

激光退火对 1Cr5Mo 钢焊接接头 热拉伸性能的影响

Effect of Laser Annealing on Hot-stretching Properties
of 1Cr5Mo Steel Welded Joints

郭 卫¹,孔德军^{1,2}

(1 常州大学 机械工程学院,江苏 常州 213164;2 常州大学 常州市
模具先进制造高技术重点实验室,江苏 常州 213164)

GUO Wei¹,KONG De-jun^{1,2}

(1 School of Mechanical Engineering,Changzhou University,
Changzhou 213164,Jiangsu,China;2 Changzhou High Technology
Research Key Laboratory of Mould Advanced Manufacturing,
Changzhou University,Changzhou 213164,Jiangsu,China)

摘要: 利用 CO₂ 激光对 1Cr5Mo 耐热钢焊接接头进行退火处理,通过拉伸实验分析温度对激光退火前后试样热拉伸性能的影响。采用扫描电镜观察激光退火前后晶粒变化情况、断裂形式和断口形貌,并通过 X 射线应力仪测定激光退火前后焊接接头表面残余应力状态。结果表明:在 200℃ 时激光退火后试样的屈服强度、抗拉强度和伸长率比原始试样分别提高了 32.5%,22.5% 和 4.6%,而在 300℃ 时激光退火后试样的屈服强度、抗拉强度和伸长率比原始试样仅分别提高了 6.6%,6.5% 和 7.5%;激光退火前后试样拉伸断口均为韧性断口,但激光退火后试样的韧窝尺寸大于原始试样,随着温度升高,韧窝尺寸进一步增大;激光退火后试样表面产生的晶粒细化和残余压应力是热拉伸性能提高的主要因素。

关键词: 激光退火;1Cr5Mo 耐热钢;焊接接头;热拉伸实验

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.000720

中图分类号: TN249;TG115.5⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)02-0115-07

Abstract: The 1Cr5Mo heat-resistant steel welded joint was annealed with CO₂ laser, the effect of temperature on hot-stretching properties of the samples before and after laser annealing was analyzed by using stretching tests. The grain changes, rupture modes and fracture morphologies before and after laser annealing were observed by SEM, and the status of residual stress on the surface of welded joints was measured by using X-ray stress analyzer. The results show that the yield strength, tensile strength and elongation rate of the samples after laser annealing at 200℃ increase by 32.5%, 22.5% and 4.6% than those of the original samples, respectively, while after laser annealing at 300℃, they only increase by 6.6%, 6.5% and 7.5%, respectively; the tensile fracture of the samples before and after laser annealing is tough fracture, but the dimple size of the samples after laser annealing is bigger than that of the original samples, with the increase of temperature, the dimple size increases further; the grain refinement and residual compressive stress generated on the surface of the samples after laser annealing are the main factors of hot-stretching properties improvement.

Key words: laser annealing;1Cr5Mo heat-resistant steel;welded joint;hot-stretching test

1Cr5Mo 耐热钢具有良好的强度和高韧性,能够抵抗石油裂化过程中产生的腐蚀,主要用于石油裂解管、热蒸气管、锅炉等领域^[1-4]。其制作过程一般采用焊接方法,属于局部加热熔化过程,容易产生焊接接头组织的缺陷,是影响管道安全的主要因素之一^[5-6];因此,需要对其焊接接头进行表面改性处理,目前,主要

采用喷丸强化、表面纳米化、超声冲击、碾压、热处理等方法^[7-9]。国内学者对焊接接头的热处理工艺进行了大量研究,杨松等^[10]分析了热处理对局部损伤的影响,获得热处理变形的控制方法;邹德宁等^[11]研究了热处理后焊接接头的力学性能,揭示了焊接接头组织的演变特征;郝亚鑫等^[12]对焊接接头进行热处理,分

