

等离子喷涂制备 NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y 自润滑涂层及其高温摩擦性能*

夏 杰, 陈小虎, 袁晓静, 姚春江, 邓 川

(第二炮兵工程大学 五系, 西安 710025)

摘 要: 通过等离子喷涂技术制备润滑相 BaF₂:CaF₂:C 比分别为 3.1:1.9:7 和 15.5:9.5:4.9 的两种 NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y 复合涂层, 研究了所选固体润滑剂在高温摩擦中对涂层润滑性能和机械性能的影响, 分析 BaF₂/CaF₂/C 的综合作用, 在 500 °C 和 800 °C 时分别对涂层进行高温摩擦试验。结果表明: 500 °C 时, 摩擦面比较粗糙, 涂层的摩擦因数较高, 磨损较为严重, 表现出明显的剥落现象; 800 °C 时, 涂层表面没有 BaF₂/CaF₂/C 等润滑相的存在, 发生了摩擦化学反应, 摩擦表面生成了一层光滑致密的氧化膜, 并存在一定程度的材料转移现象。经过 X 射线衍射(XRD)分析表明, 在高温和摩擦的共同作用下, 涂层表面有 BaCrO₄ 生成, 摩擦因数最低可达 0.268, 对应的磨损量为 0.3516 mm³, 有效降低了涂层的摩擦和磨损。在涂层的性能测试中, 各润滑相之间的协同作用较好。

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 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)06-0067-08

Fabrication and High Temperature Tribological Properties of Plasma Sprayed NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y Self-lubricating Coatings

XIA Jie, CHEN Xiao-hu, YUAN Xiao-jing, YAO Chun-jiang, DENG Chuan
(Department No. 5, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025)

Abstract: Two types of NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y self-lubricating coatings were deposited by plasma spraying, whose rates of BaF₂/CaF₂/C are 3.1:1.9:7 and 15.5:9.5:4.9, and the effect of multi-lubricants on tribological properties was investigated at 500 °C and 800 °C. The synergetic effects of BaF₂, CaF₂ and graphite on the tribological characteristics were analyzed. The friction test was carried out on a CMS band high temperature tribometer. At 500 °C, the worn surfaces were unpolished, and coatings had high friction coefficients and severe wear, with obvious phenomenon of spalling. However, at 800 °C, no phases of BaF₂/CaF₂/C existed, friction chemical reactions happened, worn surfaces were covered with a compact oxidation film, and some glaze film partially transferred to the counterface. X-ray diffraction (XRD) analysis show that the new phase of BaCrO₄ are formed in the composites under the effect of high-temperature and friction, the lowest friction coefficient is 0.268, and the wear volume is 0.3516 mm³, which decreased the friction and wear of the coatings. The synergetic effect of the solid-lubricants plays an important lubricating role during the tests at the high temperature.

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

收稿日期: 2014-06-14; 修回日期: 2014-09-11; 基金项目: * 总装维修改革项目(51405497)

作者简介: 夏杰(1990-), 男(汉), 江苏泗洪人, 硕士生; 研究方向: 维修保障

网络出版日期: 2014-11-25 10:51; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20141205.1508.036.html>

引文格式: 夏杰, 陈小虎, 袁晓静, 等. 等离子喷涂制备 NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y 自润滑涂层及其高温摩擦性能 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(6): 67-74.

0 引言

随着人类工业文明的发展,特别是各国航空航天事业的进步,在很多机械装备中,传统的润滑油和润滑脂已经不能满足现代零部件所需的润滑要求,这就促使人们去研究新型的润滑技术——固体润滑技术。固体润滑技术的发展满足了苛刻环境中零部件的润滑要求,进一步促进了工业的进步;同时,还可以有效减少润滑系统的维修问题,特别是研究从室温到 800 ℃ 甚至到 1 000 ℃ 温度范围内能实现润滑效果的复合固体自润滑涂层,吸引了许多专家学者的注意^[1-3]。表面技术的快速发展也为各种自润滑涂层的研究和制备提供了技术支持。

通过前人研究发现,氟化物在镍基和陶瓷基(Ni-Cr-Cr₃C₂, Ni-Cr-Cr₂O₃, ZrO₂)的复合涂层中得到了广泛的应用,主要的涂层制备工艺为等离子喷涂技术和粉末冶金技术。目前,具有代表性的是 NASA 研制的 PS 系列涂层和高温自适应涂层。

