

激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-WS₂ 自润滑耐磨涂层的高温摩擦学行为

High Temperature Tribological Behaviors of Laser Cladding NiCr/Cr₃C₂-WS₂ Self-lubrication Wear-resistant Coating

刘秀波¹, 刘海青¹, 孟祥军¹, 杨茂盛¹, 石世宏¹,
傅戈雁¹, 孙承峰¹, 王明娣¹, 齐龙浩²

(1 苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215006;

2 清华大学 新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京 100084)

LIU Xiu-bo¹, LIU Hai-qing¹, MENG Xiang-jun¹, YANG Mao-sheng¹, SHI Shi-hong¹,
FU Ge-yan¹, SUN Cheng-feng¹, WANG Ming-di¹, QI Long-hao²

(1 School of Mechanical and Electric Engineering,

Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;

2 State Key Laboratory of New Ceramics and Fine Processing,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 利用激光熔覆技术在 0Cr18Ni9 不锈钢基体上制备 NiCr/Cr₃C₂ 耐磨涂层与 NiCr/Cr₃C₂-30% WS₂ 耐磨自润滑涂层, 采用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)分析了涂层的物相组成及显微组织。在室温、300℃和 600℃下分别测试了上述涂层的干滑动摩擦学性能, 并讨论其磨损机理。实验结果表明: 添加 WS₂ 的熔覆涂层主要有 Cr₇C₃、(Cr, W)C 碳化物增强相、γ-(Fe, Ni)/Cr₇C₃ 共晶增韧相、WS₂ 及 CrS 润滑相。两种涂层都随温度的升高, 摩擦因数降低, 而磨损率增大。在室温及 300℃时, 添加 WS₂ 涂层由于润滑相的作用拥有较好的减摩耐磨性能。在 600℃时, 由于涂层中碳化物硬质相的强度降低, 两种涂层的磨损率显著增大。

关键词: 激光熔覆; 高温耐磨复合涂层; 固体润滑

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.11.005

中图分类号: TN249; TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)11-0026-06

Abstract: The self-lubricating wear-resistant NiCr/Cr₃C₂-30% WS₂ coating and wear-resistant NiCr/Cr₃C₂ coating were fabricated by laser cladding on 0Cr18Ni9 austenitic stainless steel. The phase compositions and microstructures were investigated by X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The tribological properties of the fabricated composite coatings were evaluated under dry sliding condition at room-temperature (RT), 300℃ and 600℃, respectively, and the wear mechanisms were discussed. The results show that the phase constituents of coating added with WS₂ are composed of Cr₇C₃, (Cr, W)C reinforcement carbides, ductile phase of γ-(Fe, Ni)/Cr₇C₃ eutectic, and WS₂, CrS lubricants. The friction coefficients of above two coatings both decrease with the rising of temperature, but the wear rates both increase. At room-temperature and 300℃, the coating added with WS₂ has superior friction-reducing and wear-resistance properties as a result of the presence of WS₂ and CrS lubricants. However, the wear rates of two coatings significantly increase due to the hardness reducing of carbides at 600℃.

Key words: laser cladding; high-temperature wear-resistant composite coating; solid lubrication

在航空、航天、核能等尖端技术领域, 存在着大量在高真空度、高温、高速、重载等苛刻工况环境下运行的摩擦运动副零部件, 如高温绝热发动机轴承、活塞环、缸套、核阀、汽轮机叶片等, 普通的润滑油脂已不能

完全满足使用要求, 固体自润滑涂层是解决上述问题的有效途径之一^[1-4]。目前, 激光熔覆是制备固体自润滑涂层的有效手段之一^[5,6], 该技术由于其能量密度很高, 添加材料与基材浅表层快速熔化与凝固, 形成

