

NiCr/Cr₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ 高温自润滑 耐磨涂层的制备与摩擦磨损特性

黄传兵^{1,2}, 杜令忠¹, 张伟刚¹

(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 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 采用加压氢气还原和固相合金化技术, 以 BaF₂ · CaF₂ 共晶、Cr₃C₂ 颗粒为核心, 制备了 NiCr 合金包覆的 NiCr/Cr₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ 复合粉末, 采用大气等离子喷涂技术制备相应涂层. 采用扫描电子显微镜、X 射线衍射和 SRV 摩擦磨损试验机 etc 分析测试技术, 研究了涂层组成、结构以及从室温到 500 °C 涂层的摩擦磨损性能. 研究结果表明: 研制的 NiCr/Cr₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ 复合涂层是一种性能优良的高温自润滑耐磨涂层, 表面包覆的致密 NiCr 层抑制了喷涂过程中颗粒的氧化、脱碳和烧蚀, 涂层的显微硬度和结合强度较高; 涂层在室温下的摩擦系数为 0.74 ± 0.02, 随温度升高摩擦系数逐渐降低, 500 °C 时降低为 0.38 ± 0.03, 涂层和对偶球 Si₃N₄ 的磨损率与室温相比显著下降. 摩擦机理研究发现, 高温下 BaF₂ · CaF₂ 共晶软化, 导致涂层剪切强度比室温时明显变低, 在摩擦表面形成了连续的 BaF₂ · CaF₂ 润滑膜.

关键词: 包覆粉末; 等离子喷涂; NiCr/Cr₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ 涂层; 摩擦磨损性能

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004 - 0595 (2009) 01 - 0068 - 07

热喷涂 Cr₃C₂ - NiCr 涂层是最常见的碳化物耐磨陶瓷涂层, 由难熔的碳化物硬质相和韧性的金属相组成, 具有较高的熔点、硬度和与基体材料的结合力以及优良的高温热稳定性和化学稳定性, 是理想的耐磨材料, 在海洋设备、动力工业和钢铁工业等高温部件上已获得了较为广泛的应用^[1-5]. 但是, 热喷涂 Cr₃C₂ - NiCr 涂层硬度高, 在滑动过程中的摩擦系数也较高, 摩擦副材料的磨损较为严重, 极大地限制了该涂层在高速运转机械上的应用^[6-7]. 为了改善这种硬质涂层的摩擦学性能, 一般通过在涂层中加入固体润滑剂的方法来降低其摩擦系数, 同时减轻对零件的磨损^[8-10]. 常用的高温固体润滑剂有软质贵金属 (Au、Ag 等)、无机氟化物 (LiF、CaF₂ 等)、金属氧化物 (PbO、MoO₃ 等) 等. 另一方面, Cr₃C₂ - NiCr 喷涂粉末一般采用混合黏结技术制造, 即 Cr₃C₂ 与 NiCr 合金粉未经机械混合、烧结破碎、团聚致密化等步骤制备. 在热喷涂过程中, 团聚烧结粉末中的碳化物容易发生氧化和脱碳反应, 掺杂的

低熔点润滑物相则更容易发生烧蚀, 造成涂层硬度降低、组织结构变差, 从而降低涂层的摩擦学性能^[11-12]. 采用化学包覆技术制备的复合粉末可以在一定程度上避免烧蚀反应的发生. 制备包覆型复合粉末的方法较多, 其中电沉积对生产操作条件的要求非常高, 需要有滚动式的电解设备, 一般不用于粉末镀层的制备; 颗粒化学镀存在难以定量包覆、槽液易于分解、游离金属较多和引进硼磷杂质等诸多缺点. 加压氢还原技术目前已经较大规模用于复合粉末的研制和生产, 其工艺技术易于实现, 所得粉末组份精确可控, 而且其组份比例易于调整和控制^[13]. 因此本文作者拟采用以 BaF₂ · CaF₂ 共晶和 Cr₃C₂ 硬质相颗粒为核心, 运用加压氢还原结合固相合金化的方法制备 NiCr 致密包覆的喷涂粉末, 用等离子喷涂的方法制备 NiCr/Cr₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ 高温自润滑耐磨涂层, 并对涂层的组织结构和摩擦学性能进行研究, 以进一步拓宽 Cr₃C₂ - NiCr 涂层的应用领域.

