

# 激光熔覆碳纤维增强 316L 不锈钢的 显微组织和耐磨性

何松亚<sup>1</sup>, 刘晓东<sup>1</sup>, 赵淑珍<sup>1</sup>, 金剑波<sup>1</sup>, 周圣丰<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>天津工业大学物理科学与技术学院激光技术研究所, 天津 300387;

<sup>2</sup>暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广东 广州 510632

**摘要** 采用激光熔覆技术制备了碳纤维增强 316L 不锈钢,研究了扫描速度对碳纤维增强 316L 不锈钢显微结构、显微硬度和耐磨性的影响。结果表明:激光熔覆 316L 不锈钢由  $\gamma$ -Fe 相组成,而激光熔覆碳纤维增强 316L 不锈钢主要由  $M_{23}C_6$ 、 $\gamma$ -Fe 和  $\alpha$ -Fe 组成,其中  $M_{23}C_6$  均匀地分布在  $\gamma$ -Fe 和  $\alpha$ -Fe 树枝晶间;随着扫描速度增大,枝晶臂间距减小,显微硬度先增加后减小,耐磨性先增强后降低;当扫描速度为 12 mm/s 时,激光熔覆碳纤维增强 316L 不锈钢的耐磨性最好,相对于未加碳纤维的激光熔覆 316L 不锈钢提高了约 25.3%。

**关键词** 激光技术; 316L 不锈钢; 碳纤维; 扫描速度; 显微组织; 耐磨性能

中图分类号 TG115.5+8

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0502010

## Microstructure and Wear Resistance of Carbon Fibers Reinforced 316L Stainless Steel Prepared Using Laser Cladding

He Songya<sup>1</sup>, Liu Xiaodong<sup>1</sup>, Zhao Shuzhen<sup>1</sup>, Jin Jianbo<sup>1</sup>, Zhou Shengfeng<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Laser Technology Institute, School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

<sup>2</sup>Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistance and Functional Materials, Jinan University,

Guangzhou, Guangdong 510632, China

**Abstract** Carbon fibers (CFs) reinforced 316L stainless steels are prepared using laser cladding (LC) and the effects of scanning speed on the microstructure, microhardness, and wear resistance of carbon fibers reinforced 316L stainless steel are investigated in this study. Results show that the laser clad 316L stainless steel without carbon fibers is composed of  $\gamma$ -Fe phase, the phases of the laser cladding carbon fibers reinforced 316L stainless are mainly composed of  $M_{23}C_6$ ,  $\gamma$ -Fe and  $\alpha$ -Fe, and  $M_{23}C_6$  homogeneously distributes between  $\gamma$ -Fe and  $\alpha$ -Fe dendrites. As the scanning speed increases, the distance between the dendrite arms decreases, while the microhardness first increases and then decreases. As a result, the wear resistance first enhances and then decreases. When the scanning speed is 12 mm/s, the laser cladding carbon fibers reinforced 316L stainless steel exhibits the highest wear resistance, and its wear resistance increases by approximately 25.3% compared with that of the laser clad 316L stainless steel without carbon fibers.

**Key words** laser technique; 316L stainless steel; carbon fibers; scanning speed; microstructure; wear resistance

**OCIS codes** 140.3390; 160.3380

## 1 引言

316L 不锈钢具有优异的耐蚀性、良好的生物相容性和低廉的成本等特点,在医用手术刀、植入骨关

节和液压系统等方面得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。但是,316L 不锈钢在各领域应用时长期处于磨损状态,而其耐磨性有限,故其使用寿命受到了限制。因此,提高 316L 不锈钢的耐磨性成为一个急需解决的问题。

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2019-12-25; 录用日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(51471084)、江西省杰出青年基金(20162BCB23039)、天津市自然科学基金京津冀专项(17JCZDJC40500)

\* E-mail: zhousf1228@163.com

目前,针对改善耐磨性<sup>[5-6]</sup>这一问题,人们基于碳纤维质量轻、强度高和韧性高的特点<sup>[7-8]</sup>,用其来增强增韧钴基合金<sup>[9]</sup>、铝基合金<sup>[10]</sup>、铜基合金<sup>[11]</sup>、镍基合金<sup>[12-13]</sup>和铁基合金<sup>[14]</sup>等金属材料。例如:Khoddamzadeh等<sup>[9]</sup>采用热等静压法制备了镀镍碳纤维增强的碳含量不同的司太立合金,对其进行研究后发现,加入的碳纤维提高了司太立合金的硬度和耐磨性;Lei等<sup>[12]</sup>研究了激光熔覆碳纤维增强镍基复合材料,发现加入碳纤维后,复合材料的磨损量是未加入碳纤维镍基合金的55%。

热等静压和传统的铸造技术虽然已比较成熟,但是用来制造形状复杂的部件时仍存在一定挑战。近年来,激光熔覆技术因材料利用率高且可以快速制造出结构复杂、显微结构精细、硬度更高的零部件<sup>[15-18]</sup>,而在增材制造领域得到快速发展和应用。但是,影响激光熔覆零部件质量的因素有很多,如激光功率、扫描速度、送粉率和搭接率等<sup>[19-22]</sup>,这些因素会直接影响成形试样的显微组织、致密度、硬度和摩擦磨损等性能。Zhou等<sup>[23]</sup>发现,可以通过控制激光功率和扫描速度来减少裂纹的出现,实现材料的无裂纹制备。文献<sup>[24]</sup>通过调整扫描速度来控制晶粒的生长,改变了试样的致密化程度,当扫描速度达到一定值时,试样的硬度和抗拉强度达到最大值;一旦扫描速度超过界限,硬度和抗拉强度便会下降。

