

激光热处理对 1Cr5Mo 耐热钢焊接接头拉伸性能的影响

郭 卫,孔德军,叶存冬,张 垒

(常州大学 机械工程学院,江苏 常州 213164)

摘 要: 为了改善 1Cr5Mo 耐热钢焊接接头拉伸力学性能,利用 CO₂ 激光对其进行了表面改性处理,通过拉伸试验考察了激光热处理对拉伸性能的影响。利用扫描电镜观察了焊接接头的断裂形式和断口形貌,并用能谱仪分析了激光热处理前后试样表面化学元素的组成,讨论了残余应力和残余奥氏体对拉伸性能的影响。结果表明,激光热处理前后试样的拉伸断口均为韧性断裂,激光热处理后断裂性能有所提高;激光热处理试样表面产生晶粒细化和残余压应力的强化层,其屈服强度和抗拉强度分别提高了 3.4% 和 13.7%,拉伸性能得到进一步提高;激光热处理试样的残余奥氏体含量有所降低,导致焊接接头的断面收缩率下降了 18.61%,而延伸率基本不变,其均匀变形能力有所增强。

关键词: 拉伸性能; 激光热处理; 1Cr5Mo 耐热钢; 焊接接头

中图分类号: TN249;TG115.5+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1145-05

Effect of laser heat treatment on tensile properties of 1Cr5Mo heat-resistant steel welded joints

Guo Wei, Kong Dejun, Ye Cundong, Zhang Lei

(College of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to improve mechanical properties of 1Cr5Mo heat-resistant steel welded joints, the surface was modified with CO₂ laser, and the tensile tests were conducted to research the effect of LHT (laser heat treatment) on tensile properties of welded joints. The rupture modes and the fracture morphologies were analyzed with SEM (scanning electron microscopy), the changes of chemical elements in the sample surface before and after LHT were analyzed with EDS (energy disperse spectroscopy), and the effects of residual stress and retained austenite on tensile properties were discussed. The results show that the fracture of the samples before and after LHT are ductile rupture, the rupture properties have been improved. After LHT, the strengthened layer of compressive residual stress and refined grains are generated in the surface, which cause yield strength and tensile strength to increase by 3.4% and 13.7%, and the tensile properties increased. The content of retained austenite decreases in the sample surface after LHT, which causes the section reduction rate to decrease by 18.61%, the elongation rate nearly doesn't change, and the ability of uniform deformation has improved.

Key words: tensile property; laser heat treatment(LHT); 1Cr5Mo heat-resistant steel; welded joint

收稿日期:2014-08-20; 修订日期:2014-09-22

基金项目:江苏省科技支撑计划(工业)(BE2014818);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX14-1098)

作者简介:郭卫(1987-),男,硕士生,主要从事激光表面处理方面的研究。Email:364440248@qq.com

通讯作者:孔德军(1966-),副教授,硕士生导师,博士,从事激光表面改性处理方面的研究。Email:kong-dejun@163.com

0 引言

1Cr5Mo耐热钢具有良好的强度、高韧性和抗裂化腐蚀性能,主要用于石油裂解管、热蒸气管、锅炉等领域。管线的连接一般采用焊接方法,焊接接头经过焊接热循环后会产生晶粒粗化和组织恶化现象,严重影响了管道的使用寿命,其失效形式主要有拉伸断裂、疲劳断裂和腐蚀等^[1]。目前焊接接头的强化方法主要有焊后热处理与应变硬化,如喷丸、碾压、锤击等^[2-3]。由于在实际应用中工件结构复杂,上述处理方法的效果不够理想。与传统的表面热处理工艺相比,激光热处理是一种快速加热和快速冷却的方法,其生产效率高,热影响区小^[4-6],目前国内外有关激光热处理对 1Cr5Mo 耐热钢焊接接头拉伸性能的影响鲜有报道。作者对 1Cr5Mo 耐热钢焊接接头进行激光热处理,分析激光热处理后接头表面的金相组织、化学元素、残余应力和残余奥氏体的变化,通过拉伸试验考察激光热处理对其抗拉强度和断口形貌的影响,为 1Cr5Mo 耐热钢焊接接头表面改性处理提供了试验依据。

