

磁场辅助激光熔覆 316L 不锈钢涂层的微结构及性能

王新军, 闫迎亮*

北京航天动力研究所, 北京 100076

摘要 对比三种磁场强度下激光表面熔覆 316L 不锈钢涂层的显微组织与性能, 分别采用三维激光扫描共聚焦显微镜、金相显微镜及扫描电子显微镜拍摄三种熔覆层的表面形貌、金相组织及摩擦磨损形貌。结果表明, 磁场的引入可以降低熔覆层的表面粗糙度, 优化表面形貌。当磁场强度达到 400 mT 时, 熔覆层晶粒得到显著细化, 同时气孔和裂纹减少, 平均显微硬度达到 573 HV, 提高幅度达 25%, 表面耐磨性能也因此得到显著提高。

关键词 激光光学; 激光熔覆; 稳态磁场; 316L 不锈钢; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG17 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.231401

Microstructure and Properties of Laser Cladding 316L Stainless Steel Coating Assisted by Magnetic Field

Wang Xinjun, Yan Yingliang*

Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China

Abstract The microstructure and properties of laser cladding 316L stainless steel coating under three magnetic field intensities are compared. The surface morphologies, metallographic structures, and friction and wear morphologies of the three cladding layers are characterized via three-dimensional laser scanning confocal microscopy, metallurgical microscopy, and scanning electron microscopy, respectively. Results show that the application of magnetic field can reduce the surface roughness of the cladding layer and optimize the surface morphology. The grains in the cladding layer are considerably refined when the magnetic field intensity becomes 400 mT. In addition, the number of pores and cracks decreases. The average microhardness increases by 25% to become 573 HV, and the wear resistance is considerably improved.

Key words laser optics; laser cladding; steady magnetic field; 316L stainless steel; microstructure; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 160.3380; 310.3840

1 引言

与传统的表面强化技术相比, 激光熔覆具有冷却速率高、与基体冶金结合良好、组织致密、力学性能优异等特点, 无需锻坯制备和锻造模具制造, 可以实现失效零部件的局部和大面积修复, 能够得到性能更加优异的表面, 被广泛应用于航空航天、汽车模具、电子电器等领域^[1-3]。但是由于工作环境恶劣, 熔覆层往往受交变、冲击、振动等动载荷影响, 其耐疲劳、耐磨损等性能变差^[4-5]。已有研究表明, 采用机械强化、热处理、激光重熔或激光冲击等强化工艺进行后处理, 虽然可以进一步提升熔覆层的力学性

能, 但是较高的残余拉应力和塑性应变会进一步造成缺陷, 而且熔覆层厚度、组织等也会受到影响^[6-7]。

磁场辅助激光加工技术利用磁场调控激光与材料的相互作用过程, 可以使加工构件获得更加优异的性能, 目前已广泛地应用在激光焊接和激光打孔等工艺^[8-9]中。同时在激光熔覆方面, 林英华等^[10]利用磁场辅助激光熔覆来抑制 Ni60 合金熔覆层表面开裂; 石岩等^[11]发现随着磁场转速的增大, Fe106+5%(质量分数为 5%)Ni/WC 熔覆层的显微硬度逐渐增大, 其耐磨性比无磁场沉积层的提高了 1.33 倍; 刘洪喜等^[12]采用旋转磁场辅助激光熔覆技术, 在 Q235 钢表面制备了 Fe60 复合涂层, 发

收稿日期: 2020-03-16; 修回日期: 2020-03-29; 录用日期: 2020-04-03

* E-mail: yangyingliang78@126.com

现涂层晶粒细化且分布均匀致密,同时耐磨性得到了明显改善;Velde等^[13]对稳态磁场作用下的熔池流体和传质进行数值分析,发现随着稳态磁场强度的增加,Marangoni对流中的主漩涡和次生漩涡被抑制,合金化元素的溶质都集中在近表浅层;Dennis等^[14]研究了熔池凝固过程中晶粒的生长和外加磁场之间的关系,发现在稳态磁场强度大于1 T时,熔池的流速明显减缓,晶粒生长形式发生了变化;Zhang等^[15]利用电磁复合场减小了熔覆层的孔隙率和孔径,使孔隙率降低64.71%;Li等^[16]发现磁场环境下成形的熔覆层含有大量相同取向的枝晶和细小等轴晶颗粒,它们具有较高的耐磨性和抗腐蚀性。

