

激光冲击 316L 不锈钢焊接件的模拟分析与试验研究

卢海飞, 鲁金忠, 张文泉, 罗开玉

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 采用 ABAQUS 有限元分析软件, 建立了一种“焊接+激光冲击强化(LSP)”应力分布模型, 研究了不同能量 LSP 对 316L 不锈钢氩弧焊缝区域应力分布及应变的影响。研究表明, 由该模型模拟得到的残余应力分布与试验结果一致。LSP 在焊缝区域表面诱导出残余压应力层, 消除了焊接热影响引起的残余拉应力; 随着激光脉冲能量的增大, 激光冲击诱导的残余压应力以及压应力层厚度增加, 但增加幅度减小; 焊接件表面应变峰值随着激光脉冲能量的增加而增大。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 有限元分析; 氩弧焊; 残余应力分布; 应变

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.101411

Simulation Analysis and Experimental Study of 316L Stainless Steel Weldments Processed by Laser Shock Peening

Lu Haifei, Lu Jinzhong, Zhang Wenquan, Luo Kaiyu

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract A stress distribution model of "welding + laser shock peening (LSP)" is established by using the ABAQUS finite element analysis software, and the effect of LSP with different pulse energies on the stress distribution and strain in the welding zones of 316L stainless steels processed by the argon-arc welding is studied. The study results show that the residual stress distribution simulated by this model is similar to the experimental result. LSP can induce a residual compressive stress layer in the welding zone to eliminate the residual tensile stress induced by the welding thermal influence. With the increase of laser pulse energy, the residual compressive stress and the depth of residual compressive stress layer increase, but the increase becomes smaller. The peak value of strain on the weldment surface increases with the increase of laser pulse energy.

Key words laser technique; laser shock peening; finite element analysis; argon-arc welding; residual stress distribution; strain

OCIS codes 140.3390; 350.3390

1 引言

由于焊接过程中局部的迅速升温 and 冷却, 金属焊接结构内部残留的残余应力使得焊接结构容易出现开裂、变形等现象, 降低了焊接结构件的疲劳寿命和强度, 直接影响焊接结构件的质量和性能^[1-3]。消除焊接残余应力的措施主要有退火消除法^[4]、锤击消除法^[5]、振动消除法以及机械喷丸处理^[6]等。退火处理是热处理消除焊接残余应力的主要方法之一, 温度越高、保温时间越长, 残余应力的消除效果就会越好, 但是在这个过

收稿日期: 2017-06-02; **收到修改稿日期:** 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(51575242)、中国博士后特别资助基金(2015T80504)、江苏省自然科学基金(BK20140012, BK20151341, BE2016148)、江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(2014ZBZZ015)、江苏省高校自然科学基金(14KJA460002)

作者简介: 卢海飞(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光表面改性技术方面的研究。E-mail: luhaiweifight@163.com

导师简介: 鲁金忠(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光冲击波非传统制造技术方面的研究。

E-mail: jzlu@ujs.edu.cn(通信联系人)

程中,焊接件表面容易发生氧化而影响其表面性能。锤击消除法、振动消除法和机械喷丸处理引起的应变较小,很难将焊接残余应力完全消除。激光冲击强化(LSP)作为一种新颖的表面处理工艺,能够在金属和合金表层产生残余压应力以及较高的位错密度,从而有效减小或消除焊接件表面的残余拉应力,并获得较大深度的压应力层,有效提高金属构件疲劳性能^[7-10]。

LSP能显著改善金属材料的疲劳性能,其已经被应用于航天航空领域关键零部件的处理,并取得了显著的效果^[11-12]。周建忠等^[13]研究了LSP对6061-T6铝合金氩弧焊焊接接头疲劳性能的影响,发现LSP处理后铝合金焊接接头疲劳性能得到了显著增强。鲁金忠等^[14]研究发现,LSP改变了TC4钛合金电子束焊缝残余应力的分布,使焊缝区产生了高残余压应力;经过激光冲击和机械喷丸复合工艺处理后,Ti6Al4V焊缝表面残余应力得到明显的改变,并且次表面层的残余应力随着深度的增加而增大,在距表面20~30 μm处出现最大残余压应力值^[15]。这些研究主要着重于LSP在焊缝区域诱导的残余应力分布,但关于焊接工艺参数和冲击强化参数的匹配和适应问题的研究鲜有报道。