在 PS 系列涂层中,氟化物和银的润滑效果得到了很好的体现。在 PS400 中,银和 BaF₂/CaF₂ 共晶体为润滑相,在 650 ℃ 时摩擦因数为 0.22,涂层的摩擦磨损较 800 ℃ 时严重。在 PS304 系列涂层中,由于 Cr₂O₃ 的存在,高温下涂层的尺寸稳定性较差。PM212 也以 Ag 和 BaF₂/CaF₂ 共晶体作为润滑相,以 Cr₃C₂ 作为增韧相,Dellacerte 等^[4-5]研究了复合涂层的摩擦学性能,从室温到 800 ℃ 涂层的平均摩擦因数为 0.29~0.38。朱圣宇^[6]等研究的 Ni₃Al-BaF₂-CaF₂-Ag-Cr 复合涂层在 20~800 ℃ 温度范围内的平均摩擦因数为 0.30~0.36,磨损量为 $6.5 \times 10^{-5} \sim 2.45 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。镍基自润滑涂层在高温环境中具有良好的摩擦学行为,但是当超过一定使用温度后,涂层的氧化和机械性能的降低会导致涂层的磨损加剧,这是一个需要克服的问题,在研究复合自润滑涂层的过程中还存在着各相之间界面结合强度低和热膨胀性能差等缺点^[7-10]。

文中采用等离子喷涂技术制备 NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y 复合涂层,研究涂层的高温摩擦磨损性能,并分析涂层的摩擦机理,以期制备一种具有较好润滑性能和机械性能的宽温域自润滑涂层。

1 材料与方法

1.1 材料

原始粉末主要为 NiCoCrAlY 商业粉末,平均粒径为 5~15 μm。BaF₂ 和 CaF₂ 平均粒径为 1~5 μm。C 粉末粒径为 5~10 μm。Y 平均粒径为 1~20 μm。以 GH 4145 高温合金钢为基材,加工后的尺寸为 Φ 30 mm×8 mm。在等离子喷涂前的预处理过程中,为提高涂层与基体的结合面积和结合质量,对基体进行喷砂处理,材料为刚玉砂,并在喷砂后 2 h 内进行喷涂。

1.2 NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y 复合粉末的制备

NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y 复合粉末的配比情况如表 1 所示,按比例将粉末混合均匀后,加入到聚乙烯醇溶液中搅拌,同时对溶液焙烧(300 ℃)直至烘干,然后在高温环境下(800 ℃)持续烧结 3 h。干燥后,对块体进行破碎、研磨和过筛处理,使其粒径不大于 100 μm。

表 1 NiCoCrAlY 基复合粉末的组成

Table 1 Composition of the NiCoCrAlY matrix self-lubricant powders (ω/%)

| Sample | NiCoCrAlY | BaF ₂ | CaF ₂ | C | Y |
|--------|-----------|------------------|------------------|-----|-----|
| TC1 | 85 | 3.1 | 1.9 | 7 | 3 |
| TC2 | 67 | 15.5 | 9.5 | 4.9 | 3.1 |

1.3 NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y 涂层的制备

等离子喷涂设备采用 Sulzer Metco 9MC 等离子喷涂系统,该系统以氮气为主气,氢气为辅气,氩气为送粉气,调整喷涂过程中的每次喷涂时间及喷涂次数,确保涂层的厚度为 350~450 μm,经过优化后具体的喷涂参数如表 2 所示。

表 2 等离子喷涂的工艺参数

Table 2 Optimal technical parameters of the plasma technique

| Parameter | Value |
|---|-------|
| Current / A | 500 |
| Voltage / V | 80 |
| N ₂ flow rate / (m ³ ·min ⁻¹) | 2.831 |
| H ₂ flow rate / (m ³ ·min ⁻¹) | 0.283 |
| Powder feed rate / (mL·h ⁻¹) | 200 |
| Spraying distance / mm | 100 |

1.4 涂层性能测试

1.4.1 涂层的力学性能测试

采用 MICROMET 5100 SERIES 全自动显微硬度系统(美国 BUEHLER 公司)对喷有涂层的试样进行显微硬度测试, TC1 所加载荷为 1.96 N, TC2 的载荷为 0.98 N, 保持 15 s, 测试 5 次取平均值。在 858 Mini Bionix II 试验机上对试样进行拉伸试验, 测量 5 次取平均值。

1.4.2 涂层的摩擦学性能测试

摩擦磨损试验在 CSM-2206 型高温摩擦磨损试验机上进行, 通过设备的电炉将试样加热至指定温度后, 以球盘接触的方式进行摩擦磨损试验。摩擦副为 Φ 5 mm 的 Si₃N₄ 陶瓷球, 载荷 10 N, 线速度 0.240 m/s, 时间 60 min。

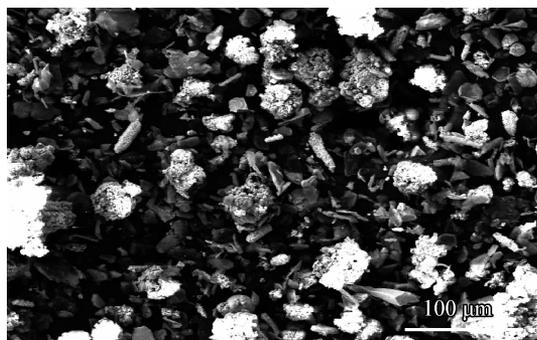
通过 T8000 型表面轮廓仪测量摩擦后的磨痕截面积, 与周长相乘得到磨损体积, 摩擦因数采用多次测量取平均值。用 VEGA II XMU 扫

