

热处理对激光熔覆 Ni/316L 堆焊层组织与性能的影响

王浩¹, 李欣², 曲玉龙², 董会³

(1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 陕西 西安 710018; 2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 陕西 西安 710018; 3. 西安石油大学材料科学与工程学院 西安市高性能油气田材料重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:为提升 Q235 钢的耐磨损性能,采用激光熔覆在 Q235 基体表面堆焊 Ni/316L 涂层,并进行了 680 °C 不同保温时间的热处理。采用扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)、显微硬度计研究堆焊层的显微组织、硬度和弹性模量。结果表明,激光熔覆层的孔隙率低,其组织主要以垂直于基体的针状树枝晶生长;热处理后组织从针状树枝晶转变为细小等轴晶;不同时间热处理后堆焊层最大硬度均出现在熔合区;热处理可以在一定程度上提升堆焊层的弹性模量。

关键词:激光熔覆层;Ni/316L 堆焊层;热处理;显微硬度;弹性模量

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212122

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2022)09-0040-03

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Laser-cladded Ni/316L Coating

WANG Hao¹, LI Xin², QU Yulong², DONG Hui³

(1. Changqing Drilling Corporation, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 2. Drilling and Production Engineering Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 3. Xi'an Key Laboratory of High Performance Oil and Gas Field Materials, School of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to improve the wear resistance of Q235 steel, a Ni/316L coating was coated on Q235 surface by laser cladding and the heat treatment at 680 °C for different time was carried out. Scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), microhardness tester were used to study the microstructure, microhardness and elastic modulus of the coating. The results show that the laser cladding layer has low porosity, and the microstructure is mainly grown in the form of needle like dendrite perpendicular to the substrate. The microstructure changes from acicular dendrites to fine equiaxed grains after heat treatment. The maximum hardness of the surfacing layer appears in the fusion zone after different time of heat treatment. The heat treatment can improve the elastic modulus of the surfacing layer in a certain content.

Key words: laser cladding; Ni/316L coating; heat treatment; microhardness; elastic modulus

随着油气田开发环境日益苛刻,其对材料的要求越来越高。常规金属材料服役过程中出现的问题越来越多^[1-2]。不锈钢以良好的耐蚀性能提升了油气田材料的耐蚀性能,在油气田中的应用越来越广泛^[3-4]。由于不锈钢价格较高,采用普通碳钢做基体,

不锈钢等耐蚀耐磨材料作为表层的复合材料同样受到关注^[5-6]。目前,常见的表面技术有激光熔覆、热喷涂、堆焊等。激光熔覆技术具有形变量小、熔覆效率高特点,与热喷涂等方法相比,激光熔覆组织更加致密,制备的涂层耐蚀耐磨性能更好^[7-8]。316L 不锈钢的高耐蚀性决定了其能显著提升零件的耐蚀性,但是 316L 不锈钢在氯离子作用下会发生应力腐蚀开裂,同时由于其低硬度的特征,316L 的耐磨性较差。因此,需要在保留不锈钢耐蚀性的基础上,提升其耐磨性,以延伸 316L 涂层的服役领域。添加合金元素是最常用的手段^[9]。Ni 元素与不锈钢基体的固溶性较好,不仅能提升 316L 的耐磨性,还能同时提

收稿日期:2021-08-11

作者简介:王浩(1977-),男,甘肃镇原人,高级工程师,主要研究方向:石油钻井工程与材料技术;电话:13891253270;

E-mail:wanghao70128@126.com

通讯作者:董会(1981-),男,山东济宁人,副教授,博士,主要研究方向:金属材料表面改性;电话:029-88382607;

E-mail:donghuihy@163.com

升 316L 耐蚀性^[10-11]。因此,本文在 Q235 钢表面采用激光熔覆制备 Ni/316L 涂层,并进行了不同热处理,研究了涂层的组织、硬度、弹性模量等性能,为拓展涂层使用范围提供基础。

