

农业拖拉机主轴激光熔覆再制造修复研究

王家胜, 舒林森^{1,2*}

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 为了实现拖拉机主轴的激光熔覆再制造修复,采用激光熔覆技术在主轴材料 40Cr 轴面上制备 Ni60A 合金涂层。通过光学显微镜、显微硬度计、摩擦磨损试验机对比分析离焦量对熔覆层宏观形貌、微观组织、显微硬度及耐磨性的影响。试验结果表明:离焦量为 8 mm 时,熔覆层表面光滑、平整,结合面无气孔、裂纹及夹渣等缺陷,熔覆层与基体间形成了良好的冶金结合;熔覆层中部为细小的等轴晶,两侧为树枝晶和柱状晶,底部为沿基体表面生长的平面晶组织;最高硬度出现在熔覆层中部,其显微硬度达 660 HV,是基体硬度的 2 倍;在相同磨损条件下,熔覆层的磨损失重仅为基体材料的 33%。随着离焦量增大,熔覆层表面粗糙度增加,硬度不均匀性增大,耐磨性能随之降低。

关键词 激光光学;农业机械;激光熔覆;再制造;微观组织;显微硬度;耐磨性能

中图分类号 TG174.44; TH17

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.071404

Laser Cladding Remanufacturing and Repair of Agricultural Tractor Spindle

Wang Jiasheng¹, Shu Linsen^{1,2*}

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

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

Abstract In order to realize the laser cladding remanufacturing and repair of tractor spindle, Ni60A alloy coating was prepared by laser cladding technology on spindle material 40Cr axial surface. The effects of defocusing amount on the macromorphology, microstructure, microhardness, and wear resistance of the cladding layer were analyzed by optical microscope, microhardness tester, and friction wear tester. The results show that when the defocusing amount is 8 mm, the surface of the cladding layer is smooth and flat, and there are no defects such as pores, cracks, and slag inclusion on the bonding surface. In the middle of the cladding layer, there are fine equiaxial crystals, dendrites and columnar crystals on both sides, and planar crystal structures growing along the surface of the substrate at the bottom. The highest hardness was found in the middle of the cladding layer, and its microhardness was up to 660 HV, twice that of the substrate. Under the same wear condition, the wear weight of cladding layer is only 33% of that of matrix material. As the amount of defocusing increases, the surface roughness of cladding layer increases, the hardness non-uniformity increases, and the wear resistance decreases.

Key words laser optics; agricultural machinery; laser cladding; remanufacturing; microstructure; microhardness; abrasion resistance

OCIS codes 140.3390; 160.3900

收稿日期: 2019-08-20; **修回日期:** 2019-08-30; **录用日期:** 2019-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51505268)、陕西省教育厅专项科研计划(15JK1142)、陕西理工大学人才启动基金项目(SLGKYQD2-26)

* **E-mail:** 893415819@qq.com

1 引言

随着我国农业现代化和可持续发展重大战略的推进,蕴含着高附加值的损伤、失效农业机械再制造研究越来越受到重视^[1]。拖拉机作为农业生产中的主要动力机械,使用频率高、工作时间长,其轴类零件长期承受随机交变载荷,以及在泥土砂石等恶劣工况下易出现磨损甚至断裂失效等情况^[2-4]。利用激光熔覆修复技术在磨损轴面上制备出高强度和高耐磨性的合金涂层,不仅能够延长拖拉机的使用寿命、减少农业生产成本,而且使资源得到循环再利用^[5-8]。