收稿日期: 2008 - 07 - 16; 修回日期: 2008 - 11 - 07; 联系人: 张伟刚, e-mail: wgzhang@home.ipe.ac.cn

作者简介: 张伟刚 (1968 -), 男, 博士, 研究员, 博导, 目前主要从事高温复合材料化工技术研究.

1 实验部分

1.1 粉末材料制备

将化学纯 BaF₂ 和 CaF₂ 粉末按照共晶比 (62 38wt%) 进行充分混合后装入石墨坩埚,置于 Ar 气保护的管式炉中在 1 100 熔融,缓慢冷却至室温^[9],破碎研磨至 38 ~ 74 μm. 在高压釜中加入硫酸镍、硫酸铵、氨水和活化剂,采用加压氢还原方法分别在 C₃C₂ (45 ~ 74 μm) 和 BaF₂ · CaF₂ 共晶颗粒表面包覆致密的 Ni 层,采用固态合金化方法在保护气氛管式炉中进行 NiCr (Ni Cr = 80 20 wt%) 互扩散,制得 NiCr 与 C₃C₂ 质量比为 25 75、BaF₂ · CaF₂ 共晶质量含量为 10% 的包覆型等离子喷涂粉末. 将制备好的粉末破碎筛分后,取粒度 38 ~ 90 μm 的粉末喷涂用.

使用 APS - 2000 等离子喷涂系统制备涂层. 喷涂前对基体 45# 钢 (40 mm × 30 mm × 3 mm) 进行喷砂预处理,以获得清洁粗糙、活性高的表面,然后喷涂 0.1 mm 的 NiAl 黏结底层,最后用经过优化的喷涂参数 (功率 30 ~ 40 kW, 喷距 100 ~ 110 mm, 送粉速率 30 ~ 40 g/min) 喷涂不少于 0.4 mm 的 NiCr/C₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ 工作层.

1.2 试验方法

采用 Hall 流量计测量喷涂粉末的流动性和松装密度. 涂层的孔隙率采用图像分析法进行分析,用

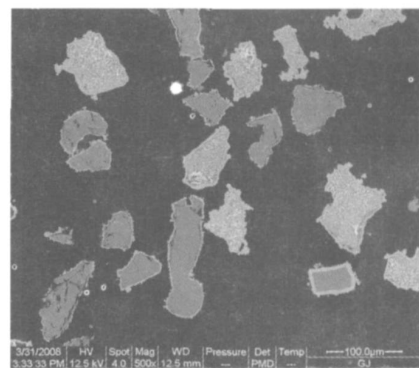
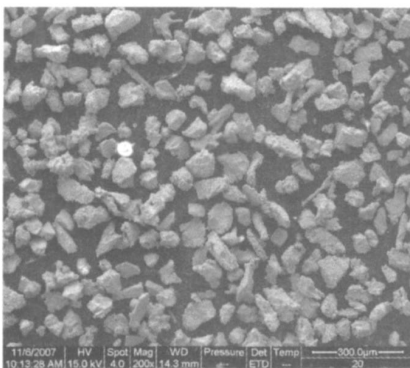
带有 EDS 能谱分析的 FEI Quanta 200 FEG 型环境电子扫描显微镜 (SEM) 分别进行组织结构分析. 采用 Philips X Pert Pro X 射线衍射仪 (XRD) 对粉体和涂层材料进行相组成分析,测试条件为: Cu 靶, K 射线,管电压 40 kV,管电流 30 mA. 在 WDW - 100E 微机控制电子式万能材料试验机上采用拉伸法按 GB/T 8642 - 2002 标准测试涂层结合强度 (样品尺寸 φ25 mm × 5 mm), 拉伸速率 1 mm/min. 采用 HX - 1000TM 型显微硬度计测试涂层抛光截面的显微硬度,所加载荷 200 g,作用时间 15 s.