虽然磁场辅助激光熔覆工艺研究较为广泛,但关于磁场辅助激光熔覆316L不锈钢涂层的组织和力学性能的研究较少。为了进一步强化316L不锈钢熔覆层的组织和力学性能,本文采用激光熔覆工艺,在316L基板上应用三种磁场参数成形316L不锈钢涂层,通过实验对比,研究熔覆层的表面形貌、组织、物相、硬度、耐磨性的变化规律。研究结果可为进一步优化高端激光熔覆产业提供参考,具有更广阔的应用前景。

表1 316L不锈钢基板的性能参数

Table 1 Performance parameters of 316L stainless steel substrate

Parameter	Hardness/ HV	Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Tensile strength/ MPa	Yield strength/ MPa	Elongation/ %	Thermal expansion coefficient/($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$)	Elastic modulus/ GPa
Value	≤ 210	7.98	≥ 480	≥ 177	30	16	200

2.2 实验方法

采用三维激光扫描共聚焦显微镜(VK-X100, Japan Keyence)对表面形貌进行测量,随后用电火花线切割机将成形件切割为所需的标准金相试样,经打磨、抛光后用硝基盐酸腐蚀,用金相显微镜(Axiovert200MAT)进行显微组织分析。采用显微硬度计(MHV2000)进行硬度测试,载荷为2.94 N,加载时间为10 s,每个位置测量5次,取平均值。采用X射线衍射仪(XRD, D/Max-2500PC)对重熔层进行物相结构分析,扫描速度为 $0.03 (^\circ)/\text{s}$,扫描角度为 $20^\circ \sim 100^\circ$ 。采用摩擦磨损试验机(CETR-UMT-2),通过球盘往复磨损方式进行耐磨性测试,法向载荷为20 N,往复滑移距离为15 mm,频率为2 Hz,磨损时间为60 min。采用扫描电子显微镜(SEM, S4800)对磨损表面进行观察。最后,采用电化学工作站(CS300)进行耐腐蚀实验,溶液是质量分数为3.5%的NaCl溶液,温

2 实验材料与方法

2.1 实验材料及参数

采用丙酮将实验基板洗净,随后烘干基板,得到的冷轧退火态316L不锈钢的尺寸为 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,成分Cr、Ni、Mo、Si、Mn质量分数分别为17.0%、12.0%、2.5%、小于等于1.0%、小于等于2.0%,Fe余量,与基板有关的性能参数如表1所示。实验前将基板预热,采用烘干处理的316L不锈钢粉末(颗粒尺寸为 $53 \sim 120 \mu\text{m}$,化学成分同基板),在氩气保护箱中(氧含量小于等于 100×10^{-6})采用激光器功率为3 kW横流 CO_2 激光熔覆系统,光斑直径为3 mm,扫描速率为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,熔覆长度为 $20 \sim 22 \text{ mm}$,熔覆高度为 $3 \sim 4 \text{ mm}$,宽度为 $5 \sim 6 \text{ mm}$,搭接率为45%。同时以NdFeB合金(尺寸为 $50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,安装在基板正下方,确保磁感线垂直穿过加工区域)为磁场源,分别在磁场强度 $B = 0, 200, 400 \text{ mT}$ 的稳态外场环境中,采用同轴送粉方式进行多道多层熔覆,送粉速率为 $6.5 \text{ g}/\text{min}$,成形示意图如图1(a)所示。

表1 316L不锈钢基板的性能参数

Table 1 Performance parameters of 316L stainless steel substrate

Parameter	Hardness/ HV	Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Tensile strength/ MPa	Yield strength/ MPa	Elongation/ %	Thermal expansion coefficient/($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$)	Elastic modulus/ GPa
Value	≤ 210	7.98	≥ 480	≥ 177	30	16	200

度为 $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

3 分析与讨论

图1(b)~(d)为三种磁场强度下的熔覆层表面形貌和粗糙度测量结果,其宏观表面结果如图1(e)~(g)所示。当磁场强度 $B = 0 \text{ mT}$ 时,熔覆层表面最粗糙,高度差约为 $210.6 \mu\text{m}$,平均表面粗糙度约 $\text{Ra } 28.37 \mu\text{m}$ (Ra为轮廓算术平均偏差),如图1(b)所示。当 $B = 200 \text{ mT}$ 时,熔覆层表面大部分凸起结构被去除,表面高度差降低至 $180.3 \mu\text{m}$,平均表面粗糙度降低至 $\text{Ra } 21.12 \mu\text{m}$,如图1(c)所示。当磁场强度增加到 400 mT 时,熔覆层表面形貌更加平整,高度差为 $140.2 \mu\text{m}$,平均表面粗糙度降低至 $\text{Ra } 15.10 \mu\text{m}$,如图1(d)所示。这是由于磁场对熔融液体流速的缓冲作用,熔池表层法向的流速减小,熔覆层表面的波纹凸起高度也相应减小,同时稳态磁场所提供的阻力大小与磁场强