目前,已有诸多学者对激光熔覆技术在不同领域的应用开展了大量研究。封慧等^[9]对曲轴轴颈损伤表面进行了激光熔覆修复,推导出了激光熔覆曲轴连杆轴颈过程中激光束与转动轴颈的运动轨迹和相对速度之间的关系模型。韩玉勇等^[10]使用 Nd:YAG 固体激光熔覆设备及 FeCr 合金粉料对损伤 45 钢主轴进行修复再制造研究,结果表明,熔覆层与基体结合良好,所得熔覆层无气孔裂纹等缺陷,显微硬度和耐磨性都得到了大幅度提升。舒林森等^[11]采用数值模拟的方法,对磨损轴面激光熔覆过程的热力耦合问题进行研究,获得了熔覆过程的三维温度和热应力分布规律。任维彬等^[12]设计了叶片激光再制造成形闭环控制系统,实现了损伤薄壁叶片的激光再制造成形闭环控制。黄海博等^[13]针对汽轮机

叶片的复杂造型,提出一种基于非均匀有理 B 样条 (NURBS) 曲面拟合的几何模型重构方法,得到了一种获取稳定的激光功率密度的路径规划方法,为复杂曲面的激光熔覆再制造提供了一种新方法。曹俊等^[14]研究了碳化钨(WC)对激光熔覆热作模具的组织 and 磨损性能的影响,结果表明,随着 WC 质量分数的增大,熔覆层的氧化磨损程度逐渐加深。

上述研究主要集中在发动机曲轴、压缩机叶片以及模具的修复领域。对于农业机械的激光熔覆修复研究较少,为了促进激光熔覆技术更好地服务于农业生产,本文以出现磨损的拖拉机主轴为研究对象,通过 Nd:YAG 固体激光熔覆系统在主轴材料 40Cr 轴面上进行激光熔覆修复。同时,分析了熔覆层宏/微观结构形貌、组织特征、显微硬度及耐磨性,以为激光熔覆技术在农业机械领域的应用提供一定的理论支撑及实验数据。

2 试验材料及方法

试验用的主轴材料为 40Cr(调质处理),其金相组织由铁素体和珠光体组成,具体化学元素成分(质量分数,%)如表 1 所示。试验前,将试样表面的油、锈和氧化物除去,然后经不同粒度的金相砂纸打磨、抛光处理,再用无水乙醇和丙酮各超声清洗 10 min。试验采用的 Ni60A 粉末颗粒直径为 45~105 μm ,其微观形貌如图 1 所示。

表 1 40Cr 钢基体化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 40Cr steel substrate(mass fraction,%)

Element	C	Si	Mn	Cr	P	S	Cu	Mo	Fe
40Cr	0.37—0.45	0.17—0.37	0.5—0.8	0.8—1.1	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.30	≤ 0.10	Bal.

激光熔覆试验采用 LSSK009 型数控 YAG 脉冲激光熔覆系统制备熔覆试件,该系统由 Nd:YAG 固体脉冲激光器、冷却机组、配电系统、加工工作台以及三爪卡盘等部分组成。激光波长为 1064 nm、平均功率 ≤ 900 W、标准光斑直径为 1 mm,控制系统具备 X、Y 和 Z 方向移动自由度,精度达 0.01 mm。通过多次单因素试验及多因素正交试验优化得到较优的工艺参数:电流 $I = 210$ A、脉宽 $B = 3.6$ ms、频率 $f = 16$ Hz、扫描速度 $V = 240$ mm/min、搭接率为 40%。由于离焦量对熔覆层质量影响很大^[15-16],故选择三种离焦量: $h_1 = 8$ mm、 $h_2 = 10$ mm、 $h_3 = 12$ mm,用以探究不同离焦量对熔覆层性能的影响。

熔覆试验完成后采用宝时格中走丝线切割机切割金相试样及摩擦磨损试样,金相试件经打磨抛光后

先用 4% 硝酸乙醇溶液腐蚀 40Cr 基材,再用现配王水溶液(HCl:HNO₃ 体积比为 3:1)对熔覆层进行腐蚀,使用放大 50~1000 倍的 4XC 型倒置金相显微镜进行组织观察;利用 HV-1000 型显微硬度计进行硬度测定,载荷为 200 g,加载时间为 10 s;通过 MMU-5G 型摩擦磨损试验机测试熔覆涂层与基材的磨损性能,试验前后用超声波清洗试样,烘干后用精度为 0.0001 g 的电子天平称重,以计算试样的磨损失重。

