

激光与光电子学进展

激光功率和扫描速度对熔覆组织与性能的影响

林冉¹, 舒林森^{1,2*}, 董月¹, 张燊东¹

¹陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001;

²陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001

摘要 采用激光熔覆技术在 GCr15 钢基材上制备 FeCrNiSi 合金熔覆层, 通过超景深显微镜、显微硬度计及摩擦磨损试验机, 研究激光工艺参数对熔覆层显微组织、硬度及摩擦磨损性能变化的影响规律。结果表明: 随着激光功率增大, 熔覆层一次枝晶呈逐渐变大、变长的趋势, 一次枝晶间距先增大后减小, 二次枝晶间距逐渐减小; 随着扫描速度加快, 熔覆层一次枝晶呈先变大后减小的趋势, 一次枝晶间距先增大后减小, 二次枝晶间距先减小后增大。随着激光功率的降低或扫描速度的增加, 熔覆层表面硬度提高, 当激光功率为 2400 W、扫描速度为 7 mm/s 时, 熔覆层最高硬度为 781.5 HV, 是基材的 3.4 倍; 此时熔覆层磨损机制由磨粒磨损和黏着磨损逐渐演变为疲劳主导的磨损机制。

关键词 激光光学; 激光熔覆; FeCrNiSi 合金; 工艺参数; 显微组织; 显微硬度; 摩擦磨损

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1914004

Effect of Laser Power and Scanning Speed on Microstructure and Properties of Cladding

Lin Ran¹, Shu Linsen^{1,2*}, Dong Yue¹, Zhang Candong¹

¹School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;

²Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong, Shaanxi 723001, China

Abstract FeCrNiSi alloy cladding layer was prepared on GCr15 steel substrate using laser cladding technology. The effects of laser processing parameters on the microstructure, hardness and friction, and wear properties of the cladding layer were studied using the depth of field microscope, microhardness tester, and friction and wear tester. The primary dendrite size of the cladding layer was found to increase with an increase in laser power and scanning speed. However, the primary dendrite spacing first increases and then decreases with an increase in laser power, and the secondary dendrite spacing decreases gradually. The primary dendrite spacing first increases and then decreases with an increase in the scanning speed, whereas the secondary dendrite spacing first decreases and then increases. The surface hardness of the cladding layer increases with a decrease in laser power or an increase in the scanning speed. When the laser power and the scanning speed are 2400 W and 7 mm/s, respectively, the maximum hardness of the cladding layer is 781.5 HV, and the hardness value is 3.4 times that of the substrate. The wear mechanism of the cladding layer prepared using this process parameter evolves from abrasive and adhesive wear to fatigue-dominated wear mechanism.

Key words laser optics; laser cladding; FeCrNiSi alloy; process parameters; microstructure; microhardness; friction and wear

OCIS codes 140.3390; 160.3380; 140.3460; 160.3900

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2021-02-03; 录用日期: 2021-02-07

通信作者: *shulinsen19@163.com

1 引言

GCr15 轴承钢因其价格低、综合性能良好等特点,在高铁运输、风力发电、航空航天等领域应用广泛^[1-3]。但是零件在工作时承受着极大的压力和摩擦力,长期工作时表面磨损严重,导致零件损伤甚至失效。激光熔覆技术具有稀释率低、涂层热变形小、涂层与基体结合强度高优点,是修复 GCr15 轴承钢磨损表面的重要手段。

激光熔覆技术的不足之处是涂层容易产生气孔、裂纹,以及存在残余应力等^[4-6]。为了解决该技术问题,许多学者通过改变材料配比来提高熔覆层质量。周建忠等^[7]在 45 钢基材上制备 4 种不同质量比的 Al_2O_3 -Fe901 金属陶瓷复合涂层,发现 Al_2O_3 显著提高了材料显微硬度和耐磨性;邹黎明等^[8]研究 WC-Fe 金属陶瓷复合涂层的耐磨性能,发现粒径较小的 WC 能显著提高涂层耐磨性;Farahmand 等^[9]研究不同成分的 Ni-WC 复合粉末涂层性能,获得了熔覆层晶粒细化的最优粉末配比。工艺参数是影响激光熔覆质量的关键因素^[10-11]。杨权等^[12]研究了激光功率对熔覆层表面形貌及稀释率的影响,得出稀释率及熔覆层的宽度和高度均随激光功率的增加而增大的结论;Erfanmanesh 等^[13]利用激光熔覆技