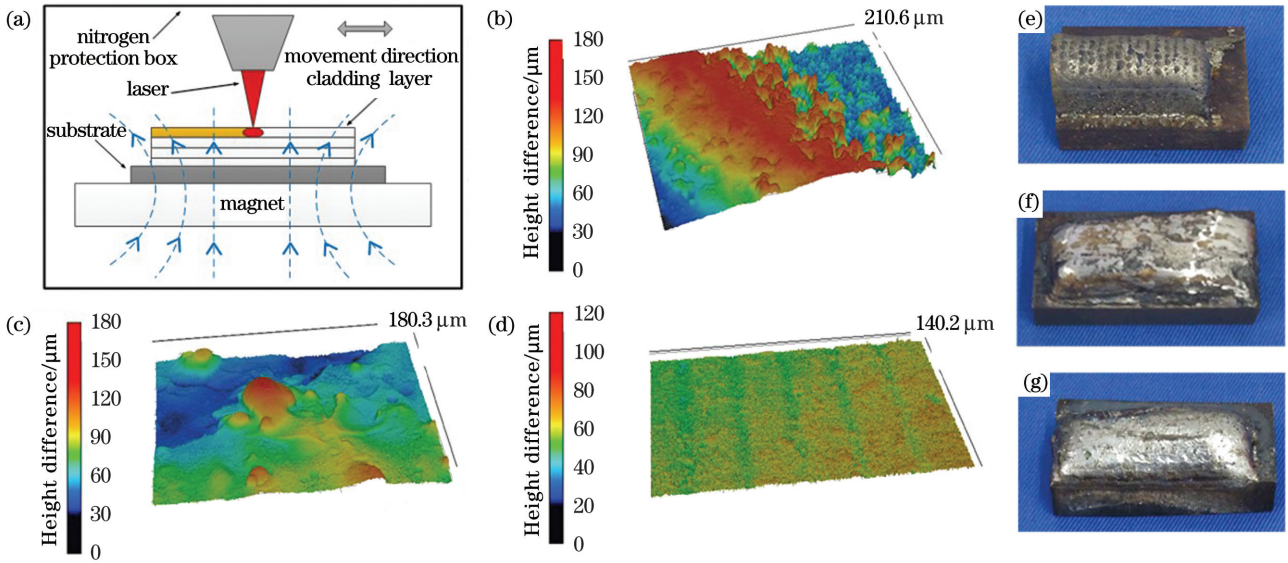


图 1 成形原理图和表面形貌对比。(a) 成形原理示意图；(b)~(d) $B=0, 200, 400$ mT 时对应的共聚焦表面形貌；(e)~(g) $B=0, 200, 400$ mT 时对应的宏观表面形貌

Fig. 1 Schematic of forming principle and comparison of surface morphology. (a) Schematic of forming principle; (b)~(d) confocal surface morphologies corresponding to $B=0, 200, 400$ mT, respectively; (e)~(g) macroscopic surface morphologies corresponding to $B=0, 200, 400$ mT, respectively

