

激光冲击对不锈钢焊接结构影响的数值分析

殷苏民 张超* 王匀 许桢英 江文林

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 为了探究激光冲击对不锈钢焊接接头残余应力分布的影响,对不锈钢焊接过程和激光冲击焊缝过程进行了数值分析。结果显示,焊后焊接结构的残余应力分布很不均匀,焊缝表面表现出较大的残余拉应力,横向和纵向残余应力相差较大。经激光冲击处理后,焊接区域的残余应力都有明显的改善,表面残余应力由拉应力转变成压应力,且应力值随着激光功率密度和冲击次数的增加而增大,横向应力和纵向应力分布也趋于均匀;选用合适的搭接率可以产生均匀的残余压应力。分析结果为激光冲击改善焊接结构性能提供参考依据。

关键词 激光技术;不锈钢焊接;激光冲击强化;焊接残余应力;数值分析

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0503005

Numerical Analysis for the Structure Effect on Stainless Steel Welding Treated by Laser Shock Processing

Yin Sumin Zhang Chao Wang Yun Xu Zhenying Jiang Wenlin

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

Abstract In order to investigate the influence of laser shock processing on the residual stress distribution of stainless steel welding joint, the numerical analysis of the stainless steel welding process and laser shock processing weld is implemented. The results show that the residual stress distribution of welded structure is not uniform after welding, and the large residual tensile stress is produced on welding surface, meanwhile, the differences of welding residual stress between horizontal and vertical orientation are large. The residual stress of welding area is notably improved after laser shock processing, the residual stress on surface is changed from tensile residual stress into compressive residual stress, and the residual stress increases with laser power density and shocking times increasing. The residual stresses on horizontal and vertical orientation become uniform. The uniform residual stress can be induced with suitable overlapping rate. It provides a reference for the application of the laser shock processing in improving welding structure performance.

Key words laser technique; stainless steel welding; laser shock processing; welding residual stress; numerical analysis

OCIS codes 140.2540; 140.3538; 140.3580

1 引言

由于不锈钢焊接结构的复杂性,焊接接头中的残余拉应力以及分布不均匀可能会引起脆性断裂、疲惫断裂、应力腐蚀破坏以及降低结构的稳定性,因此需要采用焊接后处理来改善焊接力学性能。国内常用的焊接后处理方法是热处理、过载处理、振动法调整残余应力处理、锤击处理、爆炸消除应力处理、温差拉伸法消除焊接残余应力^[1,2]。由于激光参数的灵活

可调性,目前激光冲击强化(LSP)也逐渐应用在焊接领域,其过程是利用高功率密度(GW/cm^2)、短脉冲(纳秒量级)激光束辐射金属时产生高强度冲击波在金属材料或零件表层形成一定的残余应力,从而改善金属材料的性能^[3]。

因为焊接过程是复杂的热力耦合和强烈的非线性过程^[4],而激光冲击过程是动态加载复杂的非线性动力学问题,其残余应力的分析非常复杂^[5]。本文对

收稿日期: 2012-12-07; 收到修改稿日期: 2013-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(50975126,51179076)和江苏省自然科学基金(BK2010042)资助课题。

作者简介: 殷苏民(1956—),男,教授,主要从事激光加工与检测技术、机电系统控制等方面的研究。

E-mail: smyin@ujs.edu.cn

*通信联系人。E-mail: zhangchaohyt@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

焊接过程以及激光冲击过程进行了数值分析,研究了焊接结构在激光冲击前后的残余应力分布变化,探讨了激光冲击对焊缝(BW)、热影响区(HAZ)和母材(BM)表面残余应力场分布的影响规律。

2 数值分析

焊接过程中材料热物理和力学性能依赖于温度^[6],为了保证分析精度和计算效率,仅分析焊接温度场对残余应力场的影响并计及材料参数随温度的变化,将焊接残余应力分析简化为焊接瞬时温度场

表 1 焊接材料热物理参数

Table 1 Thermophysical parameters of solder materials

| Temperature / °C | Conductivity / [J/(m·s·K)] | Thermal expansion / (10 ⁶ mm/°C) | Specific heat / [J/(kg·K)] | Young's modulus /GPa | Poisson's ratio /V | Density / (kg/m ³) |
|---------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 10 | 15.26 | 15.39 | 502 | 191.2 | 0.294 | 7966 |
| 200 | 16.69 | 16.21 | 514 | 185.7 | 0.294 | 7966 |
| 400 | 19.54 | 17.37 | 538 | 172.6 | 0.294 | 7966 |
| 600 | 22.38 | 18.12 | 562 | 155.0 | 0.294 | 7966 |
| 1000 | 28.08 | 19.27 | 611 | 100.0 | 0.294 | 7966 |
| 1400 | 33.78 | 20.21 | 659 | 2.0 | 0.294 | 7966 |

