

激光冲击强化 316L 不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能

李玉琴¹, 孟长军², 王学德¹, 罗思海¹, 徐伟胜¹

¹空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038;

²西安文理学院生物与环境工程学院, 陕西 西安 710065

摘要 采用激光冲击强化的方法改善了 316L 不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能, 分析了焊接接头表层的微观结构和残余应力分布。结果表明, 激光冲击强化使焊接接头表层残余拉应力显著减小, 提高了焊接接头的电极电位, 阻碍了腐蚀介质向材料的扩散; 同时, 激光冲击强化细化了基体晶粒, 形成了大量的滑移带和变形孪晶组织, 延缓了应力腐蚀裂纹的扩展, 增强了 316L 不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能。

关键词 激光技术; 316L 不锈钢; 焊接接头; 耐腐蚀; 微观组织; 残余应力

中图分类号 TG665 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.061402

Corrosion Resistance Property of 316L Stainless Steel Welding Joints Treated by Laser Shock Peening

Li Yuqin¹, Meng Changjun², Wang Xuede¹, Luo Sihai¹, Xu Weisheng¹

¹Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China;

²School of Biological and Environmental Engineering, Xi'an University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract The corrosion resistance property of 316L stainless steel welding joints is improved with the laser shock peening method. The microstructure and the residual stress distribution on the welding joint surface are analyzed. The results show that the residual tensile stress on the welding joint surface treated by laser shock peening is significantly reduced. The electrode potential of the welding joints increases and the diffusion of corrosive media is hindered. Moreover, as a result of laser shock peening, the matrix grain is refined and a large number of slip bands and deformation twins form, which makes the extension of stress corrosion cracks be delayed and improves the corrosion resistance property of 316L stainless steel welding joints.

Key words laser technique; 316L stainless steel; welding joint; corrosion resistance; microstructure; residual stress

OCIS codes 140.3460; 140.3390; 160.3900

1 引言

316L 不锈钢具有优良的耐腐蚀性能, 被广泛用于石油、化工、原子能、宇航航行等领域^[1], 但 316L 不锈钢的导热系数仅为低碳钢的 1/3, 线膨胀系数为低碳钢的 1.3 倍左右, 因此焊接过程中容易在焊缝中形成较大的拉伸应力^[2], 从而形成应力腐蚀裂纹与断裂故障。焊接结构的应力腐蚀开裂大部分从表面开始。热处理、过载处理、捶击法、温差拉伸法、喷丸、超声喷丸、镀膜等^[3-4]传统表面处理方法能有效消除部件焊缝区的残余拉应力, 从而改善材料抗应力腐蚀性能^[5-8]。然而受焊接工艺、焊接材料的形状以及涂层等条件制约, 传统表面处理方法增大材料腐蚀抗力的效果有限。激光冲击强化(LSP)可以细化材料表层组织, 改善材料表面性能, 其原理如下: 具有高峰值功率密度(大于 10^9 W/cm²)的短脉冲激光辐照金属表面, 金属表面涂覆的保护层吸收激光能量并发生爆炸性气化蒸发, 产生大于 1 GPa 的高压等离子体冲击波, 冲击波的力效应使

收稿日期: 2016-12-14; 收到修改稿日期: 2017-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(51305456)

作者简介: 李玉琴(1982—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事激光冲击强化技术方面的研究。E-mail: yuqin511@163.com

表层材料微观组织发生变化,在较厚的材料上残留压应力,从而显著增强金属材料抗疲劳^[9-14]、耐磨损^[15-16]和抗应力腐蚀^[17]等性能。

国内外研究验证了经过激光冲击后,不锈钢焊接构件的抗应力腐蚀性能明显提升,但焊接接头不同部位的微观组织变化和残余应力分布对耐腐蚀性能的影响还有待进一步研究。本文通过 316L 不锈钢焊接接头在激光冲击强化前后的变化,研究了激光冲击强化 316L 不锈钢焊接件的微观结构和残余应力对耐腐蚀性能的影响。

2 实验与测试方法

采用 316L 奥氏体不锈钢作为实验材料,其主要化学成分见表 1。

表 1 316L 不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel (mass fraction, %)

Element	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Fe
Content	0.02	17.0	10.3	2.41	1.51	0.51	0.03	0.003	Bal.