度的平方成正比,增大了流动性和铺展性,随着磁场强度的增加,表面粗糙度降低^[13,17]。

三种熔覆层的截面组织如图 2 所示。对于面心立方的奥氏体,枝晶择优生长方向是 $\langle 100 \rangle$ ^[2],由于激光熔覆的快熔、快冷过程,当 $B=0$ mT 时,熔覆层从顶部到底部可以分为等轴晶区、柱状枝晶区、平面晶区,如图 2(a)~(c) 所示。不同区域的组织形成主要取决于温度梯度与凝固速率之比(G/R)^[5],同时气孔含量相对较多。当 $B=200$ mT 时,如图 2(d)~(f) 所示,熔覆层顶部杂乱排布的等轴晶开始逐渐细化,组织结构越来越致密,中部柱状枝晶区开始出现越来越多的晶粒细化区,更多微小的初生枝晶从主柱状枝晶区上剥离下来形成底部的平面晶区,同时气孔数量开始减少。当 $B=400$ mT 时,如图 2(g)~(i) 所示,可以看出:随着磁场强度的增大,熔覆层组织更加致密,无气孔和裂纹,实现了明显的晶粒细化和气孔消除;顶部等轴晶区平均晶粒尺寸从 $18.39 \mu\text{m}$ ($B=0$ mT) 减小到 $6.53 \mu\text{m}$;中部柱状枝晶区出现部分细小的等轴晶,且出现明显的分层结构;底部平面晶区的组织沿熔池底部到顶部出现多层连续生长现象,平均晶粒尺寸从 $23.12 \mu\text{m}$ ($B=0$ mT) 减小到 $9.11 \mu\text{m}$ 。这是由于随着磁场强度的增大,熔覆层温度场的分布出现变化,通过影响熔池的传质、传热和流动,热量向四周扩散得更均匀,这在一定程度上加强了熔池内部的物质交换,促进熔覆层均匀冷却与凝

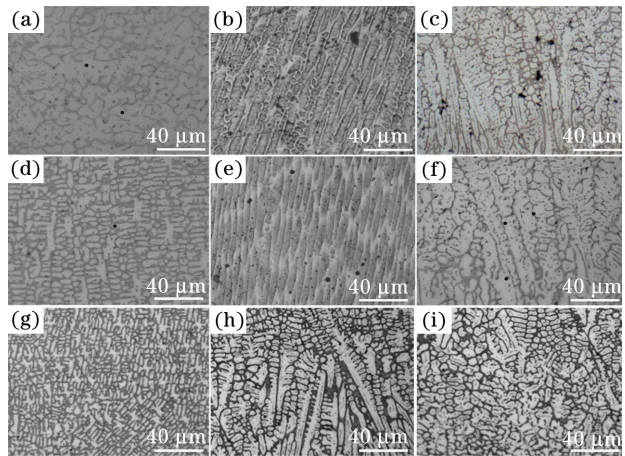


图 2 三种磁场强度下的显微组织对比。(a)~(c) $B=0$ mT 时熔覆层的顶部、中部、底部；(d)~(f) $B=200$ mT 时熔覆层的顶部、中部、底部；(g)~(i) $B=400$ mT 时熔覆层的顶部、中部、底部

Fig. 2 Comparison of microstructure under three magnetic fields. (a)~(c) Top, middle, and bottom of cladding layer when $B=0$ mT; (d)~(f) top, middle, and bottom of cladding layer when $B=200$ mT; (g)~(i) top, middle, and bottom of cladding layer when $B=400$ mT

固,提高了熔池表面液态金属向下的填充速率,从而有效抑制了气孔和裂纹的生成^[10,14]。根据 Kou^[18] 的晶粒形核理论与磁控熔池 Hartmann 效应^[19],磁场的增大导致熔池近表面液相对流强度增强,液态金属对

结晶前沿的冲刷作用增强,柱状枝晶晶胞受到的机械破坏程度增强,进而导致等轴晶晶核数量增多。因此,磁场加快了熔池的流动和熔池中的对流,熔覆表层粗大的柱状枝晶被折断,更多致密的晶体结构在各个方向上的生长速度较均匀,这使等轴晶区域扩大,晶粒细化明显,等轴晶所占比例提高。

熔覆层的物相分析如图 3(a)所示,其中, 2θ 为扫描角度,与 $B = 0$ mT 的 XRD 图谱对比可以看出,当处于 $B = 200$ mT 和 $B = 400$ mT 的磁场环境时,试件并没有对熔覆层物相产生影响, γ 奥氏体的晶面指数均为(111)、(200)、(220)、(311)和(222),这与图 2 的观察结果吻合,与文献[17]中的研究结

果一致。对熔覆层的截面显微硬度进行分析,结果如图 3(b)所示,可以看出,从基板到热影响区(HAZ)再到熔覆层的硬度分布曲线呈逐渐增大趋势,这是激光熔覆高冷却速率、高温梯度及快速凝固形成平面晶区、柱状枝晶区、表面等轴晶区的结果^[4, 20]。同时,随着磁场强度的增大,熔覆层硬度明显增大,当 $B = 400$ mT 时,平均显微硬度达 573 HV,提高幅度为 25%左右。这一方面与熔覆层的晶粒细化有关,细化的晶粒可增加晶界对位错的阻碍,从而提高熔覆层局部抗变形的能力,提高显微硬度;另一方面,由于磁场的引入,熔覆层内部的气孔数与裂纹数减少,进一步增大了显微硬度^[21]。