术制备 WC-12Co 金属陶瓷复合涂层,建立了单道熔覆层几何特性与工艺参数关系的数学模型;童文辉等^[14]研究了激光工艺参数对 TiC-钴基合金熔覆层显微组织及性能的影响规律。上述研究对激光熔覆材料组分设计及工艺参数选取具有参考价值,但是关于轴承钢激光熔覆组织与性能方面的研究报道较少。

FeCrNiSi 合金粉末的自熔性良好,具有优良的耐磨性和坚韧性。本文通过在 GCr15 轴承钢基材上制备 FeCrNiSi 合金熔覆层,研究了激光功率和扫描速度对熔覆层组织与性能的影响,并揭示了熔覆层组织的演变规律,通过对熔覆层磨损表面形貌、损失质量及摩擦磨损机制进行分析,获得扫描速度对熔覆层摩擦磨损性能的影响规律。

2 实验方案

2.1 实验装置

光纤激光熔覆设备如图 1 所示:激光喷头通过支架与 ABB 机器人连接,激光束通过喷头内部的光学装置实现分光和聚焦,与送粉器连接的送粉软管将熔覆粉末输送到喷头内部通道,并从激光喷头射出,实现光、粉的同时输出,同时保护气体通过软管进入喷头内部通道输送到熔覆层表面,防止熔覆层氧化^[15]。

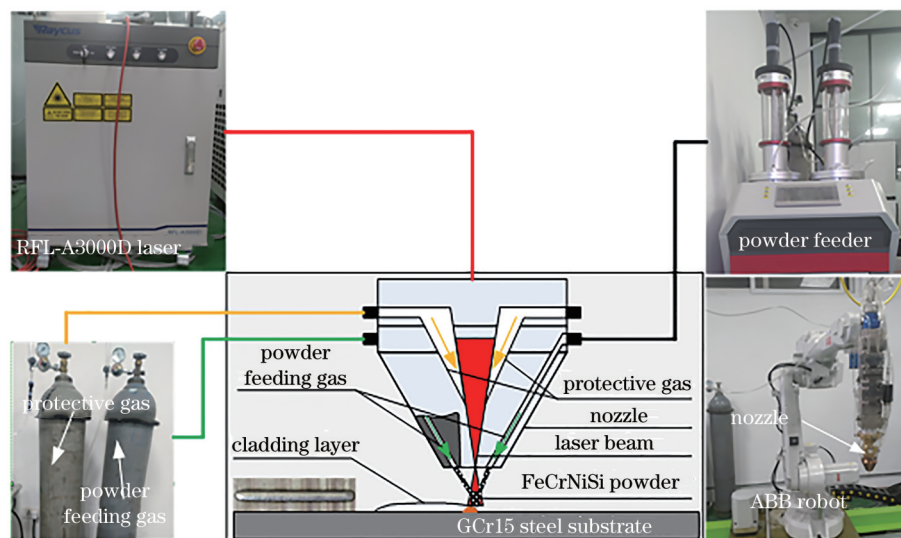


图 1 光纤激光熔覆设备

Fig. 1 Fiber laser cladding equipment diagram

2.2 实验材料

实验选用的基体材料为 GCr15 轴承钢,尺寸为 $240\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,经铣削加工表面粗糙度为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 。粉末为 FeCrNiSi 合金粉末,粉末的主要化学成分如下:C 的质量分数为 $0.6\% \sim 0.9\%$,Si

的质量分数为 $3\% \sim 4\%$,B 的质量分数为 $3\% \sim 4\%$,Cr 的质量分数为 $16\% \sim 18\%$,Ni 的质量分数为 $12\% \sim 14\%$,其余为 Fe。采用超景深显微镜获取粉末显微形貌,如图 2 所示,粉末颗粒直径为 $58 \sim 125\text{ }\mu\text{m}$,颗粒大小较为均匀,主要形状为球形和椭