组织致密、晶粒细小、与基体呈冶金结合的高强度涂层。利用激光熔覆技术制备固体自润滑涂层已成为现阶段表面工程领域的研究热点之一^[7-10]。俞友军^[7]等利用激光熔覆技术在不锈钢表面制备 NiCr/Cr₃C₂-Ag-BaF₂/CaF₂金属基高温自润滑耐磨涂层,在室温到500℃实验温度范围内表现出良好的减摩抗磨效果。王华明^[8]等采用激光熔覆技术在 Al₂O₃基体上制备了 CaF₂/Al₂O₃陶瓷基自润滑耐磨复合涂层,涂层组织由片状的 Al₂O₃初生相和弥散分布的球形 CaF₂润滑颗粒构成。与不加 CaF₂的涂层相比,CaF₂/Al₂O₃复合涂层在室温干滑动测试条件下拥有较低的摩擦因数和高耐磨性能。值得注意的是,CaF₂由于较低的密度及熔点(密度 3.18g/cm³,熔点 1270~1350℃),在激光生成的高温熔池中极易上浮到熔池表面,而无法留在涂层当中;另外,由于 CaF₂陶瓷相的本质,其与金属基体的润湿性较差,很难制备具有较高体积分数的 CaF₂复合涂层。Ag 是一种贵金属,不太适合大规模的使用。因此本工作拟选用 WS₂作为固体润滑剂,WS₂密度较高为 7.5g/cm³,且因其近金属相性质与金属基体具有良好的润湿性。WS₂属于六方晶系、层状结构,层与层之间受范德华力作用,因此剪切强度较低,受摩擦力作用下很容易在接触面形成润滑转移膜,降低摩擦副的摩擦因数、减小磨损^[11]。NiCr-Cr₃C₂是一种常用的金属陶瓷粉末,兼具 NiCr 合金与 Cr₃C₂粉末的优点,在高温下具有优异耐磨耐蚀、抗氧化等综合性能^[12]。奥氏体不锈钢因其良好的力学性能和化学稳定性,广泛用于制造硝酸、有机酸、盐、碱等工业中的机械零件及构件^[13]。0Cr18Ni9 不锈钢因其优异的高温抗氧化、耐腐蚀性能,被广泛用于建筑、冶金、化工、医疗等领域。但其高温硬度和耐磨性较低,制约了其用于高温摩擦副零部件。近年来,国内外有不少研究利用激光熔覆技术在不锈钢基体表面制备耐磨涂层^[14-16],如文献[14]在 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢表面激光熔覆了 Ni 基复合涂层,结果表明涂层的耐磨性能明显优于不锈钢基体;文献[15,16]在 AISI316L 奥氏体不锈钢表面激光熔覆 Colmonoy6 合金耐磨涂层的室温耐磨性比基体提高了 53 倍。然而关于 0Cr18Ni9 不锈钢涂层耐磨高温性能的研究报道却比较少。本工作选用 NiCr/Cr₃C₂-WS₂为合金粉末、0Cr18Ni9 不锈钢为基体,在其表面激光熔覆制备高温耐磨自润滑复合涂层,以拓展其应用领域。同时也以 NiCr-Cr₃C₂基础粉末制备了涂层以作对比,分析了上述涂层的物相组成及显微组织,并分别在室温,300,600℃时测试了以上涂层的干滑动摩擦学性能,并系统地研究讨论了其磨损机理。

1 实验材料和方法

选取热轧态的 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢作为基体材料,硬度约 200HV,切割成 50mm×40mm×8mm 的样品。采用砂纸对基体表面进行打磨,并用乙醇溶液清洗干净。熔覆材料选用 Ni80Cr20-Cr₃C₂ 金属陶瓷粉末,其中 NiCr 合金总质量分数为 30%,固体润滑剂 WS₂的添加量为 30%。用电子天平称重后混合,放入球磨机(QM-3SP04)中球磨 2h。然后使用甲基纤维素黏结剂将混合粉末预置在 0Cr18Ni9 基体上,厚度约 1.5mm。最后放入干燥箱,加热到 80℃保温烘干 2h。

激光熔覆设备采用 GS-TFL-10kW 型高功率横流 CO₂激光器,熔覆工艺参数为:功率 1.5kW,矩形光斑尺寸为 6mm×3mm(长×宽),扫描速率为 4mm/s,熔覆过程中向熔池吹氩气进行保护。

用 X' Pert-Pro MPD(XRD)分析了涂层的物相组成,用 S-4700 场发射扫描电镜(SEM)观察了涂层横截面的显微组织,并使用其附带的能谱系统(EDS)检测涂层中各区域元素成分。利用 MH-5 型显微硬度计测定涂层的显微硬度,测试载荷 300g,加载时间 10s。在 HT-1000 高温摩擦磨损试验机上,采用球盘接触方式分别测定了两种涂层在室温、300℃和 600℃的干滑动摩擦因数,相对湿度为 80%。摩擦对偶为直径 4mm 的 Si₃N₄陶瓷球,其硬度为 1600HV,表面粗糙度 $R_a \leq 0.2\mu\text{m}$ 。磨损实验参数见表 1。利用摩擦磨损试验机自带的表面轮廓仪测出磨损体积,并根据公式(1)计算磨损率。

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

式中:W 为磨损率(mm³·N⁻¹·m⁻¹);V 为磨损体积(mm³);L 为法向载荷(N);S 为滑动位移(m)。

表 1 磨损实验参数

Table 1 Experimental parameters of wear test

Load	Temperature	Wear time	Rotation radius	Linear velocity
/N	/℃	/min	/mm	/(m·min ⁻¹)
5	RT,300,600	20	2	16.889

2 实验结果与分析

2.1 物相组成

图 1 中曲线(a)为激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂涂层的 XRD 谱图,涂层主要由 Cr₇C₃及 γ-(Fe, Ni) 构成。曲线(b)为加入 WS₂涂层的 XRD 谱图,除 Cr₇C₃,γ-