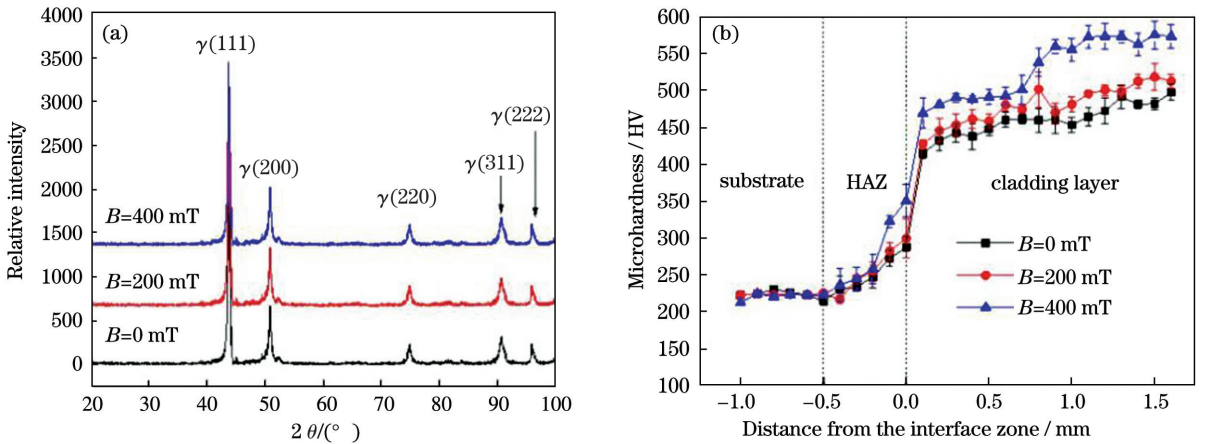


图 3 XRD 与显微硬度。(a)熔覆层 XRD 图谱;(b)显微硬度分布曲线

Fig. 3 XRD and microhardness. (a) XRD pattern of cladding layer; (b) microhardness distribution curve

为了进一步研究熔覆层的表面性能,对其进行

摩擦磨损实验,结果如图 4 所示。

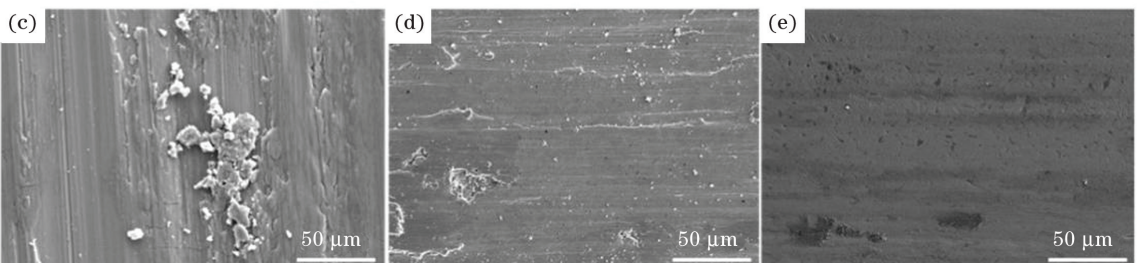
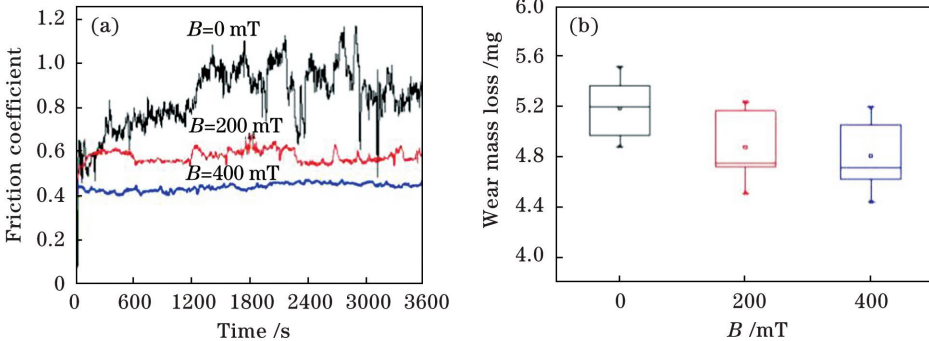