将涂层样品加工成尺寸为 φ24 mm × 7.9 mm 的试样,采用 OPTMOL SRV 高温摩擦磨损试验机进行点接触往复摩擦试验. 试验所加载荷 50 N,频率 30 Hz,振幅 1.5 mm,测试温度分别为室温、200、400 和 500,对偶材料为 φ10 mm Si₃N₄ 陶瓷球,精度 G5 级. 采用 Talysurf 5P - 120 表面形貌仪测试磨痕的体积,取 3 个试样的平均值. 试验结束后用丙酮和无水乙醇超声清洗涂层磨痕和 Si₃N₄ 表面,用扫描电子显微镜 (SEM) 观察磨痕表面形貌,同时用 SEM 附带的 EDS 分析其成分变化.

2 结果与讨论

2.1 粉体的结构与性能

图 1 是等离子喷涂用粉末的表面 (a) 和截面 (b) 形貌. 从图 1 (a) 中可以看出粉末呈不规则角



(a) Morphology of powders

(b) Cross-sectional microstructure of powders

Fig 1 SEM morphology of NiCr/C₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ spray powders

图 1 等离子喷涂粉末的 SEM 形貌

形,粒度分布均匀. 图 1 (b) 粉末截面的背散射图中灰色颗粒是 C₃C₂ 硬质耐磨相,它可以增强涂层的强度和抗磨损性能;亮颜色的颗粒是 BaF₂ · CaF₂ 共晶,为高温固体润滑相;C₃C₂ 和 BaF₂ · CaF₂ 共晶表面包覆着一层均匀致密的白色 NiCr 合金层,NiCr 合

金作为高温黏结相. SEM 测量 NiCr 包覆层厚度约为 3 ~ 5 μm,不但提供涂层必需的力学性能和抗氧化、腐蚀性能,还能够有效隔绝喷涂过程中核心颗粒与 O₂ 的接触,大幅减少喷涂过程中碳化物的脱碳、氧化以及氟化物的烧蚀.

图 2 是等离子喷涂粉末和 $\text{NiCr}/\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层的 XRD 相分析. 从图 2(a) 可以看出, 粉末中除了极少量的 C 外 (Cr_3C_2 中的杂质), 没有其他的杂质. 从图 2(a) 可以发现, 涂层组分与喷涂粉末相比多了少量的氧化物 (Cr_2O_3 和 NiO) 峰, 没有发现 Cr_7C_3 和 Cr_{23}C_6 , 表明喷涂过程中碳化物脱碳很少, 碳化物表面包覆的 NiCr 层发挥了重要作用, 与前面的分析一致.

喷涂粉末的流动性和松装比对喷涂工艺及涂层质量有重要影响. 好的流动性可以保证喷涂过程的

均匀送粉, 避免枪口的堵塞. 较大的松装比有利于保证喷涂过程中将粉末送入火焰中心, 保持良好的熔化特性. Hall 流量计测得本试验所研制的复合粉末流动性为 36 s/50 g, 松装密度 2.268 g/mL, 具有很好的流动性和松装比, 有利于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.

2.2 涂层的结构与基本性能

图 3 是等离子喷涂 $\text{NiCr}/\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层的典型组织形貌. 图 3(a) 中从左至右依次为基体、黏结层和工作层. 可以看出, 涂层与基体机械嵌