1 试验方法

试验材料为 1Cr5Mo 耐热钢,其化学成分为(mass,%):C 0.15, Si 0.50, Mn 0.60, Cr 4.0-6.0, Mo 0.45-0.60, Ni 0.60, P 0.03, S 0.02,其余为 Fe。试样分为两组:原始试样和激光热处理试样。激光热处理在 GLS-IB 型 CO₂ 激光器上进行,工艺参数为:光斑直径为 4 mm,功率为 1.5 kW,扫描速度为 15 mm/s。两组试样表面金相组织用 4X 系列金相显微镜观察,残余应力和残余奥氏体在 X350-A 型应力仪上测量,辐射源选用 Cr 靶 K_α 辐射,衍射晶面为:(211), Ψ 角为 0°、25°、35°、45°,应力常数为-318 MPa/(°), 2θ 扫描起始与终止角为 162°和 148°, 2θ 扫描步距为 0.1°,计数时间为 0.50 s。残余奥氏体测试参数为: Ψ 角为 0°、25°、35°、45°,X 光管高压为 27.0 kV,X 光管电流为 7.0 mA,马氏体的 2θ 扫描起始角与终止角为 169°和 142°,扫描步距为 0.2°;奥氏体的 2θ 扫描起始角与终止角为 134°和 123°,扫描步距为 0.1°,计数时间为 0.5 s。拉伸试验在 WDS-100 型电子式万能拉伸试验机进行,试样如图 1 所示。拉断后,试样

断口形貌和化学元素组成在 JSM-6360LA 型扫描电镜及其配置的能谱仪上分析。

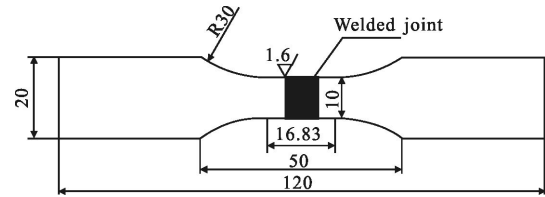


图 1 试样示意图

Fig.1 Sketch of the tensile samples

2 结果分析与讨论

2.1 拉伸曲线

应力-应变曲线如图 2 所示,试样拉伸过程分为三个阶段:(1) 弹性变形阶段,两组试样拉伸曲线斜率一致,这表明在此阶段激光热处理对弹性变形没有影响。(2) 强化阶段,两组试样均没有显著的屈服现象,直接进入均匀变形阶段,但激光热处理试样抗拉强度高于原始试样。(3) 断裂阶段,激光热处理试样的断裂应变区比原始试样略小。

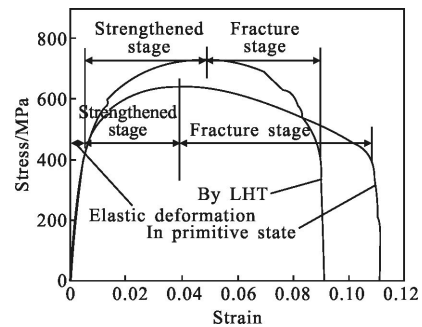


图 2 应力-应变拉伸曲线

Fig.2 Tensile curves of stress-strain

图 2 中实验结果如表 1 所示,延伸率和断面收缩率通过测量拉伸后试样延伸长度与颈缩部位断面收缩量计算得到。与原始试样相比,激光热处理试样

表 1 试样拉伸试验结果

Tab.1 Results of the sample tension tests

Sample states	Primitive state	By LHT
Yield strength R_e /MPa	502.2	519.1
Tensile strength R_m /MPa	644.1	732.3
Section reduction rate Z	66.54%	47.93%
Elongation rate A	11.1%	9.1%

的屈服强度和抗拉强度分别提高了 3.4% 和 13.7%，而激光热处理试样的延伸率与原始试样相比仅降低了 2%，说明激光热处理后试样在提高抗拉强度的同时，能保持试样良好的延伸性能。激光热处理试样断面收缩率比原始试样降低了 18.61%，说明激光热处理提高了焊接接头的均匀变形能力。

2.2 断口形貌

如图 3(a)所示，原始试样断口有明显的颈缩现象，为韧性断口，主要由纤维区、放射区和剪切唇区组成。纤维区断口形貌为密集的等轴韧窝，如图 3(b)所示，其形成机理为空洞的聚集^[7]。空洞在第二相粒子或夹杂物处形成，在滑移作用下逐渐长大，连接其他空洞而形成韧窝断口。放射区断口如图 3(c)所示，由大量撕裂韧窝、少量等轴韧窝和卵形韧窝组成。放射区的韧窝尺寸和深度比纤维区小，这说明放射区韧性有所降低。剪切唇区的断口形貌如图 3(d)所示，在断口上出现蛇形滑动特征。这是因为剪切唇区位于硬化层外部，形成脆性解理断口形貌，表现为解理台阶状花样。

