

45[#] 钢表面激光熔覆自熔性镍基碳化钨粉末

张德强¹, 张吉庆¹, 郭忠娟²

(1. 辽宁工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 锦州 121001;

2. 日照港油品码头有限公司, 山东 日照 276800)

摘要: 目的 提高 45[#] 钢的表面性能。方法 利用 IPG 光纤激光加工系统, 采用不同的工艺参数在 45[#] 钢表面激光熔覆自熔性镍基碳化钨粉末, 对熔覆层的宏观表面(平整度、表面硬度、裂纹情况)及金相组织、显微硬度分布进行对比分析。结果 在激光功率为 1200 W、扫描速度为 2 mm/s、送粉电压为 7 V 时, 获得的熔覆层宏观表面相对平整光滑, 平均洛氏硬度约是基体的 2.5 倍。由微观组织分析得知, 熔覆层及界面处无裂纹、气孔等缺陷, 熔覆层中上部组织晶粒细小, 沿熔覆层与基体交界处向外, 晶粒呈现柱状晶及等轴晶, 组织性能良好, 基体与熔覆层间冶金结合比较牢固。熔覆层显微硬度分布比较均匀, 并且与基体相比提高了约 1.5 倍。结论 45[#] 钢表面机械性能得到提升, 在其表面激光熔覆自熔性镍基碳化钨粉末具有可行性和研究价值。

关键词: 激光熔覆; 自熔性镍基碳化钨; 工艺参数; 宏观表面; 表面硬度; 金相组织; 显微硬度

中图分类号: TG174.44; TN249

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)11-0066-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.11.011

Laser Cladding of Self-fluxing Ni-based WC Powder on 45[#] Steel Surface

ZHANG De-qiang¹, ZHANG Ji-qing¹, GUO Zhong-juan²

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

2. Rizhao Port Oil Terminal Co., Ltd, Rizhao 276800, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the surface properties of 45[#] steel. **Methods** Using IPG fiber laser YLR-3000 Laser Processing System, laser cladding of self-fluxing Ni-based WC Powders was conducted on the surface of 45[#] steel using different process parameters. Comparative analysis was conducted on the macroscopic surface (Flatness, surface hardness, cracks), metallurgical structure and distribution of microhardness of the cladding layer. **Results** When the laser power was 1200 W, scanning speed was 2 mm/s, and powder feeding voltage was 7 V, the cladding layer had relatively smooth macro surface, and the average Rockwell hardness of the cladding layer was about 2.5 times that of the matrix. The microstructure analysis showed that there were no defects such as cracks and holes in the cladding layer and the interface, the middle and upper part of the cladding layer had fine grains, the grains were dendritic and equiaxed along the interface of the cladding layer and the substrate, the structural performance was good, and the metallurgical bonding between the cladding layer and the substrate was relatively strong. The microhardness distribu-

收稿日期: 2015-06-10; 修订日期: 2015-07-08

Received: 2015-06-10; Revised: 2015-07-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAF12B08-5)

Fund: Supported by the National Science and Technology Support Program (2012BAF12B08-5)

作者简介: 张德强(1964—), 男, 河北人, 硕士, 教授, 主要从事机械 CAD/CAM、数控技术等方面的研究。

Biography: ZHANG De-qiang(1964—), Male, from Hebei, Master, Professor, Research focus: CAD/CAM and NC technology.

tion of the cladding layer was relatively even, and increased by about 1.5 times as compared to the substrate. **Conclusion** The mechanical properties of 45# steel surface were improved. Laser cladding of self-fluxing nickel-based tungsten carbide powder on its surface has therefore feasibility and research value.

