

## 搭接率对 AISI202 焊接接头激光冲击应力分布的影响

钱绍祥<sup>1,2</sup>, 殷苏民<sup>2</sup>, 张飞霞<sup>1</sup>, 张志凤<sup>1</sup>

(1. 镇江市高等专科学校, 镇江 212003; 2. 江苏大学, 镇江 212003)

**摘要:** **目的** 研究光斑搭接率对激光冲击处理后残余应力分布的影响。**方法** 采用不同的光斑搭接率对 AISI202 不锈钢焊接接头进行激光冲击处理, 利用 X 射线衍射法测定激光冲击强化后的残余应力。**结果** 随着光斑搭接率的增加, 残余应力场得到增强, 并且应力分布更加均匀。搭接率由 50% 增加到 80%, 平均横向残余压应力增加了 20%, 波动减少了 30%; 平均纵向残余压应力增加了 30%, 波动减少了 13%。**结论** 提高光斑搭接率可以优化激光冲击处理后焊接接头的应力分布。

**关键词:** 激光冲击处理; 搭接率; 焊接接头; 残余应力

**中图分类号:** TG156.99; TG40

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2013)06-0015-03

## Effects of Overlapping Rate on Stress Distribution of AISI202 Welding Joint by Laser Shock Processing

QIAN Shao-xiang<sup>1,2</sup>, YIN Su-min<sup>2</sup>, ZHANG Fei-xia<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-feng<sup>1</sup>

(1. Zhenjiang College, Zhenjiang 212003, China; 2. Jiangsu University, Zhenjiang 212003, China)

**ABSTRACT: Objective** The effects of the overlapping rate of laser spots on the residual stress distribution after laser shock processing (LSP) were investigated. **Methods** The surface of AISI202 stainless steel welding joint was processed by LSP with different overlapping rates of laser spots. The residual stress of welding joint treated by LSP was determined by the X-ray diffraction method. **Results** The residual stress was enhanced and its distribution became more uniform when the overlapping rate increased. As the overlapping rate increased from 50% to 80%, the average of landscape orientation residual compressive stress  $\sigma_y$  was improved by 20% and its fluctuation was decreased by 30%, while the average of longitudinal direction residual compressive stress  $\sigma_x$  was improved by 30% and its fluctuation was decreased by 13%. **Conclusion** The distribution of the residual stress of welding joint treated by LSP can be optimized by increasing the overlapping rate.

**KEY WORDS:** laser shock processing (LSP); overlapping rate; welding joint; residual stress

焊接中, 在形成焊缝的同时, 焊接接头附近区域会存在残余应力, 造成应力集中、焊接缺陷等问题, 从而影响焊接接头的性能, 因此焊后处理主要以控制和调整应力集中及显微缺陷为主, 以提高焊接质量。工程

上常采用焊后热处理、超声冲击、温差拉伸法、爆炸法等工艺<sup>[1-5]</sup>, 但这些工艺应用在一些大型或复杂结构中存在局限性。激光冲击处理是一种新型的表面改性技术, 可通过调整激光的辐射角度和光斑大小, 对冲击

收稿日期: 2013-06-12; 修订日期: 2013-08-01

Received: 2013-06-12; Revised: 2013-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179076); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXLX13-640)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51179076) and the Jiangsu Province Ordinary University Postgraduate Research and Innovation Program (CXLX13-640)

作者简介: 钱绍祥(1977—), 男, 江苏人, 博士生, 讲师, 主要研究方向为激光冲击强化。

Biography: Qian Shao-xiang(1977—), Male, from Jiangsu, Doctoral student, Lecturer, Research focus: laser shock processing.