本文以316L不锈钢焊接件为研究对象,采用非线性有限元分析软件建立了一种“焊接+激光冲击强化”应力分布模型,对316L不锈钢氩弧焊及LSP不锈钢焊缝残余应力进行了数值建模分析,研究了脉冲能量对316L不锈钢焊接件残余应力/应变的影响规律,并与试验数据进行对比;研究和分析了激光冲击前后焊接件表面的残余应变,为LSP不锈钢焊缝工艺参数的优化和选择提供了依据。

2 316L 不锈钢焊接过程和激光冲击过程的模拟

选取316L不锈钢板作为氩弧焊焊接材料,对两块长、宽、厚分别为100,53,3 mm的板材进行氩弧拼接焊。将焊接后的板材线切割成图1所示的激光冲击试样。所采用316L不锈钢的泊松比为0.3,弹性模量为195.6 GPa,热膨胀系数为 $17.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,导热系数为 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,比热容为 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。316L不锈钢氩弧焊采用的是椭圆移动热源加热并进行温度场求解,然后将得到的节点温度作为体载荷进行热力耦合分析以获得焊接应力场,将焊接应力作为初始应力状态进行LSP模拟。

2.1 焊接过程的有限元模拟

采用ABAQUS 6.13软件进行焊接模拟,模拟采用的DC3D8类型单元共有8个节点,每个节点有一个温度自由度用于稳态热和瞬态热分析。为了同时满足计算精度和效率,温度变化明显的焊缝和热影响区域采用密集网格划分,其他区域采用稀疏网格,如图1所示。焊接时通过加热斑点将热能传给焊件,加热斑点上呈现中心多、边缘少的类高斯热量分布,即

$$Q(r) = \frac{3\eta UI}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right), \quad (1)$$

式中 η 为焊热效率,取0.8; U 为焊接电压; I 为焊接电流; R 为电弧热源有效加热半径; r 为焊件上表面至热源光点中心的距离。利用Fortran语言编写子程序作为加载方式,将其导入到ABAQUS软件编写模型中进行模拟焊接;为了实现双面焊接,试样上下表面同时加载热源。设定焊接速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,焊接时间为7 s,初始环境温度为 $20 \text{ } ^\circ\text{C}$,将温度场计算结果导入ABAQUS软件隐式静态分析模块以分析焊接区域应力场。

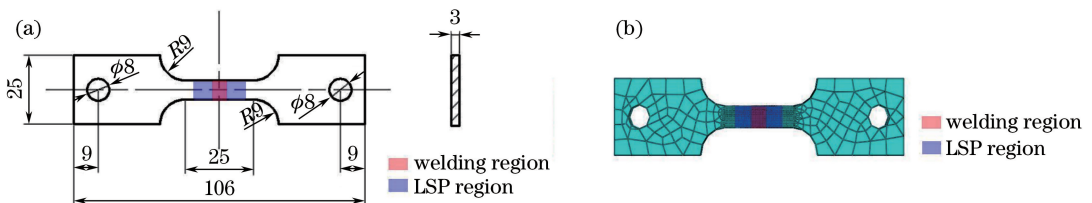


图1 (a)拉伸试样尺寸图;(b)焊接件网格划分图

Fig. 1 (a) Dimensional diagram of tensile specimen; (b) mesh graph of weldment

2.2 激光冲击过程的有限元模拟

将热力耦合分析获得的焊接残余应力场作为LSP的初始应力状态,以进行双面LSP模拟。LSP过程中等离子体爆炸产生的超高速冲击波作用于材料表面的时间只有几十纳秒,采用显式动态积分算法来模拟