(Fe, Ni), (Cr, W)C 主要物相外, 还存在少量 WS_2 和 CrS, 这是由于 WS_2 较低的分解温度($510^{\circ}C$)及氧化温度($539^{\circ}C$), 大部分 WS_2 分解成 W 和 S, 部分 S 与 Cr 元素反应生成 CrS, 而 W 与 Cr, C 结合生成 (Cr, W)C 复合碳化物。S 元素没有与熔池中 Ni、Fe 反应生成其他硫化物, 首先是因为 NiS 与 FeS 的吉布斯生成自由能远高于 WS_2 及 CrS, 另外高温熔池中 Cr 元素含量最高, 其次为 W, 因此 WS_2 及 CrS 优先从熔池中析出^[9,12]。

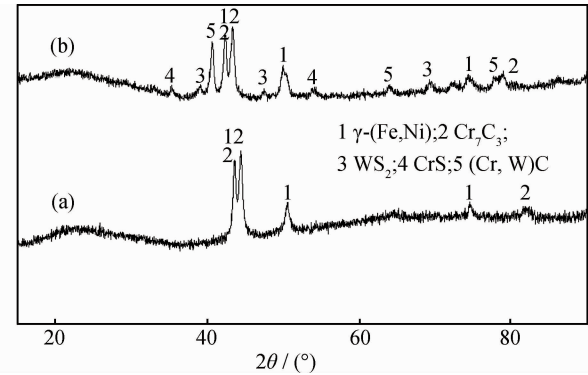


图 1 激光熔覆涂层 XRD 谱

(a) NiCr/Cr₃C₂; (b) NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂

Fig. 1 XRD patterns of the laser cladding coatings

(a) NiCr/Cr₃C₂; (b) NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂

2.2 显微组织及硬度

图 2 为激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂ 复合涂层

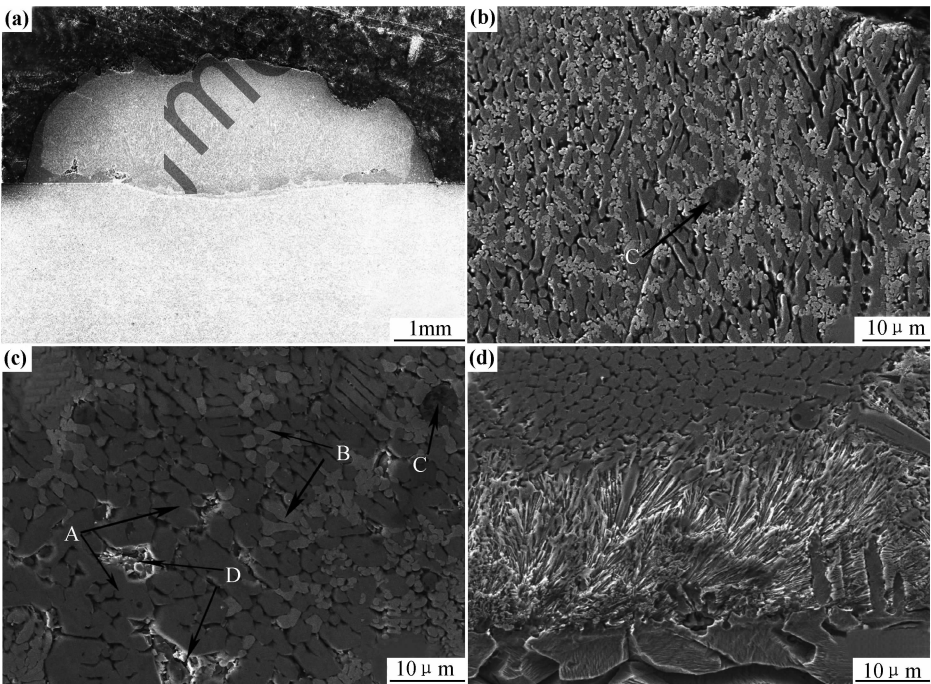


图 2 激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂ 涂层横截面 SEM (a)全貌;(b)顶部;(c)中间;(d)底部

Fig. 2 Cross-section SEM micrographs of laser clad NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂ coating

(a) overview; (b) top region; (c) intermediate region; (d) bottom region

的横截面 SEM 照片。从图 2(a),(d)可以看出涂层较厚、未出现明显的孔洞, 结合区在中部略微下凹, 其组织与涂层和基体有着明显的不同, 证明了涂层与基体形成良好的冶金结合。表 2 为图 2(b),(c)中各区域的元素分析结果。由 EDS 结果可知, 灰色块状相(A)中 Cr 含量较高, 且根据其六方形的特征及 XRD 结果可推测其为 Cr_7C_3 或 $(Cr, Fe, W)_7C_3$; 浅色不规则相(B)中 W, Cr 含量较高, 可推测为 (Cr, W)C 复合碳化物; 黑色球形相(C)为 Cr, S, 且其原子百分比接近于 1:1, 可认为是 CrS; 白色层状相(D)中 Ni, Fe, Cr 含量较高, 可推测为 γ -(Fe, Ni)/ Cr_7C_3 共晶; 由于 WS_2 在涂层中的含量很少, 其组织结构在 SEM 照片中不易观察。未添加 WS_2 的涂层主要由两相构成, 分别为 Cr_7C_3 增强相和 γ -(Fe, Ni) 固溶体。

NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂ 涂层的显微硬度在 1000~1240HV_{0.3} 之间, 平均为 1129HV_{0.3}, 大约是不锈钢基体的 5 倍多(200HV), 且略大于未添加 WS_2 的涂层(1042HV_{0.3})。

2.3 摩擦因数与磨损率

图 3 为干摩擦条件下激光熔覆涂层的摩擦因数(图 3(a))与磨损率曲线(图 3(b))。从图 3(a)可知, 两种涂层的摩擦因数都随着温度的升高而降低, 且在所有的测试温度下, 添加 WS_2 涂层的摩擦因数都远低于未加的涂层。这是由于添加 WS_2 的涂层中存在 WS_2 和 CrS 润滑相, 可在摩擦对偶之间形成润滑转移

表 2 激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂ 涂层各区域 EDS 分析(质量分数/%)

Table 2 EDS analysis of laser clad NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂ coating at different areas(mass fraction/%)

Area	Ni	Fe	Cr	S	W	C
Gray particle (A)	2.46	6.87	34.10	—	14.45	42.12
Shallow color particle (B)	—	1.38	15.19	—	42.21	41.22
Black spheroid particle (C)	—	—	53.89	46.11	—	—
White lamellar (D)	23.70	19.58	22.84	0.49	1.42	31.97

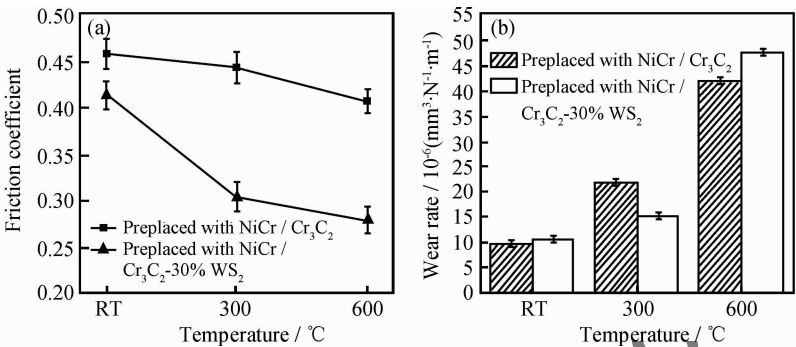


图 3 激光熔覆涂层在不同温度下的摩擦因数(a)和磨损率(b)

Fig. 3 Friction coefficient (a)and wear rate (b)of laser clad coatings at different temperatures

膜,把对偶件与涂层之间的直接高应力接触转化为对偶件与润滑膜及润滑膜与涂层之间的间接接触,对涂层表面起到有效的保护作用,从而明显地减小摩擦因数^[7,9,12]。从图 3(b)可知,两种涂层的磨损率都随着温度的升高而增加,添加 WS₂ 涂层的磨损率仅在 300℃时小于未加的涂层。两种涂层的摩擦因数和磨损率出现大范围的变化,说明其磨损机理的不同,这在后面的部分详细讨论。

2.4 室温与高温磨损行为

2.4.1 室温磨损行为

图 4(a-1)、(a-2)分别为 NiCr/Cr₃C₂涂层和 NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂涂层在室温下的磨损形貌。从图 4(a-1)可看出 NiCr/Cr₃C₂涂层的磨损表面相对较光滑,没有明显的凹坑、划擦及沟槽,可认为是轻微的混合磨粒与粘着磨损。这是由于该涂层中存在体积分数较高的 (Cr, Fe)₇C₃ 碳化物,在磨损过程中起到抗磨骨干作用,另外由于 γ-(Fe, Ni) 固溶体对碳化物硬质相的联结支撑作用,使得该涂层产生粘着磨损与塑性变形的倾向减小,并有效阻止碳化物颗粒的剥落^[13,17]。然而添加 WS₂ 涂层的磨损形貌较特别(图 4(a-2)),类似于化学腐蚀之后的组织形貌,化学腐蚀可以把涂层中的耐腐蚀相与易腐蚀相区别出来,此时的磨损作用与化学腐蚀相似,把涂层中的硬质相和软质相区别出来。经过 EDS 分析,辨别出深灰色的六方块状区域为 (Cr, Fe)₇C₃,浅色区域为 (Cr, W)C。从图中可发现, (Cr, Fe)₇C₃ 略微凸起,在涂层中主要起抗磨作用,保

护其他的软质相免受进一步的磨损,而浅色的 (Cr, W)C 上出现大量的小凹坑,这是由于 (Cr, W)C 复合碳化物脆性较大,且其中 W 元素不稳定,在对偶件表面微凸体的反复嵌入下易于剥落,造成其磨损率在室温时略大于未加 WS₂ 的涂层,磨损机理为 (Cr, W)C 相的微小剥落^[18-20]。