1 试验材料及方法

试样基体选用厚度为 10mm 的 Q235 钢板。熔覆材料为 316L 粉末、Ni 粉,二者以质量比 1:1 混合。316L 粉末的尺寸为 50~90 μm, Ni 粉的尺寸为 60~100 μm。熔覆前,粉末在 90℃ 烘干 1.5h。

熔覆前,用砂纸对基体表面除锈。激光熔覆参数如表 1 所示。熔覆后,通过线切割制备 10mm×10mm×10mm 的热处理试样。将制备好的试样分 2 组进行热处理,分别在 680℃ 保温 1、3h,然后空冷。

表 1 激光熔覆参数

Tab.1 Laser deposition parameters

功率/kW	送粉速率/(r·min ⁻¹)	N ₂ 流量/(L·min ⁻¹)	扫描速率/(mm·s ⁻¹)
0.6	30	5	3

采用 100#~1200# 砂纸打磨试样,然后采用 0.5 μm 的金刚石抛光液抛光。基体采用 4%硝酸酒精溶液腐蚀,堆焊层采用王水(HCl:HNO₃=3:1)腐蚀。采用 JSM-6390A 型扫描电镜与能谱分析仪(EDS)表征热处理前后熔覆层的形貌与成分。采用 HVS-1000 型硬度机对不同热处理保温时间下的熔覆层试样的硬度分布进行表征,载荷为 2.94N,保荷时间 20s,测量 3 次取平均值。

采用 Knoop 压痕法测试熔覆层弹性模量 E (GPa)^[12-13]:

$$E = \frac{-0.45H}{\left(\frac{b^*}{a^*} - \frac{b}{a}\right)} \quad (1)$$

$$H = \frac{14.23F}{a^{*2}} \quad (2)$$

式中; b/a 为满载时压头对角线长度比值,取 1/7.11; b^*/a^* 为弹性恢复后的对角线长度比值; H 为努氏硬度; F 为试验力,kgf; a^* 为压痕长对角线的长度,mm。

2 结果及分析

2.1 堆焊层截面形貌

图 1 为不同热处理时间的堆焊层截面形貌。可以看出,熔覆层厚度约为 200~300 μm,熔覆层内部存在少量气孔,熔覆层致密,熔覆层/基体间熔合线清晰,界面结合程度好,无气孔等缺陷,如图 1(a)、

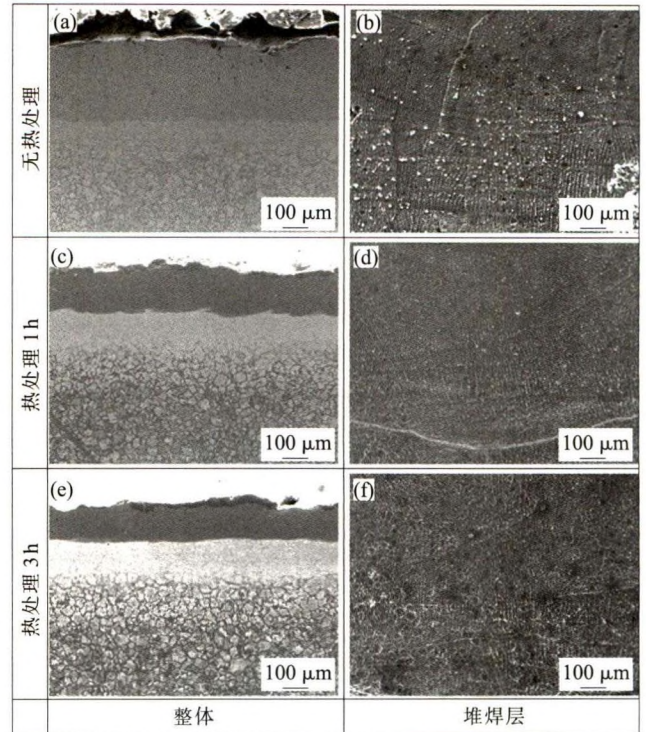


图 1 不同热处理时间的堆焊层截面形貌(腐蚀态)