析了热处理对析出相尺寸及分布的影响。热处理工艺需要对管道进行退火,但由于管道结构的复杂性,上述的热处理工艺受到限制。与传统的热处理方法相比,激光热处理(Laser Heat Treatment, LHT)通过控制激光方向可以对材料表面任意局部进行处理,利用其高能量改变表面微观结构,产生残余压应力,提高其拉伸性能。叶存冬等^[13]分析了激光热处理对焊接接头疲劳性能的影响,裴峻峰等^[14]研究了激光热处理对应力腐蚀的影响,并对应力腐蚀开裂及其断裂机理进行了分析;师东生^[15]分析了激光热处理工艺参数对微观组织与硬度的影响,获得了提高耐磨性能的机理;而有关激光退火对 1Cr5Mo 钢焊接接头热拉伸性能影响的文献报道甚少。本工作通过 CO₂ 激光对 1Cr5Mo 钢焊接接头进行退火,分析温度对激光退火后焊接接头热拉伸性能的影响。

1 实验

实验材料为退火状态的 1Cr5Mo 耐热钢,其化学成分

(质量分数/%)为 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。钢板厚度为 10mm,采用 X 型坡口,双面焊接,如图 1(a)所示。利用 $\phi 2.5\text{mm}$ 的 H11Cr5Mo 焊丝氩弧焊打底和 $\phi 3.2\text{mm}$ 的 R507 焊条手工焊盖面。激光退火处理在 GLS-IB 型 CO₂ 激光器上进行,采用氮气保护,双面处理,搭接率为 50%,其工艺参数:光斑直径为 4mm,功率为 1.0kW,扫描速率为 15mm/s。激光退火后,利用 VHX-700FC 型超景深三维显微系统分析焊接接头表面显微组织,并采用 D/max 2500PC 型 X 射线衍射仪分析激光退火前后焊接接头的物相组成。残余应力分析在 X350-A 型应力仪上进行,工艺参数:倾斜角 Ψ 分别为 0°, 25°, 35°和 45°,应力常数为 -318MPa/(°),起始角度为 161°~152°,步进速率为 2.0(°)/min。热拉伸实验在 AGS-10KNZ 型拉伸试验机上进行,试样尺寸如图 1(b)所示。在 200℃和 300℃时分别对原始试样和激光退火后试样进行热拉伸实验,拉断后,采用 JSUPRA55 型场发射扫描电镜观察断口形貌,分析激光退火后 1Cr5Mo 耐热钢焊接接头热拉伸断裂机理。

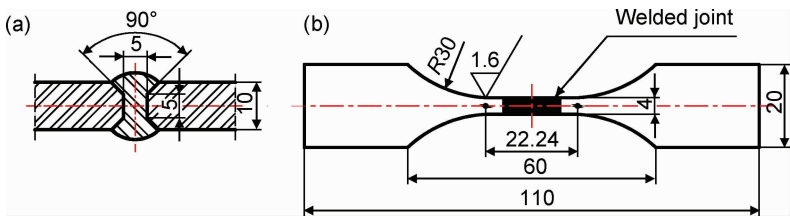


图 1 焊接接头形状(a)与拉伸试样尺寸(b)

Fig. 1 Shape of welded joint (a) and dimension of stretching sample (b)

2 结果分析与讨论

2.1 热拉伸实验结果

图 2 为试样应力-应变拉伸曲线图。在弹性变形阶段,3 组试样的拉伸曲线斜率相差不大,这表明在此阶段激光退火和温度对焊接接头弹性变形基本没有影响。3 组试样均没有明显的屈服现象,直接进入均匀变形阶段。在均匀变形阶段,激光退火后试样抗拉强度明显大于原始试样,300℃时激光退火后试样屈服强度和抗拉强度有所下降,但仍大于 200℃时原始试样屈服强度和抗拉强度,这说明激光退火后焊接接头能够满足更高的高温使用要求。在断裂阶段,200℃时激光退火后试样应变大于原始试样应变,塑性有所增强。在 300℃时应变区间增大,激光退火后试样塑性随着温度升高而有所增加。

