

# 纯铜表面激光熔覆 Ni 基硅化物涂层摩擦学性能研究

刘晓鹏<sup>1,2</sup> 张培磊<sup>1,2</sup> 卢云龙<sup>1,2</sup> 闫 华<sup>1,2</sup> 于治水<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620

<sup>2</sup>上海工程技术大学高强激光智能加工装备关键技术产学研开发中心, 上海 201620

**摘要** 采用激光熔覆技术在纯铜表面制备  $\text{Cr}_3\text{Si}+\gamma\text{-Ni}+\text{Ni}_2\text{Si}$ (45Ni-26Cr-29Si)和  $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7+\text{Ni}_2\text{Si}$ (60Ni-10Cr-30Si)(原子数分数,%)两种 Ni 基硅化物涂层。利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、能谱仪(EDS)、分析涂层不同的组织结构以及其形成原因。测试涂层的室温摩擦磨损性能。结果表明:组织为  $\text{Cr}_3\text{Si}+\gamma\text{-Ni}+\text{Ni}_2\text{Si}$  的涂层,平均硬度为 1000 HV,500 g 载荷下压痕边角出现裂纹,平均摩擦系数为 0.5;组织为  $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7+\text{Ni}_2\text{Si}$  的涂层,平均硬度为 900 HV;1000 g 载荷下压痕边角没有裂纹产生,韧性较好,平均摩擦系数为 0.5。

**关键词** 材料;耐磨性;激光熔覆;  $\text{Cr}_3\text{Si}$ ;  $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7$

中图分类号 TG115 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0906005

## Study on Tribological Properties of Ni-Based Silicide Coating on Copper by Laser Cladding

Liu Xiaopeng<sup>1,2</sup> Zhang Peilei<sup>1,2</sup> Lu Yunlong<sup>1,2</sup> Yan Hua<sup>1,2</sup> Yu Zhishui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

<sup>2</sup>Research & Development Center for Key Technologies of Intelligent Ultra-Intense Laser Processing Equipments, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

**Abstract** Two Ni-Cr-Si coatings of  $\text{Cr}_3\text{Si}+\gamma\text{Ni}$  (45Ni-26Cr-29Si) and  $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7+\text{Ni}_2\text{Si}$  (60Ni-10Cr-30Si) (atomic fraction, %) are synthesized on pure copper using laser cladding. The microstructures of the coatings are analyzed by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD) and energy dispersive spectrometer (EDS). The wear resistance of the coatings is evaluated under ambient temperature. The results show that due to the different crystallization temperature ranges between binary phase and ternary phase, constitutional supercooling degrees are different in the process of crystallization and different microstructures are formed. The coating consisted of  $\text{Cr}_3\text{Si}+\gamma\text{Ni}$  has an average hardness of 1000 HV and the friction coefficient of 0.5, but 4 cracks appear to the corner of indentation when loads add to 500 g. The coating consisted of  $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7+\text{Ni}_2\text{Si}$  with an average hardness of 900 HV, fine toughness of no cracks generating under loads of 1000 g, an average friction coefficient of 0.5 has good comprehensive performance than that of the coating consisted of  $\text{Cr}_3\text{Si}+\gamma\text{Ni}$ .

**Key words** materials; wear resistance; laser cladding;  $\text{Cr}_3\text{Si}$ ;  $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7$

**OCIS codes** 160.3900; 160.6990; 140.3390

## 1 引 言

铜合金因其高的热导率和电导率被广泛应用到冶金、电力等行业,如高炉风口、连铸结晶器、电机换向器等。但硬度低、耐磨性差严重影响了铜合金零部件的使用寿命<sup>[1-2]</sup>。激光熔覆技术制备合金涂层具有与基体冶金结合、对基体热损伤小、热影响区小等优点<sup>[3]</sup>,应用到铜合金表面可以改善铜合金零部件耐磨性又不

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51375294,51405288)、上海市自然科学基金(12ZR1444500)、上海市科委地方高校能力建设项目(13160501200)、上海市教委创新项目(14YZ139)、上海工程技术大学校基金(2012gp21)、上海工程技术大学研究生科研创新项目(14KY0509)

