1), 有利于保证喷涂过程的均匀送粉, 将粉末送入火焰中心, 从而获得较高的沉积效率和均匀致密的涂层组织, 并保证涂层的结合强度。

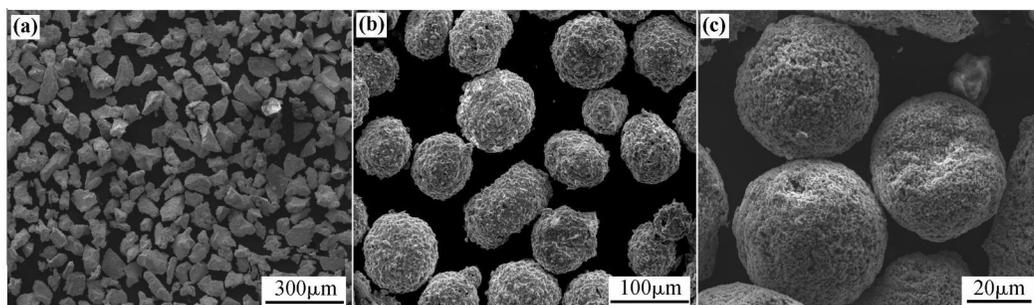


图 1 用于等离子喷涂、爆炸喷涂和超音速火焰喷涂的三种粉末的扫描电子显微镜照片

(a) 等离子喷涂; (b) 爆炸喷涂; (c) 超音速火焰喷涂

Fig. 1 SEM morphologies of three spray powders for APS (a), DS (b) and HVOF (c)

图 2 为三种热喷涂 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 涂层 XRD 衍射图谱, 从中可以看到三种工艺制备的 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 涂层的衍射谱有一定的差异。由于三种粉末中表面的 NiCr 层的保护作用, 喷涂过程均没有发生明显的脱碳和氧化, 涂层中主体衍射峰与喷涂粉末相符, 在 XRD 图谱中未见明显杂质峰。普通

等离子喷涂过程中, 由于颗粒速率慢, 经受高温加热的停留时间长, Cr_3C_2 发生少量分解。但由于颗粒表面 NiCr 层的保护, 等离子涂层中的氧化物含量较低, 也未见明显其它碳化物峰。另外, 从图 2 中还可以看出, 涂层中物相的衍射峰发生了不同程度的宽化, 主要是由于喷涂后涂层中晶粒细化的缘故。

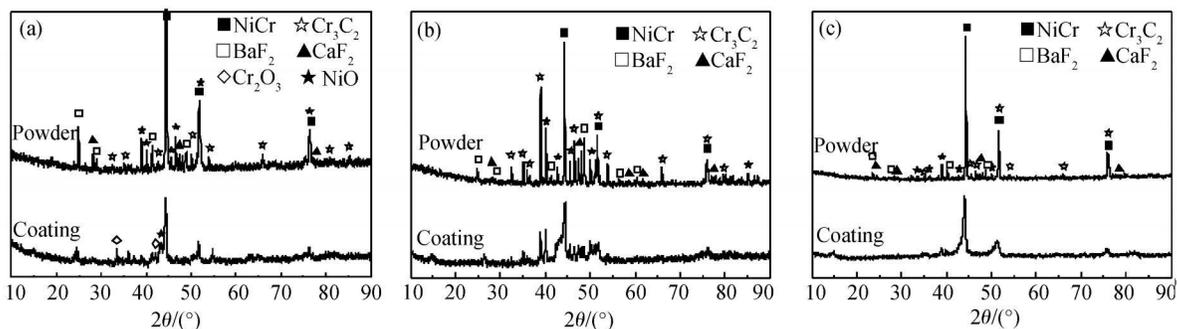


图 2 三种热喷涂粉末及涂层的 XRD 分析 (a) 等离子喷涂; (b) 爆炸喷涂; (c) 超音速火焰喷涂

Fig 2 XRD analysis of the three powders and the derived coatings (a) APS; (b) DS; (c) HVOF

2.2 涂层的结构和力学性能

图 3 是三种涂层截面金相照片形貌。可以发现三种涂层均呈现热喷涂涂层典型的层状组织结构, 涂层与基体结合良好。等离子喷涂涂层组织结构相对疏松, 孔隙率高, 而经爆炸喷涂和超音速火焰喷涂制备的涂层致密, 无明显的分层、裂纹和较大的空洞等缺陷存在。用灰度法测得三个涂层的孔隙率见表