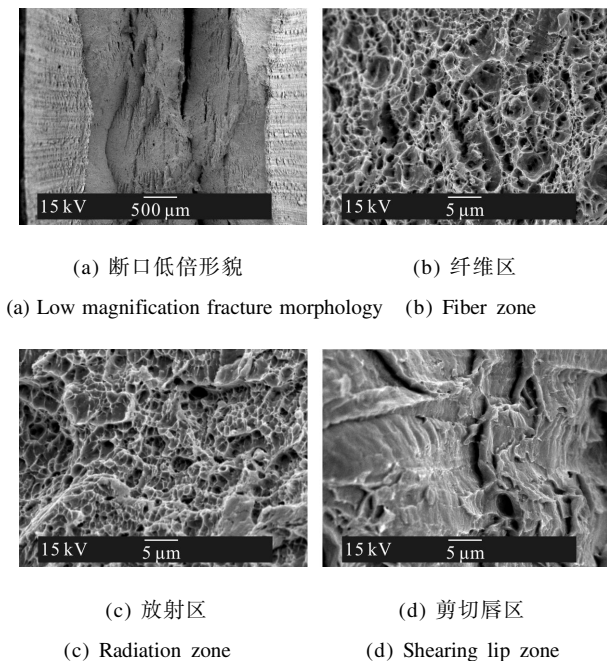


图 3 原始试样断口形貌

Fig.3 Fracture morphologies of the sample in primitive state

如图 4(a)所示，激光热处理试样宏观断口有明显的颈缩现象，断口垂直于拉伸方向，为韧性断裂。纤维区断口为韧窝形貌，如图 4(b)所示，其尺寸大于原始试样，说明激光热处理后试样芯部韧性提高。放

射区的断口形貌如图 4(c)所示，断口形貌由韧窝组成，其尺寸比原始试样大。剪切唇区断口形貌为解理断口，并伴有少量韧窝形貌如图 4(d)所示，这表明其韧性有所提高。但剪切唇区域变小，这说明其塑性变形能力有所下降。这是由于激光热处理后硬化层组织中马氏体含量增加，具有高硬度和高强度特性所致^[8]。

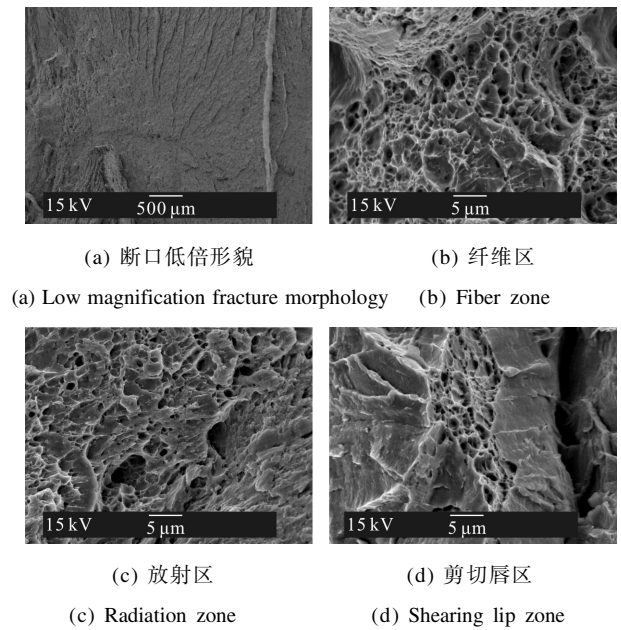


图 4 激光热处理后断口形貌

Fig.4 Fracture morphologies of the sample after LHT

2.3 分析与讨论

原始试样金相组织为针片状马氏体及残余奥氏体和少量铁素体，如图 5(a)所示。激光热处理后金相组织主要为细针状马氏体、隐晶马氏体及残余奥氏体，如图 5(b)所示。这表明激光热处理后，接头表面获得高度细化的组织，这是屈服强度和抗拉强度提高的主要原因^[8-9]。