作者简介: 刘晓鹏(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光束表面改性方面的研究。E-mail: liuxpaxgd@163.com。

导师简介: 张培磊(1981—),男,博士,副教授,主要从事激光束表面改性等方面的研究。

E-mail: peilei@sues.edu.cn(通信联系人)

过分损失其他性能。

Zhang等<sup>[4]</sup>采用同轴送粉方式利用激光熔覆技术在纯铜表面制备了Ni基合金涂层,硬度达到HV<sub>0.1</sub> 360,明显改善了耐磨性。Yan等<sup>[5]</sup>在连铸结晶器铜合金表面激光熔覆Co基合金/TiC/CaF<sub>2</sub>自润滑涂层,利用TiC强化,CaF<sub>2</sub>润滑的Co基合金涂层与GCr15钢对磨的摩擦实验,磨损量小且摩擦系数可以达到0.19。

然而铜与多数材料润湿性差,对激光反光率高,为改善成形、减少裂纹产生、提高涂层与基体的结合强度,很多研究人员在涂层与基体之间增加过渡层。Liu等<sup>[6]</sup>采用等离子喷涂技术在铜表面添加Ni基中间层,然后采用激光熔覆技术制备Co基涂层,得到与基体结合良好、组织均匀、无裂纹的双层涂层,体积磨损量比铜基体减少近7倍,有效降低了铜基体的塑性变形和粘着磨损。为了提高电接触元件使用寿命,Ng等<sup>[7]</sup>在铜表面制备了Mo/Ni/Cu“三明治”激光熔覆层,研究得出Ni做中间层的Mo-Ni涂层硬度比铜基体高7倍,耐磨性能得到改善,而电阻率增加可以忽略。

然而对于更严苛条件下使用的铜合金,现有的成熟的Ni、Co基合金材料无法满足更高硬度和耐磨性的要求。过渡金属硅化物Cr<sub>3</sub>Si具有熔点高、硬度高、高温蠕变性能好、高温抗氧化性能及抗热腐蚀性能等优异特点,其共价键与金属键并存的独特化学结合性质,赋予Cr<sub>3</sub>Si金属硅化物以优异的耐磨性能。添加韧性第二相改善其室温脆性,可以使Cr<sub>3</sub>Si作为强化相很好的应用到涂层制备中,改善材料表面耐磨性能<sup>[8]</sup>。

Wang等<sup>[9]</sup>利用激光熔覆技术在1Cr18Ni9Ti不锈钢表面制备了Cr<sub>3</sub>Si作为强化相的涂层,指出在一定范围内随着Cr<sub>3</sub>Si体积分数的增加,涂层的室温耐磨性能提高,并且测试了涂层在600℃下的干滑动摩擦磨损性能,提出由于存在大量的Cr<sub>3</sub>Si相加上快速凝固形成的晶粒细小的组织,涂层具有好的高温耐磨性能<sup>[10]</sup>。

相比Cr<sub>3</sub>Si三元相Ni<sub>16</sub>Cr<sub>6</sub>Si<sub>7</sub>具有Mg<sub>6</sub>Cu<sub>6</sub>Si<sub>7</sub>型晶体结构,具有良好的综合性能和较大的形成成分范围<sup>[11]</sup>。其作为涂层的强化相在提高涂层的综合性能方面有很大的潜力。

采用T2纯铜做基体材料,激光熔覆制备了45Ni-26Cr-29Si和60Ni-10Cr-30Si(原子数分数,%)两种成分的涂层,利用光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)观察分析涂层组织,通过X射线衍射仪(XRD)检测涂层相组成,用维式硬度计测试涂层硬度,采用硬度压痕形貌表征其韧性,通过室温下干滑动磨损实验测试涂层摩擦磨损性能。

## 2 实验材料及方法

分别用Ni、Cr、Si粉末(纯度大于等于99.5%)按表1成分配比配制涂层原始材料,粉末平均粒度为50~75 μm,分别在100℃下烘干2h,称取粉末在球磨机中混合30min。基体材料选用退火态T2纯铜,试样尺寸为50mm×50mm×8mm,用砂轮机将表面氧化皮、油污等打磨干净,保留其粗糙表面形态,放入乙醇中超声波清洗15min。将混合好的Ni-Cr-Si粉末掺入粘结剂(5%醋酸纤维素+二丙酮醇溶液)调成糊状,预置到铜基体表面约1mm厚。在150℃下烘干1h,采用5kW光纤激光加工系统(IPG YLS-5000)进行激光熔覆实验,实验参数见表1,实验过程中氩气作为保护气,流量为20L/min。每个试样进行单道和6道搭接实验。单道激光熔覆层用来观察组织,6道搭接层进行摩擦磨损实验,搭接率为30%。