描电子显微镜(TESCAN 捷克)观测磨损后表面的形貌, 通过 7718 X 射线衍射仪(DXFORD)对摩擦后的表面进行 XRD 分析。

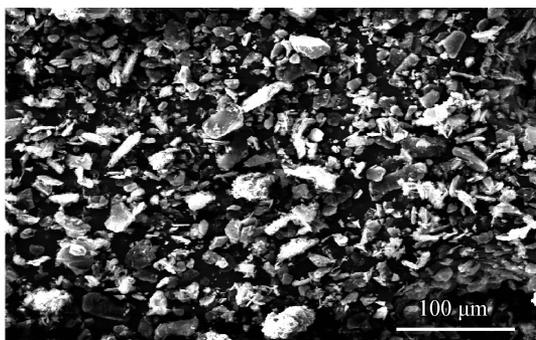
2 结果与讨论

2.1 复合粉末形貌

图 1 为经过造粒后的复合粉末形貌, 粉末发生了有效地团聚, 成型性较好, 呈现球形和片状分布居多, 颗粒的尺寸满足小于 100 μ m 的要求。图 1(a)为 TC1 的复合粉末形态, 从图中可以看出, 它的球形度要明显比 TC2 的球形度好, 这与粉末中的基相(NiCoCrAlY)含量有关。TC1 复合粉末中基相的含量为 85%, 并且基相为金属合金, 本身就呈较好的球形颗粒状, 在造粒过程中发挥了很好的骨架作用。图 1(b)中的形貌在一定程度上体现了润滑相的形貌, 从形貌上要稍逊于 TC1 颗粒。



(a) TC1



(b) TC2

图 1 NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y 复合粉末形貌

Fig. 1 Morphologies of the NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y composite powders

2.2 涂层的力学性能

表 3 为涂层的显微维氏硬度测量结果, TC1 涂层硬度要高于 TC2 涂层硬度, TC1 和 TC2 的平均维氏硬度分别为 430.2 HV_{0.2} 和 403.6 HV_{0.1}。从 TC2 硬度测试结果中可以发现, 硬度的分布随着取样点的不同具有较大的差异, 从 256 HV_{0.1} 到 536 HV_{0.1} 不等; 而 TC1 中各取样点的硬度值较为接近, 这与基相的含量高低有较大关系。

表 4 为涂层的拉伸强度测量结果, TC1 的拉伸强度(35.09 MPa)要远远高于 TC2 的拉伸强度(17.25 MPa)。由此可见, 加入较多的固体润滑剂会在一定程度上降低涂层内部的界面结合强度, 从而导致涂层拉伸强度的降低。可以看出, 涂层的

润滑效果与机械性能之间是一对矛盾体。

表 3 涂层的硬度

Table 3 Vickers hardness of the coatings (HV)

| Coating | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
| TC1 | 486 | 494 | 408 | 393 | 370 | 430.2 |
| TC2 | 256 | 454 | 536 | 454 | 318 | 403.6 |

表 4 涂层的拉伸强度

Table 4 Tensile strength of the coatings (MPa)

| Coating | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| TC1 | 38.33 | 28.48 | 34.79 | 42.65 | 31.22 | 35.09 |
| TC2 | 22.86 | 13.62 | 15.56 | 14.20 | 20.00 | 17.25 |

2.3 复合涂层高温摩擦性能

复合涂层在 500 °C 和 800 °C 时的摩擦因数和磨损量见图 2 和图 3。结果表明,在 500 °C 时涂层的摩擦因数较大,磨损量也相对较大,其中 TC2 的摩擦因数最大,带来的磨损量也最大;800 °C 时,TC2 的摩擦因数大大降低,二者的磨损量也大幅下降。

不同涂层随着温度升高,TC1 的摩擦因数基本保持不变,但是其磨损量降低了近五分之四,为 0.2089 mm^3 ;TC2 的摩擦因数达到最低值约为 0.268,磨损量也大幅下降为近原来的六分之一。