建立平板对接焊模型,三维模型尺寸为100 mm×100 mm×6 mm,如图 1 所示。焊缝宽度为 4 mm,采用单道焊方式。焊接过程是一个不均匀加热的过程,在焊缝处温度梯度变化很大,采用不均匀网格划分,有限元网格模型如图 2 所示。

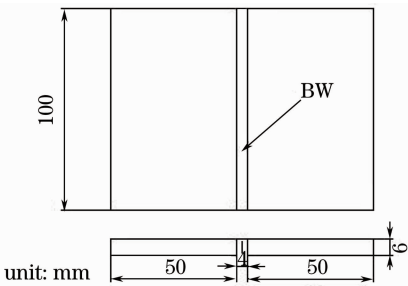


图 1 焊接模拟示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding simulation

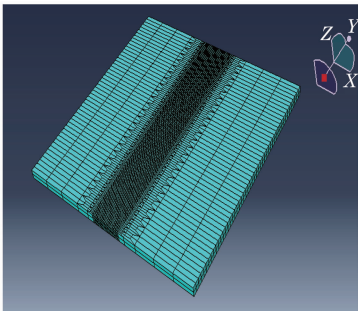


图 2 焊接模拟网格划分

Fig. 2 Grid division of welding simulation

和热弹性应力应变场的分析计算。在激光冲击过程时,冲击波峰值压力大且作用时间短^[7],利用显式动态分析方法精确追踪靶材由于应力波作用所产生的动力学响应,并将动态分析结果导入静力隐式算法,进行平衡回弹运算,最终获得靶材表面及内部残余应力场分布^[8]。

2.1 数值分析模型建立

本文以 AISI-316L 不锈钢材料为研究对象,其热物理参数如表 1 所示。

该模型采用 8 节点三维实体单元,最小单元尺寸为 0.5 mm。采用间接耦合计算方法,温度场分析采用热单元 DC3D8,残余应力场分析选用结构分析单元 C3D8R。在焊接模拟过程中,考虑了不锈钢材料热物理参数和力学参数随温度变化的非线性^[9],并将相变潜热转换成等效比热容来考虑相变的影响,同时焊接材料的塑性强化模式选用双线性等向强化模式。激光冲击时,假定材料为弹塑性等向强化,采用 Von Mises 屈服准则。材料在激光冲击波加载下应变率高达 10⁶~10⁷ s⁻¹,此时材料的力学响应将明显不同于准静态时的情况^[10]。因此,在建立本构关系时必须考虑材料的率相关性。忽略激光冲击温度对残余应力场影响的 JC 模型本构关系可表示为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)[1 + C \ln(1 + \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)], \quad (1)$$

式中 A、B、C 为材料参数;ε 为等效塑性应变;ε₀ 为参考应变率;ε̇ 为应变率,具体参数值如表 2 所示。

表 2 JC 本构模型参数

Table 2 Parameters of JC constructive model

| Parameters | A | B | C | n |
|------------|---------|---------|------|-------|
| Values | 514 MPa | 514 MPa | 0.42 | 0.508 |

2.2 数值分析过程的实现

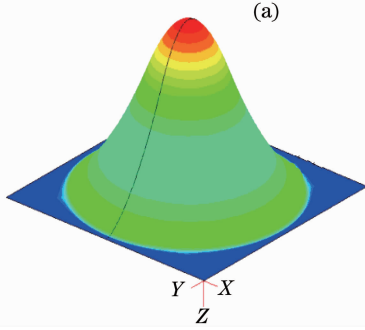
采用单元生死方法模拟焊缝形成和焊接热源的移动,先将焊缝中所有单元“杀死”,计算时按顺序“激活”单元,模拟焊缝金属的填充。同时在不同的

焊道中给激活的单元施加对应的生热率(R_{HGEN}),热载荷的作用时间等于实际焊接时间。生热率为

$$R_{HGEN} = Q / (A_{weld} \times v \times dt), \quad (2)$$

式中 Q 为热源热量; A_{weld} 为焊缝的横截面积, v 为焊接速度, dt 为每个载荷步的时间步长。

在温度场分析中焊件的初始温度取 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。焊接试样外表面均考虑为对流和辐射的边界条件^[11]。