激光冲击波的动态传递,经多次优化后显式求解时间设为 6000 ns,以精确获得焊接区域内部的动力学响应。激光脉冲压力分布如图 2 所示,可以发现,激光光斑能量呈高斯分布,从光斑中心沿半径向边缘逐渐衰减。脉冲激光脉宽设为 10~20 ns,激光诱导的冲击波持续时间约为激光脉宽的 2~3 倍以上,即 30~60 ns。

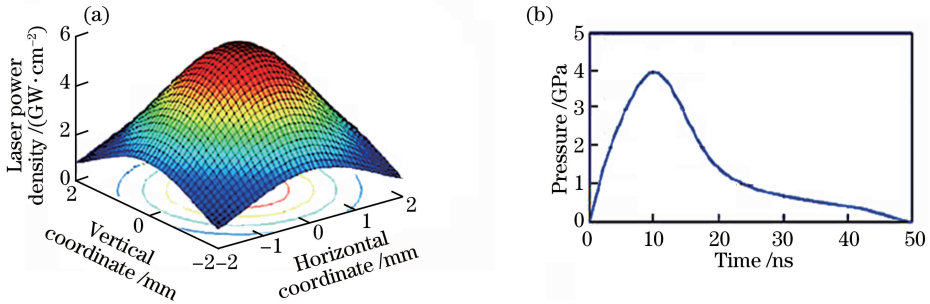


图 2 激光脉冲压力分布图。(a)空间分布;(b)压力-时间曲线

Fig. 2 Distribution maps of laser pulse pressure. (a) Spatial distribution; (b) pressure-time curve

根据 Fabbro 等^[16]的研究可知,可以用三角斜坡曲线代替高斯曲线。在约束模型下,根据激光冲击波传播的一维理想弹塑性流体力学模型^[17]可知,激光冲击波峰值压力公式为

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}, \quad (2)$$

式中 P_{\max} 为激光脉冲产生的峰值压力; α 为激光作用下基体能量转变为冲击波压力的系数,其值为 0.1~0.2; Z 为基体与约束层合成的冲击波声阻抗,定义为 $2/Z = 1/Z_{\text{target}} + 1/Z_{\text{water}}$,其中 Z_{target} 为基体对冲击波的声阻抗, Z_{water} 为约束层对冲击波的声阻抗; I_0 为入射激光功率密度,定义为 $I_0 = 4E/(\pi d^2 \tau)$,其中 τ 为脉冲宽度, E 为脉冲能量, d 为光斑直径。

3 结果与分析

3.1 316L 不锈钢焊接热传导的模拟分析

316L 不锈钢焊接模拟参数与实际焊接参数相同。选择 0, 2, 4, 5, 6, 7 s 共 6 个时间点来观察焊接件温度场云图的变化,结果如图 3 所示。可以看到, 0 s 时,从试样上端开始进行焊接; 2 s 时,试样上边缘部分温度大幅提升,且温度由热源中心向四周呈椭圆状辐射,焊接件表面平均温度约为 500 °C; 4 s 时,焊接件表面平均温度约为 800 °C,焊接热源沿着试样中心线方向移动,周围区域的温度明显低于热源经过的区域温度,且热源前方出现密集的等温线,温度梯度较大; 5 s 时,热源中心基本处于试样中心位置,热源后方区域温度明显高于热源前方区域,且温度分布更均匀,焊接件表面平均温度约为 1100 °C; 6 s 时,整个热源经过的区域温