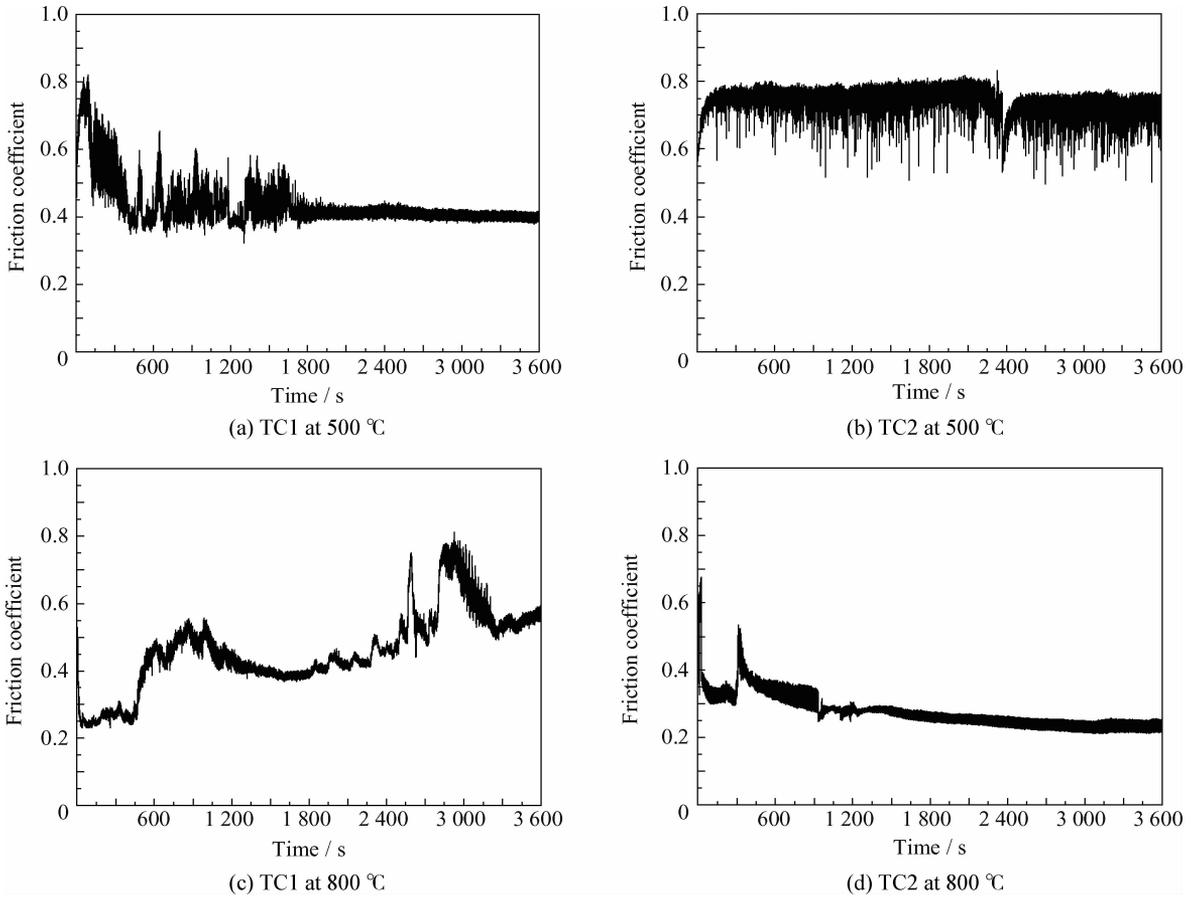


图 2 TC1 和 TC2 在不同温度下的摩擦因数

Fig. 2 Average friction coefficient of the TC1 and TC2 under different temperatures

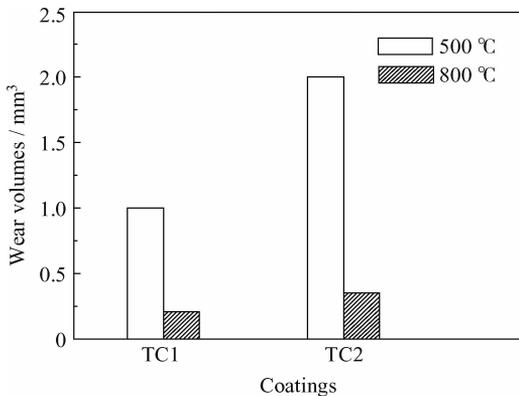


图 3 TC1 和 TC2 在不同温度下的磨损体积

Fig. 3 Wear volumes of the TC1 and TC2 under different temperatures

从图 2 还可以看出,在摩擦过程中存在明显的振动现象。在图 2(a) 的摩擦起始阶段,摩擦波动较大;图 2(c) 的整个摩擦过程都存在波动现象,并且波动呈现一定的周期性,周期约 1 800 s。这反映了摩擦过程中摩擦面的不稳定性、摩擦的不均匀性和动态性的特点。TC1 在 800 °C 时摩擦过程中存在较大的波动,而 TC2 的摩擦较为平稳,但 TC2 的磨损量仍然比 TC1 的磨损量大。

图 4 为涂层的摩擦痕迹,从图中可以看出,TC2 划痕比较宽且深,而 TC1 的划痕较窄,深度也较深。很明显,500 °C 时涂层磨损较大,这与上述关于摩擦因数和磨损量的分析结果一致。