为了对比研究不同焊接工艺对材料性能和微观组织的影响,设置了两种不同的表面处理状态,分别是焊接试样表面和焊接后经激光冲击强化处理后的试样表面。

激光冲击强化采用 Nd:YAG 固体激光器,激光波长为 1064 nm,激光能量为 4 J,脉宽为 20 ns,功率密度为 4.42 GW/cm²,激光冲击次数为 2,约束层为水,吸收保护层为铝箔,搭接率大于 60%。

取焊接试样及焊接后经过激光冲击强化的试样进行电化学测试实验,其尺寸及激光冲击强化区域如图 1 所示。

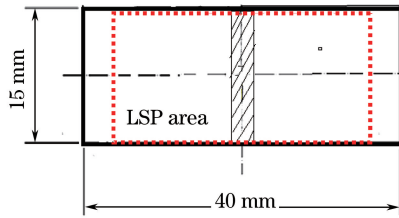


图 1 试件尺寸和激光冲击强化区域

Fig. 1 Specimen size and LSP area

焊接试样表层的相分析采用日本理学生产的 MFS-7000 型 X 射线衍射仪(XRD),测试参数如下:Cu 靶辐射,步长 0.02°,扫描速度 6 (°)/min,积分时间 2 s,管压 40 kV,管流 40 mA,衍射角扫描范围 20°~90°。接头微观组织形貌采用日本 Hitachi 公司生产的 S4800 扫描电镜(SEM)观察。表层残余应力分布采用邯郸爱斯特公司生产的 X-350A 型 X 射线残余应力测试仪进行测试分析,测试参数如下:衍射晶面(220)晶面,应力常数 -601 MPa,衍射角扫描范围 121°~138°,扫描步距 0.10 s⁻¹,计数时间 0.5 s。

电化学腐蚀采用美国 Ametek 公司生产的 PARSTAT-2273 电化学工作站进行测试,采用三电极体系,其中试样为工作电极,试样取 1 cm² 面积暴露在外,用石蜡封闭其他部位。进行动电位极化曲线测试试验时,扫描速率为 1 mV/s,腐蚀介质采用质量分数为 5% 的 NaCl 中性水溶液,温度为(30±1) °C。

3 实验结果及分析

3.1 电化学分析

316L 不锈钢焊接接头激光冲击强化前后的极化曲线如图 2 所示,其中 I 为腐蚀电流密度。由图可知,没有经过激光冲击强化的 316L 不锈钢焊接接头的腐蚀电流密度为 1.53×10^{-6} A/cm²,焊接后经过激光冲击强化的接头腐蚀电流密度为 1.194×10^{-6} A/cm²,较前者降低了 22%,而且激光冲击强化使得焊接接头表面的电极电位提高,改变了不锈钢表面耐腐蚀特性,从而显著增强了不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能。

3.2 相分析

316L 不锈钢焊接接头激光冲击强化前后的 X 射线衍射图谱如图 3 所示,其中 2θ 为衍射角。从图中可以看出,316L 不锈钢焊接接头主要为奥氏体相,而采用功率密度为 4.42 GW/cm² 的激光冲击强化后,不锈