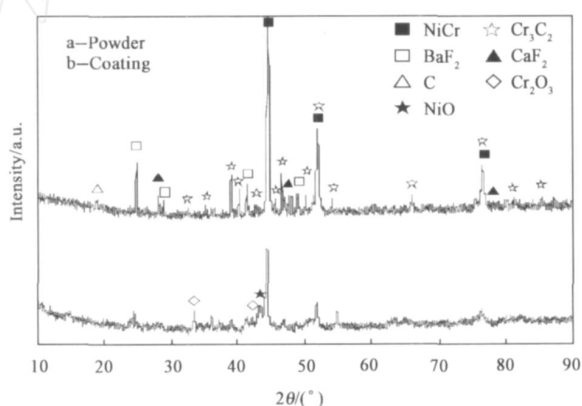
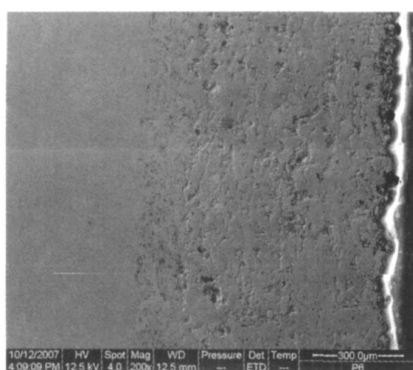
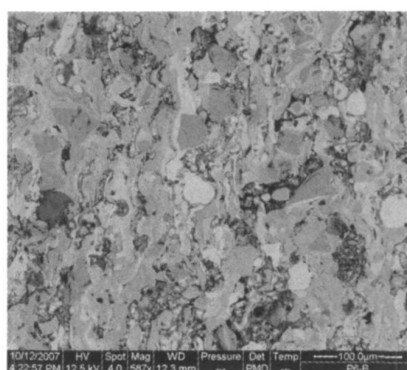


Fig. 2 XRD patterns of the spray powder and as-sprayed $\text{NiCr}/\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ coating

图 2 $\text{NiCr}/\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 喷涂粉末和涂层的 XRD 图谱



(a) Secondary electron image of coating



(b) Back scattered electron image of coating

Fig. 3 Cross-sections of the as-sprayed microstructure of $\text{NiCr}/\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ coating

图 3 等离子喷涂 $\text{NiCr}/\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层的组织结构

合很好, 具有典型的扁平状层状结构. 扁平颗粒间结合紧密, 涂层无粗大的孔隙, 灰度法测得涂层孔隙约 5% 左右. 拉伸试验表明, 断裂主要发生在涂层内部, 涂层的内聚强度最低值为 21 MPa, 最高为 28 MPa, 因此涂层与基体的结合强度要远大于 21 MPa. 图 3

(b) 中颜色较浅的亮白色相是 NiCr 合金相, 灰色的

是碳化物相, 在扁平颗粒之间有少量的氧化物相, 氟化物镶嵌在层状颗粒内部, 涂层均匀致密. 喷涂过程中, 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, 因此有效地减少了喷涂过程中碳化物脱碳、氟化物的氧化及烧蚀, 保证

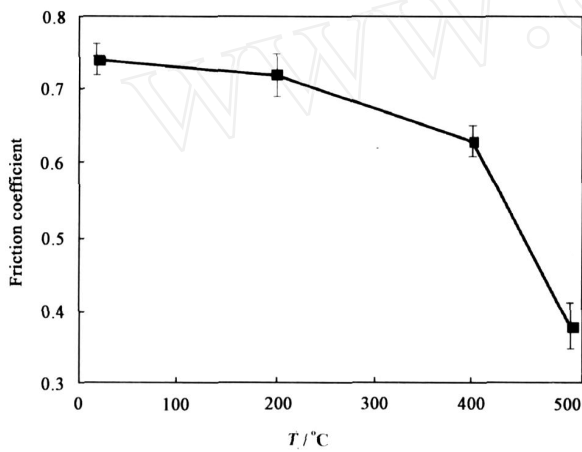
了涂层组分的完整性,使涂层具有更好的性能.

材料硬度是影响磨料磨损的最重要因素之一.一般说来,材料的硬度愈高,其耐磨性就愈好.涂层的显微硬度测试表明,碳化物硬质相的显微硬度 HV_{0.2}为 930 ±50,氟化物聚集区域基本在 HV_{0.2} 450 左右,高的显微硬度保证了涂层的耐磨性.