2 其中超音速火焰喷涂涂层的孔隙率最低, 平均 0.98%; 爆炸喷涂涂层孔隙率平均 1.4%; 而等离子喷涂涂层的孔隙率最高, 平均 6.8%。由于超音速火焰喷涂 (超过 300m/s) 和爆炸喷涂 (超过 700m/s) 的射流速率更高, 因此颗粒与基体碰撞过程中变形更充分, 组织更加致密。

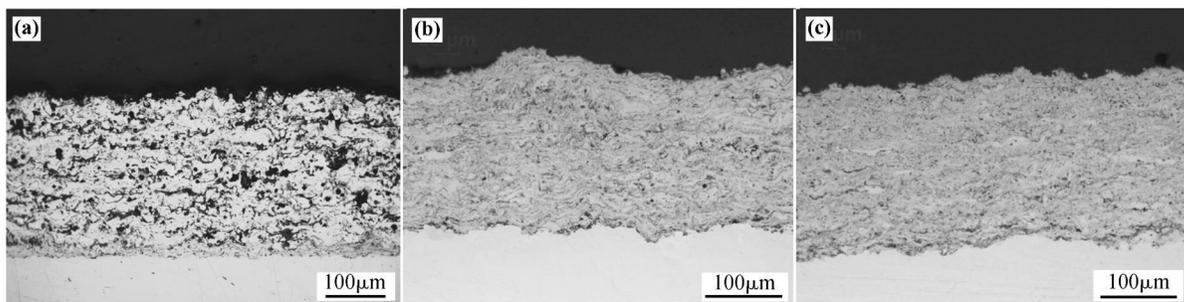


图 3 三种热喷涂 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 涂层的截面光学显微镜照片

(a) 等离子喷涂; (b) 爆炸喷涂; (c) 超音速火焰喷涂

Fig 3 Cross-sectional optical micrographs of the as-sprayed microstructure of three $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ coatings (a) deposited by APS; (b) deposited by DS; (c) deposited by HVOF

图 4 是三种热喷涂 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2\cdot\text{CaF}_2$ 涂层截面组织的背散射 SEM 形貌。从图 4 涂层的背散射电子图像可以发现, 涂层中颜色较浅的亮白色相是 NiCr 合金相, 灰色部分是碳化物相, 在扁平颗粒之间还存在少量的氧化物相。涂层的面扫描分析表明氟化物分布在层状颗粒内部。爆炸喷涂和超音速火焰喷涂涂层与等离子喷涂涂层相比更加均匀致

密。喷涂过程中粉末表面的 NiCr 被熔融呈液相状态, 覆盖在核心颗粒表面。与核心颗粒直接暴露在沉积环境中相比, 氧化、分解和烧蚀的机会要少的多, 因此有效的减少了喷涂过程中碳化物脱碳、氟化物的氧化及烧蚀, 保证了涂层组分的完整性, 使涂层具有更好的性能。

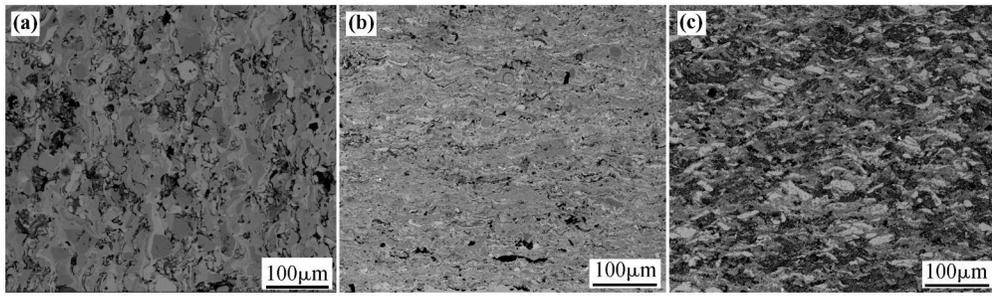


图 4 三种热喷涂 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层截面的扫描电子显微镜背散射照片

(a) 等离子喷涂; (b) 爆炸喷涂; (c) 超音速火焰喷涂

Fig 4 Cross-sectional backscattered electron images of the as-sprayed microstructure of three $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ coatings (a) deposited by APS (b) deposited by DS (c) deposited by HVOF