表1 Ni-Cr-Si粉末成分及激光参数

Table 1 Compositions of Ni - Cr - Si powders and laser parameters

	Powder composition			Laser parameters		
	Ni/%	Cr/%	Si/%	Power /W	Scan speed /(mm/min)	Diameter of laser beam /mm
1	45	26	29	4500	800	3.5
2	60	10	30	4500	800	3.5

垂直于激光扫描方向切取单道涂层-基体,采用标准抛光工艺制备金相试样。经HF-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O体积比为1:3:5的腐蚀液腐蚀10s,在VHX-600超景深OM和Hitachi S-3400N SEM下观察分析组织。用HXD-1000维式硬度计测量从涂层顶部到基体纵向硬度分布,压痕间隔为100 μm,实验载荷为100g,保荷时间为15s。在涂层中部位置变换载荷25,100,200,500,1000g,进行压痕实验,获取压痕图片,评价涂层韧性。

搭接区切取10mm×10mm×8mm试样,采用Rigaku XRD鉴定涂层组成相,Cu靶Kα射线(λ=0.154060nm),扫描速度为4°/min,步长为0.02°。室温下,在CETR-UMT多功能摩擦磨损实验仪上进行干滑动摩擦磨损实验,

实验装置示意图如图1所示。摩擦半径为2 mm,载荷为5 kg,摩擦时间为60 min,总滑动摩擦距离约为77 m。磨损前后试样经超声波清洗,用精度为0.0001 g的电子天平测量重量,计算磨损量。在整个摩擦过程中摩擦系数经过计算被实时记载,实验得到摩擦系数曲线。试样在SEM下观察磨损后磨痕表面形貌。

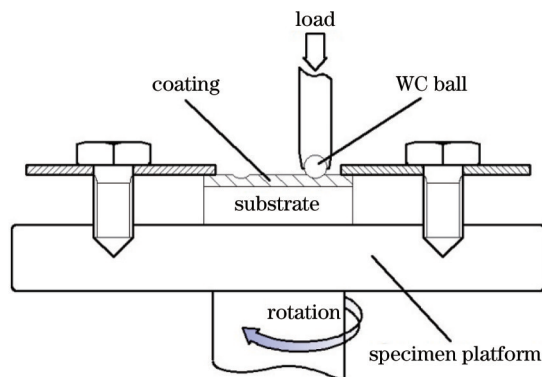


图1 摩擦磨损装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the wear test

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 相鉴定

图2为Ni-Cr-Si涂层的XRD分析结果,基体材料为纯铜,在涂层中没有发现设计成分以外的相。1号涂层由铜基固溶体( $\text{Cu}_{ss}$ )、 $\text{Cr}_3\text{Si}$ 、 $\gamma\text{-Ni}$ 、 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 相组成,2号涂层由 $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7$ 、 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 、 $\text{Cu}_{ss}$ 组成。由于铜基体的稀释作用,两种涂层中都发现了 $\text{Cu}_{ss}$ 相。参考Ni-Cr-Si平衡相图<sup>[12]</sup>,2号涂层 $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7$ 代替 $\text{Cr}_3\text{Si}$ 相。推断是由于激光熔覆涂层在非平衡凝固条件下,元素来不及充分扩散,生成相可能偏离成分点所在相区<sup>[13]</sup>。