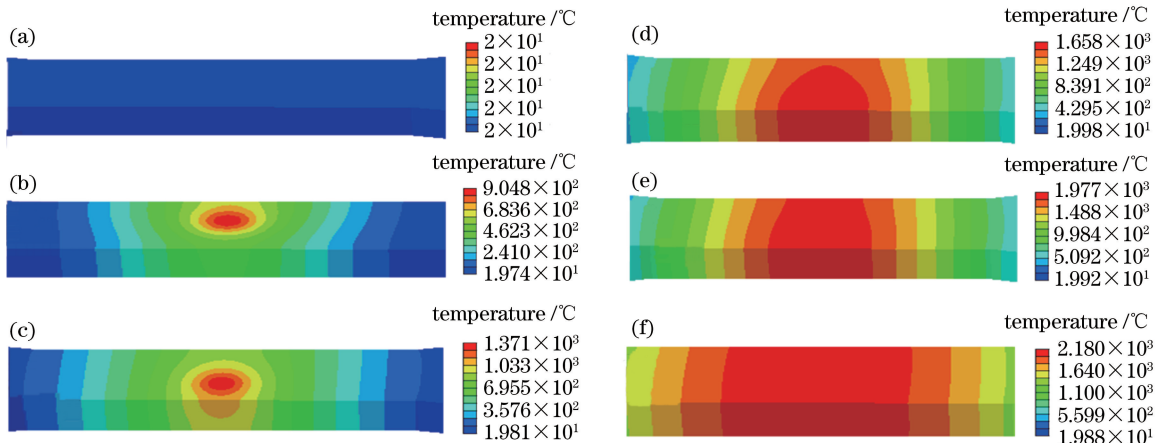


图 3 不同时刻的温度场云图。(a) 0 s;(b) 2 s;(c) 4 s;(d) 5 s;(e) 6 s;(f) 7 s

Fig. 3 Cloud diagrams of temperature fields at different moments. (a) 0 s; (b) 2 s; (c) 4 s; (d) 5 s; (e) 6 s; (f) 7 s

度分布基本均匀,焊接件表面平均温度约为 1500 °C;7 s 时,焊缝区的温度分布较 6 s 时更加均匀,热源经过整个焊缝区域,焊缝处于同一个等温线,温度维持在 1900 °C 左右,这与 316L 不锈钢的熔点相吻合。

3.2 316L 不锈钢焊接件的焊接应力模拟结果分析

不锈钢焊接应力场涉及到热/力效应,首先对温度场进行求解,将得到的节点温度作为体载荷加载到焊接件应力分析中以得到焊接后的应力场。应力场分析主要沿三个方向进行,分别是平行焊缝、垂直焊缝和厚度方向。根据温度场的分析,焊缝及热影响区(HAZ)的表面温度梯度较大,当热源到达该区域时,材料会发生瞬间熔化,体积受热产生膨胀,但又受到周围较冷区域产生的约束而形成弹性热应力;当热源离开后,材料迅速冷却收缩,此时周围区域又对其进行约束,最终焊缝区和 HAZ 因热效应呈现拉应力状态。

316L 不锈钢焊接模拟的焊接应力分布如图 4 所示。图 4(a)所示为焊接件整体的应力分布图,可以看到,整个焊缝区域呈红色,即应力分布为拉应力。由图 4(b)可以看出,应力分布与实际焊缝截面各个区域的组织结构相对应,即焊缝区域应力分布图与金相图基本吻合。由图 4(c)可以看出,靠近上下表面的残余拉应力区域较宽,中心拉应力区域相对较窄,这与采用双面焊接方式相符合;整个焊缝区域可以分为焊接区域、HAZ 与基体部分,焊接区域残余拉应力值较高,HAZ 呈现残余拉应力状态,但拉应力数值较低,基体区域靠近热影响区的部分残余拉应力接近为 0,而周围区域呈现压应力状态,这也与实际焊接结果相符合。

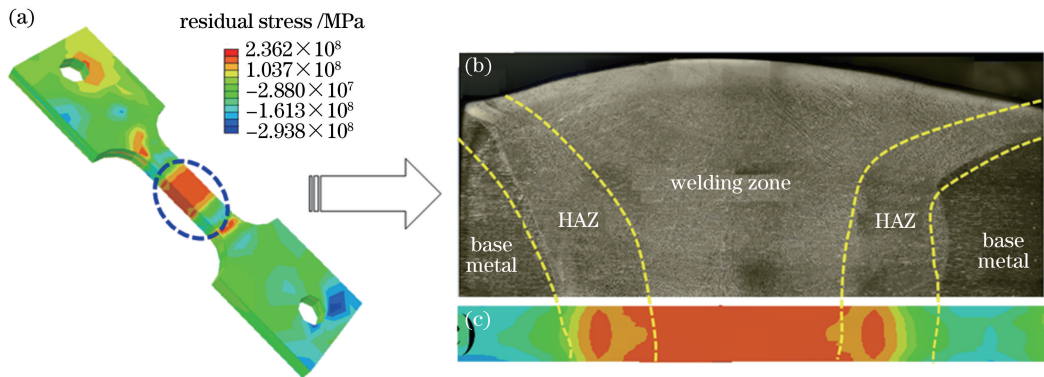


图 4 焊接件的(a)整体应力分布图,(b)截面金相图和(c)截面应力分布图

Fig. 4 (a) Overall stress distribution diagram, (b) cross-sectional metallographic diagram, and (c) cross-sectional stress distribution diagram of weldment