图 4 摩擦磨损实验。(a) 摩擦系数;(b) 质量损失;(c)~(e) $B = 0, 200, 400$ mT 时的磨损形貌

Fig. 4 Friction and wear experiment. (a) Friction coefficient; (b) mass loss;

(c)~(e) wear morphology under $B = 0, 200, 400$ mT, respectively

从图4可以看出,当 $B=400\text{ mT}$ 时,熔覆层的耐磨性最好,平均摩擦系数达0.48,比 $B=0\text{ mT}$ 时降低48%。随着磁场强度的增加,熔覆层的磨损损失质量出现不同程度的降低,且磨损损失质量从 $B=0\text{ mT}$ 时的5.36 mg降低到 $B=400\text{ mT}$ 时的4.62 mg。磨损后的表面形貌如图4(c)~(e)所示,当 $B=0\text{ mT}$ 时,熔覆层磨损表面凹凸不平,出现大量的犁沟和层状剥离带,并带有大量的磨损颗粒,磨痕边缘出现塑性变形引起的较高隆起,熔覆层表面发生严重的材料转移和少量犁沟现象。添加磁场后,晶粒细化,且表面硬度提高,熔覆层磨损表面划痕之间的距离减小,磨痕的深度变浅,磨粒的数量下降。当磁场强度为400 mT时,熔覆层的小部分材料从表面发生了脱落,磨损表面发生了微小的塑形变形,磨痕深度进一步变浅,磨粒数量进一步减少,表明抵抗磨损的能力得到进一步加强。

对三种熔覆层进行耐腐蚀性测试,结果如图5所示,其中, I 为电流。此外腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(I_{corr})列于表2。从动电位极化曲线可以看出,添加磁场后,熔覆层的耐腐蚀性与未添加磁场的熔覆层相比明显提高,当 $B=400\text{ mT}$ 时腐蚀电位达 -0.51 V ,腐蚀电流密度达 $3.31 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2$,这与添加磁场后熔覆层的显微组织细化可以提高其耐腐蚀性,同时气孔与裂纹等缺陷减少有关^[22]。

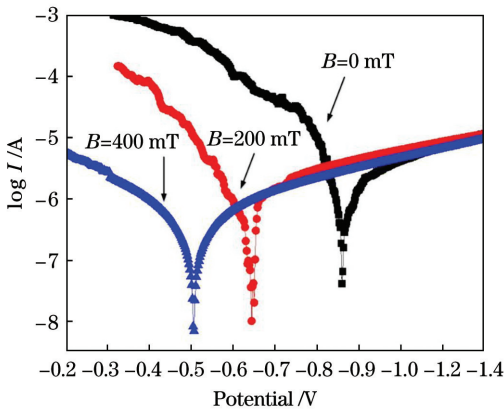


图5 动电位极化曲线

Fig. 5 Potentiodynamic polarization curve

表2 三种熔覆层电化学腐蚀参数

Table 2 Electrochemical corrosion parameters of three cladding layers

Parameter	$B=0\text{ mT}$	$B=200\text{ mT}$	$B=400\text{ mT}$
$I_{\text{corr}} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	4.57×10^{-7}	3.77×10^{-7}	3.31×10^{-7}
$E_{\text{corr}} / \text{V}$	-0.86	-0.64	-0.51

4 结 论

在三种磁场强度下进行激光表面熔覆316L不锈钢涂层,当 $B=400\text{ mT}$ 时,表面粗糙度由 $B=0\text{ mT}$ 时的 $\text{Ra } 28.37\text{ }\mu\text{m}$ 降低到 $\text{Ra } 15.10\text{ }\mu\text{m}$ 。通过实验对比,研究了熔覆层的组织及力学性能影响。随着磁场强度的增大,等轴晶区平均晶粒尺寸从 $18.39\text{ }\mu\text{m}$ ($B=0\text{ mT}$)减小到 $6.53\text{ }\mu\text{m}$,但熔覆层物相未受影响,同时平均显微硬度达到573 HV,提高幅度达25%左右,且耐磨性显著增强,磨损损失质量从5.36 mg降低到4.62 mg,摩擦系数降低了48%。