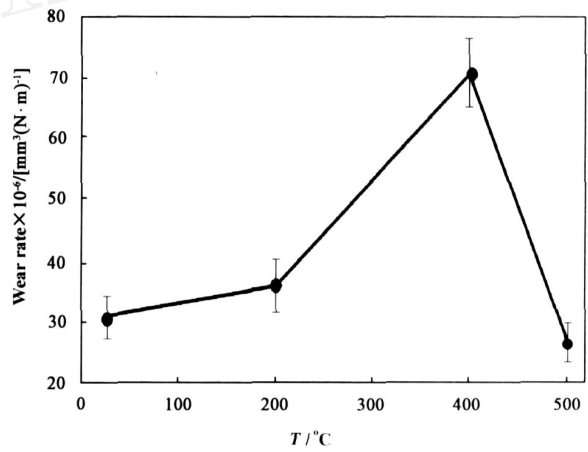
2.3 涂层的摩擦磨损性能

图 4是在不同温度条件下 NiCr/C₃C₂ - BaF₂ ·

CaF₂ 涂层摩擦系数和磨损率的变化曲线.从图 4 (a)可以看出,室温下涂层的摩擦系数较高,约为 0.74.随着温度的升高,涂层的摩擦系数逐渐减小,但从室温到 400 降低幅度较小.当外界温度上升至 500 时,涂层的摩擦系数从 400 时的 0.65急剧下降至 0.38左右,摩擦系数发生了较大的改变.从图 4(b)可以看出,涂层在室温和 200 时的磨损率较低,温度升至 400 时磨损率上升较快,达到



(a) Friction coefficient of coatings



(b) Wear rates of coatings

Fig 4 Influences of temperature on the friction coefficient (a) and wear rates (b) of the NiCr/C₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ coatings

图 4 温度对 NiCr/C₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ 涂层摩擦系数 (a)和磨损率 (b)的影响

70 ×10⁻⁶ mm³ / (N · m). 其原因主要是摩擦面的温度升高,涂层的基体镍塑性变形较为严重,当受到反复的挤压和切削力时,会发生破坏.基体的破坏减小了对 C₃C₂ 颗粒的保护作用,导致 C₃C₂ 颗粒脱落,使涂层的剥落增多,因而涂层磨损率增大.但随着温度进一步升高至 500 时,涂层的磨损率又急剧下降至 25 ×10⁻⁶ mm³ / (N · m),低于室温的磨损率.与实验室现有的 NiCr - C₃C₂ 涂层相比,NiCr/C₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ 涂层的摩擦系数在室温至 400 时与 NiCr - C₃C₂ 涂层大致相当,温度高于 400 后其摩擦系数却显著低于 NiCr - C₃C₂ 涂层.另外 NiCr/C₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ 涂层的磨损率在温度低于 400 时略高于 NiCr - C₃C₂ 涂层,但是温度高于 400 时显著降低,低于 NiCr - C₃C₂ 涂层.表明固体润滑剂开始起作用.

测量得到对摩副 Si₃N₄ 球在室温下的磨损率为 6.2 ×10⁻⁶ mm³ / (N · m),温度升高导致磨损率有所上升,200 时磨损率 8.6 ×10⁻⁶ mm³ / (N · m),400 时的磨损率与 200 时磨损率相差不多,为

8.4 ×10⁻⁶ mm³ / (N · m).当温度到 500 时,磨损率下降至 5.1 ×10⁻⁶ mm³ / (N · m),低于室温的磨损率.高温下涂层的摩擦系数、涂层和对摩球的磨损率均显著降低,表明高温下固体润滑剂 BaF₂ · CaF₂ 共晶开始起作用,提供有效地润滑. BaF₂、CaF₂ 等氟化物在强氧化和还原气氛中很稳定,并且有不擦伤对偶件的特性,它们的熔点一般都在 815 以上,在高温下软化而具有润滑性.而且 BaF₂ · CaF₂ 共晶体因为有更低的熔点和剪切力,所以比单种氟化物的润滑性能更好,可作为高温陶瓷用固体润滑剂^[8,10].