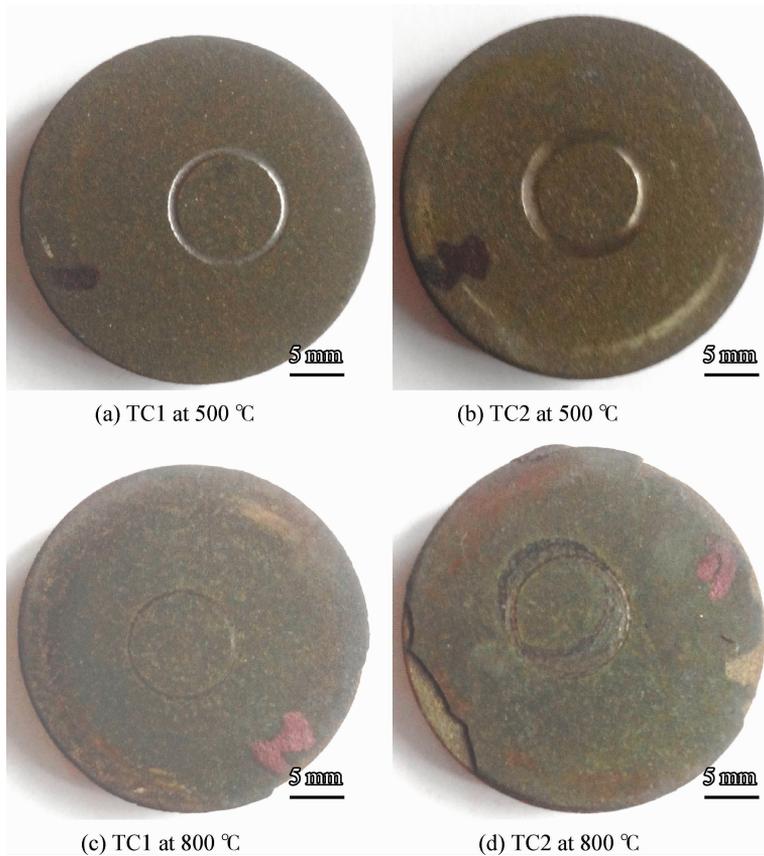


图 4 复合涂层的磨痕

Fig. 4 Wear scar of the composite coatings

2.4 涂层高温摩擦表面形貌

图 5 为涂层经过摩擦前后的表面形貌,其中,图 5(c)为 TC1 在 800 °C 环境中未摩擦表面的微观形貌,其他均为磨痕内的表面形貌。图 5(a)显示,TC1 在温度为 500 °C 时,涂层的塑性不好,表面出现大量裂纹,有较严重的剥落现象。大量的剥落层源于喷涂后的扁平粒子,成片层状剥落,剥落面积较大,表面没有太多的颗粒物存在,其磨损机理主要为疲劳剥落,剥落层边缘的氧化现象要比其他区域的氧化明显。800 °C 时摩擦后的表面明显光滑,表面存在较多的颗粒物,主要的磨损形式是材料的转移和一定的氧化磨损。经过对 TC1 在 800 °C 下摩擦面的 EDS 分析(见图 6),发现高温摩擦后表面主要有 O、Al、Ca、Cr、Co、Ni、Y、Ba 等元素,其中 Al、Ca、Cr、Co、Ni、Y、Ba 分别来自于基相 NiCoCrAlY 以及 BaF₂/CaF₂ 和 Y,含量较高的氧元素的出现,说明表面发生了比较严重的氧化。

与 TC1 涂层相比,TC2 涂层的摩擦磨损情况和 TC1 类似。500 °C 时,涂层的磨损严重,表

面呈现大量的材料脱落现象,脱落物没有在表面呈颗粒状或其他形状的聚集,可能是发生了转移,或者在挤压力作用下重新涂抹于表面的缺陷中。800 °C 时,如图 5(e)所示,涂层表现的抗摩擦磨损性能较优,剥落现象不明显,涂层表面发生了严重的氧化,在表面有致密的氧化膜生成,表面明显光滑,塑形变好,坑和凹槽也没有 500 °C 明显,且没有颗粒物的聚集,摩擦过程中材料发生了转移,主要的磨损形式为氧化磨损和材料的转移。

图 5(c)为 TC1 在 800 °C 下,未摩擦表面形貌。可以发现,仅在高温环境中,涂层表面也会发生严重的氧化,也会在涂层表面生成致密的氧化物,这是一种高温下的重结晶现象。再结晶产物呈针状和球形颗粒状,分布比较致密。从图中可以看出,颗粒状的氧化物在氧化过程中,颗粒的尺寸会经历一个由大颗粒向小颗粒变化的阶段,并且颗粒状氧化物的产生,降低了针状氧化物的分布;但是,针状的氧化物在高温作用下仍会不断沿着一定方向生长。