Fig.1 Sectional morphologies of surfacing layers with different heat treatment time (corrosion state)

(c)、(e)所示。熔覆层存在有垂直于基体方向向上生长的细针状和树枝晶。随着热处理时间的增加,熔覆层原有的组织逐渐趋于无序化,即原来细长的针状和树枝状组织逐渐变短,尖端钝化,转变为不连续的、细小颗粒状的等轴晶组织,如图 4(b)、(d)、(f)所示。

图 2 为不同热处理时间腐蚀前的堆焊层形貌及 EDS 能谱。堆焊层内部弥散分布着大小不一的灰黑色相。随着热处理时间增加,黑色颗粒产物逐渐转变为灰色产物,且数量增加。对灰、黑色颗粒状物质进行能谱分析可知,未热处理的颗粒状物质为 Cr-Si-Ni 相,热处理 1、3h 后颗粒状物质分别为 Cr-Fe-Ni 相、Cr-Fe-Ni-Mo 相。这表明在进行激光熔覆后堆焊层内部出现了析出相,且热处理后析出相发生了转变。

2.2 堆焊层硬度分析

不同热处理时间试样的硬度分布如图 3 所示。试样的硬度以熔合线为中心呈现近似的正态分布,分别对应堆焊层、熔合区、热影响区、基体。其中熔合区和热影响区的硬度高于涂层区和基体,主要由于其晶粒组织相对细小;且距熔合线相同位置处堆焊层硬度高于基体。未热处理的堆焊层在熔合区附近具有硬度最大值(约 570HV),这主要由于熔合区具有更为致密的针状组织。随着热处理时间的增加,堆

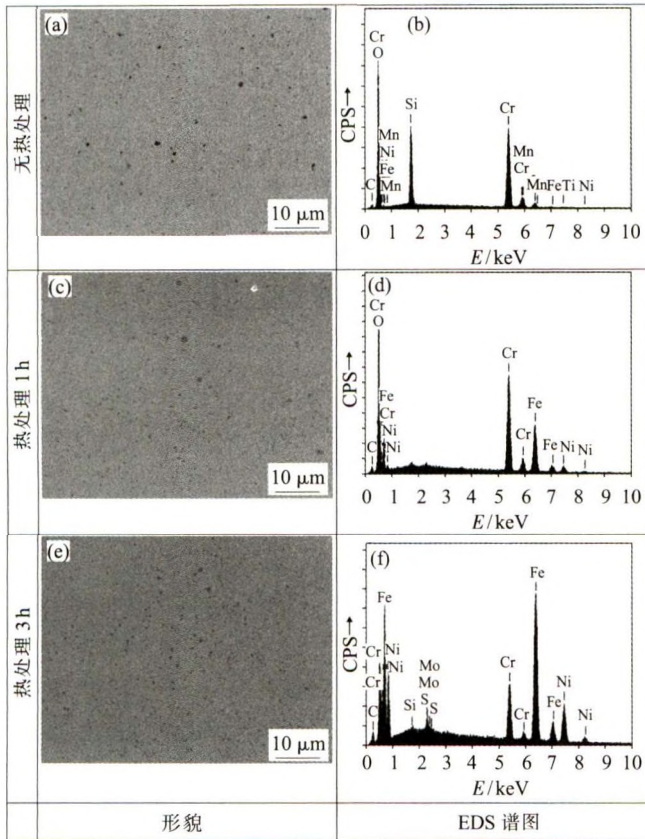


图2 不同热处理时间腐蚀前堆焊层的形貌及EDS能谱
Fig.2 Morphologies of surfacing layers with different heat treatment time before corrosion