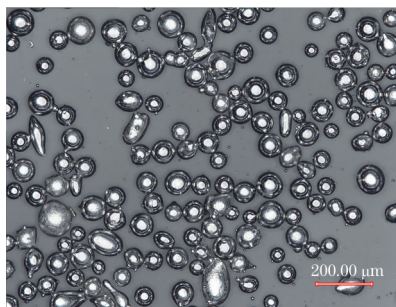


图2 FeCrNiSi粉末显微形貌
Fig. 2 Micrograph of FeCrNiSi powder

球形,且球形度较好,适合用于激光熔覆。

2.3 实验方法

本实验的主要工艺参数为激光功率和扫描速度。通过实验发现,能够获得良好熔覆层的工艺参数范围比较窄,因此本实验的激光熔覆工艺参数如表1所示。

表1 激光熔覆工艺参数

Table 1 Laser cladding process parameters

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	5	5	5	5	4	5	6	7
Laser power / W	2400	2500	2600	2700	2700	2700	2700	2700

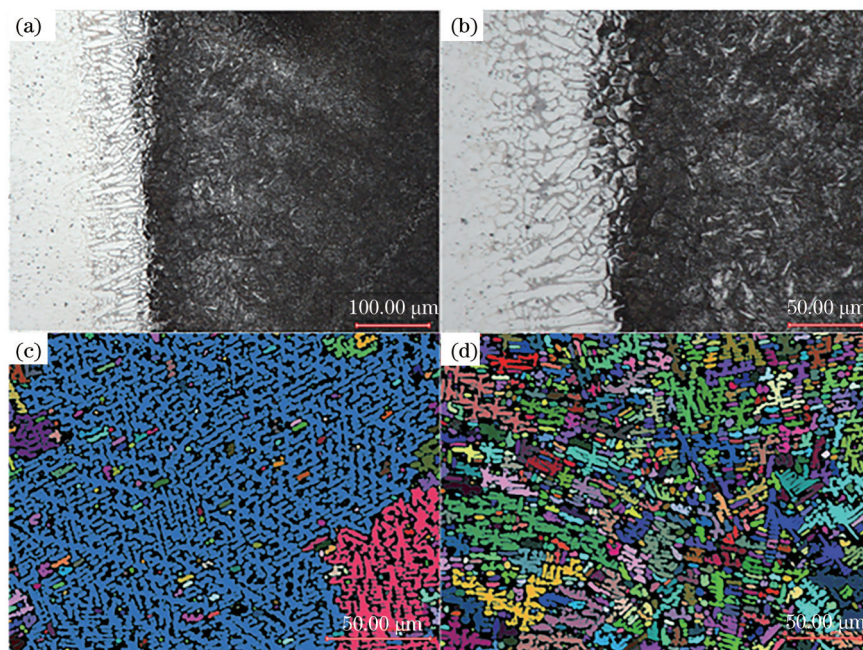


图3 GCr15钢表面熔覆FeCrNiSi合金熔覆层显微组织。(a)热影响区;(b)熔合过渡区;(c)熔覆层中部区域;(d)熔覆层表层区域

Fig. 3 Microstructures of FeCrNiSi alloy cladding layer on GCr15 steel. (a) Heat affected zone; (b) fusion transition zone; (c) the central area of the cladding layer; (d) the surface area of the cladding layer

3.2 激光功率对熔覆层显微组织的影响

图4所示为激光扫描速率为5 mm/s时,不同激

3 实验结果

3.1 FeCrNiSi合金激光熔覆层显微组织

当激光功率为2400 W、扫描速度为5 mm/s时,采用FeCrNiSi合金粉末在GCr15基材上制备熔覆层,利用超景深显微镜获取熔覆层截面组织形貌,如图3所示。GCr15基体在激光束的高密度能量作用下快速加热和冷却,在基材与熔覆层融合线下部[图3(a)右侧区域]形成热影响区,基体组织为隐针状马氏体,碳化物带中有颗粒碳化物夹杂在其中,白色区域为残留奥氏体。从图3(b)可以看出,熔覆层与基材结合紧密,冶金结合良好,熔覆层底部呈枝晶状生长。图3(c)所示为熔覆层中部区域,随着温度梯度的减小,树枝晶的生长方向性弱化,向等轴枝晶转变;图3(d)所示为熔覆层表层区域,随着冷却速度进一步加快,在此区域生成细树枝晶。