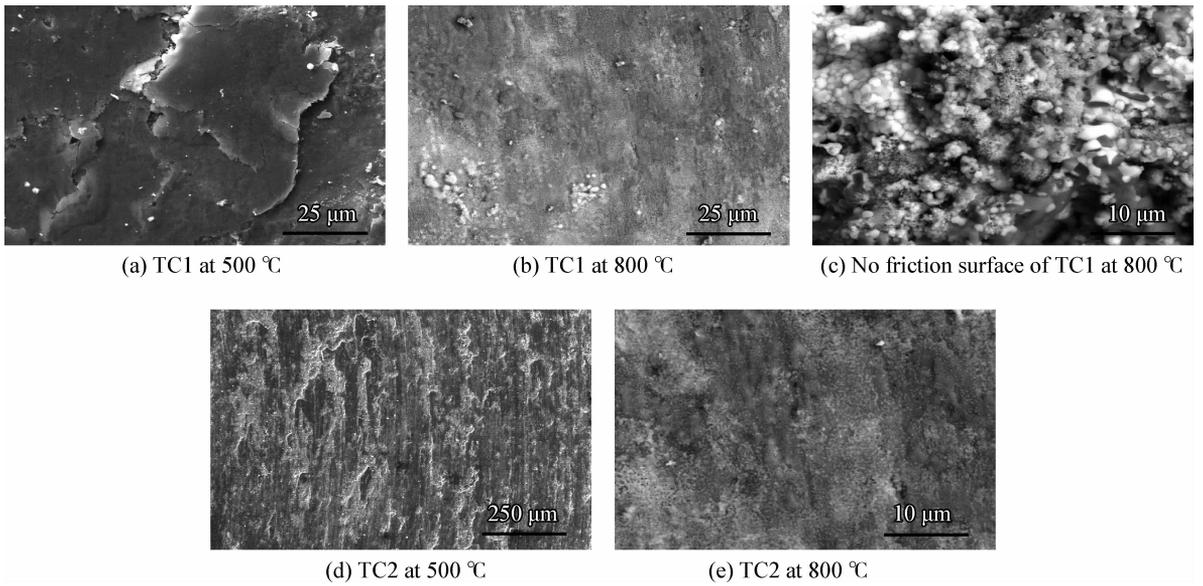
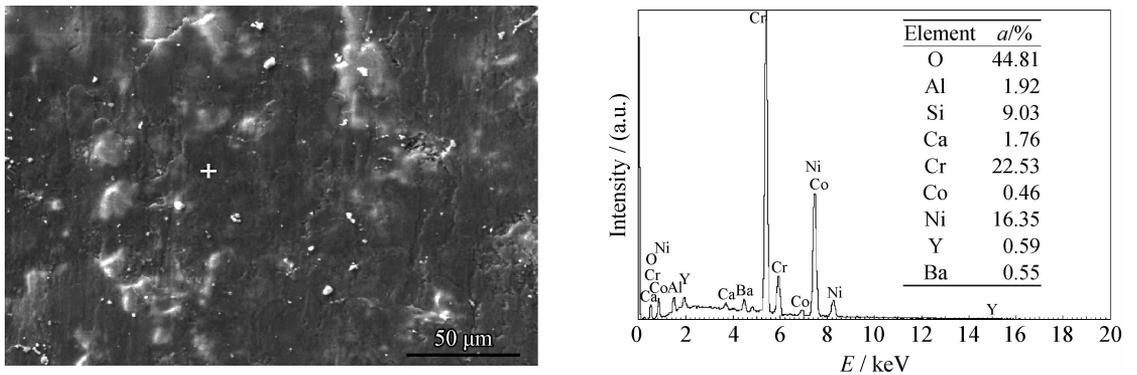
图5 试样和 Si_3N_4 对磨前后的磨损表面形貌Fig. 5 Worn surface morphologies of the solid-lubricant coatings against the Si_3N_4 

图6 TC1 在 800 °C 下磨损后的 EDS

Fig. 6 EDS of the worn surface of TC1 at 800 °C

2.5 高温摩擦机理

综上,在高温环境下涂层的摩擦磨损性能优于涂层在较低温度下的摩擦磨损性能。从摩擦磨损的关系上分析,摩擦力与磨损之间没有直接的关系,摩擦力可以认为是外力达到破坏粘着材料内部阻碍材料微观变形的阻力,而磨损是这种变形的微观表现,较大的摩擦因数一般会带来较大的磨损量。在 500 °C 环境中, BaF_2 和 CaF_2 还没有由脆性转变为塑性^[11],此时,石墨充当主要润滑相的角色,摩擦过程中涂层会失去大量的石墨,因而有大量的磨损量。另外, Cr_2O_3 在高温下会影响涂层的尺寸稳定性,摩擦过程中容易产生微裂纹,随着微裂纹的扩展,大裂纹会导致涂层

表面的剥落。在 800 °C 时,涂层表面基本没有石墨相的存在, BaF_2 和 CaF_2 完成由脆性到塑性的转变,加上摩擦和高温环境的共同作用,涂层表面会发生一系列的摩擦化学反应,在表面生成新的氧化物润滑相,实现了高温下润滑,有效降低了涂层的摩擦磨损。