为了确保在焊接过程中,焊件不发生刚性位移,在远离焊缝区域和试样底部施加了全约束。忽略应变诱发相变而产生的相变应力^[12]。

激光脉冲束为准高斯分布,其空间三维分布如图 3(a) 图所示。激光诱导冲击波持续时间为激光脉冲的 2~3 倍^[13],取为 40 ns,其冲击波压力幅值-时间曲线简化如图 3(b) 所示。

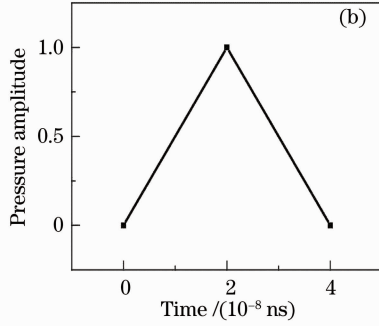


图 3 (a)激光脉冲高斯分布和(b)加载时间历程曲线图

Fig. 3 (a) Gaussian distribution of laser pulse and (b) simplified curve of LSP loading with time history

根据 6 mm/s 的焊接速度,获得焊接总时间为 16.6 s ,加热阶段的载荷步时间设置为 0.333 s ,焊接载荷总步为 50 ,试样冷却 1000 s 后达到室温。为了在动态加载求解时间内使靶材内部塑性变形达到最大化,时间设定为 4000 ns ,最后导入隐式分析,隐式分析时间为 1 s 。

分布相对更加均匀;同时在黑色曲线中,中心处在激光冲击的作用下形成 200 MPa 的残余压应力,与红色曲线中激光冲击焊缝中心形成的残余压应力相比多了 80 MPa ,原因在于焊接残余应力的存在影响了激光冲击强化的效果;另外,从图中可以看出,红色曲线并不等于蓝色曲线和黑色曲线相互叠加,即激光冲击形成的残余应力场与焊接残余应力场的关系并不是简单的应力叠加关系,其中涉及到复杂的弹塑性理论。

3 计算结果与分析

3.1 激光冲击对焊接残余应力分布影响

焊接残余应力场主要有横向残余应力、纵向残余应力以及厚度方向残余应力。由于焊接的纵向残余拉应力比横向残余拉应力大得多,因此主要研究激光冲击残余应力对焊后以及未焊试样纵向残余应力分布的总体影响。

图 4 为焊接试样和未焊试样在激光冲击下的残余应力分布,其中蓝色曲线是焊接残余应力分布,黑色曲线是激光冲击形成的残余应力分布,红色曲线是激光冲击形成的残余应力分布对焊接残余应力分布的影响。从蓝色曲线中可以看出,焊缝区表现为较高的纵向残余拉应力,达到 267 MPa ,远离焊缝时拉应力逐渐下降,在距离焊缝中 18 mm 处,拉应力变成压应力,达到 90 MPa ,总体分布规律与实际相符;在红色曲线中,激光冲击焊缝中心形成了 120 MPa 的残余压应力,与蓝色曲线相比,激光冲击形成的残余应力分布改善了焊缝表面的应力分布,使焊缝表面由拉应力转变成压应力,焊接残余应力

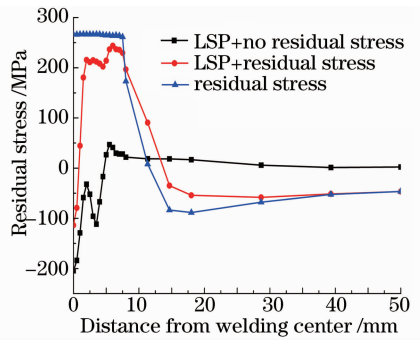


图 4 激光冲击焊接试样和未焊试样的残余应力分布
Fig. 4 Residual stress distributions of welding samples and unwelding samples under LSP

3.2 激光功率密度对焊接残余应力的影响

选取光斑直径为 3 mm ,冲击次数为 1 次,激光功率密度 I 分别为 1.2 、 1.6 、 2.0 GW/cm^2 来研究激光功率密度对焊接残余应力场的影响。图 5 为不同激光冲击功率密度下冲击前后的焊缝残余应力分布。其中图 5(a)和(b)分别为横向路径上的横向应力分布