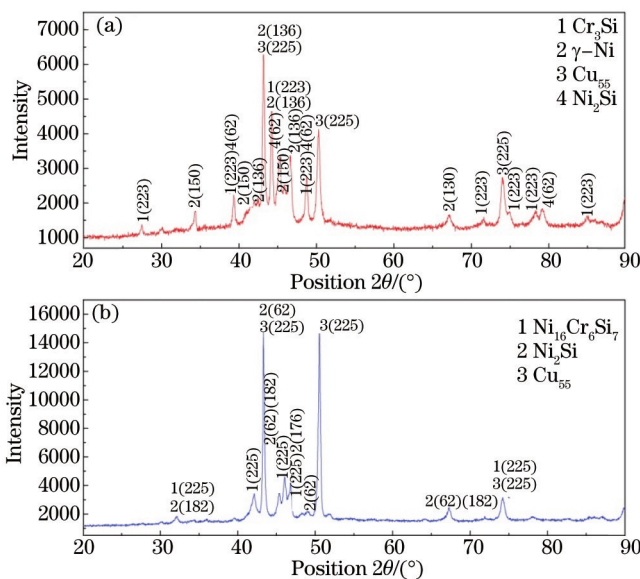


图2 铜表面激光熔覆涂层XRD分析结果

Fig.2 Results of XRD analysis of the laser cladding coatings on copper. (a) Coating 1; (b) coating 2

#### 3.2 组织分析

图3为1号涂层横截面OM和SEM形貌。从图3(a)可以看出1号涂层组织均匀,无气孔,并且与基体冶金结合的特征,涂层高度在1 mm左右,稀释率<sup>[14]</sup>小于10%。涂层中出现白色组织,其呈带状分布在涂层中下部。图3(b)为图3(a)中矩形框区域的放大组织,可以看到“白色带”的组织形态与暗灰色区域不同,呈大的花状枝晶形貌,并且A所指区域能看到花状枝晶周围分布的黄色相,对应于图3(c)3号区域。涂层的两种典型组织为花状枝晶和暗灰色区域的细等轴晶,图3(c)显示花状枝晶(1号区域)、枝晶间靠近花状枝晶相(2号区



域)、枝晶间外围相(3号区域)和细等轴晶,能谱仪(EDS)检测结果如表2所示,分析得出1号区域为 $\text{Cr}_3\text{Si}$ 相,2号区域为 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 相,3号区域即在OM下看到的黄色相为 $\text{Cu}_{ss}$ 。由花状枝晶到 $\text{Cu}_{ss}$ 呈现出成分梯度变化现象,分析造成这种变化的原因:1)由于稀释作用铜进入涂层中,但是进入量不大,所以大部分铜固溶到其他相中,不单独成相;2)花状枝晶长大过程中“吸”走了周围区域内的Cr和Si,出现贫Cr、Si区域,由于激光熔覆过程冷却速度快,更远端的Cr、Si来不及扩散过来,因此形成 $\text{Cu}_{ss}$ 相,而在 $\text{Cu}_{ss}$ 相和 $\text{Cr}_3\text{Si}$ 相之间存在一个过渡区即 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 相区。由于花状枝晶数量有限,1号涂层中 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 相数量较少,1号涂层的典型组织为细等轴晶 $\text{Cr}_3\text{Si}$ +晶间 $\gamma\text{-Ni}$ 相。图3(d)显示,均匀分布的细等轴晶晶粒大小为 $1\ \mu\text{m}$ 左右,4号区域对应晶粒上,多个类似的点显示Cr和Si原子比接近3:1,因此判断细等轴晶为 $\text{Cr}_3\text{Si}$ ,符合XRD结果;5号区域晶间相,结合XRD结果分析为固溶了大量Cu、Cr、Si元素的 $\gamma\text{-Ni}$ 相。