3 试验结果与分析

3.1 熔覆层表面宏观形貌

文献^[15-17]研究表明,激光功率密度过小,粉末熔化不充分,熔覆层表面出现局部起球、孔洞等外观缺陷,甚至会导致熔覆层与基材结合不牢,出现剥落。而激光功率密度过大,又会引起熔覆粉末过烧、

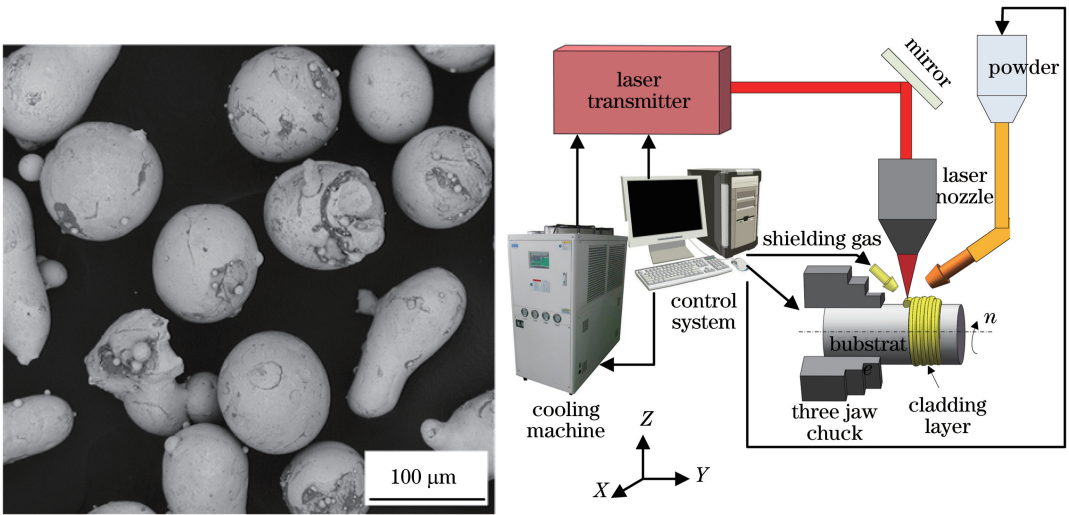


图 1 Ni60A 粉末微观形貌及激光熔覆系统示意图

Fig. 1 Morphology of Ni60A powder and schematic of laser cladding system

蒸发、表面飞溅严重,同时也会导致熔覆层稀释率增加,涂层使用性能降低。因此,选择合理的激光熔覆工艺参数对于提高熔覆层表面质量和使用性能具有至关重要的作用。图 2 为在三种不同离焦量下所制备的熔覆涂层表面宏观形貌。可以看出,熔覆层表面均匀连续,未出现气孔、裂纹等宏观缺陷。其中,离焦量 $h_1=8\text{ mm}$ 时熔覆层表面光滑、平整、质量最好;离焦量 $h_2=10\text{ mm}$ 、 $h_3=12\text{ mm}$ 时熔覆层表面呈现为沟壑状,局部出现起球、隆起现象,具有较高的粗糙度。

激光熔覆区域在单位面积上所需能量称为能量密度 E ,也叫做激光比能,其计算公式为 $E = P/dv$ (其中 P 为激光束功率, v 为激光扫描速度, d 为激光束光斑直径)。离焦量的大小直接反映激光光束的光斑直径,当激光功率、扫描速度一定时,随着离焦量的增加,激光比能量会逐渐减小,扫描中心最高温度值也逐渐降低,导致基体与熔覆层冶金结合不牢固,部分粉末颗粒没有充分熔化,附着在熔覆层表面,所以熔覆层表面质量变差,粗糙度增大。