光功率条件下激光熔覆层近表层组织变化。可见,随着激光功率的增大,一次枝晶臂呈现逐渐变大、

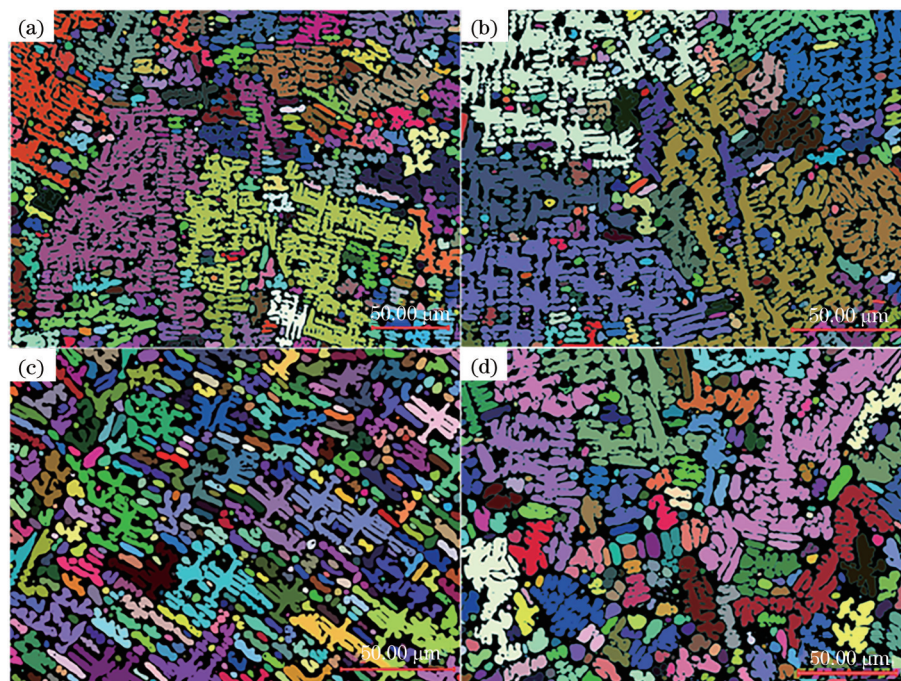


图 4 不同激光功率下熔覆层显微组织。(a) 2400 W; (b) 2500 W; (c) 2600 W; (d) 2700 W

Fig. 4 Microstructures of cladding layer of different laser powers. (a) 2400 W; (b) 2500 W; (c) 2600 W; (d) 2700 W

变长的趋势。图 4(a)、(d) 所示的枝晶呈交错生长，图 4(b)、(c) 所示的枝晶生长方向较为一致。通过对熔覆层枝晶间距进行测量，得到的熔覆层近表层枝晶间距如图 5 所示。随着激光功率的逐步增加，一次枝晶间距先增大后减小，二次枝晶间距逐渐减小，当激光功率分别为 2600 W 和 2400 W 时，一次枝晶间距和二次枝晶间距分别出现最大值。