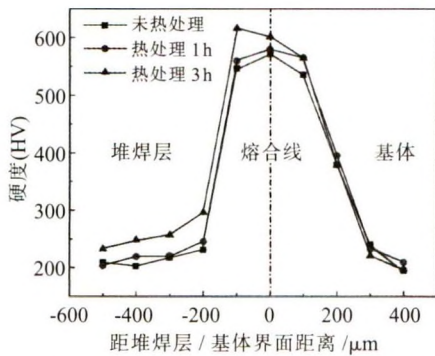


图3 不同热处理时间试样的硬度分布
Fig.3 Microhardness distribution of samples with different heat treatment times

焊层和基体的硬度逐渐升高, 热处理 1、3h 后堆焊层的最大硬度分别约为 577、615HV, 堆焊层相同位置处平均硬度分别较未热处理的提高约 10、40HV; 且堆焊层硬度变化随着热处理时间增加相较于基体较为明显。热处理后堆焊层硬度升高主要由于堆焊层的组织细化和 Ni/316L 合金层中弥散析出金属化合物造成的析出强化。硬度值是作为衡量材料耐磨性的重要指标之一, 一般材料的硬度值越高, 耐磨性越好。

2.3 试样堆焊层弹性模量分析

不同时间热处理堆焊层的弹性模量如图 4 所示。已知 316L 不锈钢与 Ni 的弹性模量分别约为 180、205 GPa, 二者混合后其弹性模量值在 180~205 GPa 之间。未热处理, 热处理 1、3h 的堆焊层的弹性模量分别约为 (178.3 ± 2.8) 、 (182.1 ± 7.4) 、 (182.5 ± 2.2) GPa, 表明随着热处理时间的增加, 堆焊层的弹性模量逐渐增大后趋于平稳, 热处理后堆焊层的弹性模量变化率仅为 2.25%。这说明弹性模量值主要取决于材料本身的化学成分, 但热处理可以在一定程度上提升堆焊层的弹性模量。

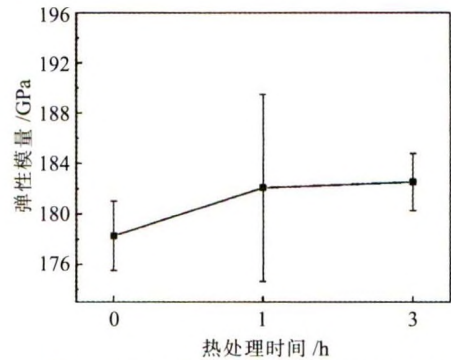


图4 不同时间热处理堆焊层的弹性模量
Fig.4 Elastic modulus of surfacing layer with different heat treatment times

3 结论


(1) 激光熔覆层具有致密度高、孔隙率低等特点, 主要以垂直于基体的针状树枝晶形式生长; 热处理后可明显改善熔覆层组织, 从原来的针状树枝晶转变为细小的等轴晶, 晶粒细化。

(2) 热处理不同时间后堆焊层及基体硬度都有所增加; 堆焊层最大硬度均出现在堆焊层熔合区, 热处理 1、3h 后平均硬度分别提高 10、40HV。热处理可以在一定程度上提升堆焊层的弹性模量。


参考文献:

- [1] 沈哲, 康留香, 李丛妮, 等. 陕北油田集输管线腐蚀原因分析及腐蚀防护技术研究[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 21-27.
- [2] 周勇, 周攀虎, 张世虎, 等. 污水储罐内牺牲阳极保护电位研究[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(4): 117-122.
- [3] 赵雪会, 刘君林, 曾瑞华, 等. 饱和 CO₂ 溶液中 Cl⁻ 浓度对马氏体不锈钢应力腐蚀敏感性的影响[J]. 材料保护, 2021, 54(1): 36-44.
- [4] 董会, 韩燕, 付安庆, 等. 快速激光熔覆 Ni/ 不锈钢堆焊层组织及耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 21-27.