表 1 为图 2 中应力-应变曲线数据处理结果,

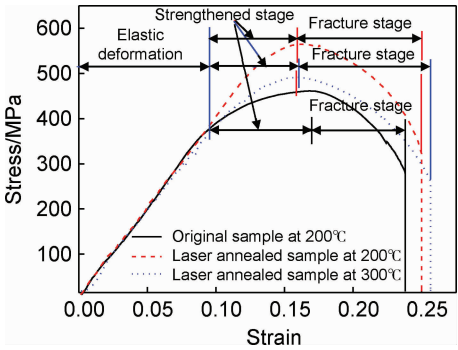


图 2 试样应力-应变拉伸曲线

Fig. 2 Stretching stress-strain curves of samples

200℃时激光退火后试样屈服强度、抗拉强度和伸长率比原始试样分别提高了 32.5%, 22.5%和 4.6%。300℃时激光退火后试样屈服强度和抗拉强度与原始试样在 200℃时相比差别不大,仅提高了 6.6%和 6.5%。随着温度升高,激光退火后试样屈服强度和抗

拉强度有所下降。而伸长率由 200℃时 24.9％提高到 300℃时 25.6％,比原始试样提高了 7.5％,这是由于

温度升高缓解了晶粒间不均匀变形所引起的应力集中,从而塑性有所提高。

表 1 试样拉伸实验结果

Table 1 Results of sample tension tests

Sample state	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Reduction of area/%	Elongation/%
Original sample at 200℃	378	461	48.7	23.8
Laser annealed sample at 200℃	501	565	54.5	24.9
Laser annealed sample at 300℃	403	491	62.2	25.6

2.2 断口形貌分析

在 200℃时原始试样断口全貌如图 3(a)所示,其由纤维区、放射区和剪切唇区组成,为韧性断裂方式。纤维区由大量的等轴小韧窝组成,如图 3(b)所示。放

射区主要由尺寸比纤维区小的等轴韧窝组成,并伴有撕裂棱产生,如图 3(c)所示。剪切唇区由尺寸更小的拉长韧窝组成,如图 3(d)所示。

在 200℃时激光退火后试样断口全貌如图 4(a)所

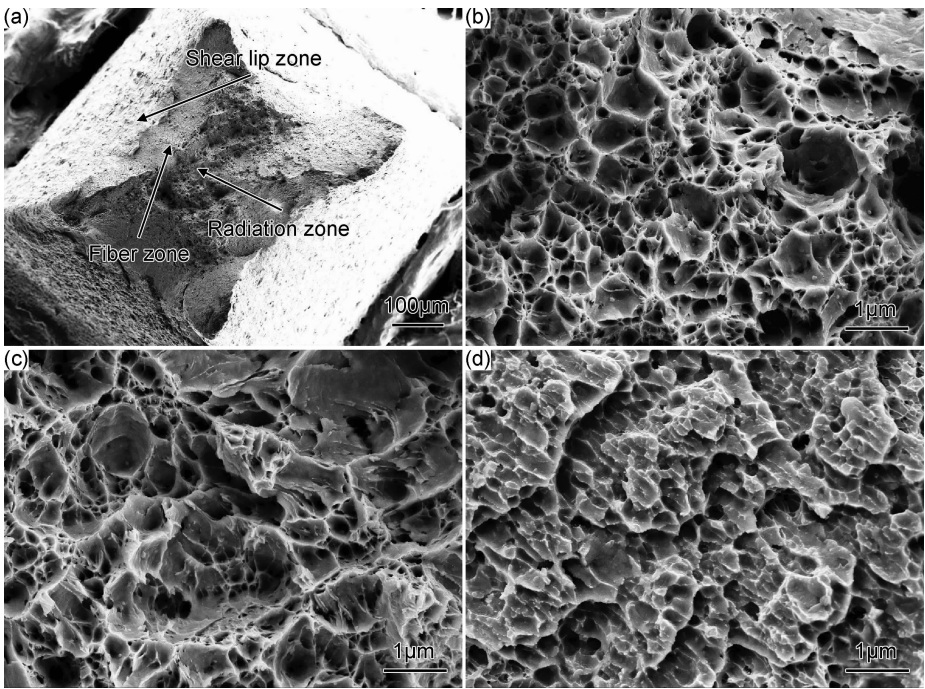


图 3 200℃时原始试样拉伸断口形貌 (a)断口全貌;(b)纤维区;(c)放射区;(d)剪切唇区

Fig. 3 Fracture morphologies of original sample at 200℃

(a)overall morphology of fracture;(b)fiber zone;(c)radiation zone;(d)shear lip zone

