激光冲击 7075-T6 铝合金焊缝的残余应力场数值模拟

罗 密 罗开玉* 王庆伟 鲁金忠
(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 针对激光冲击强化铝合金焊缝过程中存在多场耦合导致残余应力变化幅度大、实时表征难的问题,采用 ABAQUS 非线性有限元软件建立了激光冲击强化 7075-T6 铝合金板材焊接件的有限元模型,模拟计算焊缝在激光冲击强化前后的残余应力场分布,重点分析了激光冲击强化对焊缝的横、纵向残余应力场的影响规律,并对焊缝的激光冲击强化工艺参数进行优化。研究结果表明,焊缝表面为残余拉应力场并且分布不均,激光冲击强化使得焊缝的拉应力状态转变为高幅压应力状态;优化激光冲击强化工艺参数(如激光能量、激光光斑尺寸、搭接率),可以明显改善焊缝区域和热影响区的残余应力分布;当激光光斑搭接率为 50%至 70%时,残余应力分布趋于均匀,可以有效消除"残余应力洞"现象。

关键词 光学制造;激光冲击强化;7075-T6 铝合金;焊接件;残余应力;数值模拟
中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0414003

Numerical Simulation of Laser Shock Peening on Residual Stress Field of 7075-T6 Aluminum Alloy Welding

Luo Mi Luo Kaiyu Wang Qingwei Lu Jinzhong
(*School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu* 212013, *China*)

Abstract Due to the significant fluctuation and the real-time measurement difficulty of residual stress, a finite element model of laser shock peening (LSP) on residual stress field of Al alloy welding has been developed in ABAQUS. The residual stress fields of 7075-T6 Al alloy welding are computed and compared before and after LSP, and special attentions are paid to the effects of LSP on residual stress field of 7075-T6 Al alloy welding. Subsequently, the processing parameters of LSP on Al alloy welding are also optimized. Results show that LSP causes the residual stress evolution from tensile residual stress to high-level compressive residual stress on the Al alloy surface. Residual stress distributions can be clearly improved by optimizing the processing parameters (including laser pulse energy, spot size and overlapping rate). When the overlapping rate is between 50% and 70%, residual stress tends to a more uniform residual stress field, which can effectively eliminate "residual stress hole".

Key words optical fabrication; laser shock peening; 7075-T6 Al alloy; welding; residual stress; numerical simulation
OCIS codes 350.3390; 310.4925; 120.6660

1 引 言

材料焊接过程中,材料局部经迅速加热和冷却,冷却后在焊件中便产生焊接应力和变形,焊接应力和残余应力往往导致热应变时的脆化,使焊接接头产生裂纹,降低焊接结构件的疲劳寿命和强度[1]。铝合金由于高导热系数和高反射系数,使焊接结构件受热不均匀,产生应力集中等问题比较严重,残存于焊缝的拉应力诱导裂纹的产生,从而降低了焊接结构件的使用寿命。消除焊缝及其热影响区的残余拉应力成为提高焊接件强度和疲劳寿命的有效方法之一。消除焊接接头残余应力技术主要有机械应力消除法[2]、热处理法、机械喷丸法[3]、爆炸法[4-5]和

收稿日期: 2013-12-09; **收到修改稿日期**: 2013-12-28
基金项目: 国家自然科学基金(51105179, 51275220)、江苏省自然科学基金(BK2011478)、中国博士后特别资助(2012T50465)、江苏省高校"青蓝工程"和江苏大学青年骨干教师计划
作者简介: 罗 密(1985—),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: mj3050305030@163.com
导师简介: 鲁金忠(1975—),男,博士,副教授,主要从事激光冲击强化和激光复合再制造技术等方面的研究。E-mail: blueesky2005@163.com
* **通信联系人**。E-mail: kyluo@mail.ujs.edu.cn

激光冲击强化[6]等。采用激光冲击强化焊接件以消除接头残余拉应力，是近年来逐步发展起来的激光冲击强化技术的新应用领域。激光冲击作用材料表面形成的残余压应力场能有效减小或消除残余拉应力[7-8]，从而提高铝合金机械性能和疲劳寿命[9-10]。

目前对激光冲击强化铝合金焊接件进行数值模拟研究的文献主要集中在对激光冲击波诱导的力学效应进行试验和分析，很少涉及对焊接过程和激光冲击强化过程进行全面、综合的分析。有限元法(FEM)是静、动态特性分析中应用的一种有效的数值分析方法，能够实时模拟和计算热传导、电磁场、流体力学等连续性问题[11]。由于焊接过程属于比较复杂的热力能量耦合过程，而激光冲击主要涉及材料与冲击波相互作用的弹塑性理论，两者的结合研究具有一定的难度，因此采用有限元技术能够实时连续研究和分析焊接、冲击过程、以及焊缝残余应力变化规律。本文以7075-T6铝合金焊接件为研究对象，采用有限元技术，针对激光冲击强化铝合金焊缝残余应力进行数值建模分析，对激光冲击强化铝合金焊接件的工艺参数进行优化，研究激光冲击强化对铝合金焊接件残余应力的影响规律，获得合适的激光冲击强化工艺准则，并获得了消除“残余应力洞”的最优搭接率范围。