和纵向应力分布。由图可知未冲击前焊缝表面横向残余拉应力平均约为 62 MPa,纵向残余拉应力平均约为 267 MPa。当功率密度达到 2.0 GW/cm² 时,焊缝表面横向方向上形成 123 MPa 压应力,纵向方向上形成 83 MPa 压应力;在激光功率密度为 1.6 GW/cm² 时,焊接表面形成的横向压应力和纵向压应力相对于功率密度 2.0 GW/cm² 时更大,分

别为 174 MPa 和 114 MPa,这是因为激光功率为 2.0 GW/cm² 时产生的稀疏波削弱了残余压应力水平。选择合适的激光功率密度能够有效地改善焊接残余应力场的分布,最佳激光功率密度的选取与材料属性以及焊接残余应力有关,通过有限元法,可以方便而精确地求出最佳的激光功率密度。

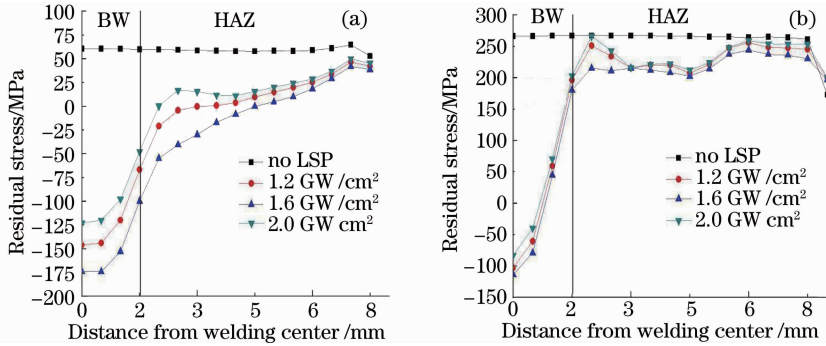


图 5 不同激光功率密度下焊缝残余应力分布。(a) 横向;(b) 纵向

Fig. 5 Residual stress distribution of welding under different laser power densities. (a) Horizontal; (b) vertical

3.3 激光冲击次数对焊接残余应力的影响

选择激光功率密度为 1.6 GW/cm²,光斑直径为 3 mm,冲击次数为 1 次、2 次和 3 次,研究冲击次数对焊接残余应力分布的影响。图 6 为不同冲击次数下焊接结构的残余应力分布曲线,其中图 6(a)为表面横向残余应力 S11,图 6(b)为纵向残余应力 S22。由图中可以看出,冲击次数为 1 次、2 次和 3 次,光斑中心的横向残余压应力分别为 174、261、247 MPa,以及纵向残余压应力分别为 114、199、209 MPa。图 6(a)中横向残余压应力第 3 次冲击反

而比第 2 次冲击残余压应力要小,这是由于多次冲击以后表面残余压应力达到饱和,再次冲击后由于冲击波的反射反而削弱了表面残余压应力水平。图 6(b)中纵向残余压应力随着冲击次数的增加,表面残余压应力水平也在不断增加,但增加幅度不断减小,这是由材料的加工硬化效应引起的。总的来说随着激光冲击强化次数增加,激光冲击对焊接残余应力影响增大,焊接表面形成的压应力也增大,当冲击次数达到一定程度时,冲击效果变得不明显,激光冲击对焊接残余应力影响也就减小。

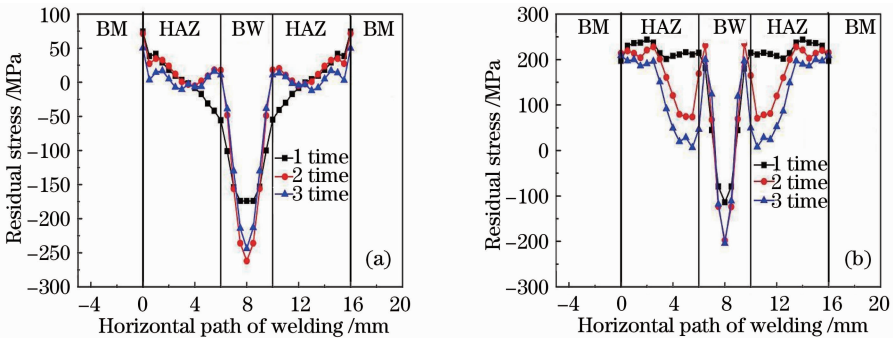


图 6 不同冲击次数下焊接结构的残余应力分布。(a) 横向;(b) 纵向

Fig. 6 Residual stress distribution of welding structure under different shocking times. (a) Horizontal; (b) vertical