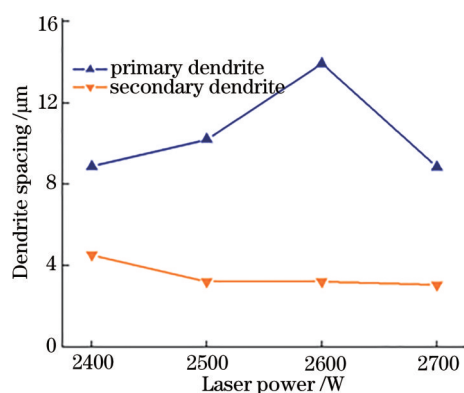


图 5 激光功率对熔覆层组织枝晶间距的影响

Fig. 5 Effect of laser power on dendrite spacing of laser cladding layer

3.3 扫描速度对熔覆层显微组织的影响

当激光功率为 2400 W 时，不同扫描速度条件下激光熔覆层近表层组织变化情况见图 6。可见，随着扫描速度的增大，一次枝晶臂呈先变大后减小

的趋势。图 6(a)、(d) 所示的枝晶呈交错生长，图 6(b)、(c) 所示的枝晶生长方向较为一致。通过对熔覆层枝晶间距进行测量，得到的熔覆层近表层枝晶间距如图 7 所示。随着扫描速度的逐步增加，一次枝晶间距先增大后减小，二次枝晶间距先减小后增大，当扫描速度分别为 5 mm/s 和 4 mm/s 时，一次枝晶间距和二次枝晶间距分别出现最大值。

3.4 显微硬度

图 8 所示为不同工艺参数下熔覆层显微硬度的变化。从图 8 可以看到，随着激光功率的降低或扫描速度的升高，熔覆层的硬度明显升高，在选取的参数范围内，当激光功率 $P=2400$ W 和扫描速度 $v=7$ mm/s 时熔覆层硬度达到最大值，为 781.5 HV，是基材硬度的 3.4 倍。通过对熔覆层显微组织的分析，发现：激光功率对熔覆层枝晶尺寸的影响较大，在实验参数范围内，较小的激光功率更有利于熔覆层枝晶细化，从而获得较高的显微硬度；扫描速度对枝晶尺寸的影响不大，但随着扫描速度的增加，二次枝晶间距明显减小，而二次枝晶的尺寸变化较小，二次枝晶的数量随着扫描速度的增加明显增多，从而提高了熔覆层的显微硬度。

3.5 摩擦磨损性能

采用销-盘干摩擦磨损方式，对不同扫描速度下的 Fe45 熔覆层摩擦磨损性能进行测试，图 9(a) 为摩

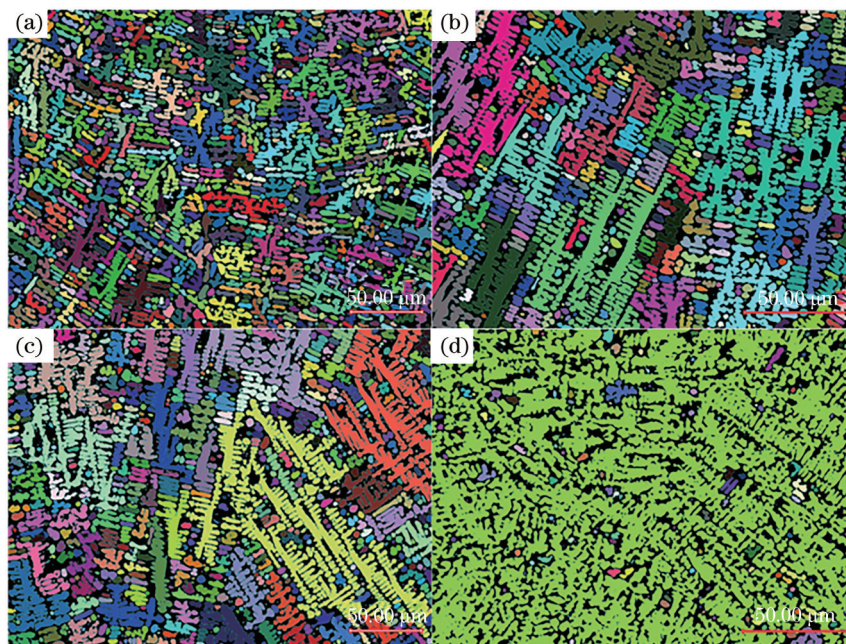


图 6 不同扫描速度下熔覆层组织。(a)4 mm/s;(b)5 mm/s;(c)6 mm/s;(d)7 mm/s

Fig. 6 Microstructures of cladding layer at different scanning speeds. (a) 4 mm/s; (b) 5 mm/s; (c) 6 mm/s; (d) 7 mm/s