2　7075-T6铝合金焊接过程和激光冲击过程模拟

以7075-T6铝合金焊接件为研究对象，所采用7075-T6铝合金泊松比(υ)为0.33，弹性模量(E)为71.7GPa。铝合金焊接模拟过程采用热-结构顺序耦合分析，焊接-激光冲击强化(LSP)模拟思路如图1所示。

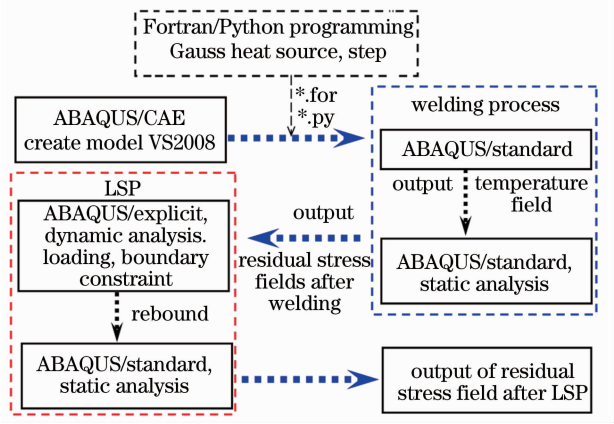

图1　有限元模拟流程图

Fig. 1　FEM analysis procedure

2.1　焊接过程建模处理

采用ABAQUS 6.10软件进行焊接模拟，图2是焊接模拟计算所使用的疏密过渡有限元模型。如图2所示，坐标系设置Y方向为纵向，平行于焊缝，X为横向，与焊缝垂直，Z为板厚方向。为提高计算精度，在温度梯度变化明显的焊缝区域及周围热影响区进行网格加密，远离焊缝处设置稀疏网格，两者之间以过渡网格相连接。模型整体尺寸为100 mm×100 mm×4 mm，焊缝长度为100 mm，宽度为4 mm，模型单元数为10200个，焊缝区域最小网格为0.5 mm。温度场计算采用DC3D8类型单元，应力场计算采用C3D8R类型单元。焊接热源模型采用高斯热源，高斯分布热源模型的热流密度分布函数为

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

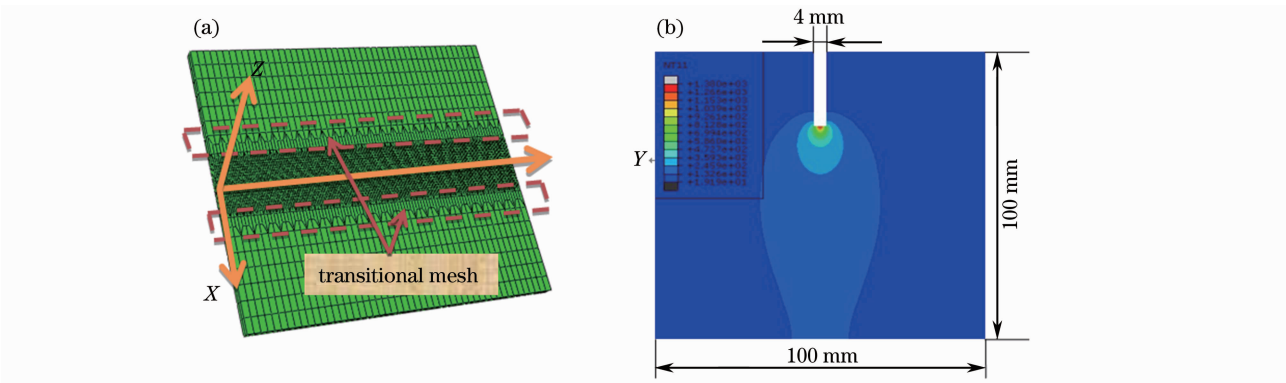

图2　焊接模拟有限元模型

Fig. 2　FEM model of welding simulation

式中 η 为焊接热效率，U 为焊接电压，I 为焊接电流，R 为光束有效加热半径，r 为焊件上任意点至光斑中心的距离，焊接热效率取 0.8。其加载方式利用 Fortran 语言编写子程序，然后导入到 ABAQUS 软件所建模型中实现单道焊接。焊速设为 5 mm/s，焊接时间为 20 s，设定焊接载荷总步数为 50，载荷步时间为 0.4 s，利用 Python 语言编写语句实现载荷循环加载。设定初始环境温度为 20 ℃。将运算得到的温度场结果导入隐式静态分析模块进行焊接应力场分析，焊接板底面施加完全位移约束，设置冷却时间为 1000 s 后冷却至室温，通过运算得到整个模型焊接残余应力场。焊接材料的热力学性能通常与温度变化有关[12]，材料密度受温度影响较小，因此不予考虑焊接和冲击过程中的材料密度变化。