表 2 三种热喷涂涂层的基本性能

Table 2 Properties of three as-sprayed $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ coatings

Properties	APS	DS	HVOF
Porosity /%	6.8 ± 0.8	1.4 ± 0.2	0.98 ± 0.1
Microhardness $\text{HV}_{0.2}$	410~1001	628.6 ± 25	680.7 ± 33
Tensile strength /MPa	28 ± 4	66 ± 8	50 ± 5

不同热喷涂方法对涂层显微组织结构有很大影响, 必然造成涂层硬度和结合强度的变化。表 2 为涂层的显微硬度和结合强度测试结果。可以看到, 超音速火焰喷涂喷涂层和爆炸喷涂喷涂层显微硬度和结合强度基本接近, 而且明显优于普通等离子喷涂。这可以归结为超音速火焰喷涂和爆炸喷涂喷涂粒子速率快, 粒子扁平化程度更高, 形成的涂层结构更加致密, 组分分布更均匀。因此超音速火焰喷涂和爆炸喷涂涂层的结合强度是等离子喷涂的 2 倍以上。另外, 对等离子喷涂涂层, 由于喷涂粉末粒径大, 且粒子扁平化不如爆炸喷涂和超音速火焰喷涂涂层, 所以硬度变化较大, 碳化物硬质相聚区的显微硬度 $\text{HV}_{0.2}$ 为 930 ± 50 。氟化物聚集区域基本在 $\text{HV}_{0.2}$ 450 左右。而爆炸喷涂制备的涂层显微硬度 $\text{HV}_{0.2}$ 介于 570~802 之间, 平均值 628。超音速火焰喷涂制备的涂层显微硬度 $\text{HV}_{0.2}$ 介于 618~784 之间, 平均值 680。整体而言, 由于等离子喷涂颗粒表面 NiCr 的保护作用, 从而喷涂过程中脱碳少, 保证了等离子喷涂涂层的硬度。超音速火焰喷涂涂层比爆炸喷涂涂层硬度要稍微高些的原因还可能是爆炸喷涂喷涂粉末中有更高含量软质相 $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 共晶的缘故。一般来说, 材料的硬度愈高, 其耐磨性就愈好, 高硬度有利于保证三种涂层的耐磨性。

2.3 涂层的摩擦磨损性能

图 5 是三种热喷涂 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层的摩擦系数随温度的变化曲线。为了对比, 同时采

用等离子喷涂制备了不含氟化物共晶的等离子喷涂 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2$ 涂层。从图 5 可以看出, $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2$ 涂层在整个实验温度范围内摩擦系数虽然随着温度的升高有所降低, 但始终大于 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层。室温下, 三种 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层的摩擦系数与 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2$ 涂层相差不大, 但是随着温度的升高摩擦系数迅速减小; 当温度大于 500°C 以后, 三种含共晶涂层的摩擦系数均显著低于 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2$ 涂层的摩擦系数。说明只有在较高温度下 $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 共晶的塑性形变才能造成涂层摩擦性能的显著变化。同时, 超音速火焰喷涂和爆炸喷涂涂层的摩擦系数一般都低于等离子喷涂涂层 (700°C 时三者接近)。等离子喷涂、爆炸喷涂和超音速火焰喷涂涂层的摩擦系数在 800°C 时最小, 分别为 0.38、0.29 和 0.23。从图 5 还可以看出, 采用爆炸喷涂和超音速火焰喷涂制备的涂层, 其摩擦系数在 $500\sim 700^\circ\text{C}$ 之间发生反常增大, 其原因可能是在该温度段 NiCr 合金与对磨球 Si_3N_4 表面粘着; 当温度继续升高至 800°C 时, NiCr 合金塑性变形增大同时表面张力减小, 表面粘着现象随之消失。该行为同时存在于 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2$ 涂层中。但是对于等离子喷涂涂层, 由于其孔隙率较高, 对磨偶表面形成的粘着能够被粗糙表面切削掉, 所以这段摩擦系数依然是呈下降的趋势。