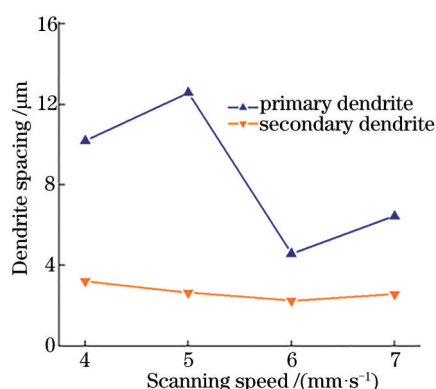


图 7 扫描速度对熔覆层组织枝晶间距的影响

Fig. 7 Effect of the scanning speed of laser on the dendrite spacing of cladding layer

摩擦磨损试验示意图。经计算机实时采集数据,得到

熔覆层的摩擦系数曲线如图 9(b)所示。当扫描速度为 7 mm/s 时,熔覆层的摩擦系数最高,平均摩擦系数为 0.528;当扫描速度分别为 5 mm/s 和 6 mm/s 时,平均摩擦磨损系数分别为 0.417 和 0.412。研究表明,随着扫描速度的增加,输入的热量减少,从而破坏了冶金结合,增加了涂层缺陷^[16]。同时,大量粗碳化物的存在破坏了熔覆层的塑韧性,从而导致熔覆层在周期性循环载荷下的抗疲劳性能下降。熔覆层的损失质量如图 9(c)所示,随着扫描速度的增加,损失质量迅速增加,当扫描速度为 5 mm/s 和 6 mm/s 时,损失质量分别为 5 mg 和 8 mg;当扫描速度增加到 7 mm/s 时,熔覆层的损失质量为 23 mg,进一步说明较大的扫描速度会加速熔覆层缺陷的产生,从而降低熔覆层的耐磨性。图 10 为磨损表面

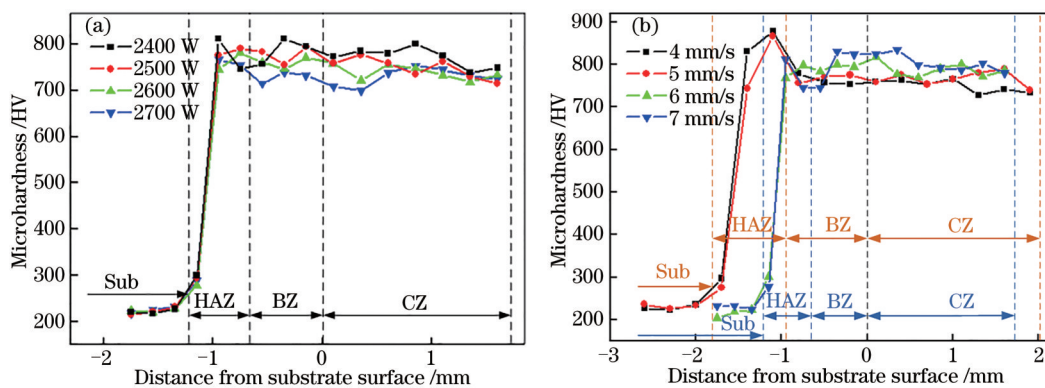


图 8 不同工艺参数对熔覆层硬度的影响。(a)激光功率;(b)扫描速度

Fig. 8 Effects of laser parameters on the microhardness. (a) Laser power; (b) scanning speed