(下转第 51 页)

- [4] 冯吉才,王廷,张秉刚,等. 异种材料真空电子束焊接研究现状分析[J]. 焊接学报,2009,30(10):108-112.
- [5] 张秉刚,王廷,陈国庆,等. 钛合金与铬青铜电子束自熔钎焊接头组织与力学性能[J]. 稀有金属材料与工程,2012,41(1):129-133.
- [6] Yue X, He P, Feng J C, et al. Microstructure and interfacial reactions of vacuum brazing titanium alloy to stainless steel using an AgCuTi filler metal [J]. Materials Characterization, 2008,59(12):1721-1727.
- [7] Lee M K, Lee J G, Choi Y H, et al. Interlayer engineering for dissimilar bonding of titanium to stainless steel[J]. Materials Letters,2010,64(9):1105-1108.
- [8] Wang Ting, Zhang Binggang, Chen Guoqing, et al. Influence of vanadium element on microstructure of electron beam welded titanium alloy to stainless steel joint [J]. Rare Metal Materials and Engineering,2011,40(S4):49-53. 

(上接第42页)

- [5] 李发根,魏斌,邵晓东,等. 高腐蚀性油气田用双金属复合管[J]. 油气储运,2010,29(5):359-362.
- [6] 蔡锐,代维,梁根. 三种材质集输管线在某油田中的适用性与经济性[J]. 腐蚀与防护,2013,34(6):539-541.
- [7] 张尧成,黄希望,杨莉,等. 热处理前后镍基高温合金激光熔覆层的组织和力学性能[J]. 机械工程材料,2016,40(11):22-26.
- [8] 付春霞,姜江,边秀房,等. 热处理对激光熔覆 Ni 基金层组织耐磨性的影响[J]. 热加工工艺,2007,36(15):44-47.
- [9] 韩亚军,陈友媛. 316L 不锈钢在不同电导率海水和 NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为[J]. 材料导报,2012,26(10):57-60.
- [10] 张自强,程相榜,白海明. 不同种类激光熔覆粉末的性能研究[J]. 南阳师范学院学报,2018,17(4):22-29.
- [11] 杨健,谢燕翔. 不锈钢激光熔敷纯 Ni 粉末涂层的组织和腐蚀行为[J]. 兵器材料科学与工程,2018,41(6):34-39.
- [12] 刘德来,王博,周攀虎,等. 激光功率对高速激光熔覆 Ni /316L 层组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理,2021,46(5):213-217.
- [13] 柏树宏. 努氏压头确定织构取向和弹性模量方法研究[J]. 南方农机,2015,46(7):27-28. 

(上接第46页)

参考文献:

- [1] 张琪. 汽车覆盖件用 6xxx 系铝合金板材的研究、产业化现状及发展趋势[J]. 有色金属加工,2020,49(1):1-5.
- [2] Maisonneste D, Suery M, Nelias D, et al. Effects of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a 6061 aluminium alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2011,528(6):2718-2724.
- [3] 孙巍,静宇,佟伟平,等. 汽车用 6005A-T6 铝合金动态力学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程,2021,50(6):2118-2124.
- [4] 王洪斌,张新宇,李胜利,等. Mn 添加对双辊铸轧 6061 铝合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2021,50(1):129-137.
- [5] 李龙,夏承东,宋友宝,等. 铝合金在新能源汽车工业的应用现状及展望[J]. 轻合金加工技术,2017,45(9):18-25.
- [6] 段晓鸽,江海涛,米振莉,等. 轧制方式对 6016 铝合金薄板组织和塑性各向异性的影响[J]. 材料工程,2020,48(8):134-141.
- [7] 段晓鸽,米振莉,江海涛,等. 一种改善汽车车身用铝合金板材各向异性的方法:CN110952052A[P]. 2020-04-03.
- [8] 董远鹏. AA 6061 铝合金各向异性实验和本构关系研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2020.
- [9] 许璐迪,涂景辉,王瑞楠,等. 2014 铝合金轧制板材各向异性研究[J]. 科技信息,2014(7):21-22.
- [10] 王新华,吴梵,胡会娥. 5083 铝合金轧制板材的各向异性研究[J]. 轻合金加工技术,2014,42(10):58-62. 