示,颈缩比原始试样严重,颈缩面较小,这是由于激光退火后试样裂纹扩展阻力增加,其塑性得到提高的结果。纤维区由大小均匀的等轴韧窝组成,尺寸和深度明显大于原始试样,如图 4(b)所示。放射区主要由等轴韧窝和少量剪切拉长韧窝组成,尺寸小于纤维区,但大于原始试样,如图 4(c)所示。剪切唇区由大量的拉长韧窝组成,尺寸和深度大于原始试样,如图 4(d)所示。

图 5 为 300℃时激光退火后试样断口形貌,颈缩明显,深度大于在 200℃时激光退火的试样,剪切唇区面积有所减小,为典型的韧性断口,如图 5(a)所示。

纤维区断口由等轴韧窝组成,如图 5(b)所示,其尺寸大于 200℃时激光退火的试样,这是由于温度升高时,晶界切变抗力降低,韧窝成核率减小,引起韧窝尺寸增大。放射区由等轴韧窝组成,韧窝尺寸和深度明显大于200℃时激光退火的试样,如图 5(c)所示。与 200℃拉伸时相比,激光退火的试样剪切唇区是由少量等轴韧窝和大量的拉长韧窝组成,韧窝尺寸和深度有所增加,如图 5(d)所示。

2.3 分层断裂分析

在拉伸过程中,3 组试样都出现了不同程度的颈缩,受力由均匀分布的轴向应力作用转变为轴向应

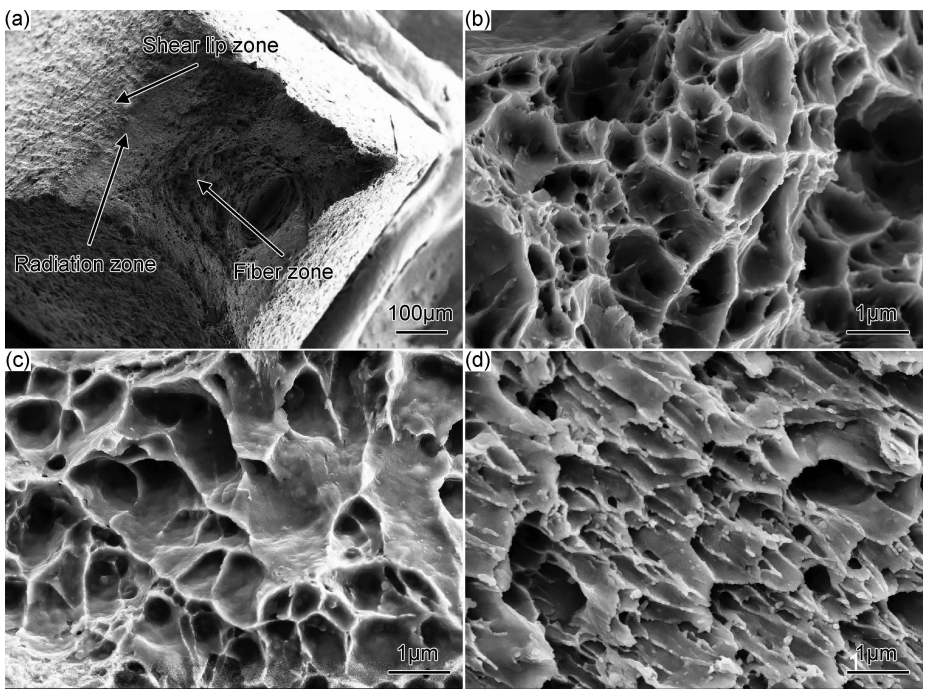


图 4 200℃时激光退火后试样拉伸断口形貌 (a)宏观断口;(b)纤维区;(c)放射区;(d)剪切唇区

Fig. 4 Fracture morphologies of laser annealed sample at 200℃

(a)overall morphology of fracture;(b)fiber zone;(c)radiation zone;(d)shear lip zone