图 6 是三种热喷涂涂层的磨损率随温度的变化曲线。从图 6 可以看出, 超音速火焰喷涂和爆炸喷

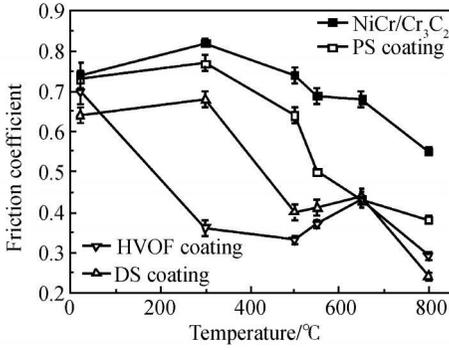


图 5 三种热喷涂 NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ 涂层的摩擦系数随温度的变化曲线

Fig 5 Friction coefficients of three NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ coatings vary with temperatures

涂涂层的磨损率在室温到 800°C 均低于等离子喷涂涂层。超音速火焰喷涂涂层在 600°C 以下要显著低于爆炸喷涂涂层, 温度高于 600°C 以后爆炸喷涂涂层的磨损率与超音速火焰喷涂涂层接近。等离子喷涂和爆炸喷涂涂层的磨损率在高温 500°C 左右出现显著的下降, 主要是由于涂层中的润滑剂 BaF₂·CaF₂ 开始发生作用。而超音速火焰喷涂涂层的磨损率从室温到 800°C 变化不是很大, 300°C 以后基本上是逐渐减小的趋势, 与其润滑相比较少有关。由于超音速火焰喷涂和爆炸喷涂涂层的结构要比等离子喷

涂涂层致密, 显微硬度更高, 层间结合更紧密, 在磨损时压力作用下, 致密、层间结合好的涂层颗粒和层间断裂的程度要小, 裂纹扩展慢, 所以超音速火焰喷涂和爆炸喷涂涂层的耐磨性要比等离子喷涂涂层好。试验结果还发现, 在高温下, 对磨球 Si₃N₄ 的磨损率也有较大降低, 主要是由于 BaF₂·CaF₂ 润滑膜的形成减少了硬质颗粒间的直接接触。为了弄清楚涂层的摩擦磨损机理, 我们对涂层的磨痕进行了分析。

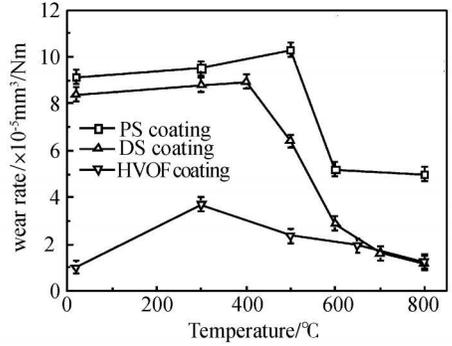


图 6 三种热喷涂 NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ 涂层的磨损率随温度的变化曲线

Fig 6 Wear rates of three NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ coatings vary with temperatures