焊接件表面垂直焊缝方向的应力分布如图 5 所示,由图 5(a)的焊接模拟结果可以看出,焊接试样整个焊缝区域的应力分布可以分为焊接区、HAZ 与基体区,焊接区和 HAZ 的长度分别约为 7 mm 和 2 mm;焊接区、HAZ 和基体区的残余拉应力值约为 173,91,0 MPa。结合图 5(a)、(b)可知,激光冲击前焊接区域表面残余应力的试验结果与模拟结果大体接近,焊接区残余拉应力试验数值约为 161 MPa,宽度约为 5 mm;HAZ 的残余拉应力试验数值约为 80 MPa,宽度约为 2 mm。

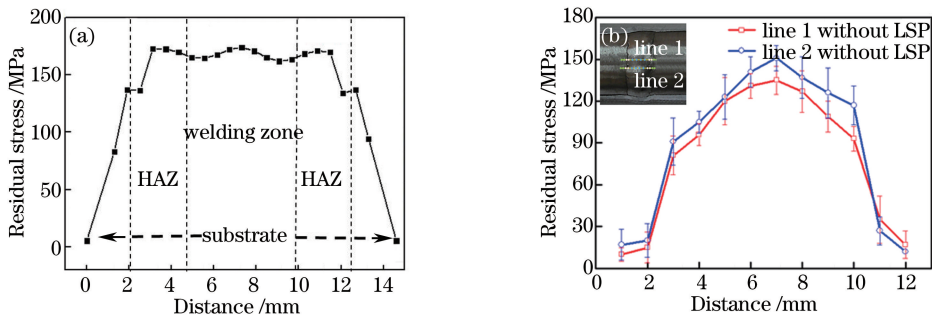


图 5 焊接件表面应力分布。(a)模拟结果;(b)试验结果

Fig. 5 Stress distributions on weldment surface. (a) Simulated result; (b) experimental result

3.3 激光冲击 316L 不锈钢焊接件的模拟结果分析

将焊接残余应力场作为冲击波加载前的预载荷,对 316L 不锈钢焊接区域进行 LSP 并分析冲击诱导的

应力分布。采用 3,6,9 J 的激光脉冲能量对焊接件进行激光冲击模拟,激光光斑搭接率为 50%,模拟结果如图 6 所示。可以看出,LSP 在焊接件表面诱导出残余应力层,且焊接件内部的残余拉应力分布得到改善,随着激光脉冲能量的提高,焊接件的应力变化越明显。在焊接件表面以及截面取两条路径,结合具体应力数值研究不同能量激光冲击对焊接件应力分布的影响。

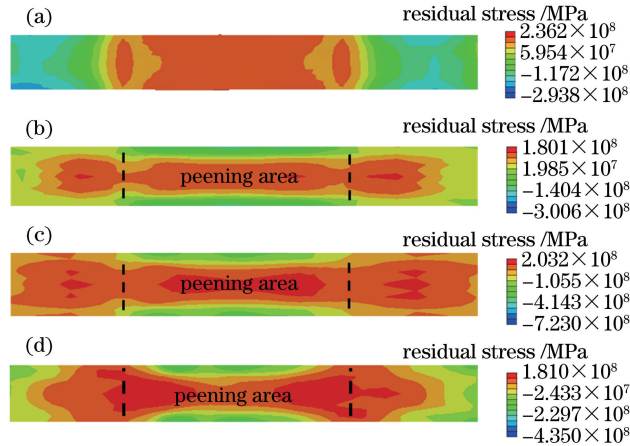


图 6 不同脉冲能量激光冲击焊缝区的截面残余应力分布云图。(a)未冲击;(b) 3 J;(c) 6 J;(d) 9 J

Fig. 6 Cloud diagrams of cross-sectional residual stress distributions in welding zones shocked by lasers with different pulse energies. (a) Without LSP; (b) 3 J; (c) 6 J; (d) 9 J