KEY WORDS: laser cladding; self-fluxing nickel based WC; process parameters; macroscopic surface; surface hardness; micro-structure; microhardness

自激光器应用于工业领域以来,激光熔覆技术得到了快速发展,成为一种提高材料表面性能的有效手段^[1-7]。激光熔覆层具有优良的耐磨性、耐蚀性、抗高温氧化性、抗疲劳性等,综合性能优异,是零部件表面改性的研究和发展热点^[8-10]。

零部件常采用45#钢生产制造。45#钢无论在力学性能方面,还是在价格方面,都具有一定优势,已成为众多工业产品的重要选材^[11-12]。但是在生产实践中,由于需长期处于恶劣的环境下服役,零部件易发生失效(磨损、疲劳、腐蚀等),而失效大多发生在材料表面^[13]。因此,45#钢基材表面激光熔覆技术在实际生产中有着极为重要的研究前景。

文中利用激光熔覆技术在45#钢表面单道熔覆自熔性镍基碳化钨粉末,制备出力学性能均匀、稳定的熔覆层。将自熔性合金粉末较好的工艺性和原位反应生成的WC陶瓷颗粒的优异特性(耐磨性、耐蚀性、耐高温和抗氧化性能)结合起来,获得硬度均匀、稳定的熔覆层,是近年来激光熔覆领域的研究热点。

1 试验

45#钢基体样品的尺寸为8 mm×30 mm×300 mm,其成分(以质量分数计)为:C 0.46%,Si 0.27%,Cr 0.05%,Ni 0.04%,Mn 0.59%,P 0.024%,Cu 0.05%,S 0.016%。激光熔覆前,表面经精细打磨,并用无水乙醇清洗,以使表面平整,无油污、氧化膜、气孔、杂质颗粒等缺陷,避免加工过程中产生烟雾或影响光的吸收。

熔覆粉末为自熔性镍基碳化钨粉末,粒度为-140+325目,成分(以质量分数计)如下:C 1.02%,W 6.13%,Cr 17.19%,Si 4.06%,Fe 8.32%,B 2.98%,Ni 余量。熔覆粉末需先经真空烘干除潮,以防止被氧化或受外界环境影响而变质。

激光熔覆采用最大输出功率为3000 W的YLR-3000型IPG光纤激光器。熔覆过程中采用同轴送粉方式,辅助不变参数为:熔覆头与基体表面距离16 mm(光斑直径约为2 mm),送粉气压(N_2)0.3 MPa,载气流量600 L/h,保护气压(N_2)0.1 MPa,环境恒温

22℃左右,恒湿(RH)65%。前期研究发现,扫描速度对熔覆层的影响很大,当扫描速度 $v=1$ mm/s时,熔覆层较厚,熔覆效果较差;当扫描速度 $v=3$ mm/s时,熔覆层厚度难以满足实际应用需求。因此,文中固定扫描速度 $v=2$ mm/s,以激光功率 P 和送粉电压 U 为变量设计激光熔覆实验。

熔覆完成后,用HR-150DT型洛氏硬度计测定涂层表面硬度。利用线切割将熔覆试样沿熔覆方向垂直切开,依次用280,320,400,500,600,800,1000目砂纸打磨、抛光截面,之后经水洗、酒精擦洗、4%(质量分数)硝酸乙醇溶液腐蚀、二次水洗、二次酒精擦洗、吹干,利用蔡司高级金相显微镜分析熔覆层的金相组织,并用HVS-1000型显微硬度计测定涂层截面的显微硬度分布。

2 结果及分析

2.1 表面质量及硬度

宏观形貌(是否有裂纹、气孔等缺陷)及表面硬度^[14]是决定熔覆层质量的重要因素。

2.1.1 表面质量

通过对比熔覆层的表面质量发现,激光功率对基体与熔覆层的结合强度及熔覆层均匀性的影响较为明显。激光功率直接影响单位面积上激光辐照能量的大小,这恰恰也是决定成形质量的关键因素,所以选择恰当的激光功率对熔覆层的成形质量较为关键。在 $P=1300$ W, $v=2$ mm/s, $U=7$ V和 $P=1200$ W, $v=2$ mm/s, $U=7$ V两组工艺参数下,制备的熔覆层均表面相对光滑,颜色光亮均匀,没有气孔、裂纹,与基体冶金结合较好,高度均匀且连续,见图1。熔覆层裂纹主要是由熔覆过程中形成的残余应力导致^[15],分析表明,熔覆层表面残余应力较小。当 $P\geq 1500$ W时,虽然形成了较好的熔池,但是激光功率较高使得温度高于基体熔点,导致熔覆层与基体接触处出现烧黑碳化现象,交界处严重失去原本的物理性能,熔覆层表面平整度显著降低且为暗灰色,宏观质量不佳;当 $P\leq 1000$ W时,由于激光功率过小,基体与熔覆层冶金