2.4 涂层的磨痕分析

图 7 是三种热喷涂涂层在室温和 500°C 时的磨

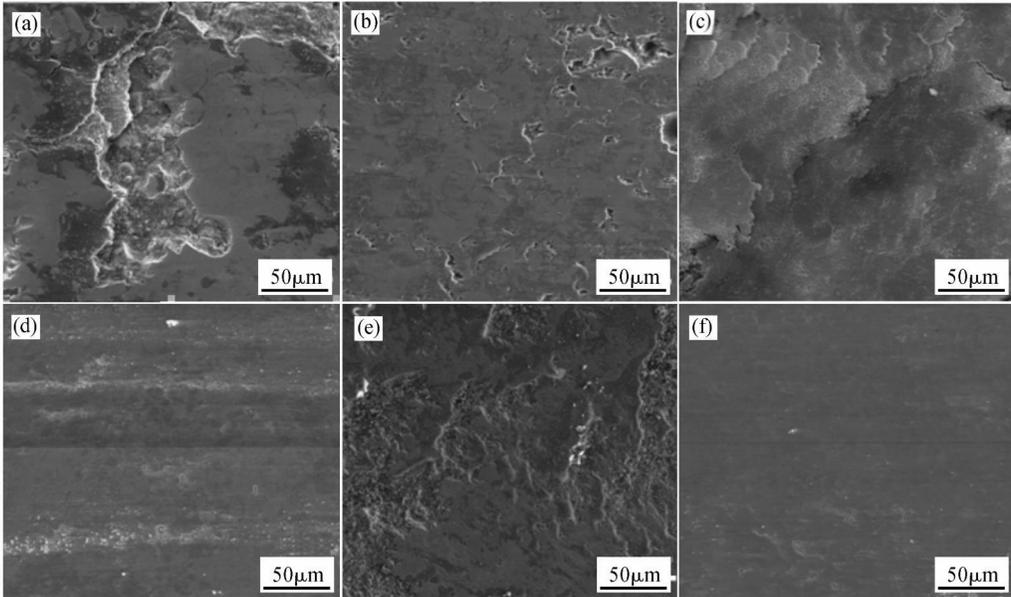


图 7 三种热喷涂 NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ 涂层的磨痕 SEM 形貌 (a) 等离子喷涂涂层, 室温; (b) 等离子喷涂涂层, 500°C; (c) 爆炸喷涂涂层, 室温; (d) 爆炸喷涂涂层, 500°C; (e) 超音速火焰喷涂涂层, 室温; (f) 超音速火焰喷涂涂层, 500°C

Fig 7 SEM morphologies of the worn surfaces of three thermal sprayed NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ coatings (a) plasma spraying coating at room temperature; (b) plasma spraying coating at 500°C; (c) detonation spraying coating at room temperature; (d) detonation spraying coating at 500°C; (e) HVOF coating at room temperature; (f) HVOF coating at 500°C

痕 SEM 形貌图。从图中可看出, 室温下 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层与 Si_3N_4 对磨时, 表面受到了明显的挤压作用, 不同磨痕上均出现塑性变形和涂层层状组织结构的层间界面, 各个涂层的磨损均主要表现为沿气孔、裂纹和新的凹坑边缘等处发生的裂纹扩展而引起的层状颗粒剥离, 因此低温下涂层的磨损率偏高。而在 500°C 时, 三种涂层磨痕表面均变得比较光滑。等离子喷涂涂层表面含有少量 Cr_3C_2 组分的破裂颗粒和拔出小坑, 爆炸喷涂和超音速火焰喷涂涂层表面平整, 仅有细微的划痕、塑性犁沟和变形。 500°C 时, $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 剪切强度比室温时显著变低, $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 颗粒经历由脆性到塑性的转变, 发生软化逐渐铺展在磨痕表面, 形成一层连续的表面转移膜, 显著降低涂层的摩擦系数, 这与 Wang^[16] 的研究结果一致。在 Cr_3C_2 薄层中, 显微裂纹和断裂碎片可导致涂层材料的脱落, 而 $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 软化后的填入则使此粗化不平的表面平滑化, 并成为含有 Cr_3C_2 硬质点的低摩擦与低磨损的耐磨薄膜, 从而降低涂层及对磨球 Si_3N_4 的磨损。

3 结论

(1) 运用等离子喷涂、爆炸喷涂和超音速火焰喷涂技术成功制备了结构和性能良好的 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 高温耐磨自润滑涂层。在三种涂层中, 爆炸和超音速火焰涂层的结构更加致密, 硬度和结合强度更高。

(2) 采用包覆法制备的粉末进行喷涂, 能在一定程度上抑制碳化物的失碳和氧化, 减少喷涂过程中低熔点化合物的烧蚀。固体润滑剂 $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 500°C 左右软化, 在摩擦表面形成润滑膜, 可以有效降低三种热喷涂 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层的摩擦系数和磨损率, 同时减弱对磨件的磨损。由于爆炸喷涂和超音速火焰喷涂 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层更加致密、硬度更高以及更强的层间结合, 其耐磨性要高于等离子喷涂涂层。

参考文献:

- [1] 薛群基, 吕晋军. 高温固体润滑研究的现状及发展趋势 [J]. 摩擦学学报, 1999, 19 (1): 91-96
- [2] 李剑锋, 周霞明, 丁传贤. 等离子喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层的气孔率统计分析 [J]. 航空材料学报, 2000, 20 (1): 33-39
- [3] W IRO JANUPATUMP S SH IPWAY P H, MCCARTNEY D G. The influence of HVOF powder feedstock characteristics on the abrasive wear behaviour of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coatings [J]. Wear 2001, 249: 829-837.
- [4] MOHANTY M, SM ITH R W, DEBONTE M, *et al*. Sliding wear behavior of thermally sprayed 75/25 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ wear resistant coatings [J]. Wear 1996, 198: 251-266
- [5] MATEOS J, CUETOS J M, VIJANDE R, *et al*. Tribological properties of plasma sprayed and laser remelted 75/25 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ coatings [J]. Tribology International 2001, 34: 345-351.
- [6] GU ILEMANY J M, M IGUEL J M, V IZCA NO S, *et al*. Role of heat treatments in the improvement of the sliding wear properties of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coatings [J]. Surface and Coatings Technology 2002, 157: 207-213.
- [7] 李剑锋, 丁传贤. 水润滑下等离子喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层 / 增韧 SiC 陶瓷摩擦副的摩擦学特性 [J]. 摩擦学学报, 2001, 21 (2): 90-93
- [8] DONNET C, ERDEM IR A. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings [J]. Surface and Coatings Technology 2004, 180~181: 76-84.
- [9] SLINEY H E. Solid lubricant materials for high temperature—a review [J]. Tribology International 1982, 15: 303-310.
- [10] SHINYA SASAKI. Tribological evaluation of plasma sprayed coatings for high temperature sliding surface against cordierite [J]. Materials and Manufacturing Processes 1999, 14: 185-194.
- [11] LIU G H, ROBBEVALLOIRE F, GRAS R, *et al*. Improvement in tribological properties of chromium oxide coating at high temperature by solid lubricants [J]. Wear 1993, 160: 181-189.
- [12] MOORE G D, RIFFER J E. The friction and wear characteristics of plasma-sprayed NiO-CaF_2 in rubbing contact with a ceramic matrix [J]. Lubrication Engineering 1974, 30: 596-604.
- [13] SLNEY H E, STOM T N, ALLEN G P. Fluoride solid lubricants for extreme temperatures and corrosive environments [J]. ASLE Transactions 1965, 8: 309-322.
- [14] DELLACORTE C. The effect of counterface on the tribological performance of a high temperature solid lubricant composite from 25 to 650°C [J]. Surface and Coatings Technology 1996, 86~87: 486-492.
- [15] DELLACORTE C, SLNEY H E. Composition optimization of self-lubrication chromium-carbide based composite coatings for use to 760°C [J]. ASLE Transactions 1987, 30: 77-83.
- [16] WANG W C. Application of a high temperature self-lubricating composite coating on steam turbine components [J]. Surface and Coatings Technology 2004, 177~178: 12-17.

Microstructure and Properties of NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ Coatings Prepared with Three Kinds of Thermal Sprayed Technologies

HUANG Chuan-bing¹, DU Ling-zhong¹, ZHANG Wei-gang¹, WANG Lu², HOU Guang-ku²

(1. State Key Laboratory of Multi-phase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Shenyang LMing Aero-Engineering (group) Corporation Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract Microstructures, composition, porosity, hardness, bonding strength and tribological properties of NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ coatings prepared with plasma spraying (APS), detonation spraying (DS) and high velocity oxy-fuel spraying (HVOF) was systematically investigated. The results show that using coated spray powders, the decarburization of carbide, oxidation and ablation are reduced in thermal spray process. The NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ coatings deposited by HVOF and detonation spraying have higher density, hardness and bond strength with comparison to plasma spraying. The friction coefficients of three kinds of NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ coatings decrease with the increasing temperatures, and the high temperature friction coefficients are significantly lower than that at room temperature. The friction coefficients of HVOF and detonation spraying coatings are lower than plasma spraying coating, and HVOF and detonation spraying coatings show better wear-resistance. The friction coefficients and wear rates of three coatings as well as the wear rates of coupled Si₃N₄ balls are reduced due to the formation of BaF₂·CaF₂ lubrication layer at elevated temperatures.

Key words thermal spray; NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂; microstructure; mechanical properties; friction and wear