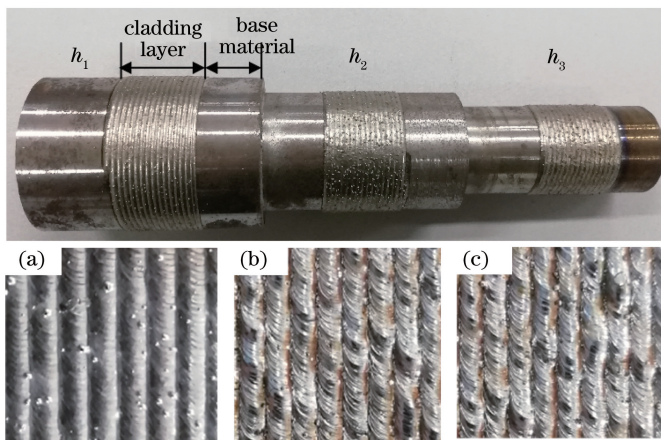


图 2 不同离焦量下熔覆层表面宏观形貌。(a) 8 mm;(b) 10 mm;(c) 12 mm

Fig. 2 Surface macromorphology of cladding layer with different defocusing amounts. (a) 8 mm; (b) 10 mm; (c) 12 mm

3.2 熔覆层微观组织结构

图 3 是离焦量为 h_1 时获得的激光熔覆结构的横截面形貌。经过 4%硝酸乙醇腐蚀后,可以看到,熔覆结构由熔覆层(CL)、结合区(BZ)、热影响区(HAZ)和基体材料(BM)组成,如图 3(a)所示。其

中,白亮区域为 Ni60A 熔覆合金涂层形貌(金相未出现,需要王水再腐蚀),最下方是由珠光体和铁素体构成的基体组织,而处于中间的区域则是结合区和热影响区。图 3(b)为经王水腐蚀后熔覆层金相组织,可以看到,熔覆层呈现出十分丰富的组织形

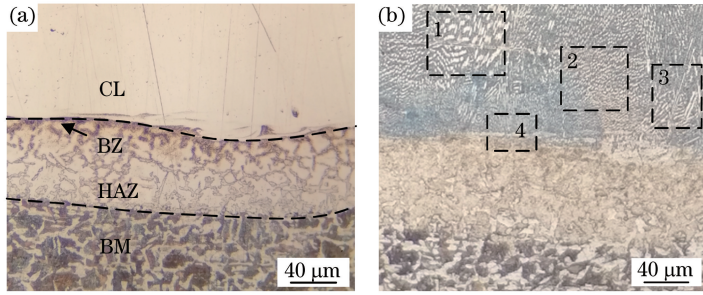


图 3 激光熔覆结构截面微观形貌

Fig. 3 Microstructure of cross section of laser cladding structure

态。熔覆层与基体之间的结合界面平整,两者结合处没有观察到气孔、裂纹及夹渣现象,这说明熔覆层与基体间形成了良好的冶金结合。

图 4 为图 3(b)中不同区域金相组织微观放大图。熔覆层的复杂组织形态与激光熔覆过程中小区域内温度梯度和凝固速率差异大的事实吻合。熔覆层左右两侧区域(图 3(b)中的区域 1、3)主要由垂直于熔合线生长的树枝晶和柱状晶组成;熔覆层中间部分(图 3(b)中的区域 2)则主要由细小的等轴晶组

成;熔覆层底部(图 3(b)中的区域 4)为沿基材表面生长的平面晶组织。这主要是由于熔覆层两侧区域散热速度快,晶体沿温度梯度方向快速生长,组织主要以长条状柱状晶和树枝晶为主;在熔覆层底部由于受到基体的激冷作用,界面结合的温度梯度 G 最大,凝固速率 R 最小, G/R 最大,晶体的形核速度远大于生长速度,导致平面晶在基材表面生长;而熔覆层中间部分各方向温度差异不大,所以呈现出等轴晶组织。