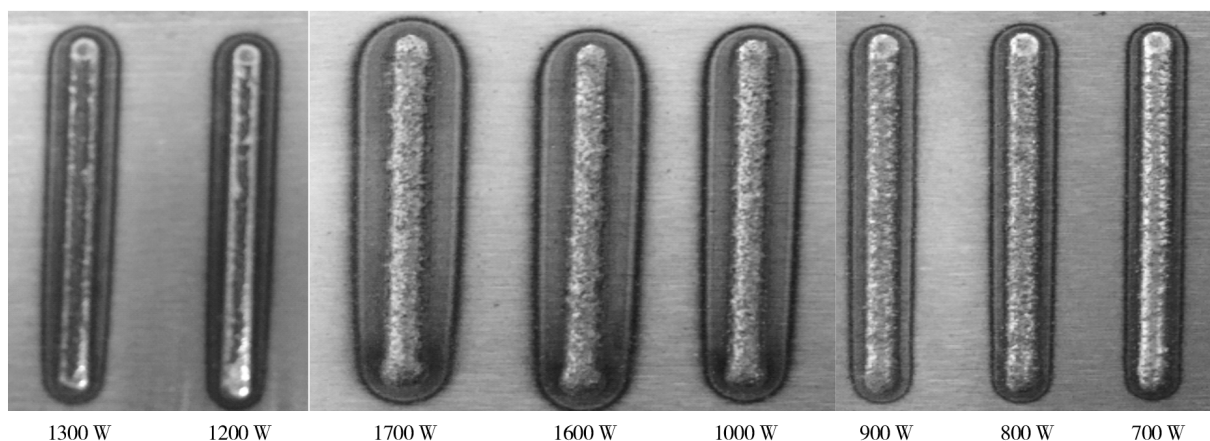


图1 不同激光功率下所得熔覆层的形貌

Fig. 1 Morphology of the cladding layer prepared under different laser power

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,熔覆层质量较差。

2.1.2 表面硬度

熔覆层外轮廓近似二次曲线型,直接测量表面硬度会存在一定的误差,因此将单道涂层上表面磨平,再测试洛氏硬度。每组参数的试样测3个点,并求平均值,得出最高平均洛氏硬度值为58.5HRC。与基体洛氏硬度(22HRC)对比可知,激光熔覆层的机械性能明显高于45#钢基体。不同工艺参数(扫描速度2 mm/s)下所得熔覆层的表面平均洛氏硬度如图2所示。可以看出,当送粉电压为7 V时,激光功率在9~12 W范围内,熔覆层表面硬度较高,且变化不大;但激光功率增大到一定值时,熔覆层硬度呈现急剧下降趋势。当送粉电压为8,9 V时,熔覆层表面平均硬度小且随激光功率的变化大。综合看来,送粉电压为7 V时,激光熔覆效果更佳。