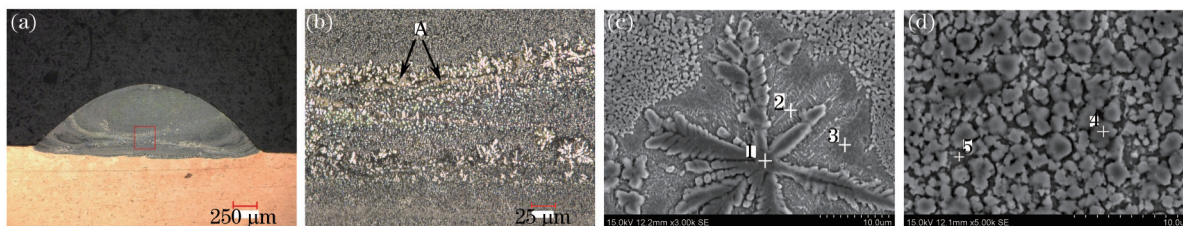


图3 1号涂层(a)、(b)横截面OM和(c)、(d)SEM形貌

Fig.3 (a),(b) Cross-sectional OM images and (c),(d) SEM images of coating 1

图4为2号涂层横截面OM和SEM形貌。从图4(a)可以看到涂层稀释率较低,成形良好,无其他缺陷。由于Ni的比热高于Cr,在相同的能量输入情况下,2号涂层因为Ni含量高,熔化吸收热高,所以熔化后润湿铺展的面积小于1号涂层,加上激光加工快速凝固涂层成形的不均匀性,2号涂层的宏观截面形貌比1号涂层窄小。从图4(b)、(c)可以看出涂层由树枝晶+枝晶间相两相组成,树枝晶由涂层下部向上生长,生长方向一致,符合生长方向与热流相反的枝晶生长规律。由6和7两区域的EDS结果,结合XRD结果和平衡相图<sup>[12]</sup>分析得出树枝晶为 $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7$ 相,枝晶间为 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 相,相比1号涂层典型组织,2号涂层枝晶间为 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 相,而非 $\gamma\text{-Ni}$ 相,推断是随着Ni含量的增加,Ni和Si从固溶体中析出形成 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 相的自由能比保持 $\gamma\text{-Ni}$ 固溶体的自由能更

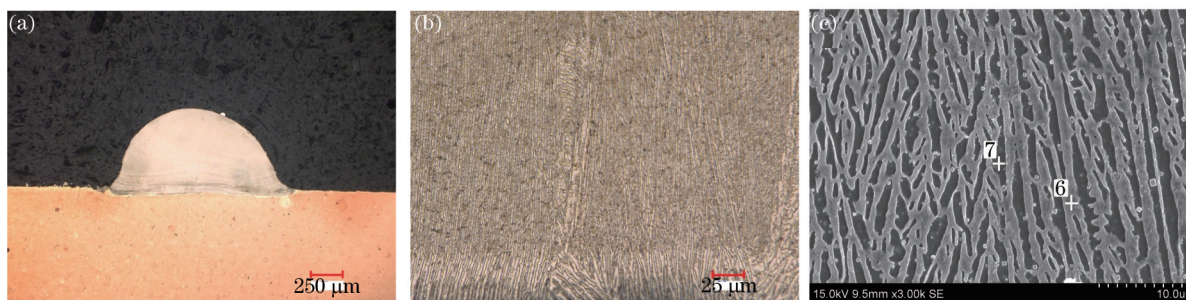


图4 2号涂层横截面OM(a)、(b)和SEM(c)形貌

Fig.4 Cross-sectional OM images (a), (b) and SEM images (c) of coating 2

表2 涂层测试点EDS分析

Table 2 EDS analyses of test points in coatings

Region	Element composition /%			
	Ni	Cr	Si	Cu
1	3.11	69.32	27.57	—
2	41.18	10.57	26.69	21.56
3	17.77	2.86	8.65	70.73
4	6.92	61.96	26.43	4.69
5	33.8	25.79	22.15	18.25
6	52.49	18.03	20.17	9.3
7	56.29	7.13	27.25	9.33

低。XRD 鉴定出涂层含有少量  $\text{Cu}_{ss}$  相,可能是由于热量不均匀导致涂层存在微区时效作用,过饱和固溶体中析出  $\text{Cu}_{ss}$  相。而受实验中所使用的 SEM 的分辨率限制,这部分微区域的相很难精确地检测到。

### 3.3 硬度和韧性

涂层硬度分布曲线如图 5 所示,硬度曲线相对平滑,1 号涂层 2 号涂层的平均硬度分别为 1000 HV 和 900 HV,都远高于铜基体(65 HV)。 $\text{Cr}_3\text{Si}$  强化相的高硬度特点加上激光加工带来的细晶强化作用赋予 1 号涂层高的硬度值。但是由于  $\text{Cr}_3\text{Si}$  存在严重的室温脆性<sup>[8]</sup>,压痕实验中载荷增大到 500 g 时,压痕的四角出现裂纹,如图 6(1)所示。相对于 1 号涂层, $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7$  作为强化相的 2 号涂层具有良好的韧性,如图 6(2)所示,从中可以看出载荷从低到高,压痕四角都没有出现裂纹,只有在局部区域出现塌陷。