2.2　激光冲击过程建模处理

将焊接残余应力场数据导入到相同模型作为激光冲击强化的初始应力场。激光冲击强化材料主要是激光诱导的冲击波与材料相互作用的过程。高速冲击波与材料表面作用时间非常短暂，所以模拟激光冲击波传递阶段选用显式动态积分算法，显式求解时间经多次优化设为 6000 ns，以便准确模拟材料内部的动力学响应，使材料表面产生弹塑性变形。之后将运算结果作为初始状态导入到隐式静态分析中进行回弹分析，去除附加约束，使弹性应变能完全释放，从而得到稳定的应力场与塑性应变，隐式求解时间设为 1 s。激光光束的空间分布为高斯分布，其能量分布如图 3(a)所示，从光斑中心开始沿半径方向逐渐衰减。激光冲击强化的脉冲激光脉宽为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，经简化后的压力-时间曲线[13-14]如图 3(b)所示，完整的温度场-焊接残余应力场-激光冲击残余应力场分布如图 4 所示。

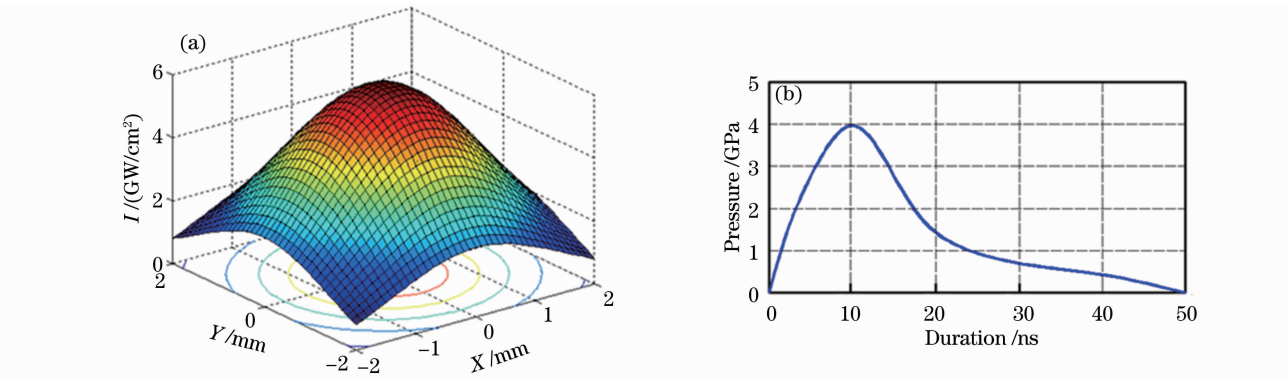

图 3　(a)压力-空间分布；(b) 压力-时间分布

Fig. 3　(a) Pressure-space distribution; (b) pressure-time distribution

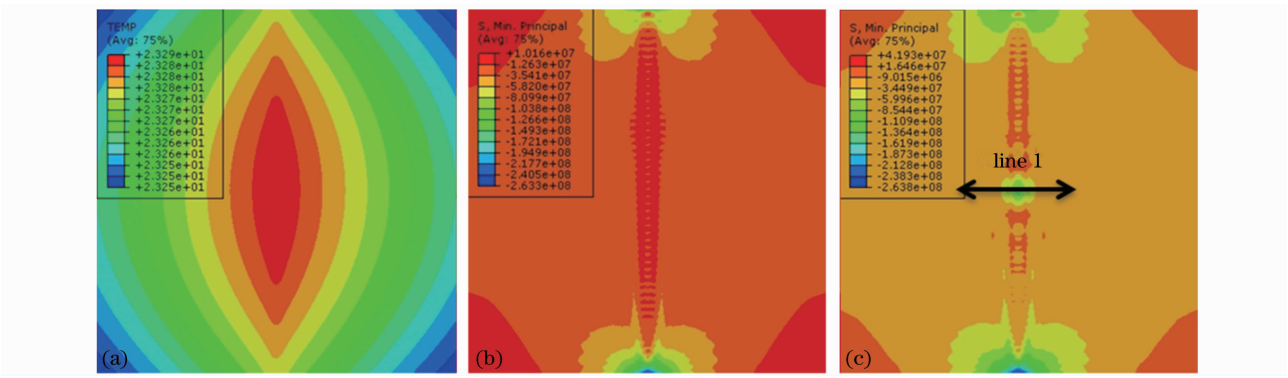

图 4　激光冲击焊缝残余和温度应力分布图。(a)焊接温度场；激光冲击(b)前、(c)后残余应力分布

Fig. 4　Residual stress and temperature fields of welding line before and after LSP. (a) Temperature field of welding; residual stress distribution (b) before and (c) after LSP