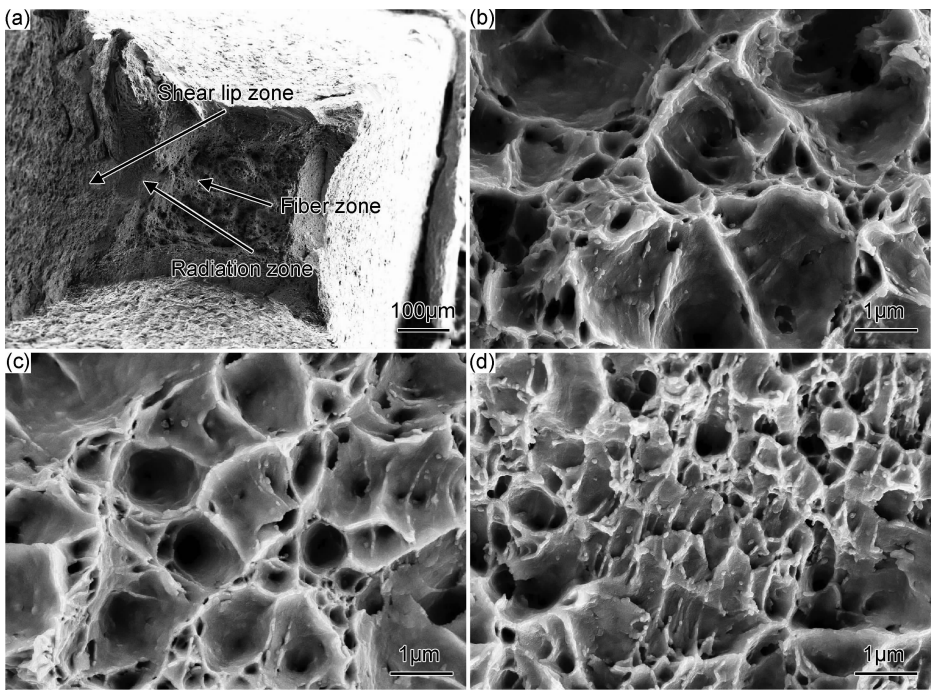


图 5 300℃时激光退火后试样拉伸断口形貌 (a)宏观断口;(b)纤维区;(c)放射区;(d)剪切唇区

Fig. 5 Fracture morphologies of laser annealed sample at 300℃

(a)overall morphology of fracture;(b)fiber zone;(c)radiation zone;(d)shear lip zone

力、径向应力和切向应力的共同作用^[16-17]。颈缩中心处纤维区为最大受力区域,裂纹扩展速率最快,形成分层断裂现象,如图 6 所示。在 200℃时,原始试样分层断裂现象明显,呈台阶状,如图 6(a)所示。激光退火

的试样分层断裂现象有所缓解,其断裂方式得到改善,如图 6(b)所示。当 300℃时,激光退火的试样纤维区也存在“台阶状”分层断裂现象,但其高度低于 200℃时激光退火的试样,如图 6(c)所示。

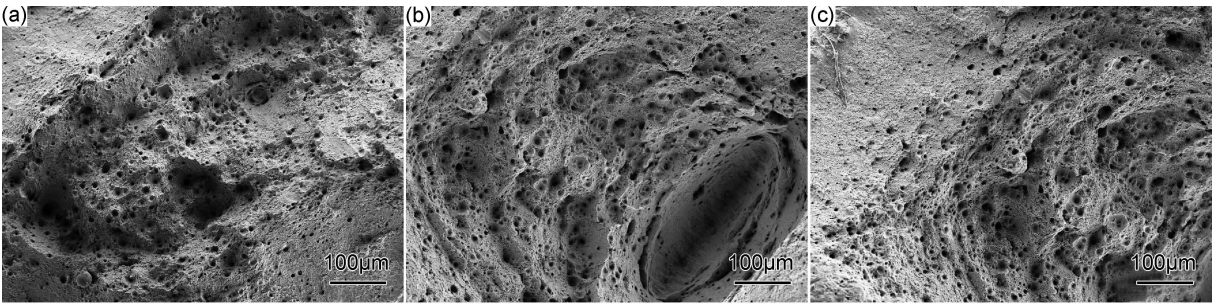


图 6 断口分层断裂形貌 (a)200℃时原始试样;(b)200℃时激光退火的试样;(c)300℃时激光退火的试样
Fig. 6 Morphologies of layered rupture on fractures
(a)original sample at 200℃;(b)laser annealed sample at 200℃;(c)laser annealed sample at 300℃