2.4.2 300℃磨损行为

当测试温度升高到 300℃,从图 4(b-1)可看出 NiCr/Cr₃C₂涂层的磨损表面出现了少数较大的凹坑,这是由于黏着而产生的片状脱落,因此涂层的磨损机理主要表现为粘着磨损。图 4(b-2)为添加 WS₂ 涂层的磨损表面,与室温时差别不大,但是从它的局部区域放大图可以看到黑色的润滑膜痕迹(图 5),黑色润滑膜都位于浅色的 (Cr, W)C 低洼处,通过 EDS 分析结果可知,黑色润滑膜主要为 Cr, W, S 元素,应是 WS₂, CrS 的混合物。由于温度的升高,涂层中的 WS₂, CrS 润滑相塑性提高,在摩擦力的作用下铺展在接触表面,同时由于涂层表面高低不平,都聚集于低洼的 (Cr, W)C 处,从而使对偶件与涂层之间的直接高应力接触部分转化为对偶件与润滑膜及润滑膜与涂层之间的间接接触,对涂层表面起到有效的保护作用,其摩擦因数与磨损率都远小于未加 WS₂ 的涂层。该涂层的磨损机理表现为润滑膜的产生与破裂。

2.4.3 600℃磨损行为

从图 4(c-1)可看出, NiCr/Cr₃C₂涂层在 600℃下的磨损形貌相比室温和 300℃变化较大,出现轻微的

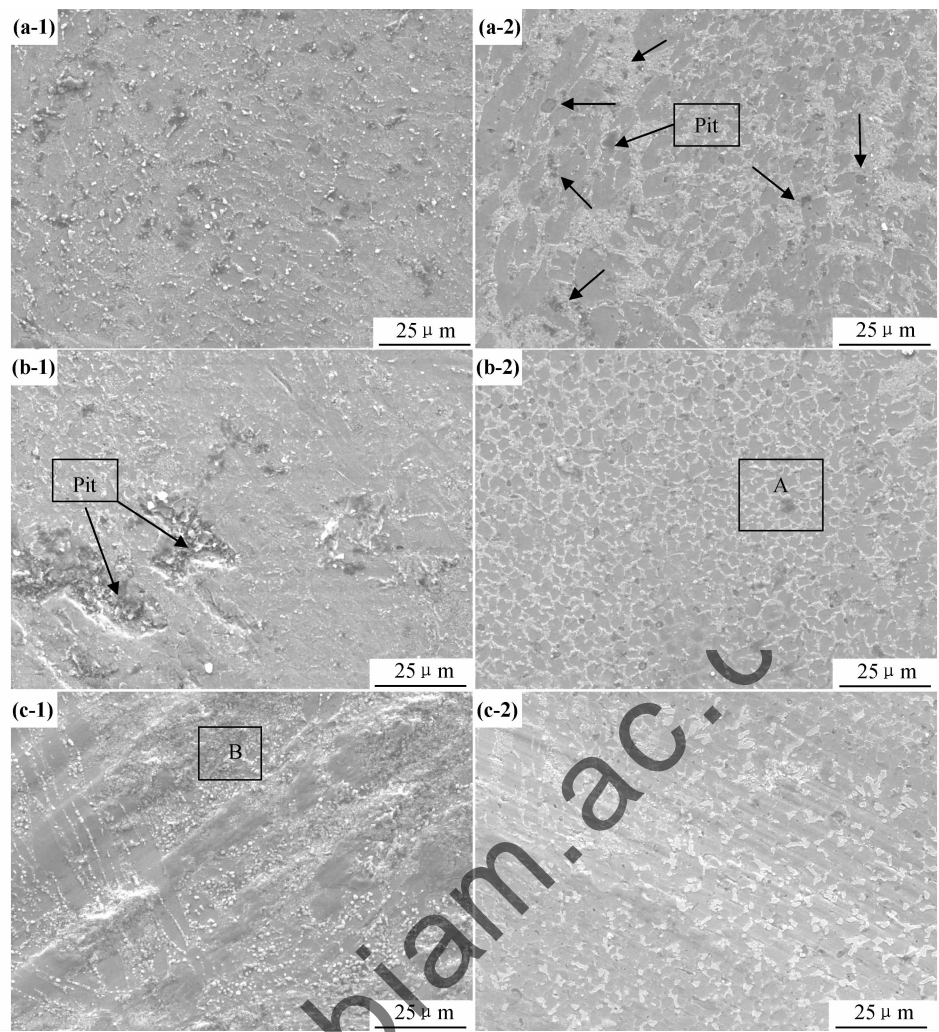


图 4 激光熔覆涂层在不同温度下的磨损形貌
(1)NiCr/Cr₃C₂; (2)NiCr/Cr₃C₂-30% WS₂; (a)RT; (b)300℃; (c)600℃
Fig. 4 SEM micrographs of the worn surfaces at different temperatures
(1)NiCr/Cr₃C₂; (2)NiCr/Cr₃C₂-30% WS₂; (a)RT; (b)300℃; (c)600℃