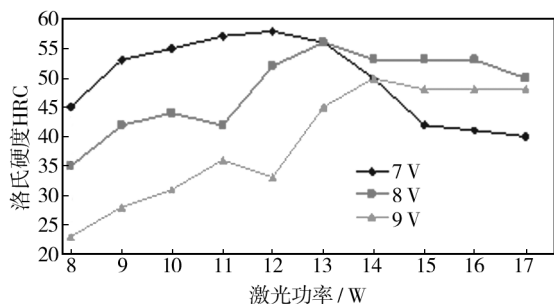


图2 洛氏硬度测试结果

Fig. 2 Rockwell hardness test results

2.2 涂层金相组织和显微硬度

2.2.1 金相组织分析

为了解单道熔覆层具体的组织性能,对 $P=1200$

W, $v=2$ mm/s, $U=7$ V 条件下制备的熔覆层进行金相组织分析。如图3a所示,熔覆层最底部组织以柱状晶为主,此区域的组织晶粒尺寸粗大且延伸较长。如图3b所示,熔覆层中上部为枝状晶逐渐向等轴晶变化,此区域上部的组织得到了明显细化,晶粒变得比较细小且均匀。对于交界处的熔覆层来说,温度无法快速释放,使得中上部区域的温度梯度非常小,因此晶粒细化的现象更加明显,熔覆层组织较好,无裂纹和气孔出现。

从快速凝固机理分析^[16],涂层的内部组织形态变化主要有以下几个特点:1)激光熔覆刚开始时,基体温度很低,但熔融的金属粉末温度较高,温度差大,冷却速度快,熔化状态的液态金属发生凝固。涂层与基体交界处因温度差而结晶速度小,晶粒以很慢的生长速度向外推进,基底处的组织晶粒为无晶核,受温度梯度的影响,向外慢慢生长,交界处形成一层白亮层,如图3a所示。2)随着距交界面的距离增加,界面处的温度梯度 G 与结晶速率 R 的比值减小,界面失稳,晶粒的生长方向因熔体的对流作用减弱而发生改变,柱状晶沿着熔体最易散热的方向生长明显,如图3b所示。与此同时,熔池底部前沿区域受过冷区影响,冷却速率很快,因此熔体迅速凝固形成直径较小的细晶组织。3)随着熔池内部的过冷区域变大,熔池内产生大量的晶粒,晶粒自由生长,形成了自由分布的枝状晶和等轴晶组织。

在其他工艺参数下,熔覆层与基体显微组织相对较差,均存在着不同程度的气孔等缺陷(见图3c),熔覆层与基体的冶金结合较差,物理力学性能不稳定,达不到对熔覆层组织性能的要求。