2.4 机理分析

2.4.1 激光热影响层

原始试样截面存在一些微小的焊接孔洞和微裂纹,如图 7(a)所示,易产生应力集中现象。经激光退火后焊接接头表面形成厚度约为 65µm 的热影响层,无明显的焊接缺陷,如图 7(b)所示,微观缺陷有所减少,组织结构得到改善。

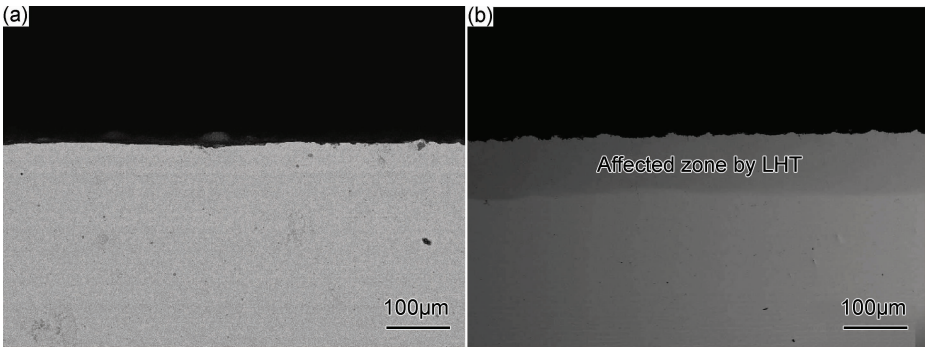


图 7 激光退火前(a)后(b)截面形貌
Fig. 7 Section morphologies of sample before (a) and after (b) laser annealing

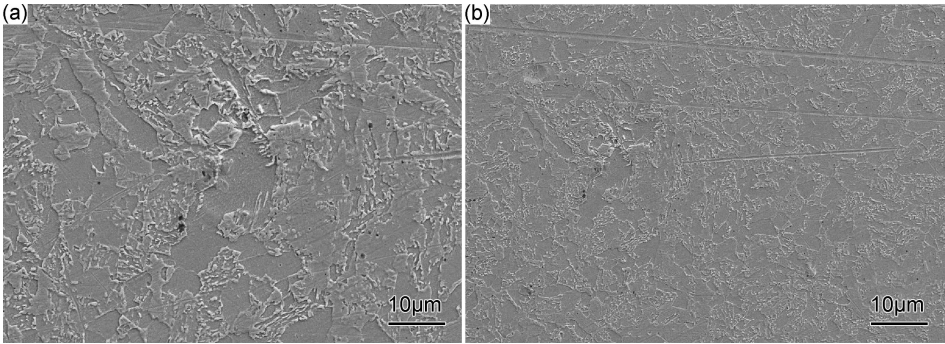


图 8 激光退火前(a)后(b)试样表面晶粒分布
Fig. 8 Grain size distribution of sample surface before (a) and after (b) laser annealing

2.4.3 XRD 分析

原始试样的物相由 α -Fe 组成,而激光退火的试样物相主要由 α -Fe, γ -Fe, MnO_2 , 奥氏体和 Fe_3O_4 等组

2.4.2 晶粒组织

原始试样表面显微组织比较粗大,如图 8(a)所示,经激光退火后显微组织尺寸明显减小,分布均匀,如图 8(b)所示。这是由于激光加热和冷却时间极短,形成较大的相变驱动力,加快了组织成核速率,产生晶粒细化。晶粒细化使变形量分散到其他晶粒,增加了位错运动的阻力,表现出较好的塑性和韧性。

成,如图 9 所示。其中 Fe_3O_4 和 MnO_2 分别为 Fe 和 Mn 原子的氧化物,而面心立方的 γ -Fe 可以转化为体心立方的 α -Fe;因此,激光退火的试样表面没有出现