针对316L不锈钢的硬度和耐磨性有待进一步提高问题,本文采用激光熔覆技术制备了碳纤维增强316L不锈钢,并重点开展以下两方面的研究:1)碳纤维对316L不锈钢显微组织、硬度和耐磨性的影响;2)扫描速度对激光熔覆碳纤维增强316L不锈钢显微组织和耐磨性的影响。

## 2 试验材料与方法

本试验所用基材为A3钢,其尺寸为300 mm×80 mm×10 mm。熔覆材料为316L不锈钢粉末,其粒径为37~48 μm,化学成分(质量分数,%)为:0.03 C,1.00 Si,2.00 Mn,0.035 P,0.03 S,10.0~10.4 Ni,16.0~18.0 Cr,其余为Fe。选择长度为2~3 mm的T700碳纤维作为强化相,将其与316L不锈钢粉按体积比为3:7在高能行星磨内混匀,球料质量比为4:1,转速设定为300 r/m。为避免高温影响,球磨20 min后暂停10 min,共球磨5 h。将球磨后的碳纤维增强316L不锈钢粉在100℃的电阻炉中干燥4 h。图1为碳纤维增强316L不锈钢粉末球磨后的形貌图及X射线衍射(XRD)分析结

果,其中细长的纤维物为碳纤维,它在复合粉末中的分布较为均匀,但因碳纤维(CFs)的含量较低,故而在复合粉末的XRD图谱中未发现它的衍射峰。使用波长为920~1040 nm的半导体激光器(TruDiode 4006)系统进行激光熔覆试验,激光工艺参数如表1所示。将带有卡槽的预置粉末装置固定在基板上,向卡槽中倒入金属粉末,用刮刀将多余粉末刮掉,完成铺粉,铺粉厚度为0.8 mm,搭接率为50%,试验过程采用氩气气氛保护,以防止熔覆层氧化。

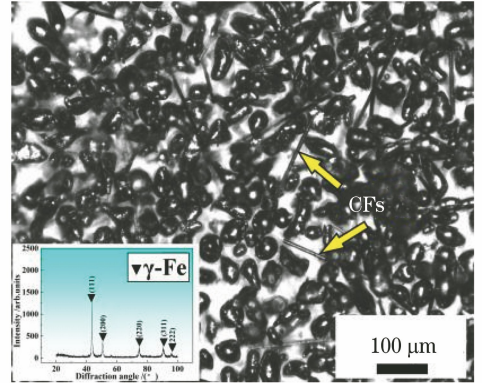


图1 碳纤维增强316L不锈钢粉末球磨后的形貌  
Fig. 1 Morphology of carbon fibers reinforced 316L stainless steel powder after ball milling

表1 激光熔覆的工艺参数

Table 1 Process parameters of laser cladding

Sample No.	Volume fraction		Scanning speed / (mm·s <sup>-1</sup> )
	of carbon fibers / %	Power / W	
S1	0	800	9
S2	3	800	9
S3	3	800	12
S4	3	800	15

激光熔覆后,采用化学试剂(5 g FeCl<sub>3</sub>+50 mL HCl+10 mL H<sub>2</sub>O)对试样进行腐蚀,采用配备有能量衍散光谱仪(EDS)的扫描电子显微镜(ZEISS Sigma 300)观察熔覆试样的显微结构。采用X射线衍射仪(D/MAX-2500,铜靶,电压40 kV,电流150 mA)测试熔覆层的物相。采用THV-1MDT显微硬度仪测量试样的显微硬度,加载载荷为2 N,加载时间为10 s。采用环块摩擦磨损试验机(M-2000)在空气环境中进行干滑动摩擦磨损试验,载荷为200 N,转速为200 r/min,磨损时间为150 min,对磨环材料为GCr15,对磨环直径为50 mm,宽度为10 mm,硬度为60 HRC。磨损前后的试样均采用电子天平(BSA124S)称重,在磨损过程中收集磨屑,采用扫描电子显微镜(ZEISS Sigma 300)观察磨

屑和试样磨损后的形貌。采用白光干涉三维表面轮廓仪(Phase Shift Micro XAM-3D)测量磨痕的表面特征。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 XRD 分析

图 2 为激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢的 XRD 图谱。由图可知,碳纤维增强 316L 不锈钢主要由  $\gamma$ -Fe、 $M_{23}C_6$  和  $\alpha$ -Fe 组成。与未添加碳纤维的 316L 不锈钢相比,碳纤维增强 316L 不锈钢的 XRD 图谱中出现了  $M_{23}C_6$  ( $M$  为 Cr、Fe 与 Ni) 和  $\alpha$ -Fe<sup>[25-26]</sup> 的衍射峰,这表明加入的碳纤维与 316L 不锈钢内的 Cr、Fe、Ni 在激光作用下发生冶金反应形成了  $M_{23}C_6$ ,少量面心立方结构的  $\gamma$ -Fe 与碳纤维反应后转变为体心立方结构的  $\alpha$ -Fe<sup>[27]</sup>。对于碳纤维增强 316L 不锈钢,尽管不同扫描速度下制得的熔覆层有着相同的相组成,但各组成相衍射峰的强度有所不同。随着扫描速度增大,  $M_{23}C_6$  和  $\alpha$ -Fe 衍射峰的强度呈现先增后减的变化趋势,而  $\gamma$ -Fe 衍射峰的强度则呈相反的趋势变化,即在扫描速度为 12 mm/s 时,复合涂层中  $M_{23}C_6$  和  $\alpha$ -Fe 的含量最高。