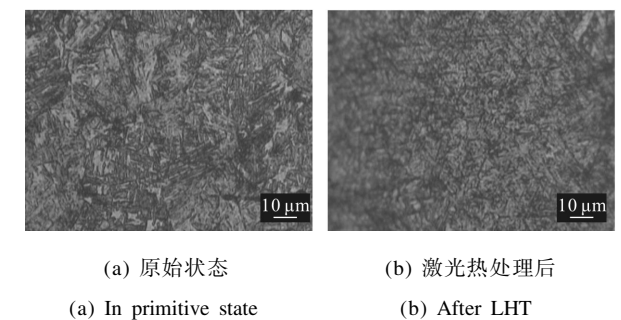
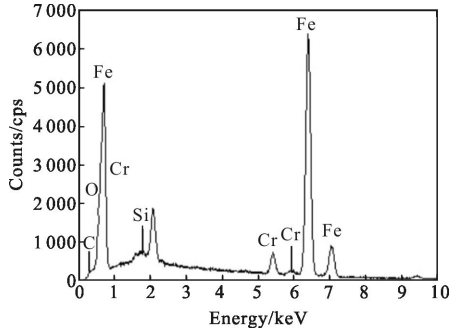


图 5 试样表面金相组织分析

Fig.5 Analysis of metallurgical structures in the sample surface

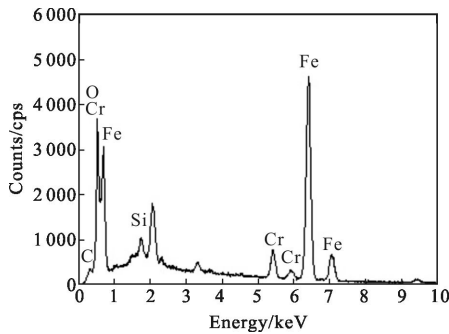
原始焊接接头表面化学元素如图 6(a)所示，其

质量分数为(mass, %):C 0.17、O 0.35、Si 0.17、Cr 4.08、Fe 95.24。经激光热处理后试样表面化学元素质量分数为 (mass, %):C 0.23、O 7.82、Si 0.95、Cr 6.01、Fe 84.69,如图 6(b)所示。由 EDS 分析知,激光热处理后焊接接头表面除了 O 元素有所增加外,其他原子分数变化不大。这表明激光热处理后试样可以保持原子分数原有的韧性。



(a) 原始状态

(a) In primitive state



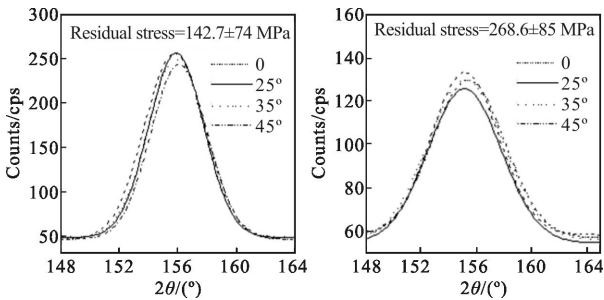
(b) 激光热处理后

(b) After LHT

图 6 试样表面 EDS 分析

Fig.6 EDS analysis of the sample surface

原始试样表面残余应力为 142.7 ± 74 MPa, 表现为拉应力(见图 7(a)),经激光热处理试样的残余应力



(a) 原始状态

(b) 激光热处理后

(a) In primitive state

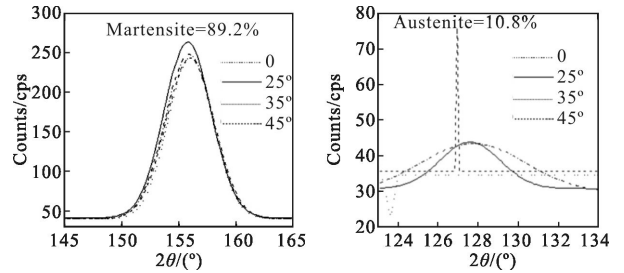
(b) After LHT

图 7 残余应力分析

Fig.7 Analysis of residual stress

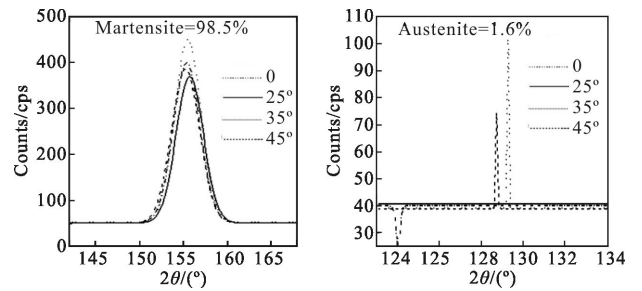
为 -268.6 ± 85 MPa, 表现为压应力(见图 7(b))。压应力的形成可以部分抵消外加载荷, 阻碍表面裂纹的扩展, 是屈服强度和抗拉强度提高的主要因素。