塑性变形及大量细小的磨屑。图 6 为 B 处的能谱分析。其中 Si 是从 Si₃N₄ 陶瓷球对磨件转移而来,由于对磨件硬度很高且高温稳定性好,磨损过程主要是涂层物质的损失。其中 O 元素含量很高,说明磨屑已经发生剧烈的氧化,大量细小的氧化物颗粒在摩擦表面形成连续均匀的氧化物转移膜,可有效降低摩擦因数,减小磨损,磨损机理为氧化磨损与轻微的塑性变形^[21]。图 4(c-2)为添加 WS₂ 涂层在 600℃时的磨损形貌,磨损表面出现较浅的划擦,浅色的 (Cr, W)C 相大部分被磨掉。首先,由于 WS₂ 较低的分解温度(510℃)及氧化温度(539℃),WS₂ 大多数分解氧化了,已无法在此温度下形成润滑膜;其次,由于 (Cr, Fe)₇C₃ 硬质相的硬度降低,不能继续保护硬度相对较低的 (Cr, W)C 等相,并一起经受对磨件的磨损,其磨损机理主要表现为磨粒磨损。

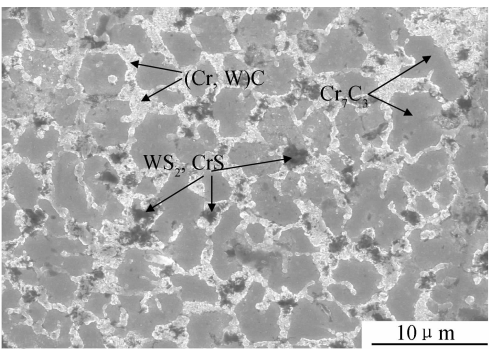


图 5 图 4(b-2)中 A 区域放大形貌
Fig. 5 The magnification morphology at A region in fig. 4(b-2)

3 结论

(1)激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-30% WS₂ 涂层中主要含 Cr₇C₃, γ-(Fe, Ni) 和 (Cr, W)C, 存在少量的 WS₂,

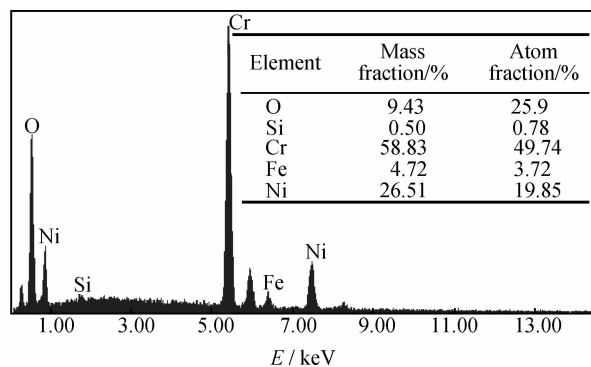


图6 图4(c-1)中B处的能谱分析

Fig. 6 EDS analysis at B region in fig. 4(c-1)

CrS 润滑相。未添加 WS₂ 的涂层由 Cr₇C₃ 增强相和 γ -(Fe, Ni) 固溶体组成。NiCr/Cr₃C₂-30% WS₂ 涂层的显微硬度在 1000 ~ 1240HV_{0.3} 之间, 平均为 1129HV_{0.3}, 大约是不锈钢基体的 5 倍多, 且略大于未添加 WS₂ 的涂层(1042HV_{0.3})。

(2) 两种涂层都随着温度的升高(从室温到 600℃), 摩擦因数降低、磨损率增大。添加 WS₂ 涂层的摩擦因数在所有测试温度下都低于未加 WS₂ 的涂层, 但其磨损率只在 300℃ 时较小。

(3) 室温时, 添加 WS₂ 涂层的磨损机理为 (Cr, W)C 相的轻微剥落, 而未添加 WS₂ 涂层为轻微的混合磨粒与黏着磨损; 300℃ 时, 添加 WS₂ 涂层的磨损机理为润滑膜的产生与破裂, 而未添加 WS₂ 涂层为黏着磨损; 600℃ 时, 添加 WS₂ 涂层的磨损机理为磨粒磨损, 而未添加 WS₂ 涂层为氧化磨损与轻微的塑性变形。

参考文献

- [1] 李桂花, 邹勇, 邹增大, 等. 激光熔覆原位生成 Nb₂(C, N) 及 V₈C₇ 陶瓷粒子增强铁基金属涂层[J]. 材料工程, 2012, (1): 29-33.
LI Gui-hua, ZOU Yong, ZOU Zeng-da, et al. In-situ synthesized Nb₂(C, N) and V₈C₇ ceramics particulates reinforced Fe-based composite coating by laser cladding[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (1): 29-33.
- [2] JIANG X, LIU W J, ZHONG M L. Microstructure and dry sliding wear behavior of MoS₂/TiC/Ni composite coatings prepared by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200: 4227-4232.
- [3] DONNET C, ERDEMIR A. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 180-181: 76-84.
- [4] DONNET C, ERDEMIR A. Solid lubricant coatings: recent developments and future trends[J]. Tribology Letters, 2004, 17 (3): 389-397.
- [5] 曾维华, 刘洪喜, 王传琦, 等. 工艺参数对不锈钢表面激光熔覆 Ni 基涂层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 材料工程, 2012, (8): 24-29.