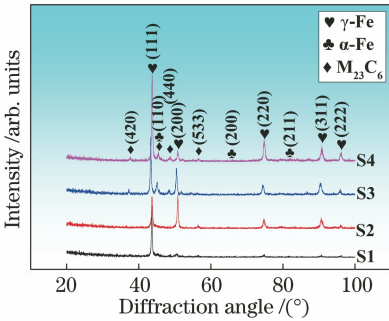


图 2 激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of 316L stainless steel and carbon fibers reinforced 316L stainless steels prepared by laser cladding

#### 3.2 显微结构

图 3 为激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢横截面的宏观形貌,图 3 中各标记位置处的放大图如图 4 所示。当激光照射在粉末上时,粉末和基材表面熔化形成熔池,激光移开后熔池开始冷却凝固,凝固过程中晶粒的形成与  $G/R$  密切相关, $G$  表示温度梯度, $R$  表示凝固速率,可表示<sup>[4,28]</sup>为

$$G = \frac{2k(T - T_0)^2}{\epsilon P}, \quad (1)$$

$$R = V_s \cos \theta, \quad (2)$$

式中: $T$  为液态金属的温度,K; $T_0$  为基材的初始温度,K; $\epsilon$  为激光吸收系数; $P$  为激光功率,W; $k$  为材料的热导率,W/(m · K); $V_s$  为激光扫描速度,mm/s; $\theta$  为  $V_s$  与  $R$  的夹角。在熔池的底部, $G$  最大而  $R$  最小,故基材与熔覆层之间形成了平面晶,如图 4(a1)所示。随着熔池继续凝固,固液面开始移动, $G/R$  减小,平面晶开始向树枝晶转变。当  $G/R$  达到一定值时,凝固的晶粒完全转变成树枝晶,如图 4(a2)所示。最后,由于空气的热导率远小于金属材料,散热不再具有方向性,从而在熔覆层顶部形成了等轴晶,如图 4(a3)所示。碳纤维增强 316L 不锈钢的生长特征[如图 4(b1)~(b3)所示]与 S1 类似。但是,碳纤维的加入,使枝晶臂间距从 2.20  $\mu\text{m}$  [如图 4(a2)所示]减小到 1.6  $\mu\text{m}$  [如图 4(b2)所示]。从图 4(b2)和图 4(c2)可以看出,随着扫描速度增大,枝晶间距逐渐减小。通过 Huang 等<sup>[29]</sup> 的研究可知,扫描速度与枝晶臂间距存在一定关系,即

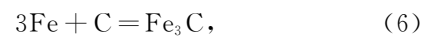
$$\lambda = \frac{a \sqrt{\epsilon P}}{(T - T_0) \sqrt{2kV_s \cos \theta}}, \quad (3)$$

式中: $a$  为系数。由(3)式可知,随着扫描速度增大,枝晶间距离相应减小。所以,当扫描速度由 9 mm/s 增加到 12 mm/s 时,枝晶臂距离的平均值减小到 1.26  $\mu\text{m}$ ,如图 4(c2)所示。

图 5 为激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢显微结构的放大图。根据文献[18]的研究结果可知,激光熔覆过程中,Fe、Cr、C 之间的热力学特征可以表示为



$$\Delta G_1^0 (\text{kJ/mol}) = -309.616 - 0.0774T \quad (298 \text{ K} < T < 1773 \text{ K}), \quad (5)$$



$$\Delta G_2^0 (\text{kJ/mol}) = 25.92 - 0.023T \quad (298 \text{ K} < T < 463 \text{ K}), \quad (7)$$

$$\Delta G_2^0 (\text{kJ/mol}) = 26.67 - 0.025T \quad (463 \text{ K} < T < 1115 \text{ K}), \quad (8)$$

$$\Delta G_2^0 (\text{kJ/mol}) = 10.34 - 0.010T \quad (1115 \text{ K} < T < 1808 \text{ K}). \quad (9)$$

显然,与 Fe 相比,Cr 更易与 C 结合。因此,316L 不锈钢粉中加入的碳纤维在激光辐照下将优先与 Cr 结合形成  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,同时促进少量  $\gamma$ -Fe 转变成  $\alpha$ -Fe。由 EDS 分析可知,图 5(c)中点 A 处的主要成分(质量分数,%)为:60.25 Fe,20.23 Cr,7.92 Ni,10.44 C,1.16 Si。根据 EDS 结果和图 2 所示的 XRD 图谱可知:加



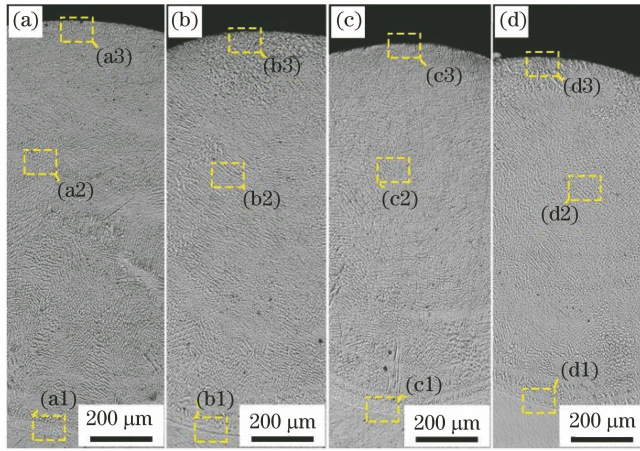


图3 激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢横截面的宏观形貌。(a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4  
 Fig. 3 Macro-morphology taken from cross-sectional of 316L stainless steel and carbon fibers reinforced 316L stainless steel fabricated by laser cladding. (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