新的物相,只是出现奥氏体相衍射峰,与原始试样相比,奥氏体含量有所增加。

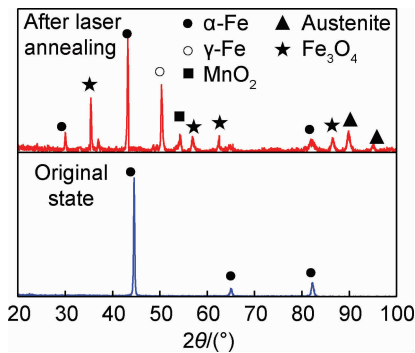


图9 激光退火前后试样表面 XRD 分析

Fig. 9 XRD analysis of sample surfaces before and after laser annealing

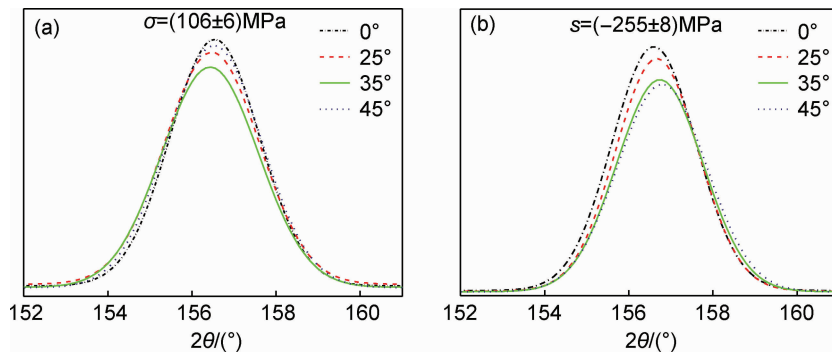


图10 激光退火前(a)后(b)试样表面残余应力

Fig. 10 Residual stress of sample surface before (a) and after (b) laser annealing

(2)在 300℃时,激光退火后试样屈服强度、抗拉强度和伸长率比原始试样分别提高了 6.6%,6.5%和 7.5%,断裂方式得到改善。

(3)激光退火后试样表面形成了晶粒细化和残余压应力层,是提高 1Cr5Mo 耐热钢焊接接头热拉伸性能的主要因素。

参考文献

- [1] 黄少军,刘康林. 退火降温速率对 1Cr5Mo 钢组织及性能的影响[J]. 压力容器, 2014, 31(1): 15-19.
HUANG S J, LIU K L. Effects of cooling rate of annealing treatment on microstructure and properties of 1Cr5Mo steel [J]. Pressure Vessel Technology, 2014, 31(1): 15-19.
- [2] 石晓霞,郭兆成,乔爱云. 1Cr5Mo 合金钢管热处理工艺研究[J]. 包钢科技, 2010, 36(5): 13-15.
SHI X X, GUO Z C, QIAO A Y. Research on heat treatment technology for 1Cr5Mo alloy steel pipes [J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2010, 36(5): 13-15.
- [3] 郭卫,孔德军. 激光热处理对 1Cr5Mo 钢焊接接头慢拉伸性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(8): 203-208.
GUO W, KONG D J. Effects of laser heat treatment on stress

2.4.4 残余应力

激光退火的试样表面残余应力由拉应力 (106 ± 6) MPa (图 10(a)) 转变为压应力 (-255 ± 8) MPa (图 10(b)), 这是由于激光退火区域产生塑性变形, 使焊接形成的残余拉应力得到释放。同时, 激光退火区域外的材料抵抗该区域塑性变形, 从而形成压应力。压应力可以抵消一部分外加载荷, 对已形成的裂纹具有闭合效果^[18], 有利于提高试样的拉伸性能。

3 结论

(1)在 200℃时,激光退火前后试样拉伸断口均为韧性断裂,激光退火后试样屈服强度、抗拉强度和伸长率比原始试样分别提高了 32.5%, 22.5% 和 4.6%。

corrosion cracking behavior of 1Cr5Mo steel welded joint [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(8): 203-208.

- [4] 李秀程,谢振家,王学林,等. 高强度低碳贝氏体钢拉伸断口分离现象及机理研究[J]. 金属学报, 2013, 49(2): 167-174.
LI X C, XIE Z J, WANG X L, et al. Split fracture phenomenon and mechanism in tensile tests of high strength low carbon bainitic steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(2): 167-174.
- [5] 陈嵩. 1Cr5Mo 钢高温应力腐蚀及防护方法的研究现状[J]. 热加工工艺, 2013, 42(12): 29-31.
CHEN S. Research status of high temperature stress corrosion and protective methods for 1Cr5Mo steel [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(12): 29-31.
- [6] 宫鑫. 1Cr5Mo 石油裂化用无缝钢管热处理工艺优化[J]. 包钢科技, 2015, 41(4): 63-64.
GONG X. Heat treatment process optimization for 1Cr5Mo seamless steel tube for petroleum cracking [J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2015, 41(4): 63-64.
- [7] 陈国宏,潘家栋,王家庆,等. 650℃时效 HR3C 耐热钢的显微组织与高温拉伸性能[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(2): 104-109.
CHEN G H, PAN J D, WANG J Q, et al. Microstructure and