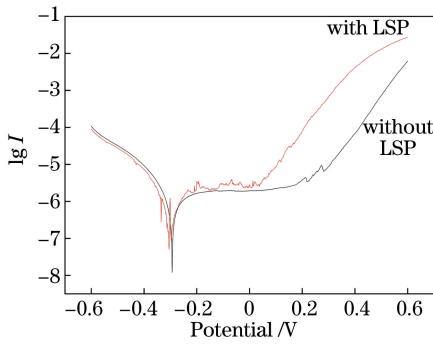


图2 极化曲线

Fig. 2 Polarization curves

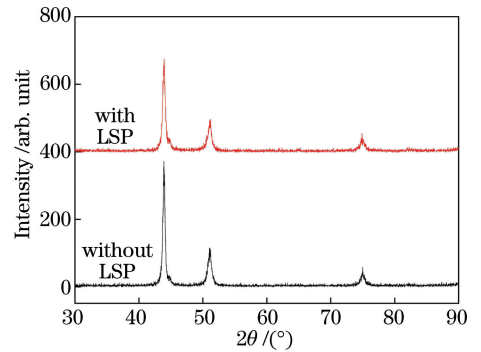


图3 焊接接头的X射线衍射图

Fig. 3 XRD patterns of welding joint

钢焊接接头的布拉格衍射峰下降,晶粒碎化,但没有新峰出现,未发生相变。

由于奥氏体不锈钢耐腐蚀的机理在单相组织,因此在合金中加入大量的Cr元素,以提高材料的电极电位。激光冲击强化316L不锈钢焊接接头,没有发生相变,保持了奥氏体的单相组织,减少了电化学腐蚀数量。由此可见,焊接后激光冲击强化316L奥氏体不锈钢相组成未发生改变,其良好的耐腐蚀性能未受影响。

3.3 微观组织对耐腐蚀性能的影响

316L不锈钢焊接接头激光冲击强化前后不同区域的SEM图如图4所示。激光冲击强化前的焊接接头焊缝区的扫描电镜图如图4(a)所示,焊缝区为较大的树枝晶,晶粒较大。激光冲击强化后的焊接接头焊缝区的扫描电镜图如图4(b)所示,可见一个厚度为6 μm左右的剧烈塑性变形区,晶粒呈纤维状,且沿冲击方向被压缩,组织变得均匀致密;沿深度方向的枝晶组织被打碎,晶粒细化,在剧烈的塑性变形中,残余拉应力释放,应力集中减小。

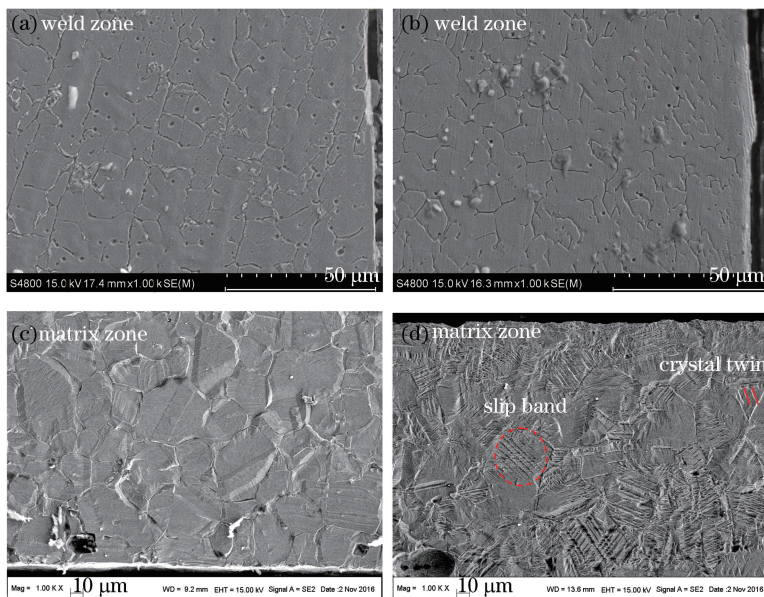


图4 焊接接头激光冲击强化(a)(c)前、(b)(d)后的扫描电镜图

Fig. 4 SEM images of welding joint (a)(c) before and (b)(d) after LSP

激光冲击强化前的焊接接头基体区组织为等轴晶,如图4(c)所示。激光冲击强化后的焊接接头基体区组织如图4(d)所示,可见晶粒细化,基体表层组织致密,形成了大量的变形孪晶和滑移带。激光冲击强化使得焊接接头的焊缝和基体区的组织更加均匀,减小了应力集中,延缓了应力腐蚀裂纹的扩展,对耐腐蚀性能有一定的影响。