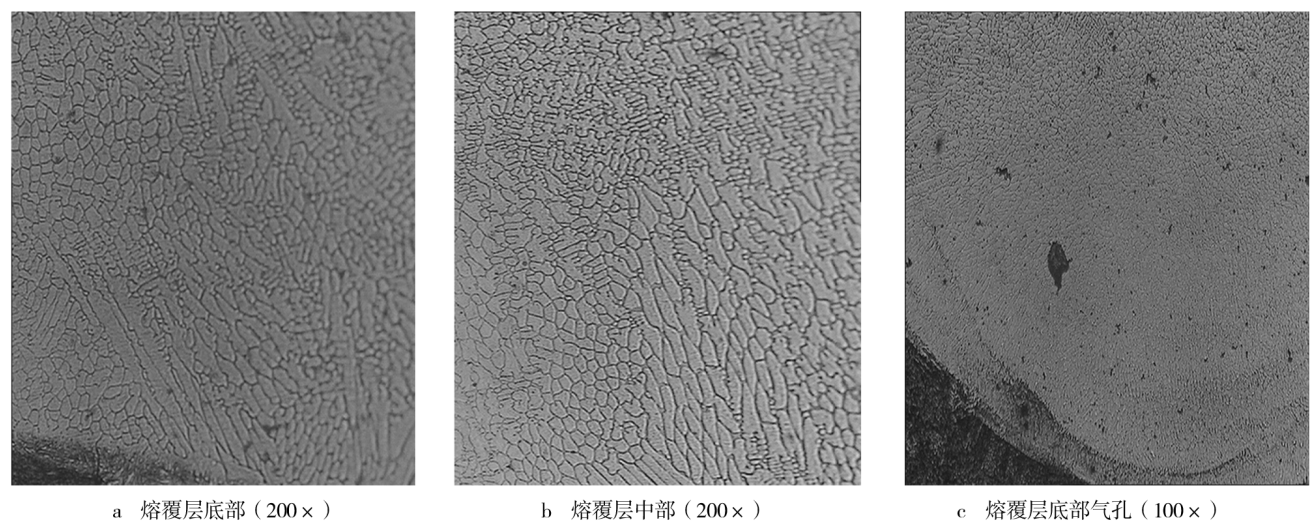


图 3 熔覆层显微组织形态

Fig. 3 The microcosmic metallographic morphology of the cladding layer

2.2.2 截面显微硬度分布

金属成形件的硬度是一项非常重要的力学性能指标,它反映了成形件抵抗弹塑性变形的能力,而且硬度与强度之间具有一定的换算关系,硬度值可以从侧面反映成形件的强度值。为了更全面地了解单道熔覆层的成形性能,对其由基体到熔覆层顶部的显微硬度变化规律进行了研究。测试了在 $v=2\text{ mm/s}$, $U=7\text{ V}$, $P=1200\text{ W}$ 条件下制备的熔覆层的显微硬度,如图 4 所示。可以发现,从熔覆层顶部到基体,显微硬度呈阶梯状分布。由于激光熔覆快速凝固的机理,熔覆层晶粒得到细化,因此其硬度明显高于基体。

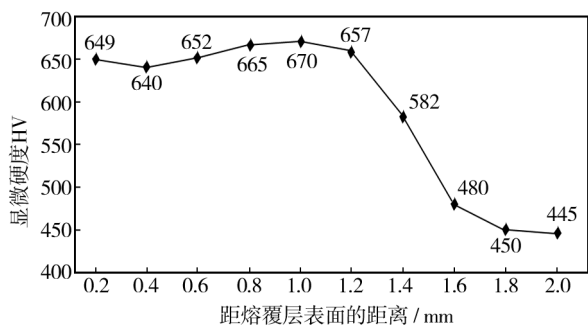


图 4 显微硬度测试结果

Fig. 4 The microhardness test result

根据霍尔佩奇关系式 $\sigma_y = \sigma_0 + K_y / \sqrt{d}$ (其中 σ_y 为材料的屈服极限值,指材料发生相对 0.2% 变形时的屈服应力,通常可以用材料的显微硬度 HV 表示; σ_0 为变化一个位错所产生的摩擦阻力; K_y 为常数; d 为晶粒平均直径)^[17],可知熔覆层显微硬度与组织晶粒

大小有着密切关系:晶粒尺寸越细小,熔覆层的显微硬度越高。结合图 4 及金相组织分析,由于基体对熔覆层底部的稀释作用使得熔覆层与基体之间发生原子相互扩散,因此结合区域的显微硬度低于熔覆层中上部,但也明显大于基体(255HV)。

3 结论

1) 采用激光熔覆技术成功在 45#钢表面熔覆了自熔性镍基碳化钨涂层。熔覆层的平均洛氏硬度为 58.5HRC,约是基体的 2.5 倍,能够有效提高 45#钢表面机械性能。

2) 最佳工艺参数为:激光功率 $P=1200\text{ W}$,扫描速度 $v=2\text{ mm/s}$,送粉电压 $U=7\text{ V}$ 。在该工艺参数下制备的涂层相比于其他工艺参数下制备的涂层,表面粗糙度较小,没有裂纹和气孔出现。通过金相组织观察发现,该工艺参数下制备的涂层组织明显细化,晶粒由熔覆层底部的柱状晶逐渐变成比较细小的等轴晶,微观组织较好,与基体冶金结合较好。