区域进行应变强化,从而提高材料的疲劳强度<sup>[6-8]</sup>。目前,激光冲击处理焊接接头对接头力学性能的影响研究不多<sup>[9-13]</sup>,尤其是光斑搭接率对激光冲击强化的影响缺乏深入研究。在激光冲击强化处理过程中,需保证一定的功率密度,光斑尺寸受到一定的限制,单个光斑不可能对整个焊接区域进行一次性冲击强化处理,必须采用一定的光斑搭接处理工艺。光斑搭接率公式为 $p=(1-L/D)\times 100\%$ (其中 $p$ 为搭接率, $L$ 为两相邻光斑中心的距离, $D$ 为光斑直径),搭接率的大小对激光冲击区域的应力场分布会产生影响。文中则对这种影响进行相关研究,对提高焊接接头的疲劳性能具有重要的现实意义。

# 1 实验

## 1.1 试样制备

试样为尺寸 100 mm×50 mm×1 mm 的 AISI202 奥氏体不锈钢板,其化学成分见表 1<sup>[14]</sup>,此种不锈钢广泛应用于石油、化工、原子能、海洋开发等行业的焊接结构中。

表 1 AISI202 不锈钢化学成分

Tab.1 Chemical composition of AISI202 stainless steel					
元素	C	Si	Mn	P	S
质量分数/%	≤0.15	≤1.00	7.5~10.0	≤0.06	≤0.03
元素	Ni	Cr	N	Fe	
质量分数/%	4.0~6.0	17.0~19.0	≤0.25	余量	

激光焊机采用 STARWELD250 型 Nd:YAG 固体激光器,激光波长为 1.064 μm,最大平均功率为 250 W。焊接时,沿两块板长度方向进行对接。为了尽可能避免焊接缺陷,提高焊接接头性能,焊接前,试样的焊接部位需经“细砂纸打磨—丙酮清洗—酒精擦洗干净—风干”处理。焊接过程中,采用琴键式夹具夹紧焊件,以减少焊接过程中的薄板变形,侧向加氩气进行保护,流量为 12 L/min。焊接的具体工艺参数见表 2。

表 2 脉冲激光焊接工艺参数

Tab.2 Welding parameters of pulse laser welding				
离焦量	速度	电压	脉宽	频率
/mm	/(mm·min <sup>-1</sup> )	/V	/ms	/Hz
-1	400	445	3	30

## 1.2 激光冲击处理方法

激光冲击处理采用大功率 Nd:glass 激光冲击强化装置,其工艺参数见表 3。选择水为约束层,厚度 1~2 mm,表面涂 86-1 黑漆,厚度约为 0.1 mm。在其他激光冲击处理工艺参数相同的情况下,对 3 片相同的焊接试样进行单面激光冲击,光斑搭接率分别为 0, 50%, 80%。

表 3 激光冲击处理工艺参数

Tab.3 Technological parameters of laser shock processing

参数	数值	参数	数值
脉冲能量/J	25	输出不稳定性	≤±10%
峰值功率/W	≥1×10 <sup>9</sup>	ASE 系统能量/mJ	15
脉冲宽度/ns	23	光斑直径/mm	7

## 1.3 残余应力测试

采用 X-350A 型 X 射线应力仪对试样进行应力分析,使用侧倾固定  $\psi$  法,铬靶 K $\alpha$  特征辐射,其测试参数如下:管电压 22 kV,管电流 6 mA,准直管直径  $\phi$ 2 mm,时间常数 1.5 s,  $2\theta$  扫描步进角 0.1°,  $2\theta$  范围 132°~126°,  $\psi$  角 0°, 24.2°, 35.3°, 45°, 衍射晶面(220),应力常数-601 MPa/(°)。