- high-temperature tensile properties of HR3C heat-resistant steel after annealing at 650℃ [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(2): 104-109.
- [8] YANG B Q, CHEN G N, ZHANG K, et al. 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.
- [9] ZHAO X H, WANG D P, HUO L X. Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment [J]. Materials & Design, 2011, 32(1): 88-96.
- [10] 杨松, 杨圆明. AP1000 蒸汽发生器环焊缝局部热处理对 U 形管局部损伤的分析及预防[J]. 焊接学报, 2015, 36(6): 90-94.
YANG S, YANG Y M. U-tube local damage analysis and preventable method for AP1000 steam generator during local post weld heat treatment [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(6): 90-94.
- [11] 邹德宁, 韩英, 李姣, 等. 热处理对 2205 双相不锈钢焊接接头力学性能的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 85-89.
ZOU D N, HAN Y, LI J, et al. Influence of heat treatment on mechanical properties of 2205 duplex stainless steel welds [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 85-89.
- [12] 郝亚鑫, 王文, 徐瑞琦, 等. 焊后热处理对 7A04 铝合金水下搅拌摩擦焊接接头组织性能的影响[J]. 材料工程, 2016, 44(6): 70-75.
HAO Y X, WANG W, XU R Q, et al. Effects of post weld heat treatment on microstructures and mechanical properties of submerged friction stir welded 7A04 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(6): 70-75.
- [13] 叶存冬, 孔德军. 激光热处理对 X80 管线钢焊接接头疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(10): 64-69.
YE C D, KONG D J. Effect of laser heat treatment on fatigue resistance of X80 pipeline steel welded joints [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(10): 64-69.
- [14] 裴峻峰, 郭泽亮, 殷舜时, 等. 激光热处理对 1Cr13 井口用钢抗硫化物应力腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(5): 184-190.
- PEI J F, GUO Z L, YIN S S, et al. Effects of laser heat treatment on sulfide stress corrosion resistance of 1Cr13 steel for wellhead equipment [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(5): 184-190.
- [15] 师东生. 激光热处理工艺对高速钢轧辊微观组织与硬度特性的影响[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
SHI D S. Effects of laser heat treatment on the microstructures and hardness characteristics of high speed steel rolls [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [16] 彭胜, 彭其春, 范丹萍, 等. 耐候钢 Q450NQR1 拉伸试验断口分层原因分析[J]. 物理测试, 2014, 32(1): 36-39.
PENG S, PENG Q C, FAN D P, et al. Cause of layered fracture of weathering steel Q450NQR1 during tensile test [J]. Physics Examination and Testing, 2014, 32(1): 36-39.
- [17] 刘会杰, 刘向前, 胡瑛莹. 搅拌摩擦焊缝类型对接头拉伸性能及断裂特征的影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 29-34.
LIU H J, LIU X Q, HU Y Y. Effects of weld characteristics on tensile properties and fracture morphologies of friction stir welded joints [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 29-34.
- [18] 吴永忠, 孔德军, 龙丹, 等. 激光冲击对 X70 管线钢焊缝盐雾腐蚀的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 101-104.
WU Y Z, KONG D J, LONG D, et al. Effects of laser shock wave on salt spray corrosion of X70 pipeline steel welded lines [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(12): 101-104.
-
- 基金项目:**江苏省研究生科研创新计划项目(CXLX14-1098); 江苏省科协首席专家(工程师)项目(2013-216)
收稿日期:2015-06-08;**修订日期:**2017-08-12
通讯作者:孔德军(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事材料表面改性处理方面的研究, 联系地址: 江苏省常州市常州大学机械工程学院(213164), E-mail: kong-dejun@163.com

(本文责编:寇凤梅)