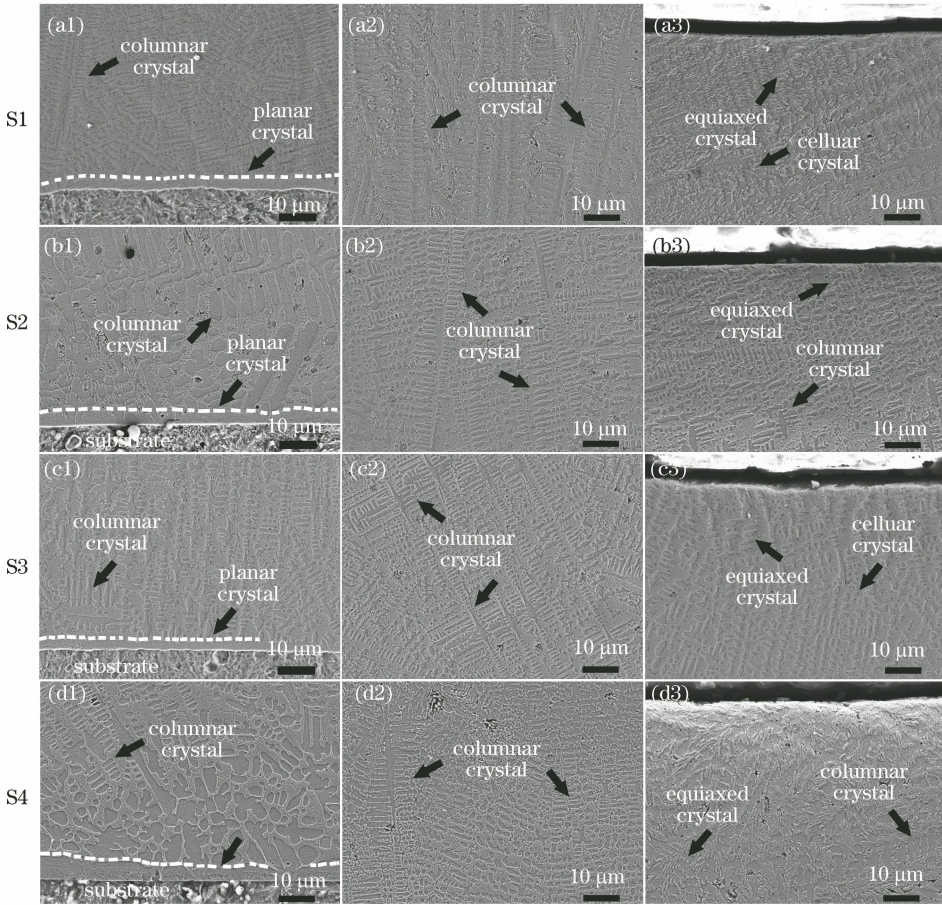


图4 激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢的横截面形貌。

(a1)(b1)(c1)(d1)基材与熔覆层结合区;(a2)(b2)(c2)(d2)熔覆层中部区;(a3)(b3)(c3)(d3)熔覆层顶部

Fig. 4 Cross-sectional morphology of 316L stainless steel and carbon fibers reinforced 316L stainless steels prepared by laser cladding. (a1)(b1)(c1)(d1) Interfaces between substrate and coating; (a2)(b2)(c2)(d2) middle regions in the coating; (a3)(b3)(c3)(d3) top regions in the coating

入的碳纤维在激光作用下与 316L 不锈钢中的合金元素交互作用后转化成了碳化物 $M_{23}C_6$  (M 为 Cr、Fe 与 Ni),且 $M_{23}C_6$ 沿着温度梯度的方向均匀有序地分布在

$\gamma$ -Fe、 $\alpha$ -Fe 树枝晶之间,抑制  $\gamma$ -Fe 和  $\alpha$ -Fe 晶粒的生长。因此,随着扫描速度增大,激光熔覆碳纤维增强 316L 不锈钢内的  $\gamma$ -Fe 组织结构逐渐变细。

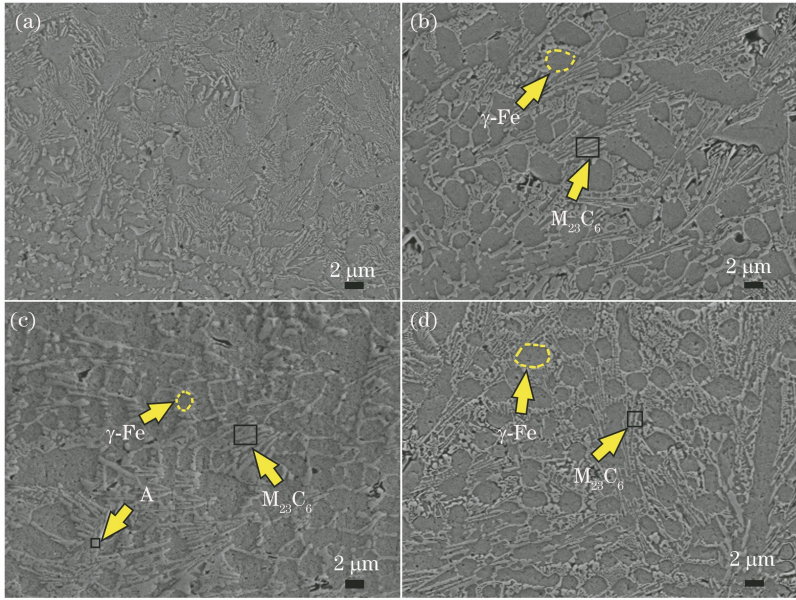


图 5 激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢显微结构的放大图。(a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4  
 Fig. 5 Magnified images of 316L stainless steel and carbon fibers reinforced 316L stainless steels prepared by laser cladding. (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