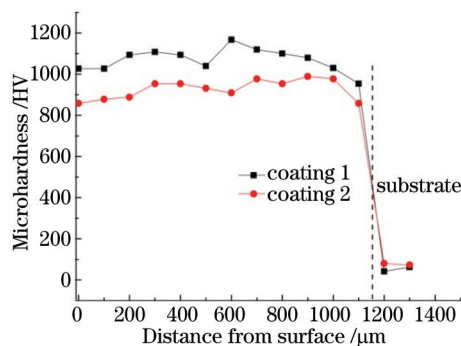


图 5 两种涂层的显微硬度值曲线

Fig.5 Microhardness curves of two coatings

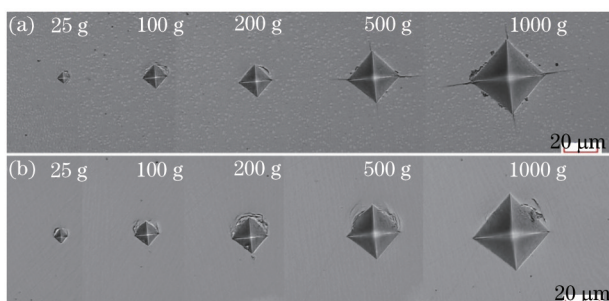


图 6 (a) 1 号涂层和 (b) 2 号涂层不同载荷下的压痕形貌

Fig.6 Indentation images under different loads of (a) coating 1 and (b) coating 2

### 3.4 摩擦磨损性能

载荷相同的情况下,影响摩擦系数的是摩擦力<sup>[15]</sup>。在干滑动摩擦条件下,1 号和 2 号涂层摩擦系数相似,平均值为 0.5 左右,比 304 不锈钢参考试样低,如图 7(a)所示,两者都在摩擦后期出现曲线跳动现象。分析是受磨损装置限制(见图 1),磨屑不易自行排出摩擦区,部分脱落磨屑被碾压进入摩擦区域引起摩擦力增大,导致摩擦系数增大。图 7(b)为两种涂层和 304 不锈钢在同等实验条件下的磨损量比较,1 号和 2 号涂层磨损量

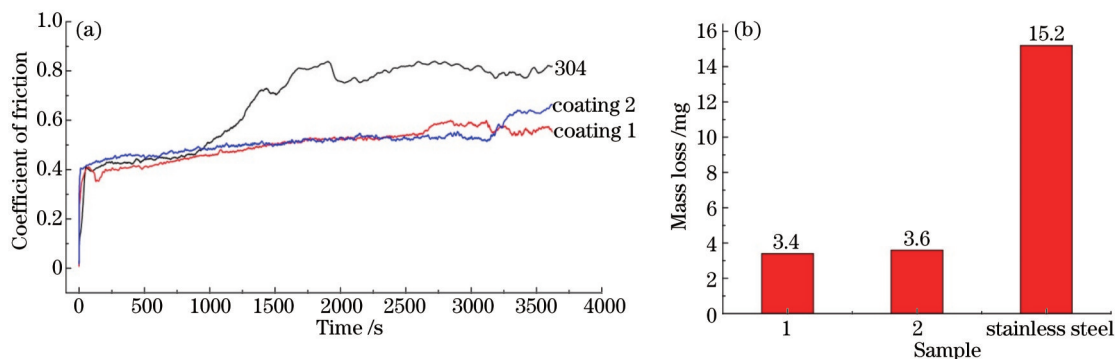


图 7 两种涂层和 304 不锈钢的 (a) 摩擦系数曲线和 (b) 磨损失重

Fig.7 (a) Coefficients of friction and (b) mass losses for two coatings and 304 stainless steel