3.4 残余应力对电化学性能的影响

316L不锈钢焊接接头激光冲击强化前后表层残余应力测试位置及结果如图5、6所示。由图可知,未进

行激光冲击强化的 316L 不锈钢焊接件表面存在高达 330 MPa 的残余拉应力,局部应力的集中使得材料表面化学稳定性变差、电极电位降低,内应力(特别是拉应力)破坏了金属表面的保护膜,形成裂纹,裂纹成为阳极,其他无应力区域为阴极,与腐蚀溶液一起共同构成腐蚀电池并加速腐蚀。经过激光冲击后,316L 不锈钢焊接接头的残余应力降低到 150 MPa 以下,材料表面残余拉应力急剧减小,焊接接头局部应力梯度降低,进而延缓了试样表面钝化膜的破裂,阻碍了腐蚀介质向材料的扩散,使得腐蚀点坑不易形成。另一方面,焊接接头组织的细化减小了表面的应力集中,延缓了裂纹的扩展,对增强抗应力腐蚀性能有一定作用。

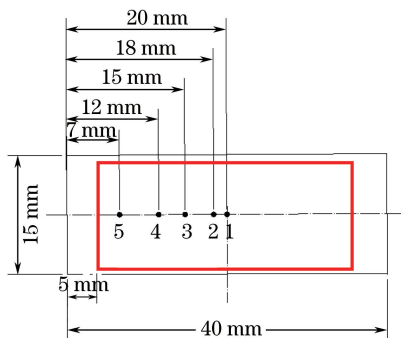


图 5 残余应力测试点分布图

Fig. 5 Residual stress distribution at test points

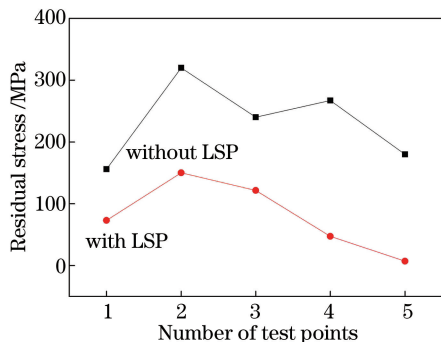


图 6 焊接接头表面激光冲击强化前后残余应力分布图

Fig. 6 Residual stress distribution on welding joint surface before and after LSP

4 结 论

采用 4.42 GW/cm^2 的纳秒脉冲激光冲击 316L 不锈钢焊接接头,研究了激光冲击强化后焊接件的微观结构和残余应力对耐腐蚀性能的影响,得到以下结论:

- 1) 激光冲击强化处理后的腐蚀电流较处理前的降低了 22%,激光冲击强化改善了不锈钢焊接接头的耐电化学腐蚀性能;
- 2) 316L 不锈钢焊接接头激光冲击强化前后均未发生相变,但激光冲击强化使得焊接接头的枝晶组织被打碎细化,同时基体晶粒得到细化,延缓了裂纹的扩展,减小了焊接接头组织之间的差异,对材料的耐腐蚀性能有一定的影响;
- 3) 激光冲击强化使得材料表面残余拉应力下降,分布趋向均匀,减小了表面的应力集中,延缓了试样表面钝化膜的破裂,阻碍了腐蚀介质向材料的扩散,不易形成腐蚀点坑,从而使得 316L 不锈钢焊接接头抗应力腐蚀性能得到增强。

参 考 文 献

- [1] Shi Jihong, Wu Baolin, Liu Gang. Study on corrosion property of 316L stainless steel with nanocrystalline surface[J]. Journal of Materials Engineering, 2005(10): 42-46.
石继红, 武保林, 刘刚. 316L 不锈钢表面纳米化后腐蚀性能研究[J]. 材料工程, 2005(10): 42-46.
- [2] Chen Jing, Lin Xin, Wang Tao, *et al.* The hot cracking mechanism of 316L stainless steel cladding in rapid laser forming process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(3): 183-186.
陈静, 林鑫, 王涛, 等. 316L 不锈钢激光快速成形过程中熔覆层的热裂机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(3): 183-186.
- [3] Wang Jianhua, Lu Hao. Some discussions on principle of causing and relieving welding residual stress[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(3): 75-79.
汪建华, 陆皓. 焊接残余应力形成机制与消除原理若干问题的讨论[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 75-79.
- [4] Chen Xiaodong. Methods for dispelling weld residual stress in pressure vessel[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(6): 15-17.