不同光斑搭接率下的应力测试点位置如图 1 所示。

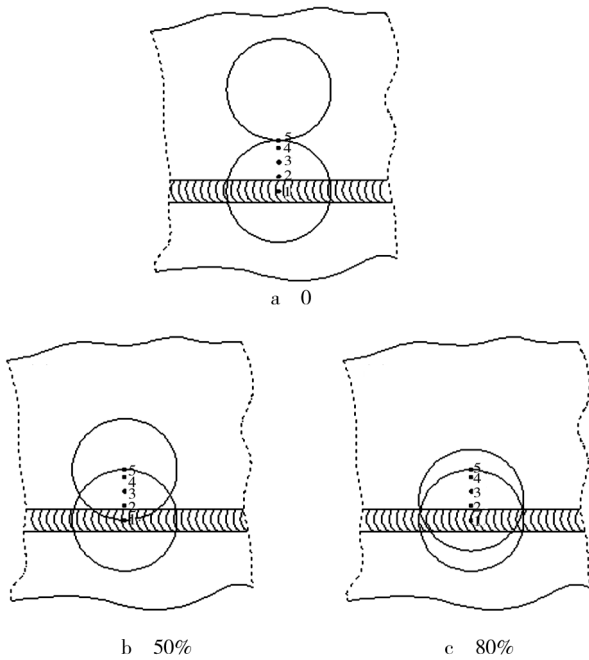


图 1 不同搭接率下的应力测试点

Fig.1 Stress test points with different overlapping rates

# 2 结果与分析

横向残余应力  $\sigma_y$  和纵向残余应力  $\sigma_x$  的测定值见表 4。当光斑搭接率为 0 时,激光冲击区域全表现为残余压应力的分布,残余应力最大值并没有出现在光斑中心区域,所测点的最大横向残余应力为-411 MPa,最大纵向残余应力为-358 MPa,平均横向残余应力为-232.2 MPa,平均纵向残余应力为-318.4 MPa。此外还发现,冲击区域应力波动比较大,波动最大的是横向残余应力,幅度为 344 MPa。这与文献[15]中提到的圆形光斑的“残余应力洞”现象比较严重是一致的。

表 4 焊接接头残余应力分布

Tab. 4 Residual stress distribution of welding joints

搭接率	残余应力	1	2	3	4	5
0	$\sigma_y/\text{MPa}$	-67	-254	-411	-297	-132
	$\sigma_x/\text{MPa}$	-283	-341	-358	-300	-310
50%	$\sigma_y/\text{MPa}$	-293	-360	-511	-320	-380
	$\sigma_x/\text{MPa}$	-346	-382	-395	-342	-325
80%	$\sigma_y/\text{MPa}$	-402	-450	-572	-432	-405
	$\sigma_x/\text{MPa}$	-463	-490	-496	-471	-450

当光斑搭接率为 50% 时,所测点的最大横向残余应力为-511 MPa,最大纵向残余应力为-395 MPa,平均横向残余应力为-372.8 MPa,平均纵向残余应力为-358 MPa。与光斑搭接率为 0 时相比,残余压应力得到提高,应力波动现象有所缓和,波动最大的是横向残余应力,幅度为 218 MPa。

当光斑搭接率为 80% 时,所测点的最大横向残余应力为-572 MPa,最大纵向残余应力为-496 MPa,平均横向残余应力为-452.2 MPa,平均纵向残余应力为-474 MPa,应力分布比较均匀,波动趋于平稳。

通过分析测试数据可知,光斑搭接率为 0 时,残余应力的分布极不均匀。这一方面与原始状态下焊接接头区域存在复杂的残余应力分布有关;另一方面,在激光冲击作用下,材料表面在应力波加载过程中,由于边界效应发生了反向塑性变形,影响了中心部位的残余应力场分布,使得冲击区域存在较大的应力突变,从而影响焊接构件的抗疲劳性能。随着光斑搭接率由 50% 增加到 80%,平均横向残余应力增加了 20%,波动减少了 30%;平均纵向残余应力增加了 30%,波动减少了 13%。冲击区域的残余应力场得到增强,并且残余应力分布更加均匀,应力突变减少,焊接接头的力学性能得以提高。

3 结论

对 AISI202 不锈钢焊接接头进行激光搭接冲击,可以获得残余压应力场。提高光斑搭接率可以增强残余压应力场,减少激光冲击处理区域的应力突变,优化应力场的分布,提高焊接接头的疲劳性能。

参考文献

[1] 叶雄林,朱有利,马丽丽,等. 超声冲击处理改善 22SiMn2TiB 钢焊接接头的疲劳性能[J]. 机械工程学,2009,45(8): 283—286.  
YE Xiong-lin, ZHU You-li, MA Li-li, et al. Fatigue Performance Improvement of 22SiMn2TiB Steel Welded Joint by