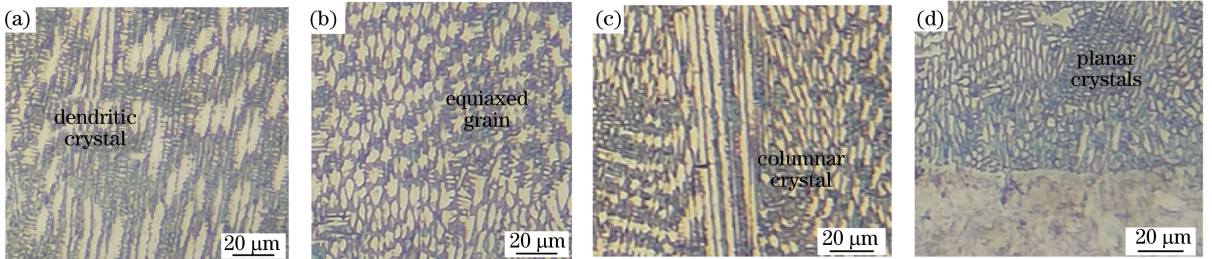


图 4 不同区域组织微观放大图

Fig. 4 Microscopic magnification of different regional organizations

3.3 熔覆层的显微硬度

对熔覆试样进行了显微硬度测试。从熔覆层上表面至基体每隔 0.2 mm 取一点进行测量,每个试样取三组数据并取平均值,试样取样位置分布示意

图如图 5(a)所示。不同离焦量下熔覆结构硬度分布曲线如图 5(b)所示。由图 5 可知,三种离焦量下熔覆结构硬度分布规律基本相同,整体上呈梯度分布,自熔覆层至基体硬度逐渐降低。熔覆层中部位

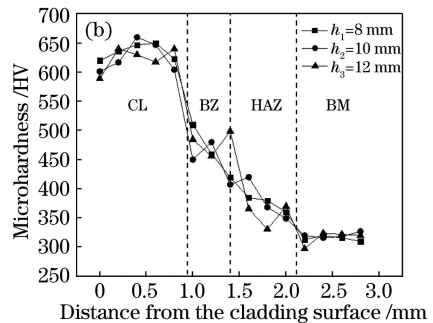
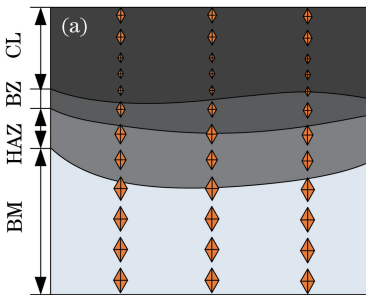


图 5 不同离焦量下激光熔覆结构硬度分布情况。(a)测试点位置分布示意图;(b)硬度分布曲线

Fig. 5 Hardness distribution of laser cladding structure with different defocusing amounts.

(a) Schematic of test point location distribution; (b) hardness distribution curve

置硬度最高,达到了 660 HV,是 40Cr 基体硬度 (320 HV)的 2 倍。其中,离焦量 $h_1=8$ mm 时硬度分布最为稳定,而离焦量 $h_2=10$ mm 和 $h_3=12$ mm 时硬度分布波动较大。其主要原因是当离焦量为 10 mm 和 12 mm 时,激光功率密度过小,导致熔覆层粉末熔化不均匀,组织不均匀性增加,因此其硬度分布不均匀。熔覆层中部区域为细小的等轴晶,所以该区域显微硬度最高。

3.4 熔覆层的磨损性能

图 6 是 40Cr 基体和熔覆涂层试样在相同磨损条件下的磨损失重对比。从图中可以看出,40Cr 钢基体的磨损量最大,为 7.2 mg,激光熔覆涂层的磨损量大幅度降低,分别为 40Cr 基体的 33%、41% 和 44%,都不足其磨损量的一半。从而说明通过激光熔覆制备的合金涂层可大幅度提高基体的耐磨性。