- 陈晓冬. 压力容器焊接残余应力的消除对策[J]. 材料工程, 2003(6): 15-17.
- [5] Zhou Jianzhong, Liu Huixia, Feng Aixing, *et al.* Advances on the application of laser-induced shock wave in metal processing[J]. Applied Laser, 2005, 25(1): 27-31.
周建忠, 刘会霞, 冯爱新, 等. 激光冲击波技术用于材料加工的研究进展[J]. 应用激光, 2005, 25(1): 27-31.
- [6] Zhang Y K, You J A, Lu J Z, *et al.* Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B magnesium alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(24): 3947-3953.
- [7] Miebara E, Nishimura A, Tsukada T. Method of an ultra-short femtosecond pulse and KW class high average-power laser for preventing cold-worked stress corrosion cracking in iron steels and alloyed steel including stainless steels: US0048867[P]. 2006-03-09.
- [8] Sharma A K, Thareja R K. Plume dynamics of laser-produced aluminum plasma in ambient nitrogen[J]. Applied Surface Science, 2005, 243(1-4): 68-75.
- [9] Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong, *et al.* Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2197-2201.
李伟, 何卫锋, 李应红, 等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2197-2201.
- [10] He Weifeng, Li Yinghong, Li Qipeng, *et al.* Vibration fatigue performance and strengthening mechanism of TC6 titanium alloy by laser shock peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(8): 1643-1648.
何卫锋, 李应红, 李启鹏, 等. LSP 提高 TC6 钛合金振动疲劳性能及强化机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(8): 1643-1648.
- [11] Li Yuqin, He Weifeng, Li Yinghong, *et al.* Effects on technology of aluminizing after laser shock processing in 1Cr11Ni2W2MoV steel[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0703005.
李玉琴, 何卫锋, 李应红, 等. 1Cr11Ni2W2MoV 钢激光冲击强化后渗铝工艺研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0703005.
- [12] He Weifeng, Zhang Jin, Yang Zhuojun, *et al.* Fatigue properties research of titanium alloy repaired by laser cladding and laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1103008.
何卫锋, 张金, 杨卓君, 等. 激光冲击强化钛合金熔覆修复试件疲劳性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1103008.
- [13] Zhang Qinglai, Wang Rong, Zhang Bingxin, *et al.* Effect of laser shock processing on mechanical properties and mesostructures of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303001.
张青来, 王荣, 张冰昕, 等. 激光冲击强化对 AZ31 镁合金力学性能和组织结构的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303001.
- [14] Su Chun, Zhou Jianzhong, Huang Shu, *et al.* Influence of laser shock processing on fatigue properties of 6061-T6 aluminum alloy TIG welded joints[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 061403.
苏纯, 周建忠, 黄舒, 等. 激光冲击强化对 6061-T6 铝合金 TIG 焊接接头疲劳性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 061403.
- [15] Yan Hong, Hua Yinqun, Chen Ruifang, *et al.* Study on the tribological and wear behavior of FeNi alloy treated by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(S1): 364-367.
颜红, 花银群, 陈瑞芳, 等. 激光冲击强化铁镍合金摩擦磨损性能的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 364-367.
- [16] Wang Hao, Huang Yihui, Zhang Wenwu, *et al.* Experimental study of tensile and wear resistance properties of ZK60 magnesium alloy treated by laser shock peening[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101406.
王浩, 黄亿辉, 张文武, 等. 激光冲击强化 ZK60 镁合金拉伸和耐磨性能实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101406.
- [17] Ma Bang, Zhang Jin, Chen Zhimin. Effect of laser shock processing on residual stress of strain steel welded joints[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(8): 089001.
马榜, 张金, 陈志敏. 激光冲击对不锈钢焊接接头残余应力场的影响[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(8): 089001.