Ultrasonic Impact Treatment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 283—286.  
[2] 王春雨,李磊,韩飞,等. 表面镀铝对 22MnB5 钢薄板焊接性的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(6): 37—41.  
WANG Chun-yu, LI Lei, HAN Fei, et al. Effect of Surface Hot-dipping Al on Welding of 22MnB5 Sheet [J]. Surface Technology, 2012, 41(6): 37—41.  
[3] 慕伟意,李争显,杜继红,等. 镁合金的应用及其表面处理研究进展[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 86—91.  
MU Wei-yi, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Application and Surface Treatment Research Progress of Magnesium Alloys [J]. Surface Technology, 2011, 40(2): 86—91.  
[4] 符浩,刘希林,卢海,等. 钛合金焊接接头残余应力的消除方法[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 713—716.  
FU Hao, LIU Xi-lin, LU Hai, et al. Relieving Residual Stress of Titanium Alloy Welding Joints [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 713—716.  
[5] 黄加强,万正权,卞如冈,等. 高强度钢焊接接头超声冲击效果对比试验研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(10): 1164—1171.  
HUANG Jia-qiang, WAN Zheng-quan, BIAN Ru-gang, et al. Comparative Experiment on the Effects of Ultrasonic Impact Treatment on Butt-weld of High Tensile Strength Steel [J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(10): 1164—1171.  
[6] 韩莉,姜伟. 1Cr18Ni9Ti 激光表面强化工艺的研究[J]. 表面技术, 2008, 37(1): 62—63.  
HAN Li, JIANG Wei. Study on the Laser Surface Strengthen Process of 1Cr18Ni9Ti [J]. Surface Technology, 2008, 37(1): 62—63.  
[7] HATAMLEH O. A Comprehensive Investigation on the Effects of Laser and Shot Peening on Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded AA 2195 Joints [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31: 974—988.  
[8] SANO Y, MASAKI K, GUSHI T, et al. Improvement in Fatigue Performance of Friction Stir Welded A6061-T6 Aluminum Alloy by Laser Peening without Coating [J]. Materials and Design, 2012, 36: 809—814.  
[9] 邹世坤,王健,王华明. 激光冲击处理焊接接头力学性能的影响(I) [J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 79—81.  
ZOU Shi-kun, WANG Jian, WANG Hua-ming. The Effects of Laser Shock Processing on Mechanical Properties of Welded Joints (I) [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 79—81.  
[10] 周磊,汪诚,周留成,等. 激光冲击表面强化对焊接接头力学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2010, 23(5): 41—44.  
ZHOU Lei, WANG Cheng, ZHOU Liu-cheng, et al. The Effect of Laser Shock Surface Processing on Mechanical Properties of Welded Joints [J]. China Surface Engineering, 2010, 23(5): 41—44.

加,腐蚀加重。随着冲蚀的继续进行,在  $90^\circ$  冲蚀角的条件下,固体颗粒的切削作用较低,但其冲击作用增强,因此腐蚀产物局部发生脱落,裸露出新的基体,并形成冲蚀剥落坑(图 4d 中箭头所指)。剥落坑的存在使液体在材料表面形成局部湍流,改变了固体颗粒的冲蚀角度,在一定程度上加剧了材料的冲蚀。

同时,在冲刷腐蚀过程中,腐蚀产物膜的局部开裂,形成小孔。孔内金属呈局部活化状态(电位较低),为阳极,孔外为阴极,从而形成大阴极、小阳极的活化钝化电池,孔内发生阳极溶解( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ),孔外则发生阴极还原反应( $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ ),此过程造成孔内金属阳离子浓度增大。为保持电中性,孔外的  $\text{Cl}^-$  由于具有很强的穿透性<sup>[6]</sup>,能穿过腐蚀产物,并与孔内的  $\text{Fe}^{2+}$  等反应,形成高浓度的  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_2$  的水解降低了孔内的 pH 值,促进孔内加速溶解,最终形成点蚀,如图 5 所示。