接近,均比304不锈钢低。实验选用的是WC球(HRA92)作为摩擦副,其硬度比两种涂层和304不锈钢都高,从表面形貌看,摩擦副几乎没有磨损,磨损量主要来自试样。

图8为室温干滑动摩擦磨损SEM形貌。从图8(a)中可以看出1号涂层摩擦后表面光滑,几乎没有犁沟、层状剥离等塑性变形特征,在边缘出现少量磨损粉末的重新粘着现象。磨痕区域能观察到一条长裂纹,推测是成形过程中由于涂层和基体热膨胀系数相差较大加上涂层韧性较差,导致涂层开裂。图8(b)为图8(a)的局部放大图,可以看到类似金相组织的形貌。枝晶间韧性相( $\gamma$ -Ni相)优先磨损,因为本征高硬度,初生 $\text{Cr}_3\text{Si}$ 花状枝晶和细等轴晶在摩擦过程中略微突出于涂层基体表面,又对 $\gamma$ -Ni相起到保护作用。相比2号涂层的基体 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 相,1号涂层的基体 $\gamma$ -Ni相软,在摩擦磨损过程中对强化相的支持和稳固作用弱。因此大块枝晶在摩擦过程中会因为基体给予的支持不足而开裂、脱落<sup>[16]</sup>,从图8(b)中标出花状枝晶的脱落痕迹得到验证。

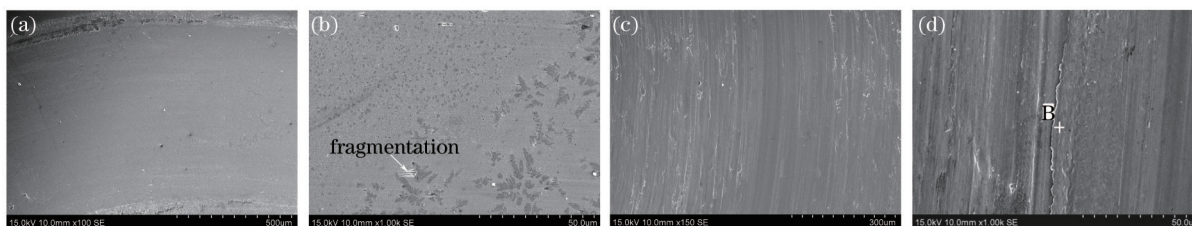


图8 室温干滑动摩擦磨损SEM形貌。(a)、(b) 1号涂层; (c)、(d) 2号涂层

Fig.8 SEM micrographs after dry sliding wear test at ambient temperature. (a),(b) Coating 1; (c),(d) Coating 2

2号涂层磨痕表面形貌比较光滑,只有少量比较浅的犁沟。B点EDS结果为18.85Si-2.24Cr-29.48Ni-49.43Cu(原子数分数,%),表明翘起部分为涂层组织。从硬度和韧性测试结果可知,2号涂层综合性能良好,没有发现裂纹。组成涂层的两相硬度差异不大<sup>[16-17]</sup>,没有强化相脱落现象。

$\text{Cr}_3\text{Si}$ 合金因其高硬度具备好的抗磨粒磨损性能,因其强的共价键和金属间结合的原子键结构具备杰出的抗粘着磨损性能。以 $\text{Cr}_3\text{Si}$ 为强化相, $\gamma$ -Ni为增韧相的1号涂层,平均摩擦系数为0.5,磨损量最低,但涂层中存在宏观裂纹。2号涂层强化相为 $\text{Ni}_6\text{Cr}_6\text{Si}_7$ ,综合性能好,枝晶间 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 相具备较高的硬度和韧性<sup>[17]</sup>。因此在图8(c)和(d)中并没有观察到2号涂层中强化相“微凸”出涂层基体的形貌,没有观察到明显的裂纹,平均摩擦系数为0.5。

## 4 结 论

采用光纤激光在纯铜表面制备两种成分的Ni-Cr-Si涂层,45Ni-26Cr-29Si(原子数分数,%)涂层形成初生相为 $\text{Cr}_3\text{Si}$ ,枝晶形貌为花状枝晶+细等轴晶,枝晶间为 $\gamma$ -Ni相+少量 $\text{Ni}_2\text{Si}$ 相的组织;60Ni-10Cr-30Si(原子数分数,%)涂层则生成发达树枝晶。对两种涂层分别进行硬度和韧性测试以及干滑动摩擦磨损实验,结果表明 $\text{Cr}_3\text{Si}+\gamma$ -Ni+ $\text{Ni}_2\text{Si}$ 涂层硬度高,但韧性差,涂层中存在原始裂纹,平均摩擦系数为0.5。 $\text{Ni}_6\text{Cr}_6\text{Si}_7+\text{Ni}_2\text{Si}$ 涂层具有较高的硬度和良好的韧性,平均摩擦系数为0.5。两种涂层摩擦系数和磨损量均比304不锈钢低。