不同脉冲能量激光冲击后焊缝区表面残余应力的模拟结果如图 7 所示。残余应力的测量路径如图 7(a)所示。由图 7(b)可知,当脉冲能量为 3 J 时,焊接区的残余应力由 173 MPa 转化为-117 MPa,HAZ 的残余应力由 91 MPa 转化为-82 MPa,材料内部的应力平衡使得基体区产生的拉应力约为 57 MPa;当脉冲能量为 6 J 时,焊接区的残余应力由 173 MPa 转化为-217 MPa,HAZ 的残余应力由 91 MPa 转化为-107 MPa,材料内部的应力平衡使得基体区产生的拉应力约为 83 MPa;当脉冲能量增加至 9 J 时,焊接区的残余应力由 173 MPa 转化为-285 MPa,HAZ 的残余应力由 91 MPa 转化为-207 MPa,材料内部的应力平衡使得基体区产生的拉应力约为 133 MPa。可以看出,随着脉冲能量的提高,焊接件表面焊接区、HAZ 以

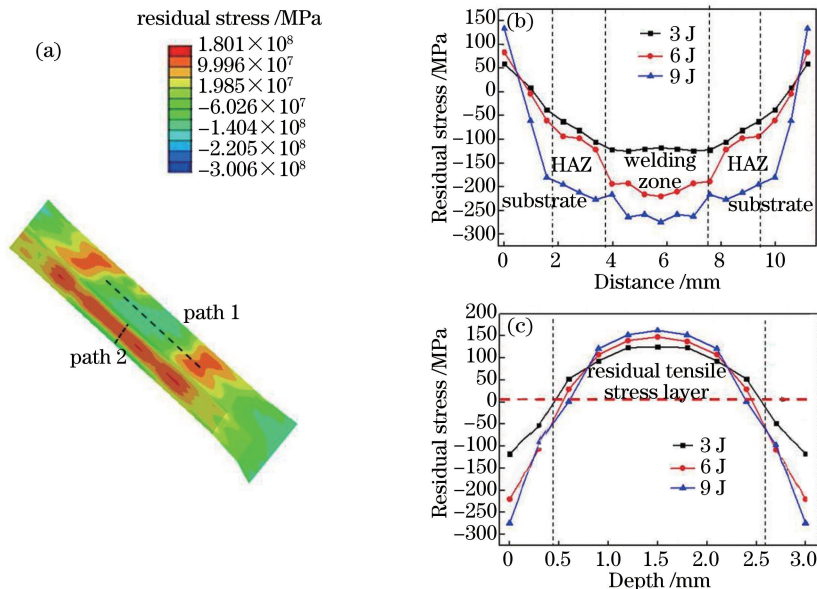


图 7 不同脉冲能量激光冲击焊缝区的残余应力分布模拟。

(a)残余应力测量路径示意图;(b)表面残余应力分布;(c)截面残余应力分布

Fig. 7 Simulated residual stress distributions in welding zones shocked by lasers with different pulse energies. (a) Schematic of measurement paths of residual stress; (b) surface residual stress distribution; (c) cross-sectional residual stress distribution

及基体区的残余压应力都有所增加,而残余压应力的增加幅度随着脉冲能量的增加有所降低。这主要与基体材料在激光冲击过程中发生大塑性变形的速度有关,随着脉冲能量的提高,冲击波作用时间内的金属材料塑性变形量越大,变形速度越快,其附加应力和残余应力就减小,因此,实际高能量激光冲击诱导的残余应力值要小于理论值,残余应力的增加幅度随着脉冲能量的增加有所降低。