### 3.3 显微硬度和耐磨性能

图 6(a)为激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢的显微硬度曲线(HAZ 为热影响区),可以看出,基材的显微硬度并无明显变化;在相同的扫描速度下,碳纤维增强 316L 不锈钢 S2 的显微硬

度为(455.3 ± 22.8) HV0.2,与未加入碳纤维的 316L 不锈钢 S1 的显微硬度(392.2 ± 19.6) HV0.2 相比得以提高;随着扫描速度的增加,碳纤维增强 316L 不锈钢的硬度先增大后减小,当扫描速度从 9 mm/s 增加到 12 mm/s 时,碳纤维增强 316L 不锈

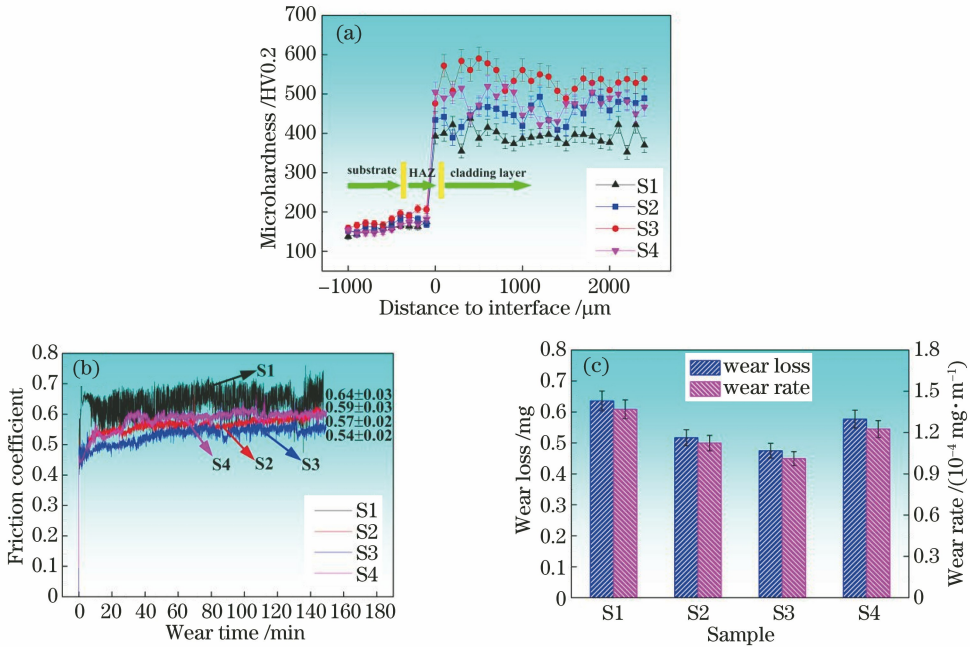


图 6 激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢的显微硬度与耐磨性。  
 (a)显微硬度;(b)摩擦因数;(c)磨损质量及磨损率

Fig. 6 Microhardness and wear resistance of 316L stainless steel and carbon fibers reinforced 316L stainless steels prepared by laser cladding. (a) Microhardness; (b) friction coefficient; (c) wear loss and wear rate



钢的平均硬度值由  $(455.3 \pm 22.8)$  HV0.2 增大到  $(539.3 \pm 27.0)$  HV0.2, 且均高于激光熔覆 316L 不锈钢的硬度。这主要是因为: 随着扫描速度增大, 熔覆层中的  $\gamma$ -Fe 晶体结构得到了细化, 起到了细晶强化的作用<sup>[17]</sup>; 同时, 当扫描速度达到 12 mm/s 时, 组织中分散着明显的  $M_{23}C_6$  硬质相, 起到了弥散强化的作用。另外, 碳化的 Cr 元素诱使少量面心立方结构的  $\gamma$ -Fe 与碳纤维反应而转变成体心立方结构的  $\alpha$ -Fe, 从而使 316L 不锈钢的结构组成从面心立方结构转化成面心立方+体心立方的结构, 且  $\alpha$ -Fe 的硬度比  $\gamma$ -Fe 大<sup>[30]</sup>。所以, 激光熔覆碳纤维增强 316L 不锈钢的硬度也随之增大。但是, 当扫描速度增大到 15 mm/s 时, 从图 2 所示的 XRD 图谱可知,  $M_{23}C_6$  和  $\alpha$ -Fe 的含量降低,  $\gamma$ -Fe 的含量增加, 说明此时碳纤维与金属元素之间的反应减弱了, 硬度便也随之降低。

一般而言, 磨损率  $\omega$  的公式为<sup>[31]</sup>

$$\omega = \frac{m_0 - m_1}{\pi \cdot d \cdot n}, \quad (10)$$

式中:  $m_0$  为试样磨损前的质量, mg;  $m_1$  为试样磨损后的质量, mg;  $d$  为对磨环的直径, mm;  $n$  为对磨环转过的圈数。图 6(b) 为激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢的摩擦因数随时间变化的曲线, 可知, 磨损一开始, 摩擦因数突然增大, 这是因为