3.4 搭接率对焊接残余应力的影响

多点激光冲击时,光斑间距对残余应力均匀性都有很大影响,这里选择单排激光冲击的方法来研究光斑间距对焊接残余应力的影响,选择激光功率密度为 1.6 GW/cm²,光斑直径为 3 mm,冲击次数

为 1 次,不同的光斑间距 R 分别取 1、2、3、4 mm。

图 7 为不同光斑间距下激光冲击焊缝形成的横向残余应力分布云图,可以直观地看出,在光斑间距 R 分别为 1、2、3、4 mm 时,焊接结构的最大残余压应力分别为 5.6、155.7、165.4、168.8 MPa。在光斑间距

$R=1\text{ mm}$ 和 2 mm 时,冲击区域蓝色区域(压应力区)面积较少,甚至在 $R=1\text{ mm}$ 时大部分冲击区域表现为拉应力,而在光斑间距 $R=3\text{ mm}$ 和 4 mm 时,蓝色区域已覆盖甚至超过了冲击区域,残余压应力分布比较均匀。说明在一定的间距范围内,光斑间距越大,

残余压应力的影响范围越大,激光冲击对焊接残余应力分布的影响就越大。这是因为光斑间距越小,光斑搭接区域越大,搭接区域材料经历了相邻光斑的多次激光冲击,在搭接区域外侧区域产生拉应力,影响了压应力的形成以及压应力的均匀分布。

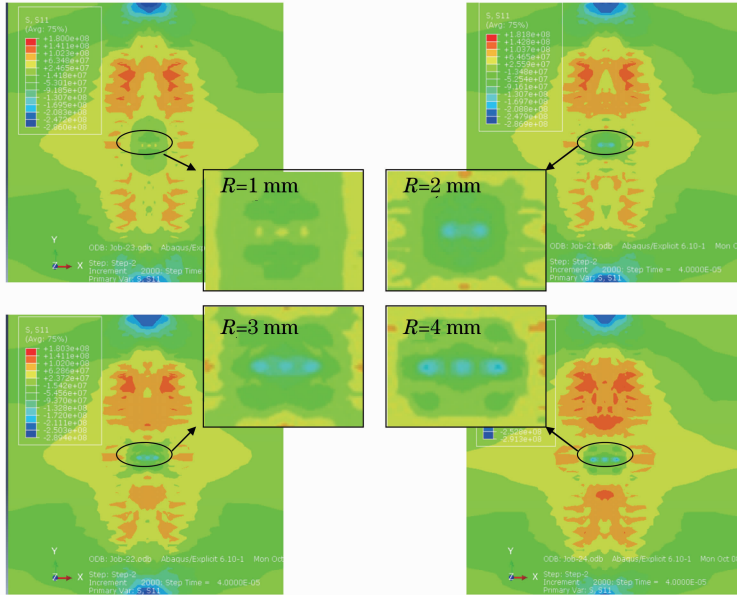


图 7 不同间距 R 下横向残余应力分布云图

Fig. 7 Contour of transverse residual stress under different spaces R

图 8 为不同光斑间距下试样的残余应力分布曲线。由此可以更直观地看出,在不同的光斑间距 R 下,光斑之间都出现了“应力跃动”的现象,而光斑间距 $R=2\text{ mm}$ 和 3 mm 时,应力跃动幅值相对较小,考虑到强化效果(包括压应力值大小和分布),光斑间距一般选择在 $R=1.5r$ 到 $2r$ (r 为光斑半径)之间,能形成有效的残余压应力,可以使得焊接残余应力分布更加均匀。

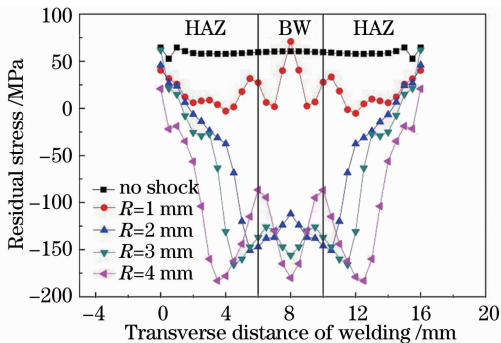


图 8 不同间距 R 下横向残余应力分布曲线

Fig. 8 Distribution curve of transverse residual stress in different spaces R

4 结 论

进行了激光冲击对不锈钢焊接结构的数值分析得到了以下结论:

1) 考虑钢材热物理参数和力学参数随温度变化的非线性以及高应变率下的材料属性的变化规律,运用单元激活技术和动态分析模块分别模拟平板对接焊的情形以及焊后冲击强化的过程,能够获得对接焊接结构的焊后残余应力场,以及冲击强化后的残余应力场。

2) 残余应力场分析表明,焊接过程是瞬时加热和冷却过程,在焊缝及热影响区表面形成较大的温度梯度,由于受到周围区域的约束,最终焊缝区呈现残余拉伸应力,而周围区域呈现压应力。对拉应力区域进行激光冲击,能够形成有效的压应力,改善焊缝应力分布,提高了焊接结构的性能。

3) 从激光冲击参数对焊接残余应力分布的影响来看,一般情况下随着激光功率密度和冲击次数的增加,表面残余拉应力变成压应力值增大,横向和纵向应力分布也趋于均匀,但在冲击次数和功率密度达到一定值后,增加功率密度和次数残余压应力反而变小,故选用合适的冲击次数、功率密度以及搭

接率有利于提高激光冲击残余应力场对焊接残余应力场的改善作用。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Liu Yong, Shen Naijie. Residual stresses analysis for actual material model of autofrettaged tube by non-linear boundary element method [J]. *International J. Pressure Vessels and Piping*, 1991, **48**(1): 10~25
- 3 J. N. Johnson, R. W. Rhode. Dynamic deformation twinning in shock-loaded iron [J]. *J. Appl. Phys.*, 1971, **42** (11): 4171~4182
- 4 Chen Jiaquan, Shen Weiliang, Yin Zhixin *et al.*. Simulation of welding temperature distribution based on element birth and death [J]. *Hot Working Technology*, 2005, **34**(7): 64~65
陈家权, 沈炜良, 尹志新 等. 基于单元生死的焊接温度场模拟计算[J]. *热加工工艺*, 2005, **34**(7): 64~65
- 5 Chen Ruifang, Hua Yinqun, Cai Lan. Estimate of residual stress of steel materials induced by laser shock wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 278~282
陈瑞芳, 花银群, 蔡 兰. 激光冲击波诱发的钢材残余应力的估算[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 278~282
- 6 Zhao Xuerong, Zhu Yuanxiang, Sun Qinming. Analysis of finite element of residual stresses in butt welds [J]. *Welding Technology*, 2003, **32**(5): 14~15
赵学荣, 朱援祥, 孙秦明. 对接焊缝残余应力的有限元分析[J]. *焊接技术*, 2003, **32**(5): 14~15
- 7 P. Merrien, H. P. Lieurade, P. Peyre *et al.*. Laser shock processing of aluminium alloys: application to high cycle fatigue behaviour [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, **210**(1): 102~113
- 8 Liu Shiwei. The Research of Laser Shock Processing Technology [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2000
刘世伟. 激光冲击处理技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2000
- 9 Ni Hongfang, Ling Xiang, Peng Weiwei. Prevention of stress corrosion cracking in weld joint of type 304 stainless steel by class-bead peening [J]. *J. Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2005, **25**(3): 152~156
倪红芳, 凌 祥, 彭薇薇. 玻璃喷丸处理提高 304 不锈钢焊接接头抗应力腐蚀性能的研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2005, **25**(3): 152~156
- 10 Zhou Jianzhong, Fan Yujie, Huang Shu *et al.*. Research and prospect on micro-scale laser shot peening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601003
周建忠, 樊玉杰, 黄 舒 等. 激光微喷丸强化技术的研究与展望 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0601003
- 11 J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby. A new finite element model for welding heat sources [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1984, **B15**(2): 299~305
- 12 Ni Hongfang, Ling Xiang, Tu Shandong. Simulation of 3D residual stresses field of multi-pass welding by fem [J]. *J. Mechanical Strength*, 2004, **26**(2): 110~117
倪红芳, 凌 祥, 涂善东. 多道焊三维残余应力场有限元模拟 [J]. *机械强度*, 2004, **26**(2): 110~117
- 13 Wang Xucheng, Shao Min. The Basic Principle of Finite Element Method and Numerical Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. 3

栏目编辑: 宋梅梅