3) 熔覆层显微硬度在一定范围内存在波动,中上部显微硬度相对基体而言提高较大。由此可见,熔覆层可以大大提高基体表面的硬度和耐磨性,显著提升材料综合力学性能。

参考文献

[1] 高慧,相珺,王莞,等. Al_2O_3 对激光熔覆镍基涂层腐蚀性

- 的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2009, 28(3): 461.
- GAO Hui, XIANG Jun, WANG Chong, et al. Effect of Laser Cladding Ni-based Coating Corrosion[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2009, 28(3): 461.
- [2] 顾伟. 激光熔覆 Ni 包 Al+1% Y_2O_3 覆层的组织分析[J]. 表面技术, 2012, 41(2): 69—74.
- GU Wei. Analysis of Laser Cladding Ni Coated Al+1% Y_2O_3 Coating Organization[J]. Surface Technology, 2012, 41(2): 69—74.
- [3] LUO Fang, YAO Jian-hua, HU Xia-xia, et al. Effect of Laser Power on Cladding Temperature Field and the Heat Affected Zone[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(1): 73—78.
- [4] ZHANG Ke-min, ZOU Jian-xin, LI Jun, et al. Surface Modification of TC4 Ti Alloy by Laser Cladding with TiC+Ti Powders[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 2192—2197.
- [5] RAPPAZ M, CARRUPT B, ZIMMERMANN M, et al. Numerical Simulation of Eutectic Solidification in the Laser Treatment of Materials[J]. Hely Phys, 1987, 60: 924—963.
- [6] 邱宇. 激光熔覆中不同激光热源对熔池表面形状的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 40—43.
- QIU Yu. The Effect of Different Heat Source in Laser Cladding on Surface Configuration of Melting Pool[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 40—43.
- [7] HEMMATI I, OCELIK V. Effects of the Alloy Composition on Phase Constitution and Properties of Laser Deposited Ni-Cr-B-Si Coatings[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 302—311.
- [8] 朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296—301.
- ZHU Gang-xian, ZHANG An-feng, LI Di-chen. Effect of Process Parameters on Surface Smoothness in Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Laser, 2010, 37(1): 296—301.
- [9] 杨勇, 赵靖宇, 李静. 氩气保护下碳化钨对镍基合金熔覆层组织及耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 55—59.
- YANG Yong, ZHAO Jing-yu, LI Jing, et al. Effect of Tungsten Carbide on the Microstructure and Wear Resistance of the Nickel-based Alloy Cladding Layer under the Protection of Argon[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 55—59.
- [10] XIE J, KAR A. Mathematical Modeling of Melting during Laser Materials Processing[J]. Appl Phys, 1997, 81(7): 3015—3022.
- [11] 曹公望, 王振尧, 汪川, 等. 45# 钢在西双版纳大气环境下的腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(2): 1—6.
- CAO Gong-wang, WANG Zhen-yao, WANG Chuan, et al. Research on Atmospheric Corrosion of 45# Carbon Steel in Xishuangbanna Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2): 1—6.
- [12] 李星, 周人歌, 陈津虎, 等. 钢和硬铝的加速腐蚀试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 5—8.
- LI Xing, ZHOU Ren-ge, CHEN Jin-hu, et al. Study on Accelerated Corrosion Testing of Steel and Duralumin[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 5—8.
- [13] 李养良, 罗红梅, 王利, 等. 45 钢多道搭接激光熔覆层的组织与性能[J]. 材料热处理技术, 2010(7): 81—82.
- LI Yang-liang, LUO Hong-mei, WANG LI, et al. Microstructure and Properties of 45 Steel Multitrack Overlapping Laser Cladding Layer[J]. Heat Treatment Technology, 2010(7): 81—82.
- [14] 杨宁, 杨帆. 激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(4): 17—19.
- YANG Ning, YANG Fan. Effect of Laser Cladding Parameters on the Quality of Cladding Layer[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2010, 31(4): 17—19.
- [15] 梁志宏, 马恩波. 激光熔覆成形预热基板设计及试验研究[J]. 机械设计与制造, 2009(7): 54—55.
- LIANG Zhi-hong, MA En-bo. Structural Design of Substrate Preheating for Laser Cladding[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2009(7): 54—55.
- [16] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- HU Han-qi. Metal Solidification Principle[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000.
- [17] 路君, 曾小勤, 丁文江. 晶粒度与合金强度关系[J]. 轻金属, 2008(8): 59.
- LU Ju, ZENG Xiao-qin, DING Wen-jiang. Alloy Grain Size and Strength of the Relationship[J]. Light Metal, 2008(8): 59.