TC1 在 800 °C 环境中发生了严重的氧化现象,如图 5(b),不仅仅是在剥落层的边缘,整个表面都有明显的氧化,氧化后的涂层呈现很好的塑性,剥落和划痕现象不明显,主要是表面的氧化和材料的转移,发生较多的氧化磨损和粘着磨损,润滑性能也较为优越,实现了很好的润滑效果。另外,研究高温下涂层表面的氧化是研究高温摩擦磨损机理的重要组成部分,了解各组成相

的结构变化,可以预测高温摩擦趋势。图 5(c)反映了高温下没有被摩擦的涂层表面材料的晶相变化, Frank 位错理论认为,晶须生长的先决条件是:①有氧化或活化的气氛,②表面有小的突出物,③存在位错(特别是螺型位错)。在本次高温摩擦过程中,能够满足以上条件,活性气氛吸附于突起物(或者小颗粒)表面形成晶核,晶核伴随着体系的热起伏继续生长或分解,达到某一临界值时,晶格会稳定地沿着位错的伯格矢量方向生长形成晶须。

TC2 的基相(NiCoCrAlY)含量较少,因此金属属性较差,涂层表面的氧化现象没有 TC1 明显, TC2 表面更加松软,可能是气体产生所致,使得涂层内部有很多气孔。从机理上分析,可能是涂层表面以下的石墨在高温下发生氧化,生产 CO₂ 气体,使得涂层呈现致密性不高的特点。800 °C 时复合涂层的摩擦表面产生了新的摩擦产物层,

也是高温氧化所致,存在一层致密的氧化物润滑层,该产物层具有较好的可塑性和粘着性。

图 7 为 TC1 和 TC2 在高温环境下摩擦后磨痕表面的 XRD 图谱。在 500 °C 时,涂层的氧化并不严重,基本的相结构没有发生明显的变化,涂层表面的组分基本保持稳定。涂层在 800 °C 的摩擦环境中发生了氧化,物相结构发生了变化,涂层表面致密的氧化膜主要由 NiO、Y₂O₃、Cr₂O₃ 及 BaCrO₄ 组成。BaCrO₄ 在高温环境下是一种很好的固体润滑材料,属于重晶石结构,剪切强度较低,可以有效降低摩擦因数,且热稳定性较好。Cr₂O₃ 作为增韧相可以减小涂层的磨损,TC2 良好的摩擦性能离不开这些氧化物和 BaCrO₄ 的存在。而氧化物覆盖层与表面剥落及氧化物颗粒有关,脱落的氧化颗粒在摩擦过程中继续受到挤压作用,聚集于涂层表面的缺陷中形成致密的氧化物层^[11]。

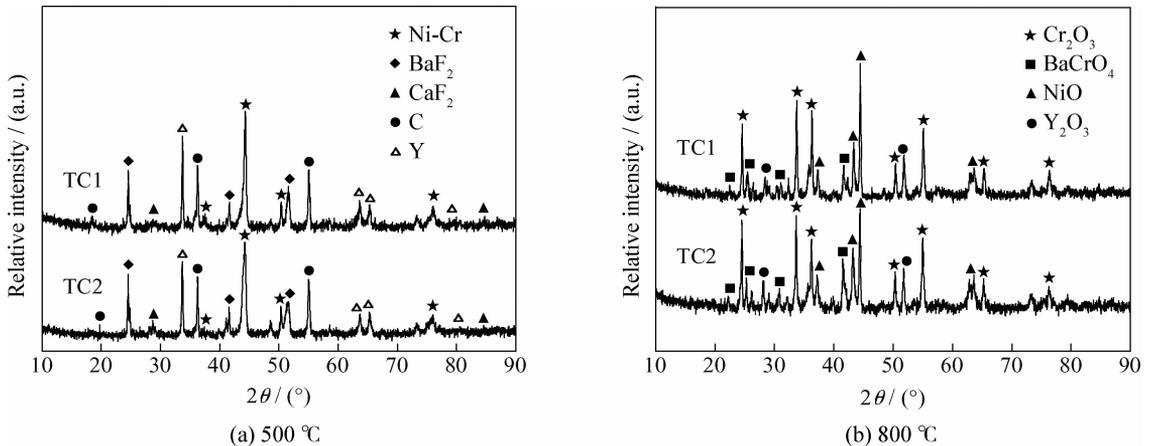


图 7 不同温度下 TC1 和 TC2 的 XRD 图谱

Fig. 7 X-ray diffraction patterns of the TC1 and TC2 under different temperatures

3 结论

(1) NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y 复合涂层在高温环境下具有良好的抗摩擦磨损性能,随着温度的升高,涂层的摩擦因数减小,磨损降低,且 TC2 涂层在 800 °C 时有最小的摩擦因数(0.268), TC1 在 800 °C 时有最低的磨损量(0.208 9 mm³)。