## 参 考 文 献

- 1 Yan H, Zhang P L, Yu Z S, *et al.*. Microstructure and tribological properties of laser-clad Ni-Cr/TiB<sub>2</sub> composite coatings on copper with the addition of CaF<sub>2</sub>[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(19): 4046-4053.
- 2 Dehm G, Medres B, Shepeleva L, *et al.*. Microstructure and tribological properties of Ni-based claddings on Cu substrates[J]. Wear, 1999, 225: 18-26.
- 3 Zhang P L, Liu X P, Lu Y L, *et al.*. Microstructure and wear behavior of Cu-Mo-Si coatings by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2014, 311: 709-714.
- 4 Zhang Y Z, Tu Y, Xi M Z, *et al.*. Characterization on laser clad nickel based alloy coating on pure copper[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(24): 5924-5928.
- 5 Yan H, Zhang J, Zhang P L, *et al.*. Laser cladding of Co-based alloy/TiC/CaF<sub>2</sub> self-lubricating composite coatings on copper for continuous casting mold[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 232: 362-369.
- 6 Liu F, Liu C S, Chen S Y, *et al.*. Laser cladding Ni-Co duplex coating on copper substrate[J]. Optics and Lasers in Engineering,



- 2010, 48(7): 792-799.
- 7 Ng K W, Man H C, Cheng F T, *et al.*. Laser cladding of copper with molybdenum for wear resistance enhancement in electrical contacts[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(14): 6236-6246
- 8 Wang H M, Duan G. Microstructure and wear resistance of a laser clad reinforced Cr<sub>3</sub>Si metal silicide composite coating[J]. Materials Science and Engineering:A, 2002, 336(1): 117-123.
- 9 Wang H M, Duan G. Wear and corrosion behavior of laser clad Cr<sub>3</sub>Si reinforced intermetallic composite coatings[J]. Intermetallics, 2003, 11(8): 755-762.
- 10 Duan G, Wang H M. High-temperature wear resistance of a laser-clad  $\gamma$ /Cr<sub>3</sub>Si metal silicide composite coating[J]. Scripta Materialia, 2002, 46(1): 107-111.
- 11 Gupta K P. The Cr-Ni-Si (Chromium-Nickel-Silicon) system[J]. JPEDAV, 2006, 27(5): 523 - 528.
- 12 Villars P, Prince A, Okamoto H. Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams[M]. New York: Asm Intl Press, 1995: 8476.
- 13 Yuan L, Wang H M. Microstructure and hot corrosion behaviors of a  $\gamma$ -toughened Cr<sub>13</sub>Ni<sub>5</sub>Si<sub>2</sub>/Cr<sub>3</sub>Ni<sub>5</sub>Si<sub>2</sub> ternary metal silicide alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 479(1): 217-224.
- 14 Pan Hu, Zhao Jianfeng, Liu Yunlei, *et al.*. Controllability research on dilution ratio of Nickel-based superalloy by laser cladding repairment[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 04030071.  
潘 浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 04030071.
- 15 Li J, Yu Z S, Wang H P. Wear behaviors of an (TiB+TiC)/Ti composite coating fabricated on Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V by laser cladding[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(15): 4804-4808.
- 16 Lu X D, Wang H M. High-temperature phase stability and tribological properties of laser clad Mo<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si/NiSi metal silicide coatings [J]. Acta Materialia, 2004, 52(18): 5419-5426.
- 17 Cai L X, Wang C M, Wang H M. Laser cladding for wear-resistant Cr-alloyed Ni<sub>2</sub>Si-NiSi intermetallic composite coatings[J]. Materials Letters, 2003, 57(19): 2914-2918.

栏目编辑: 张浩佳