2.3 磨痕分析

图 5是室温和 500 时 NiCr/C₃C₂ - BaF₂ · CaF₂ 涂层的磨痕 SEM 照片.根据 EDS元素分析结果发现,图 5(a)中亮色为 NiCr相,灰色为 C₃C₂相,氧化物和氟化物主要分布在颜色较暗黑色区域.涂层与 Si₃N₄ 对摩后,其磨痕表面比较光滑,但呈现出沿滑动方向的磨痕条纹和凹坑,涂层表面受到了明显的挤压作用,涂层的磨损主要是沿气孔、裂纹和新的凹坑边缘等处发生的裂纹扩展和颗粒断裂.

此外,磨痕表面也出现 Si_3N_4 的黏着. 500 下涂层磨痕的 EDS 分析表明,涂层磨痕表面大面积存在着氟化物相,均匀分布于整个磨痕表面,表明氟化物润滑膜逐渐形成.同时 EDS 分析发现室温下对偶球表面仅含有 Si_3N_4 球自身的元素 Si、N、Al 等元素 [图 6(a)],而 500 时其磨痕表面除 Si_3N_4 球自身

元素外还存在 Ba、Ca、F、Ni、Cr 元素的峰 [图 6(b)],表明在滑动摩擦过程中有部分润滑膜转移至对偶球表面. 500 时, $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 剪切强度比室温时显著变低, $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 颗粒软化铺展开来,连续的表面转移膜覆盖了整个磨痕面,这与 Wang^[14] 的研究结果一致.在 C_5C_2 薄层中,显微裂纹和断裂碎

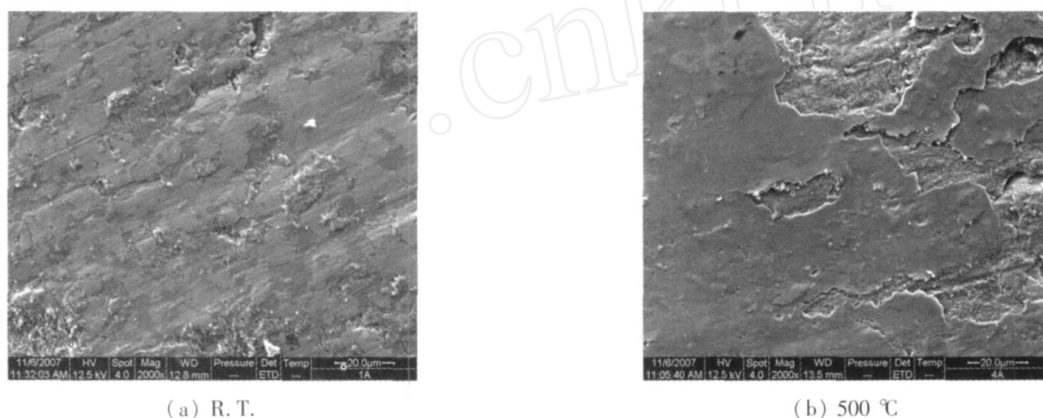


Fig. 5 Worn morphology of NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ coating at room temperature (a) and 500 °C (b)

图 5 室温(a)和 500℃(b)时 NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ 涂层的磨痕形貌