在磨损的初期阶段, 试样与对磨环之间进行磨合, 随着试验的继续, 当试样与对磨环之间基本完全吻合后, 曲线便趋于稳定。从图 6(b) 还可以看出: 加入碳纤维之后, 试样 S2、S3、S4 的平均摩擦因数分别为  $0.59 \pm 0.03$ 、 $0.54 \pm 0.02$ 、 $0.57 \pm 0.02$ , 均小于未加入碳纤维的激光覆 316L 不锈钢的摩擦因数  $(0.64 \pm 0.03)$ 。可知, 随着扫描速度增大, 碳纤维增强 316L 不锈钢的摩擦因数先变小后变大。当扫描速度从 9 mm/s 增加到 15 mm/s 时, 碳纤维增强 316L 不锈钢的磨损量和磨损率同时减小, 且均小于 316L 不锈钢的磨损量和磨损率, 如图 6(c) 所示。结合图 7 中 A、B、C、D 点处的 EDS 结果分析可知, 由于持续的磨损不断积累热量, 在高温环境下磨损试样表面碳化物中的 C 原子以石墨微晶的形式析出, 磨损表面的石墨微晶在外加负载的作用下不断积累形成石墨膜, 减少了摩擦过程中金属间的接触, 提升了碳纤维增强 316L 不锈钢的耐磨性。当扫描速度达到 15 mm/s 时,  $M_{23}C_6$  的含量降低, 磨损产生的石墨膜也随着减少, 润滑的作用被弱化, 露出的  $\gamma$ -Fe 与对磨环之间不断摩擦, 磨损量随着升高, 耐磨性变差。因此, 采用扫描速度为 12 mm/s 制备的碳纤维增强 316L 不锈钢的磨损量和磨损率最小, 且耐磨性相对于未加入碳纤维的激光覆 316L 不锈钢提高了约 25.3%。

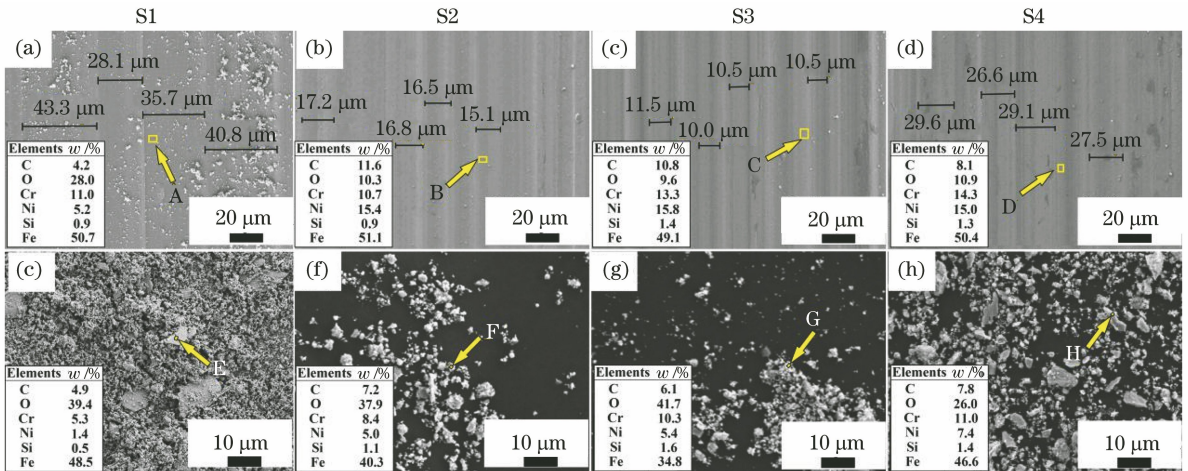


图 7 激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢磨损面及磨屑形貌。(a)~(d) 磨损面; (e)~(h) 磨屑  
Fig. 7 Worn surface and worn debris morphology of 316L stainless steel and carbon fibers reinforced 316L stainless steels prepared by laser cladding. (a)-(d) Worn surface; (e)-(h) worn debris

图 7(a)~(d) 为激光熔覆 316L 不锈钢与碳纤维增强 316L 不锈钢的磨损表面形貌图 ( $w$  表示质量分数)。从图中可以看出, 磨损后试样表面有很多宽度不等且平行于磨损方向的犁沟。这是因为在干滑动摩擦过程中, 持续外加的法向负载, 使试样的表

面发生塑性变形, 局部硬质颗粒剥落, 造成磨损表面剥落后黏着的硬质颗粒不断积累。另外, 对磨环的硬度很高, 磨损面与对磨环相比较软, 磨损掉的硬质细小颗粒随后在对磨环与试样磨损面之间切削磨损面, 发生磨粒磨损。由于摩擦生热<sup>[19, 32]</sup>, 随着摩擦磨

损的进行,试样表面的热量开始不断积累,结合如图7(e)~(h)所示的磨屑形貌以及E、F、G、H点处的EDS分析可知,磨损过程中发生了氧化磨损。因此,316L不锈钢的主要磨损机制有黏着磨损、磨粒磨损和氧化磨损。由图7(a)~(d)中犁沟的宽度可以看出,未加入碳纤维试样(S1)磨损表面的犁沟比加入碳纤维试样(S2、S3、S4)的宽,这主要是因为碳纤维的加入促进了硬质相 $M_{23}C_6$ 和少量 $\alpha\text{-Fe}$ 的形成,在磨损过程中保护着周围的材料,阻止材料进一步被切削,起到了“阴影保护”的作用<sup>[33]</sup>。这表明,碳纤维的加入可以减小犁沟宽度,有利于磨损性能的提高。