图 7(c)所示为不同脉冲能量激光冲击后焊缝区域截面的残余应力数值分布。激光冲击不锈钢焊接件后,焊接件表面形成了一定厚度的残余压应力层,中心区域对应生成一定的残余拉应力。当脉冲能量为 3 J 时,焊接件表面形成的残余压应力层厚度约为 0.5 mm,试样中心区域的残余拉应力约为 113 MPa;当脉冲能量为 6 J 时,焊接件表面形成的残余压应力层厚度约为 0.6 mm,试样中心区域的残余拉应力约为 139 MPa;当脉冲能量为 9 J 时,焊接件表面形成的残余压应力层厚度约为 0.67 mm,试样中心区域的残余拉应力约为 152 MPa。可以看出,随着脉冲能量的提高,焊接件表面残余压应力层厚度以及试样截面中间部分的残余拉应力值均增加,同样其增加幅度随着脉冲能量的增加均却有所降低。

不同脉冲能量激光冲击焊接件表面的动态应变-时间曲线模拟结果如图 8 所示,可以看出,不同脉冲能量激光诱导的冲击波在焊接件表面产生的动态应变具有不同的变化规律。在冲击波作用过程中,冲击波诱导焊接件表面发生急剧的应变,60 ns 时应变达到峰值,图 8 中 A、B、C 点分别为 3,6,9 J 脉冲能量激光冲击焊接件表面的应变峰值,其值分别为 0.99×10^{-3} , 2.45×10^{-3} , 3.5×10^{-3} ,所对应的应变云图如图 9 所示。焊接件表面应变峰值随脉冲能量的增加而变大。60 ns 后,激光诱导的冲击波衰减消失,焊接件表面的应变也随之减弱,三种脉冲能量冲击诱导的应变曲线变化趋势基本一致。

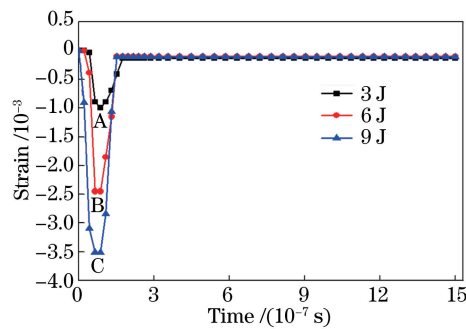


图 8 激光冲击焊接件表面的动态应变-时间曲线

Fig. 8 Dynamic strain-time curves on LSP weldment surface

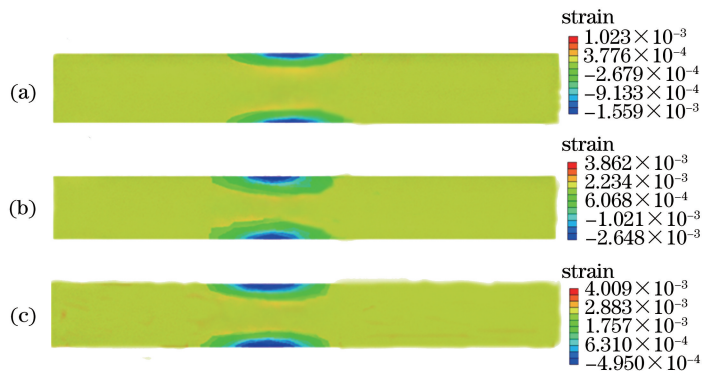


图 9 应变峰值时刻对应图 8 的应变云图。(a)图 8 中 A 点时刻;(b)图 8 中 B 点时刻;(c)图 8 中 C 点时刻

Fig. 9 Cloud diagram of strain at strain peak moment corresponding to Fig. 8. (a) Moment at point A in Fig. 8;

(b) moment at point B in Fig. 8; (c) moment at point C in Fig. 8

4 结 论

采用 ABAQUS 非线性有限元模拟的方法,模拟分析与试验研究了激光冲击对 316L 不锈钢焊接件焊接应力的影响,分析讨论了不同脉冲能量激光冲击对焊接件表面焊缝区域动态应变的影响,得到如下结论。