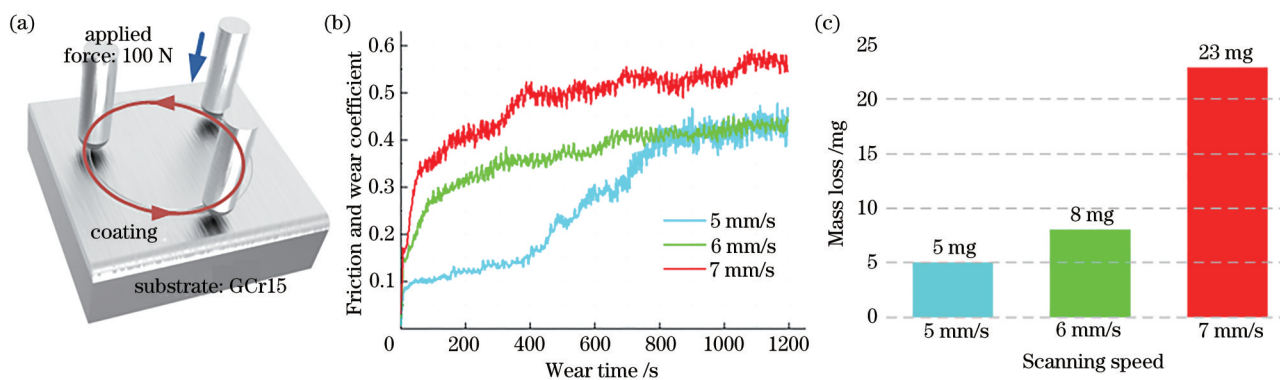


图 9 不同扫描速度下熔覆层的摩擦磨损性能。(a)摩擦磨损示意图;(b)不同扫描速度下熔覆层摩擦系数曲线;(c)损失质量
Fig. 9 Friction and wear properties of cladding layer at different scanning speeds. (a) Schematic of friction and wear; (b) friction coefficient curves of cladding layer at different scanning speeds; (c) the results of mass loss of debris



图 10 不同扫描速度下熔覆层磨损形貌。(a) $v=5\text{ mm/s}$; (b) $v=6\text{ mm/s}$; (c) $v=7\text{ mm/s}$

Fig. 10 Friction and wear properties of cladding layer at different scanning speeds. (a) $v=5\text{ mm/s}$; (b) $v=6\text{ mm/s}$; (c) $v=7\text{ mm/s}$

显微形貌图,当扫描速度为 5 mm/s 和 6 mm/s 时,熔覆层的主要磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损,在载荷和摩擦力的作用下,配磨副上的凸峰与残留在接触面上的磨屑被压入摩擦表面,对熔覆试样表面进行剪切、犁皱和切削,在摩擦表面留下犁沟,而熔覆层表面磨损较为光滑,表明熔覆层具有良好的耐磨性,当扫描速度达到 7 mm/s 时,熔覆层磨损表面开始出现剥落,在材料表面形成片状的破坏区,主要的磨损机制为疲劳磨损。

4 结 论

采用激光熔覆技术在 GCr15 钢基材上制备 FeCrNiSi 合金熔覆层,研究激光工艺参数对熔覆层显微组织、硬度及摩擦磨损性能变化的影响规律:1)熔覆层组织以树枝晶为主,随着温度梯度的变化,从基材与熔覆层融合线上部至熔覆层表层组织形态由树枝晶向等轴枝晶转变,再向树枝晶转变;在融合线下部的热影响区,组织为隐针状马氏体和残留奥氏体。2)随着激光功率的增加,熔覆层一次枝晶臂逐渐变大、变长,一次枝晶间距先增大

后减小,二次枝晶间距逐渐减小;随着扫描速度的升高,熔覆层一次枝晶臂呈先变大后减小的趋势,一次枝晶间距先增大后减小,二次枝晶间距先减小后增大。3)随着激光功率的降低和扫描速度的升高,熔覆层的显微硬度显著增加,当激光功率为 2400 W ,扫描速度为 7 mm/s 时,最高硬度为 781.5 HV ,是基材硬度的 3.4 倍。4)当扫描速度为 5 mm/s 和 6 mm/s 时,熔覆层损失的质量较少,主要磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损;当扫描速度为 7 mm/s 时,熔覆层损失的质量大幅增加,主要磨损机制为疲劳磨损。

参 考 文 献

[1] He T T, Shao R N, Liu J, et al. Sliding friction and wear properties of GCr15 steel under different loads [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(7): 105-110.
贺甜甜, 邵若男, 刘建, 等. 不同载荷下 GCr15 钢的滑动摩擦磨损性能[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(7): 105-110.