参 考 文 献

- [1] Cai Y C, Luo Z, Feng M N, et al. The effect of TiC/ Al_2O_3 composite ceramic reinforcement on tribological behavior of laser cladding Ni60 alloys coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 291: 222-229.
- [2] Li Y H, Gao S Y. Surface enhanced 316L/SiC nanocomposite coatings via laser cladding and following cold-swaging process [J]. Applied Physics A, 2017, 123(10): 660.
- [3] Li H C, Wang D G, Chen C Z, et al. Phase composition, microstructure and *in vitro* bioactivity of laser cladding CaO-ZrO₂-SiO₂ system coatings on titanium alloy [J]. Materials Letters, 2015, 157: 139-142.
- [4] Chew Y, Pang J H L, Bi G J, et al. Effects of laser cladding on fatigue performance of AISI 4340 steel in the as-clad and machine treated conditions [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 246-257.
- [5] Duan X X, Gao S Y, Dong Q, et al. Reinforcement mechanism and wear resistance of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe-Cr-Mo}$ steel composite coating produced by laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 291: 230-238.
- [6] Zhou S F, Xu Y B, Liao B Q, et al. Effect of laser remelting on microstructure and properties of WC reinforced Fe-based amorphous composite coatings by laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 8-16.
- [7] Liu J L, Yu H J, Chen C Z, et al. Research and development status of laser cladding on magnesium alloys: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 93: 195-210.

- [8] Tse H C, Man H C, Yue T M. Effect of electric and magnetic fields on plasma control during CO₂ laser welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 32(1): 55-63.
- [9] Lu Y, Sun G F, Wen D P, et al. Effects of applying electric and magnetic fields on laser drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9/10/11/12): 2293-2300.
- [10] Lin Y H, Yao J H, Yuan Y, et al. Influence of electric-magnetic compound field on crack and microstructure of Ni60 alloy laser cladding coating [J]. Electromachining & Mould, 2018(1): 37-40.
林英华, 姚建华, 袁莹, 等. 电磁复合场对 Ni60 激光熔覆层表面裂纹与组织结构的影响[J]. 电加工与模具, 2018(1): 37-40.
- [11] Shi Y, Chen K M, Liu J, et al. Microstructure and properties of composite coatings by magnetic field assisted laser deposition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1102009.
石岩, 陈奎明, 刘佳, 等. 磁场辅助激光沉积复合涂层的微观组织与性能 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102009.
- [12] Liu H X, Ji S W, Jiang Y H, et al. Microstructure and property of Fe60 composite coatings by rotating magnetic field auxiliary laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0103007.
刘洪喜, 纪升伟, 蒋业华, 等. 旋转磁场辅助激光熔覆 Fe60 复合涂层的显微组织与性能 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103007.
- [13] Velde O, Gritzki R, Grundmann R. Numerical investigations of Lorentz force influenced Marangoni convection relevant to aluminum surface alloying [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(14): 2751-2762.
- [14] Dennis B H, Dulikravich G S. Magnetic field suppression of melt flow in crystal growth [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(3): 269-277.
- [15] Zhang N, Liu W W, Deng D W, et al. Effect of electric-magnetic compound field on the pore distribution in laser cladding process [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 247-254.
- [16] Li Y, Cui X F, Jin G, et al. Influence of magnetic field on microstructure and properties of TiC/cobalt-based composite plasma cladding coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 325: 555-564.
- [17] Wang L, Hu Y, Song S Y, et al. Suppression effect of a steady magnetic field on surface undulation during laser remelting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1103005.
王梁, 胡勇, 宋诗英, 等. 稳态磁场辅助对激光熔凝层表面波纹的抑制作用研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1103005.
- [18] Kou S. Welding metallurgy [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1987.
- [19] Kern M, Berger P, Hugel H. Magneto-fluid dynamic control of seam quality in CO₂ laser beam welding [J]. Welding Journal, 2000, 79(3): 72-78.
- [20] Zhu H M, Hu W F, Li Y Z, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of laser-cladded Martensitic stainless steel layer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202001.
朱红梅, 胡文锋, 李勇作, 等. 回火温度对马氏体不锈钢激光熔覆层组织和性能的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202001.
- [21] 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.
- [22] Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. Thermal corrosion resistance of Co-based alloy coatings by laser cladding assisted by electromagnetic stirring [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0114002.
徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 电磁搅拌辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗热腐蚀性能 [J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0114002.