- 1) 随着激光脉冲能量的提高,激光冲击后焊接区、HAZ 以及基体区的残余压应力都有所增加,但增加幅度随着脉冲能量的提高而减小。
- 2) 随着激光脉冲能量的提高,焊接件表面的残余压应力层厚度以及试样截面中间部分的残余拉应力也有所增加,增加幅度同样随着脉冲能量的提高而减小。
- 3) 焊接件表面应变峰值随脉冲能量的提高而增大。

参 考 文 献

- [1] Wang Ruolin, Gao Wei, Ye Xiaowei, *et al.* Some issues of fatigue failure of welded structures[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(2): 194-198.
王若林, 高巍, 叶肖伟, 等. 焊接结构疲劳破坏的若干问题[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(2): 194-198.
- [2] Yousefieh M, Shamanian M, Saatchi A. Influence of heat input in pulsed current GTAW process on microstructure and corrosion resistance of duplex stainless steel welds[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18(9): 65-69.
- [3] Ding J H, Zhang L, Li D P, *et al.* Corrosion and stress corrosion cracking behavior of 316L austenitic stainless steel in high $H_2S-CO_2-Cl^-$ environment[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(10): 3708-3715.
- [4] Xu Jijin, Chen Ligong, Ni Chunzhen. Effect of mechanical stress relieving method on welding residual stress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 291-295.
徐济进, 陈立功, 倪纯珍. 机械应力消除法对焊接残余应力的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 291-295.
- [5] Zhang Shukui, Luo Zhiting. Analysis of residual stress produced by welding and its elimination methods [J]. Metallurgical Power, 1996, (6): 38-41.
张书奎, 罗植廷. 浅析焊接残余应力及其消除方法[J]. 冶金动力, 1996, (6): 38-41.
- [6] Liu Kaixin, Zhang Jinxiang, Liu Ying, *et al.* Numerical simulation on the relief of welding residual stress through an explosive treatment[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(2): 10-15.
刘凯欣, 张晋香, 刘颖, 等. 爆炸法消除焊接接头残余应力的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2004, 21(2): 10-15.
- [7] Xiang Jianyun, Ge Maozhong, Zhang Yongkang. Experiment of laser shock strengthening tungsten inert-gas welded AZ31B magnesium alloy[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s114015.
项建云, 葛茂忠, 张永康. AZ31B 镁合金交流氩弧焊接件激光冲击强化实验[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s114015.
- [8] Yin Sumin, Zhang Chao, Wang Yun, *et al.* Numerical analysis for the structure effect on stainless steel welding treated by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503005.
殷苏民, 张超, 王匀, 等. 激光冲击对不锈钢焊接结构影响的数值分析[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503005.
- [9] Sano Y, Obata M, Kubo T, *et al.* Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 417(1/2): 334-340.
- [10] Xu Guojian, Zhong Liming, Wang Hong, *et al.* Performance of aluminum alloy welded joints by laser shock processing [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603007.
徐国建, 钟立明, 王虹, 等. 激光冲击强化铝合金焊接接头的性能[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603007.
- [11] Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng, *et al.* Development and application of laser shock processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 15-19.
李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应 用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 15-19.
- [12] See D W, Dulaney J L, Clauer A H, *et al.* The air force manufacturing technology laser peening initiative[J]. Surface Engineering, 2002, 18(1): 32-36.
- [13] 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.
- [14] Lu Jinzhong, Zhang Yongkang, Kong Dejun, *et al.* Effects on mechanical properties of TC4 welding line by laser shocking processing[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2006, 27(3): 207-210.
鲁金忠, 张永康, 孔德军, 等. 激光冲击强化对 TC4 电子束焊缝机械性能的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2006, 27(3): 207-210.

- [15] Lu Jinzhong, Zhang Yongkang, Qian Xiaoming, *et al.* Effects on residual stresses of Ti6Al4V electron beam welding line by laser shock processing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(7): 869-872.
鲁金忠, 张永康, 钱小明, 等. 激光处理对 Ti6Al4V 焊缝表面应力状况的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(7): 869-872.
- [16] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.* Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2): 775-784.
- [17] Zhou Nan, Qiao Dengjiang. Materials dynamics under pulse beam radiation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
周男, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.