图 7 为不同离焦量下的激光熔覆涂层和 40Cr 基体在相同磨损条件下的磨损表面微观形貌。从微观形貌分析可知,激光熔覆涂层磨损表面出现比较

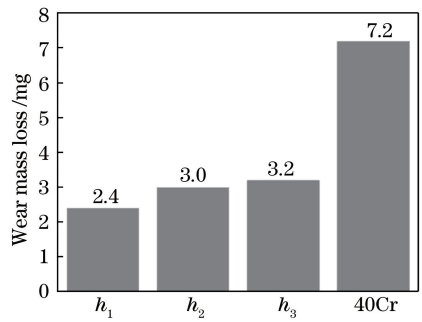


图 6 不同离焦量下熔覆层及 40Cr 基体磨损质量
Fig. 6 Wear losses of 40Cr substrate and cladding layer at different defocusing rates

浅的犁削痕迹,主要表现为磨粒磨损。随着离焦量增大,磨损面上出现了黏着磨损,且离焦量越大,黏着磨损越严重。这是因为随着离焦量的增大,激光能量密度减小,导致粉末熔化不充分,部分区域组织较为疏松,硬度降低,耐磨性变差;40Cr 基体出现了较宽且较深的沟槽,主要表现为黏着磨损,表明它抵抗对磨头摩擦的能力更差。

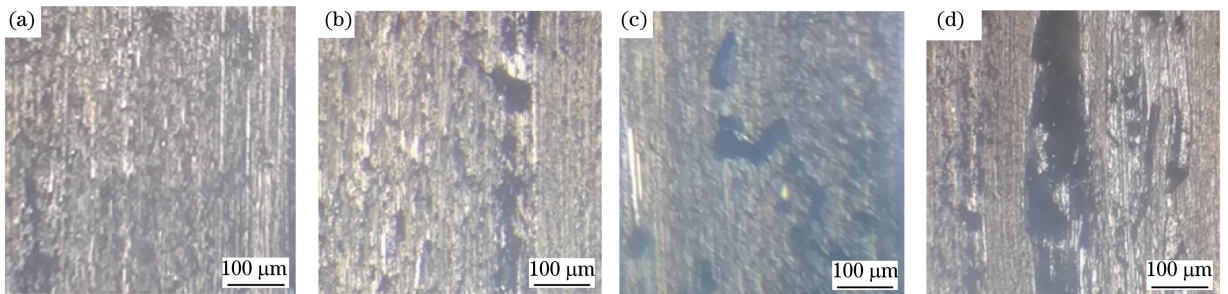


图 7 磨损面微观形貌。(a) 8 mm; (b) 10 mm; (c) 12 mm; (d) 40Cr

Fig. 7 Microstructure of wear surface. (a) 8 mm; (b) 10 mm; (c) 12 mm; (d) 40Cr

4 结 论

利用激光熔覆技术在拖拉机主轴材料上成功地制备出了 Ni60A 合金涂层,通过金相组织及力学性能检验发现:熔覆层与基体呈现出良好的冶金结合状态,未出现气孔、裂纹及夹渣等缺陷,熔覆层组织晶粒细小均匀,硬度和耐磨性能都得到了大幅度提高,为农业机械设备再制造修复提供了思路。同时,在激光熔覆过程中,离焦量等工艺参数对熔覆层的质量影响较大,熔覆过程中应注重对工艺参数进行优化。

参 考 文 献

[1] Xu B S, Xia D, Tan J Y, et al. Status and development of intelligent remanufacturing in China [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 1-13.

徐滨士, 夏丹, 谭君洋, 等. 中国智能再制造的现状与发展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 1-13.

[2] Xie B, Wu Z B, Mao E R. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17.

谢斌, 武仲斌, 毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 1-17.

[3] Bai X F, Yang H Y, Chang J X. Present situation analysis and development suggestion of crawler tractor [J]. Tractor & Farm Transporter, 2017, 44(6): 1-4, 6.

白学峰, 杨浩勇, 常江雪. 履带拖拉机发展现状分析与发展建议思考[J]. 拖拉机与农用运输车, 2017, 44(6): 1-4, 6.