- ZENG Wei-hua, LIU Hong-xi, WANG Chuan-qi, et al. Effects of technological parameters on microstructure and corrosion resistance of laser cladding Ni-based coating on stainless steel surface[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (8): 24-29.
- [6] HUANG C B, DU L Z, ZHANG W G. Effects of solid content on the microstructure and properties of NiCr/Cr₃C₂-BaF₂ · CaF₂ composite coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 479: 777-784.
- [7] 俞友军, 周健松, 陈建敏, 等. 激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-Ag-BaF₂/CaF₂ 金属基高温自润滑耐磨覆层的组织结构及摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 64-73.
YU You-jun, ZHOU Jian-song, CHEN Jian-min, et al. Microstructure and tribological behavior of laser cladding NiCr/Cr₃C₂-Ag-BaF₂/CaF₂ self-lubrication wear-resistant metal matrix composite coating[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(3): 64-73.
- [8] 闫来成, 谭华玉, 韩欢庆, 等. 一种低摩擦因数复合润滑膜的结构与性能研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(5): 58-61.
YAN Lai-cheng, TAN Hua-yu, HAN Huan-qing, et al. Study on property and structure of duplex lubricating film with lower friction coefficient[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(5): 58-61.
- [9] WANG A H, ZHANG X L, ZHANG X F, et al. Ni-based alloy/submicron WS₂ self-lubricating composite coating synthesized by Nd:YAG laser cladding[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 475: 312-318.
- [10] 张祥林, 章小峰, 王爱华, 等. 激光熔覆金属基固体自润滑涂层的组织结构[J]. 中国机械工程, 2006, 17(19): 2084-2088.
ZHANG Xiang-lin, ZHANG Xiao-feng, Wang Ai-hua, et al. Microstructure of metal-based solid self-lubrication coating by laser cladding[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(19): 2084-2088.
- [11] ZHANG X F, ZHANG X L, WANG A H, et al. Microstructure and properties of HVOF sprayed Ni-based submicron WS₂/CaF₂ self-lubricating composite coating [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(1): 85-92.
- [12] 黄传兵, 杜令忠, 张伟刚. NiCr/Cr₃C₂-BaF₂ · CaF₂ 高温自润滑耐磨涂层的制备与摩擦磨损特性[J]. 摩擦学学报, 2009, 29 (1): 68-73.
HUANG Chuan-bing, DU Ling-zhong, ZHANG Wei-gang. Preparation and tribological properties of NiCr/Cr₃C₂-BaF₂ · CaF₂ high temperature self-lubrication wear-resistant coating[J]. Tribology, 2009, 29(1): 68-73.
- [13] 沈莲. 机械工程材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 131-137.
- [14] 何祥明, 刘秀波, 杨茂盛, 等. 奥氏体不锈钢激光熔覆镍基复合涂层高温磨损行为[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0903007.
HE Xiang-ming, LIU Xiu-bo, YANG Mao-sheng, et al. Elevated temperature tribological behaviors of laser cladding nickel-based composite coating on austenitic stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9): 0903007.