原始试样表面奥氏体含量为 10.8%(见图 8 (a)),经激光热处理后试样表面奥氏体含量降至 1.6%(见图 8(b))。奥氏体是一种韧化相, 拉伸变形过程中的裂纹扩展到此处时, 裂纹扩展路径发生偏转, 扩展速率降低。奥氏体含量的降低在一定程度上降低了接头的断面收缩率。



(a) 原始状态

(a) In primitive state



(b) 激光热处理后

(b) After LHT

图 8 残余奥氏体分析

Fig.8 Analysis of residual austenite

3 结论

原始试样与激光热处理试样的断口均为韧性断裂, 两者延伸率基本上没有变化。激光热处理试样的屈服强度和抗拉强度比原始试样分别提高 3.4% 和 13.7%, 其中晶粒细化和残余压应力的形成是其提高的主要因素。

经激光热处理后试样的残余奥氏体含量有所下降, 导致断面收缩率比原始试样降低 18.61%, 但焊接接头的均匀变形能力得到提高。

参考文献:

[1] Wang Xiaohong, Shi Yijun, Shao Chunyu, et al. Effect of

- high sulfur and high acid value crude oil temperature on corrosion resistance of 1Cr5Mo steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 34(10): 160–164. (in Chinese)
- 王小红, 施宜君, 邵春宇, 等. 高硫高酸值原油温度对1Cr5Mo钢耐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(10): 160–164.
- [2] Fang D. Experimental study on degradation of 1Cr5Mo steel tubes in the coking furnace at super temperature [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 345–346: 1067–1070.
- [3] Yang Banquan, Chen Guangnan. A mechanical model for the quantification of the effect of laser quenching on CTOD in steels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(4): 2180–2185.
- [4] Wang Kun, Meng Mu, Wang Huaming. Effect of heat treatment and laser multi-track overlapping on microstructure of a laser melting deposition TC18 titanium alloy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 521–525. (in Chinese)
- 王昆, 孟牧, 王华明. 热处理及激光多道搭接对激光熔化沉积TC18钛合金组织的影响 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 521–525.
- [5] Yang Lijun, Zhang Hongzhi, Wu Xuefeng, et al. Laser machining technology with the effect of thermal soften and thermal stress[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1038–1043. (in Chinese)
- 杨立军, 张宏志, 吴雪峰, 等. 应用加热软化和应力效应的激光加工技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1038–1043.
- [6] Kong Dejun, Zhang Lei, Song Renguo, et al. Effect of laser quenching on fatigue properties and fracture morphologies of 40CrNiMo high strength steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 11030051–11030057. (in Chinese)
- 孔德军, 张垒, 宋仁国, 等. 激光淬火对40CrNiMo高强度钢疲劳性能与断口形貌的影响 [J]. 中国激光, 2013, 40(11): 11030051–11030057.
- [7] Zhong Qunpeng, Zhao Zihua, Zhang Zheng, et al. Development of "Fractography" and research of fracture micromechanism [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2005 27(3): 358–370. (in Chinese)
- 钟群鹏, 赵子华, 张峥, 等. 断口学的发展及微观断裂机理研究[J]. 机械强度, 2005, 27(3): 358–370.
- [8] Li Jing, Li Jun, He Weifeng, et al. Microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy by laser shock peening with different impacts [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2889–2895. (in Chinese)
- 李靖, 李军, 何卫锋, 等. TC17钛合金激光多次冲击强化后组织和力学性能研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2889–2895.
- [9] Yang Jianxun, Du Xianbin, Li Guangyan, et al. Tension fracture delamination mechanism of 800 MPa grade low carbon bainitic high strength steel plate [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2012, 37(9): 40–43. (in Chinese)
- 杨建勋, 杜显彬, 李广艳, 等. 800MPa级低碳贝氏体高强钢板拉伸断口分层机理[J]. 金属热处理, 2012, 37(9): 40–43.