图8为激光熔覆316L不锈钢与碳纤维增强316L不锈钢磨损表面的三维形貌,可见:试样S2的磨损深度为 $271\ \mu\text{m}$ ,比未加入碳纤维的试样S1的磨损深度( $310\ \mu\text{m}$ )小,这进一步表明碳纤维的加入可以减小磨损深度,从而提高耐磨性能。另外,图8(b)~(d)给出了采用不同扫描速度制备的碳纤维增强316L不锈钢磨损表面的三维轮廓,可以看出,随着扫描速度增大,磨损深度呈现先减小再增大的趋势,在 $12\ \text{mm/s}$ 扫描速度下制得的试样S3的磨损深度最小,为 $236.27\ \mu\text{m}$ ,说明其耐磨性最好,与图6给出的结果一致。

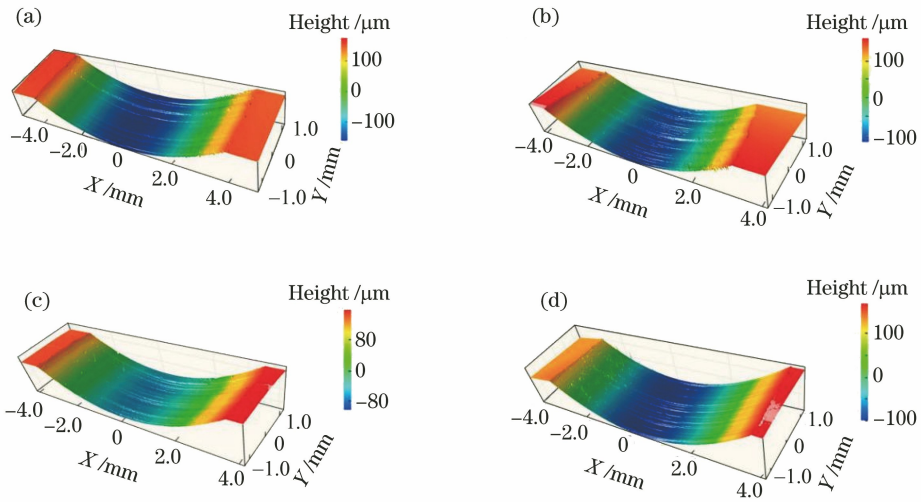


图8 激光熔覆316L不锈钢与碳纤维增强316L不锈钢磨损表面的三维轮廓图。(a) S1;(b) S2;(c) S3;(d) S4

Fig. 8 Three-dimensional maps of 316L stainless steel and carbon fibers reinforced 316L stainless steel prepared by laser cladding wear surface. (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

## 4 结 论

在激光熔覆过程中,316L不锈钢中的Cr、Fe、Ni等合金元素会与加入的碳纤维交互作用形成 $M_{23}C_6$ , $M_{23}C_6$ 均匀分布于 $\gamma\text{-Fe}$ 和 $\alpha\text{-Fe}$ 枝晶间,诱使少量 $\gamma\text{-Fe}$ 向 $\alpha\text{-Fe}$ 转化,起到了强化316L不锈钢的作用。

激光熔覆碳纤维增强316L不锈钢中加入的碳纤维细化了晶粒结构。随着扫描速度的增大,碳纤维增强316L不锈钢的枝晶臂间距从 $1.6\ \mu\text{m}$ 减小到 $1.26\ \mu\text{m}$ ,由于细晶强化的作用,碳纤维增强316L不锈钢的硬度也从 $(455.3\pm 22.8)\ \text{HV}0.2$ 增大到 $(539.3\pm 27.0)\ \text{HV}0.2$ 。

对于激光熔覆碳纤维增强316L不锈钢而言,碳纤维的加入促使磨损表面上少量的碳化物在磨损过程中转化为石墨膜。同时,碳纤维的加入促进了硬质相 $M_{23}C_6$ 和少量 $\alpha\text{-Fe}$ 的形成,在磨损过程中保

护周围的材料,阻止材料进一步被切削,起到了“阴影保护”的作用,提高了试样的耐磨性。随着扫描速度增大,碳纤维增强316L不锈钢的耐磨性先增大后降低。当扫描速度为 $12\ \text{mm/s}$ 时,碳纤维增强316L不锈钢的耐磨性相对于未加入碳纤维的激光熔覆316L不锈钢提高了约25.3%。

## 参 考 文 献

- [1] Lodhi M J K, Deen K M, Greenlee-Wacker M C, et al. Additively manufactured 316L stainless steel with improved corrosion resistance and biological response for biomedical applications [J]. Additive Manufacturing, 2019, 27: 8-19.
- [2] Zhao J L, Xu D K, Shahzad M B, et al. Effect of surface passivation on corrosion resistance and antibacterial properties of Cu-bearing 316L stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2016, 386: 371-380.
- [3] Bartolomeu F, Buciumeanu M, Pinto E, et al. 316L