[4] Ma G, Mao C E, Kong C H, et al. Effects of induction heating process on torsional strength of tractor shaft parts [J]. Tractor & Farm Transporter,

- 2014, 41(1): 70-73.
- 马戈, 毛长恩, 孔春花, 等. 感应热处理工艺对拖拉机轴类零件扭转强度的影响[J]. 拖拉机与农用运输车, 2014, 41(1): 70-73.
- [5] Skarvelis P, Papadimitriou G D. Plasma transferred arc composite coatings with self lubricating properties, based on Fe and Ti sulfides: Microstructure and tribological behavior[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(10/11): 1384-1394.
- [6] Varfolomeev I, Luke M, Burdack M. Effect of specimen geometry on fatigue crack growth rates for the railway axle material EA4T [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(5): 742-753.
- [7] Linhart V, Černý I. An effect of strength of railway axle steels on fatigue resistance under press fit[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(5): 731-741.
- [8] Lu X L, Liu X B, Yu P C, et al. Effects of post heat-treatment on microstructure and tribological properties of Ni60/H-BN self-lubricating anti-wear composite coating on 304 stainless steel by laser cladding[J]. Tribology, 2016, 36(1): 48-54.
- 陆小龙, 刘秀波, 余鹏程, 等. 后热处理对 304 不锈钢激光熔覆 Ni₆₀/h-BN 自润滑耐磨复合涂层组织和摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(1): 48-54.
- [9] Feng H, Li J F, Sun J. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0803003.
- 封慧, 李剑峰, 孙杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803003.
- [10] Han Y Y, Lu J J, Li J F, et al. Lathe spindle remanufacturing based on laser cladding technology [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 147-153.
- 韩玉勇, 鲁俊杰, 李剑峰, 等. 基于激光熔覆的车床主轴再制造[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 147-153.
- [11] Shu L S, Wang J S, Bai H Q, et al. Numerical and experimental investigation on laser cladding treatment of wear shaft surface [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 217-223.
- 舒林森, 王家胜, 白海清, 等. 磨损轴面激光熔覆过程的数值模拟及试验[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 217-223.
- [12] Ren W B, Dong S Y, Xu B S, et al. Design and implementation of laser refabrication forming closed-loop controlling for compressor blade [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(3): 11-15, 129.
- 任维彬, 董世运, 徐滨士, 等. 压缩机叶片激光再制造成形闭环控制设计与实现[J]. 焊接学报, 2018, 39(3): 11-15, 129.
- [13] Huang H B, Sun W L, Zhang G, et al. Path trajectory of laser cladding remanufacturing for turbine blade based on NURBS surface [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 175-183.
- 黄海博, 孙文磊, 张冠, 等. 基于 NURBS 曲面的汽轮机叶片激光熔覆再制造路径规划[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 175-183.
- [14] Cao J, Lu H F, Lu J Z, et al. Effects of tungsten carbide particles on microstructure and wear resistance of hot-working die prepared via laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702001.
- 曹俊, 卢海飞, 鲁金忠, 等. WC 对激光熔覆热作模具的组织 and 磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702001.
- [15] Xu P, Dong L, Ju H, et al. Microstructure and corrosion resistance of 304 stainless steel coating by laser cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(S1): 221-225.
- 徐鹏, 董梁, 鞠恒, 等. 激光熔覆 304 不锈钢涂层的组织及耐蚀性[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(S1): 221-225.
- [16] Li C, Liu H X, Zhang X W, et al. Microstructure and property of Co-based carbide composite coating fabricated by laser cladding on 40Cr tool steel surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1103002.
- 李闯, 刘洪喜, 张晓伟, 等. 40Cr 刀具钢表面激光熔覆钴基碳化物复合涂层的组织与性能[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1103002.
- [17] Ye S Y, Liu J Y, Yang W. Microstructure and properties of laser clad 316L stainless steel layer [J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 48-53.
- 叶四友, 刘建永, 杨伟. 激光熔覆 316L 不锈钢涂层组织和性能的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 48-53.