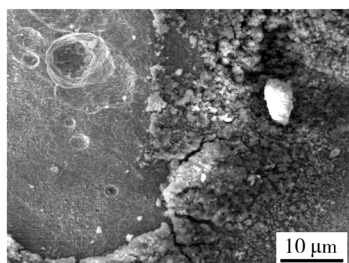


图 5 N80 钢在 7% NaCl 浆料中的点蚀形貌

Fig. 5 Pitting morphology on the surface of the N80 steel in 7% NaCl solution

### 3 结论

1) N80 钢在不同浓度 NaCl 浆料中的腐蚀产物均为  $\text{FeO}$  及  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 氧化腐蚀为主要的腐蚀机理。

2) 固体粒子的冲蚀破坏了材料表面钝化膜,加速了 N80 钢的腐蚀速率。

3) 随着 NaCl 浓度的提高, N80 钢的腐蚀速率加快,当 NaCl 质量浓度超过 7% 时,出现点蚀。

### 参考文献

- [1] MSDSEN B W. Measurement of Erosion-corrosion Synergism with a Slurry Wear Test Apparatus [J]. Wear, 1988, 123 (2): 127—142.
- [2] 邢建东,高义民,张国赏. 不锈钢与高碳钢的冲刷腐蚀磨损试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(5): 469—473.  
XING Jian-dong, GAO Yi-min, ZHANG Guo-shang. Investigation to Erosion-corrosion Behavior of Stainless Steel and High Carbon Steel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(5): 469—473.
- [3] 李涌泉,田进. pH 值对 N80 钢固液两相冲刷腐蚀的影响 [J]. 表面技术, 2013, 42(5): 29—31.  
LI Yong-quan, TIAN Jin. Influence of pH on Erosion-corrosion of N80 Steel in Fluids with Solid Particles [J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 29—31.
- [4] NISHIMURA T, KATAYAMA H, NODA K, et al. Electrochemical Behavior of Rust Formed on Carbon Steel in a Wet/Dry Environment Containing Chloride Ions [J]. Corrosion, 2000, 56(9): 935—941.
- [5] 高丽丽. Mg-11Li-3Al-0.5RE 合金在酸性 NaCl 溶液中腐蚀特性研究 [J]. 表面技术, 2008, 37(2): 4—7.  
GAO Li-li. Study on Corrosion Characteristic of Mg-11Li-3Al-0.5RE Alloy in Acidic Solution of NaCl [J]. Surface Technology, 2008, 37(2): 4—7.
- [6] 许淳淳. A3 钢在碱性 NaCl 体系中闭塞电池腐蚀的研究 [J]. 北京化工大学学报, 2000(2): 52—55.  
XU Chun-chun. Study of Occluded Cell Corrosion of A3 Steel in Alkali NaCl Solution [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2000(2): 52—55.
- [11] COSTA J M, FERREIRA J M, CAPELA C. Fracture Toughness of the Heat Affected Zone on Nd-YAG Laser Welded Joints [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16: 1245—1251.
- [12] BORREGO L P, PIRES J T B, COSTA J M, et al. Fatigue Behaviour of Laser Repairing Welded Joints [J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14: 1586—1593.
- [13] ZHANG L, ZHANG Y K, LU J Z, et al. Effects of Laser Shock Processing on Electrochemical Corrosion Resistance of AN-SI304 Stainless Steel Weldments after Cavitation Erosion [J]. Corrosion Science, 2013, 66: 5—13.
- [14] 齐达,李晶,董力,等. 200 系列不锈钢耐腐蚀性能研究 [J]. 钢铁钒钛, 2010, 31(2): 72—75.  
QI Da, LI Jing, DONG Li, et al. Study on Corrosion Resistance of 200 Series Stainless Steel [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2010, 31(2): 72—75.
- [15] 胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 76—81.  
HU Yong-xiang. Research on the Numerical Simulation and Impact Effects of Laser Shock Processing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008: 76—81.

(上接第 17 页)