- tent curing agent for epoxy resin, method for producing the same, one-component epoxy resin composition, and epoxy resin cured product[P]. JP Patent: 158114, 1993-09-24.
- [8] 泽冈龙治, 河内真二, 村木俊夫. 微胶囊型固化剂, 其制备方法, 热固性树脂组合物, 预浸渍物及纤维增强的复合材料[P]. 中国专利: 1112142, 1995-11-22.
- [9] 池村和弘. 封装半导体用环氧树脂组合物和半导体器件[P]. 中国专利: 1256288A, 2000-06-14.
- [10] 原田忠昭. 半导体密封用树脂组合物、半导体装置、半导体晶片、半导体安装结构体[P]. 中国专利: 1340586A, 2002-03-20.
- [11] 三隅贞仁, 松村健, 水谷昌纪. 粘合剂组合物, 粘合膜及使用其的半导体器件[P]. 中国专利: 1542076, 2004-11-03.
- [12] 方征平, 许虹霞, 佟立芳, 等. 一种微胶囊潜伏型环氧树脂固化剂及其制备方法[P]. 中国专利: 101016369, 2007-08-15.
- [13] 邢素丽, 曾竟成, 肖加余, 等. 改性 2-乙基-4-甲基咪唑固化剂的胶囊化研究[J]. 功能材料, 2006, 37(6): 936-939.
XING Su-li, ZENG Jing-cheng, XIAO Jia-yu, et al. Encapsulation process of 2-ethyl-4-methyl imidazole curing agent[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(6): 936-939.
- [14] 邢素丽, 曾竟成, 王遵, 等. 新型潜伏性 M-DDM 微胶囊固化剂的制备及表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(4): 196-199.
XING Su-li, ZENG Jing-cheng, WANG Zun, et al. The fabrication and characterization of a novel M-DDM/Microcapsule-type latent curing agent[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2006, 22(4): 196-199.
- [15] 童速玲, 张兴华, 丁新平. 环氧树脂固化促进剂的微胶囊化及其应用[J]. 广东化工, 2004, (6): 41-43.
TONG Su-ling, ZHANG Xing-hua, DING Xin-ping. The application of microencapsulated curing accelerator of epoxy resin[J]. Guangdong Chemical Industry, 2004, (6): 41-43.
- [16] TAKETOSHI U, YOSHIMITSU O. Capsule type curing agent and composition[P]. JP Patent: 132931, 2009-06-18.
- *****
- (上接第 31 页)
- [15] ZHANG H, SHI Y, KUTSUNA M, et al. Laser cladding of colmony 6 powder on AISI316L austenitic stainless steel[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(10): 2691-2696.
- [16] SHI Y, ZHANG H, XU C Y. Research on the structure and wear resistance of colomony 6 alloy coating cladded on austenitic stainless steel by laser[J]. Acta Arm Amentar, 2010, 31(7): 928-932.
- [17] 刘秀波, 虞钢, 郭建, 等. 等离子熔覆 $\gamma/\text{Cr}_7\text{C}_3$ 复合材料涂层组织与耐磨性研究[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(6): 114-117.
LIU Xiu-bo, YU Gang, GUO Jian, et al. Research on organization and wear resistance of $\gamma/\text{Cr}_7\text{C}_3$ composite coating by plasma cladding[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(6): 114-117.
- [18] LU X D, WANG H M. Metallic tribological compatibility of laser clad $\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si}/\text{NiSi}$ metal silicide coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200: 2380-2385.
- [19] LIU Y, WANG H M. Elevated temperature wear behaviors of a Co-Mo-Si ternary metal silicide alloy[J]. Scripta Materialia, 2005, 52: 1235-1240.
- [20] ZHANG L Q, WANG H M. High-temperature sliding wear resistance of a $\text{Cr}_3\text{Si}/\text{Cr}_{13}\text{Ni}_5\text{Si}_2$ multiphase intermetallic alloy[J]. Materials Letters, 2003, 57: 2710-2715.
- [21] XIONG D S. Lubrication behavior of Ni-Cr-based alloys containing MoS_2 at high temperature[J]. Wear, 2001, 251: 1094-1099.
- 基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20131155); 苏州市科技计划项目(SYG201233, SG201273, SYG201203); 江苏省高校自然科学基金(11KJB460008); 国家自然科学基金(51205266, 61078019);
- 收稿日期: 2012-07-12; 修订日期: 2012-12-24
- 作者简介: 刘秀波(1968—), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事材料科学与激光加工等领域的科研与教学工作, 联系地址: 江苏省苏州市干将东路 178 号苏州大学机电工程学院(215021), E-mail: liuxiubo@suda.edu.cn
- [17] SHIGEAKI F, YUTAKA O, YOSHII M. Micro-capsule type latent curing agent for epoxy resin, one-component type epoxy resin composition, and epoxy resin cured product[P]. JP Patent: 203453, 2009-09-10.
- [18] YUKO S, HIROYUKI O, MISAKI M, et al. Microcapsule type curing agent and curable resin composition containing the same[P]. JP Patent: 056891, 2008-03-13.
- [19] MASUKO D, KUMURO K, ITO M, et al. Latent curing agent for epoxy resin and method for manufacturing the same[P]. USA Patent: 0249258, 2008-10-9.
- [20] SAWAOKA R, IYO-GUN, KOUCHI S, et al. Microcapsule-type curing agent, method for producing the same, thermosetting resin composition, prepreg and fiber reinforced composite material[P]. USA Patent: 5726222, 1998-05-10.
- [21] SAWAOKA R, SHINJI K, TOSHIO M. Microcapsule-type curing agent, method for producing the same, thermosetting resin composition, prepreg and fiber reinforced composite material[P]. USA Patent: 5589523, 1996-12-31.
- [22] 史有强, 张秋禹, 马爱洁, 等. 潜伏性热释放 2PZ-PGMA 微胶囊固化剂的结构表征与性能研究[J]. 化学通报, 2012, 75(3): 245-250.
SHI You-qiang, ZHANG Qiu-yu, MA Ai-jie, et al. Characterization and performances of latent heat released 2PZ-PGMA microcapsule curing agent[J]. Chemistry, 2012, 75(3): 245-250.
- [23] 傅婧. 高弹性环氧胶粘剂的研制[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
- 收稿日期: 2012-10-08; 修订日期: 2013-08-21
- 作者简介: 史有强(1986—), 男, 硕士, 从事隐身材料的制备及研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 9 分箱(100095), E-mail: npusyq@163.com.
- *****