- stainless steel mechanical and tribological behavior: a comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting [J]. Additive Manufacturing, 2017, 16: 81-89.
- [4] He B, Zhang L J, Zhu Q H, et al. Effect of solution treated 316L layer fabricated by laser cladding on wear and corrosive wear resistance [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121: 105788.
- [5] Yi W, Chen H, Wu Y, et al. Effect of *in situ* NbC on microstructure and wear properties of laser cladding Co-based coatings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302010.  
易伟, 陈辉, 吴影, 等. 原位 NbC 对激光熔覆 Co 基涂层组织和磨损性能的影响 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302010.
- [6] Song Y, Zhu W, Li S, et al. Micro-structure and properties of nitrogenous austenitic stainless steel by laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402004.  
宋勇, 朱伟, 李胜, 等. 激光熔覆含氮奥氏体不锈钢层组织与性能研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402004.
- [7] Newcomb B A. Processing, structure, and properties of carbon fibers [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 91: 262-282.
- [8] Shirvanimoghaddam K, Hamim S U, Karbalaee Akbari M, et al. Carbon fiber reinforced metal matrix composites: fabrication processes and properties [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 92: 70-96.
- [9] Khoddamzadeh A, Liu R, Liang M, et al. Wear resistant carbon fiber reinforced stellite alloy composites [J]. Materials & Design (1980—2015), 2014, 56: 487-494.
- [10] Liu L, Li W W, Tang Y P, et al. Friction and wear properties of short carbon fiber reinforced aluminum matrix composites [J]. Wear, 2009, 266(7/8): 733-738.
- [11] Tang Y P, Liu H Z, Zhao H J, et al. Friction and wear properties of copper matrix composites reinforced with short carbon fibers [J]. Materials & Design, 2008, 29(1): 257-261.
- [12] Lei J B, Shi C, Zhou S F, et al. Enhanced corrosion and wear resistance properties of carbon fiber reinforced Ni-based composite coating by laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 334: 274-285.
- [13] Xu J C, Zhao L, Deng X Y, et al. High temperature simulation of short carbon fiber-reinforced nickel base composite [J]. Materials & Design, 2006, 27(10): 1152-1156.
- [14] Gorunov A I. Investigation microstructure of carbon fibers reinforced composite on Fe and Ni-based obtained by laser metal deposition [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 364: 279-288.
- [15] Yu P C, Liu X B, Lu X L, et al. Study on tribology and high-temperature oxidation resistance of laser cladding composite coatings on Ti6Al4V alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1003004.  
余鹏程, 刘秀波, 陆小龙, 等. Ti6Al4V 合金激光熔覆复合涂层的摩擦学和高温抗氧化性能研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003004.
- [16] Zhang H, Zou Y, Zou Z D, et al. Effects of chromium addition on microstructure and properties of TiC-VC reinforced Fe-based laser cladding coatings [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 614: 107-112.
- [17] Gao W Y, Zhang Z Y, Zhao S S, et al. Effect of a small addition of Ti on the Fe-based coating by laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 291: 423-429.
- [18] Wu Q L, Li W G, Zhong N, et al. Microstructure and wear behavior of laser cladding VC-Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> ceramic coating on steel substrate [J]. Materials & Design, 2013, 49: 10-18.
- [19] Zhao S Z, Jin J B, Xie M, et al. Effects of scanning speed on microstructure and wear resistance of Cu<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> immiscible coatings prepared by laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302005.  
赵淑珍, 金剑波, 谢敏, 等. 扫描速率对激光熔覆 Cu<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 偏晶涂层组织与耐磨性能的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302005.
- [20] Zhang B C, Dembinski L, Coddet C. The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 584: 21-31.
- [21] Zhou S F, Dai X G, Zeng X Y. Effects of processing parameters on structure of Ni-based WC composite coatings during laser induction hybrid rapid cladding [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(20): 8494-8500.
- [22] Ge J B, Zhang A F, Li D C, et al. Process research on DZ125L superalloy parts by laser metal direct forming [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 0703004.  
葛江波, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形 DZ125L 高温合金零件工艺的研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0703004.
- [23] Zhou S F, Zeng X Y, Hu Q W, et al. Analysis of



- crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization [J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 1646-1653.
- [24] Wang D, Song C H, Yang Y Q, et al. Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts [J]. Materials & Design, 2016, 100: 291-299.
- [25] Zhou S F, Dai X Q, Zheng H Z. Microstructure and wear resistance of Fe-based WC coating by multi-track overlapping laser induction hybrid rapid cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44 (1): 190-197.
- [26] Li X, Zhang C H, Zhang S, et al. Design, preparation, microstructure and properties of novel wear-resistant stainless steel-base composites using laser melting deposition [J]. Vacuum, 2019, 165: 139-147.
- [27] Wu C L, Zhang S, Zhang C H, et al. Formation mechanism and phase evolution of *in situ* synthesizing TiC-reinforced 316L stainless steel matrix composites by laser melting deposition [J]. Materials Letters, 2018, 217: 304-307.
- [28] Zhou S F, Huang Y J, Zeng X Y, et al. Microstructure characteristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 480(1/2): 564-572.
- [29] Huang Y J, Zeng X Y, Hu Q W, et al. Microstructure and interface interaction in laser induction hybrid cladding of Ni-based coating [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(7): 3940-3945.
- [30] Wang S, Zhang S, Zhang C H, et al. Effect of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> content on 316L stainless steel fabricated by laser melting deposition [J]. Vacuum, 2018, 147: 92-98.
- [31] Jin J B, Zhao Y, Zhao S Z, et al. Effect of TiN content on microstructure and wear resistance of Ti-based composites produced by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46 (11): 1102013.  
金剑波, 赵宇, 赵淑珍, 等. TiN 含量对激光选区熔化成形钛基复合材料微结构与耐磨性能的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102013.
- [32] Chen J F, Li X P, Xue Y P. Friction and wear properties of laser cladding Fe901 alloy coating on 45 steel surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46 (5): 0502001.  
陈菊芳, 李小平, 薛亚平. 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502001.
- [33] Zhou S F, Wu C, Zhang T Y, et al. Carbon nanotube- and Fe<sub>p</sub>-reinforced copper-matrix composites by laser induction hybrid rapid cladding [J]. Scripta Materialia, 2014, 76: 25-28.