(2) NiCoCrAlY/BaF₂/CaF₂/C/Y 复合涂层在高温下,表面会发生一系列的摩擦化学反应,生成新的氧化物覆盖膜,且具有良好的润滑性能,基相(NiCoCrAlY)和 BaF₂/CaF₂ 的含量越高,涂层的氧化现象越严重,表面的氧化物分布

越致密。

(3) 涂层表面相在高温环境下,满足一定的条件时会发生再结晶的现象,材料发生相变,会在表面形成致密的氧化物膜,晶格沿着稳定的方向生长。

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.
Yang L Y, Liu Z M. The Influence of component of TiAl based alloy on high-temperature tribological property [J]. Material for Mechanical Engineering, 2006, 30(11): 1-3 (in Chinese).

- [2] 牛淑琴, 朱家佩, 欧阳锦林. 几种高温自润滑复合材料的研制与性能研究 [J]. 摩擦学学报, 1995, 15(4): 324-332.
Liu S Q, Zhu J P, Ouyang J L. Study on the development and properties of several new type high-temperature self-lubricating composites [J]. Tribology, 1995, 15(4): 324-332 (in Chinese).
- [3] 安家财, 杜三明, 肖宏滨, 等. 等离子喷涂 ZrO_2/Al_2O_3 陶瓷涂层的摩擦磨损性能 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(1): 20-24.
An J C, Du S M, Xiao H B, et al. Tribological properties of plasma sprayed ZrO_2/Al_2O_3 ceramic coatings [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(1): 20-24 (in Chinese).
- [4] Dellacorte C, Sliney H E. Tribology properties of PM212 [J]. Lubrication Engineering, 1991, 47(4): 298-303.
- [5] Dellacorte C, Sliney H E. Tribological and mechanical comparison of sintered and hiped PM212; high temperature self-lubricating composites [J]. Lubrication Engineering, 1992, 48(11): 877-885.
- [6] Zhu S Y, Bi Q L, Yang J, et al. Influence of fluoride content on friction and wear performance of Ni_3Al matrix high temperature self-lubricating composites [J]. Tribology Letters, 2011, 43(3): 341-349.
- [7] 阙存一, 刘近朱, 张国威, 等. 稀土氧化物或合金化元素对 Ni-Cr-5S 合金物理机械性能和摩擦学性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 1994, 14(4): 289-297.
Kan C Y, Liu J Z, Zhang G W, et al. Effects of rare-earth oxide or alloying elements on the physical-mechanical and tribological properties of Ni-Cr-5S alloy [J]. Tribology, 1994, 14(4): 289-297 (in Chinese).
- [8] Lu J J, Xue Q J, Wang J B, et al. The effect of CeF_3 on the mechanical and tribological properties of Ni-based alloy [J]. Tribology International, 1997, 30(9): 659-662.
- [9] Li J L, Xiong D S. Tribological properties of nickel-based self-lubricating composite at elevated temperature and counterface material selection [J]. Wear, 2008, 265(3/4): 533-539.
- [10] 王振生, 周兰章, 郭建亭, 等. NiAl-Cr(Mo)- Cr_xS_y 自润滑复合材料的摩擦磨损特征 [J]. 摩擦学学报, 2010, 30(6): 589-595.
Wang Z S, Zhou L Z, Guo J T, et al. Friction and wear behavior of NiAl-Cr(Mo)- Cr_xS_y self-lubricating composite [J]. Tribology, 2010, 30(6): 589-595 (in Chinese).
- [11] 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(2): 51-56.
Gao Y J, Zhang S T, Deng Z C, et al. Tribological properties of laser cladding high-temperature self-lubrication composite coatings [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(2): 51-56 (in Chinese).

作者地址: 陕西西安灞桥区同心路 2 号 710025
第二炮兵工程大学 4502 分队
Tel: (029) 8474 1370
E-mail: 1316872444@qq.com

(责任编辑: 常青)

• 本刊讯 •

《中国表面工程》入编国家新闻出版广电总局第一批认定学术期刊名单

为严格学术期刊出版资质, 优化学术期刊出版环境, 促进学术期刊健康发展, 根据新闻出版广电总局《关于规范学术期刊出版秩序促进学术期刊健康发展的通知》《关于开展学术期刊认定及清理工作的通知》, 新闻出版广电总局组织开展了学术期刊认定工作。经过各省、区、市新闻出版广电局, 中央期刊主管单位初审上报, 新闻出版广电总局组织有关专家严格审定, 确定了第一批认定学术期刊名单。第一批认定学术期刊名单已于 2014 年 11 月 18 号公示。《中国表面工程》期刊入编国家新闻出版广电总局第一批认定学术期刊名单, 顺序号为 617。

(本刊编辑部 供稿)