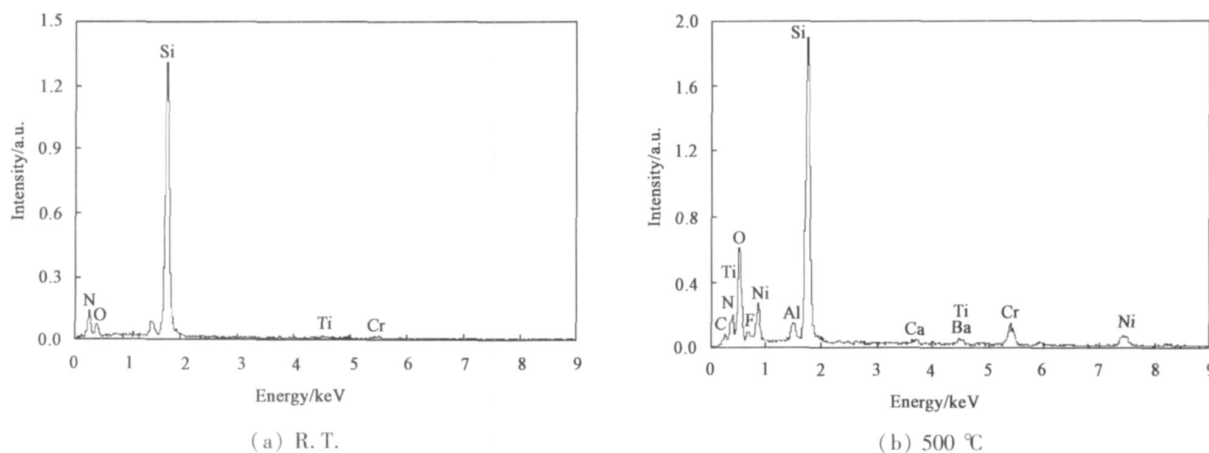


Fig. 6 EDS analyses of worn surface of Si_3N_4 balls at room temperature (a) and 500 °C (b)

图 6 室温(a)和 500 °C (b) 时 Si_3N_4 球表面磨痕的 EDS 分析

片可导致涂层材料的脱落,而 $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 的填入则使此粗化不平的表面平滑化,并成为含有 C_5C_2 硬质点的低摩擦与低磨损的耐磨薄膜,如图 5(b)所示.在室温至 400 时,脆性碎片和 $\text{C}_5\text{C}_2 - \text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 剥离颗粒对磨损的进程起了主导作用. 500 时,塑性变形及连续的 $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 转移膜、轻微黏着磨损和黏滞流对磨损进程起主导作用.

3 结论

a 采用加压氢还原和固相合金化方法制备的包覆型复合粉末,可以有效地减少等离子喷涂过程

中的氧化、脱碳和烧蚀.用该粉末制备的 NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ 涂层孔隙率低,显微硬度和结合强度高.

b NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ 涂层摩擦系数从室温到 400 缓慢减小,温度升至 500 时,涂层的摩擦系数显著下降;涂层的磨损率从室温到 400 逐渐上升,至 500 时急剧下降,低于室温的磨损率.

c 500 时 $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 颗粒软化,剪切强度比室温时显著变低,涂层与 Si_3N_4 球之间形成了一层连续的 $\text{BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 润滑膜,显著降低了涂层的摩

擦系数,减少了涂层及摩擦副的磨损。

参考文献:

- [1] Wirojanupatump S, Shipway P H, McCartney D G The influence of HVOF powder feedstock characteristics on the abrasive wear behaviour of CrxCy - NiCr coatings[J]. Wear, 2001, 249: 829 - 837.
- [2] 纪岗昌,李长久,王豫跃,等. 喷涂工艺条件对超音速火焰喷涂 Cr₃C₂ - NiCr涂层冲蚀磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(6): 424 - 428.
- Ji G C, Li C J, Wang Y Y, *et al* Effect of spray conditions on erosion performance of high velocity oxygen fuel sprayed Cr₃C₂ - NiCr coatings[J]. Tribology, 2002, 22(6): 424 - 428.
- [3] 李剑锋,丁传贤. 水润滑下等离子喷涂 Cr₃C₂ - 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.
- Li J F, Ding C X Tribological properties of plasma - sprayed Cr₃C₂ - NiCr coating against toughened SiC ceramics under water - lubricated sliding[J]. Tribology, 2001, 21(2): 90 - 93.
- [4] Wang B Q, Luer K The erosion - oxidation behavior of HVOF Cr₃C₂ - NiCr cement coating[J]. Wear, 1994, 174: 177 - 185.
- [5] Guilemany J M, Miguel J M, Vizcaino S, *et al* Role of heat treatments in the improvement of the sliding wear properties of Cr₃C₂ - NiCr coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 157: 207 - 213.
- [6] Mohanty M, Smith R W, De Bonte M, *et al* Sliding wear behavior of thermally sprayed 75/25 Cr₃C₂/NiCr wear resistant coatings[J]. Wear, 1996, 198: 251 - 266.
- [7] Mateos J, Cuertos J M, Vijande R, *et al* Tribological properties of plasma sprayed and laser remelted 75/25 Cr₃C₂/NiCr coatings[J]. Tribology International, 2001, 34: 345 - 351.
- [8] Silney H E Solid lubricant materials for high temperature - a review[J]. Tribology International, 1982, 15: 303 - 310.
- [9] Dellacorte C, Silney H E Composition optimization of self - lubrication chromium - carbide based composite coatings for use to 760 [J]. ASLE Transactions, 1987, 30: 77 - 83.
- [10] Longson B. Lubrication of high temperature ceramic materials [J]. Tribology International, 1983, 16: 221 - 225.
- [11] Ji G C, Li C J, Wang Y Y, *et al* Dominant effect of carbide rebounding on the carbon loss during high velocity oxy - fuel spraying of Cr₃C₂ - NiCr[J]. Thin Solid Films, 2002, 419: 137 - 143.
- [12] Matthews S, Hyland M, James B. Long - term carbide development in high - velocity oxygen fuel/high - velocity air fuel Cr₃C₂ - NiCr coatings heat treated at 900 [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2004, 13: 526 - 536.
- [13] 梁焕珍,毛铭华,张荣源. 水热加压氢还原制取镍包石墨 [J]. 化工冶金, 1996, 17(2): 111 - 116.
- Liang H Z, Mao M H, Zhang R Y Preparation of Nickel - coated graphite by hydrothermal pressure hydrogen reduction [J]. Journal of Engineering Chemistry and Metallurgy, 1996, 17(2): 111 - 116.
- [14] 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.

Preparation and Tribological Properties of NiCr/Cr₃C₂ - BaF₂·CaF₂ High Temperature Self-lubricating Wear-resistant Coating

HUANG Chuan-bing^{1,2}, DU Ling-zhong¹, ZHANG Wei-gang¹

(1. State Key Laboratory of Multi-Phase Complex Systems, Institute of Process Engineering,

Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: BaF₂·CaF₂ eutectic and Cr₃C₂ composite powders coated with NiCr alloy were prepared with the technology of hydrogen reduction hydrothermal process combined with a solid state alloying NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ coating was produced by atmospheric plasma spray (APS) using the prepared powders. The microstructure and phase compositions of the powders as well as the deposited coating were analyzed by SEM and XRD, while the friction and wear behavior of the coatings from room temperature to 500 °C were evaluated using a SRV high temperature tribometer. The NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ composite coating exhibited excellent wear-resistant performance by high temperature self-lubrication with high microhardness and cohesive strength. Oxidation, decarburization and ablation of Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ during spray were avoided due to the protection by NiCr layer. The friction coefficient of the coating, 0.74 ± 0.02 at room temperature, gradually decreased with the increase of temperature, a small value of 0.38 ± 0.03 was achieved as temperature up to 500 °C, which led to a significant decrease of wear rates of both of the coating and the Si₃N₄ ball. BaF₂·CaF₂ eutectic underwent a transition with decrease of shear strength at high temperature from brittle to plastic state, which resulted in the formation on a continuous lubricating layer in the wear track at 500 °C.

Key words: composite powders, plasma spray, NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ coating, friction and wear properties

Author: ZHANG Wei-gang, male, born in 1968, Ph. D., Professor, e-mail: wgzhang@home.ipe.ac.cn