[2] Song G P, Sun D D, He X D, et al. Friction and

- wear behavior of Fe₂AlB₂ nanolaminates against GCr15 steel counterpart[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(12): 19912-19918.
- [3] Jiang D Q, Wang R, Zhang Q, et al. Effect of final electromagnetic stirring on solidification microstructure of GCr15 bearing steel in simulated continuous casting [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2020, 27(2): 141-147.
- [4] Li L X, Zhang D Q, Li J H, et al. Residual stress analysis and shape optimization of laser clad Ni-based alloy coatings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 171405.
李伦翔, 张德强, 李金华, 等. 激光熔覆镍基合金形貌优化及残余应力分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 171405.
- [5] Xu P, Shang X J, Zhu Y Z, et al. Stress release of Fe₁₇Mn₅Si₁₀Cr₅Ni shape memory alloy coating fabricated by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0202006.
徐鹏, 尚晓娟, 朱益志, 等. 激光熔覆 Fe₁₇Mn₅Si₁₀Cr₅Ni 记忆合金涂层的应力释放研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0202006.
- [6] Liu H F, Tan C K I, Wei Y F, et al. Laser-cladding and interface evolutions of Inconel 625 alloy on low alloy steel substrate upon heat and chemical treatments [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 404: 126607.
- [7] Zhou J Z, He W Y, Xu J L, et al. Strengthening mechanism and wear resistance of Al₂O₃/Fe901 composite coating prepared by laser cladding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0514001.
周建忠, 何文渊, 徐家乐, 等. 激光熔覆 Al₂O₃/Fe901 复合涂层的强化机制及耐磨性[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0514001.
- [8] Zou L M, Liu X, Wang L, et al. Effects of cast tungsten carbide powder on wear resistance of laser cladding ceramic particle reinforced iron matrix composite[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(4): 1126-1131.
邹黎明, 刘辛, 王蕾, 等. 铸造碳化钨粉末物性对激光熔覆陶瓷颗粒增强 Fe 基复合材料耐磨性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(4): 1126-1131.
- [9] Farahmand P, Kovacevic R. Corrosion and wear behavior of laser clad Ni-WC coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 276: 121-135.
- [10] Wang Z Y, Lin J, Lei Y P, et al. Microstructure and properties of Stellite6 coating prepared by laser cladding[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(10): 1172-1177.
王招阳, 林健, 雷永平, 等. 激光熔覆制备 Stellite6 涂层的组织与性能[J]. *激光与红外*, 2020, 50(10): 1172-1177.
- [11] Zhou D, Shen Y, Xiong D H, et al. Effects of scanning speed and Ni content on the characteristics of high-speed laser-clad coating[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(4): 579-586.
周丹, 沈义, 熊大辉, 等. 扫描速度和 Ni 含量对高速激光熔覆层特性的影响[J]. *应用激光*, 2020, 40(4): 579-586.
- [12] Yang Q, Zhang P, He Z T, et al. Influence of laser power on morphology and structure of cladding gas turbine impeller and blade coating[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(1): 13-21.
杨权, 章鹏, 何宗泰, 等. 激光功率对熔覆燃气轮机叶轮、叶片涂层的形貌组织影响[J]. *应用激光*, 2020, 40(1): 13-21.
- [13] Erfanmanesh M, Abdollah-Pour H, Mohammadian-Semnani H, et al. An empirical-statistical model for laser cladding of WC-¹²Co powder on AISI 321 stainless steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 97: 180-186.
- [14] Tong W H, Zhang X Y, Li W X, et al. Effect of laser process parameters on the microstructure and properties of TiC reinforced Co-based alloy laser cladding layer[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(9): 1265-1274.
童文辉, 张新元, 李为轩, 等. 激光工艺参数对 TiC 增强钴基合金激光熔覆层组织及性能的影响[J]. *金属学报*, 2020, 56(9): 1265-1274.
- [15] Li X B, Li T, Shi B W, et al. The influence of substrate tilt angle on the morphology of laser cladding layer[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 391: 125706.
- [16] Jiao X Y, Wang J, Wang C M, et al. Effect of laser scanning speed on microstructure and wear properties of T15M cladding coating fabricated by laser cladding technology[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 110: 163-171.