3　结果与分析

焊接区域的残余应力由横向残余应力、纵向残余应力和深度方向残余应力构成，激光冲击强化主要是作用在材料亚表面，而且由于模型厚度相对长

宽较小，所以深度方向的残余应力不予讨论。这里主要探讨激光冲击强化工艺参数对模型表面的横向残余应力和纵向残余应力的影响。冲击区域位于焊缝的中心位置，对比数据皆从图 4(c)路径 1(line1)上获取。

3.1　激光冲击强化前后焊缝的残余应力分布

图 5 为激光单点单次冲击前后，焊缝及其热影响区(HAZ)的表面残余应力分布情况。从图 5(a)和(b)两图的对比情况可以看出，激光冲击强化焊缝前，焊缝处(BW)为拉应力状态，模拟结果其纵向残余应力约为 245 MPa，横向残余应力约为 25 MPa，纵向残余应力比横向残余应力大得多；激光冲击强化焊缝后，焊缝处为压应力状态，模拟结果其纵向残余应力最小约为－90 MPa，横向残余应力平均约为－115 MPa，冲击后的焊缝，其横、纵向残余压应力差距缩小，激光冲击强化使焊缝中心区和近焊缝的热影响区由拉应力状态转变为压应力状态，这是因为激光冲击材料表面产生的压应力，中和了残留的焊接残余拉应力，高速冲击波继续作用，在冲击区域及周围产生残余压应力场，焊缝中心至边缘的残余应力分布不均，出现了“残余应力洞”。对比结果进一步显示，激光冲击焊缝区产生的残余应力场，并不等于激光冲击基材产生的残余应力场与焊接残余应力场的差值，这与材料本身复杂的弹塑性理论紧密相关。

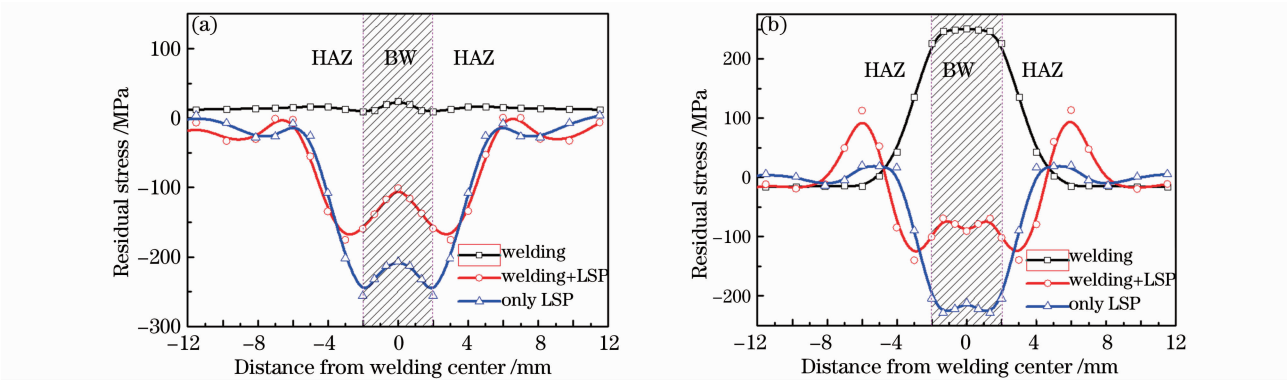

图 5　激光冲击强化前后焊缝的残余应力分布。(a)横向残余应力；(b)纵向残余应力

Fig. 5　Residual stress distributions of welding line before and after LSP in (a) transversal direction and (b) longitudinal direction

3.2　激光脉冲能量对焊缝残余应力分布的影响

激光脉冲能量对焊接残余应力场有着非常重要的影响，当激光光斑直径为 4 mm 时，对焊缝区域进行单点单次冲击，取激光脉冲能量分别为 3、4、5 J。图 6 为不同激光脉冲能量下焊缝区域的残余应力分布情况。焊缝区域的横向残余应力分布不均，冲击区域的平均横向残余应力在 3、4、5 J 时为－94、－129、－145 MPa，对应的平均纵向残余应力分别为－64、－85、－89 MPa。从以上数据可以看到，激光脉冲能量为 3 J 时，所产生的残余压应力较小，而 4 J和 5 J 两者差距不大；从图 6 中的曲线走势可以看出，激光光束能量为 5 J 时产生的残余压应力落

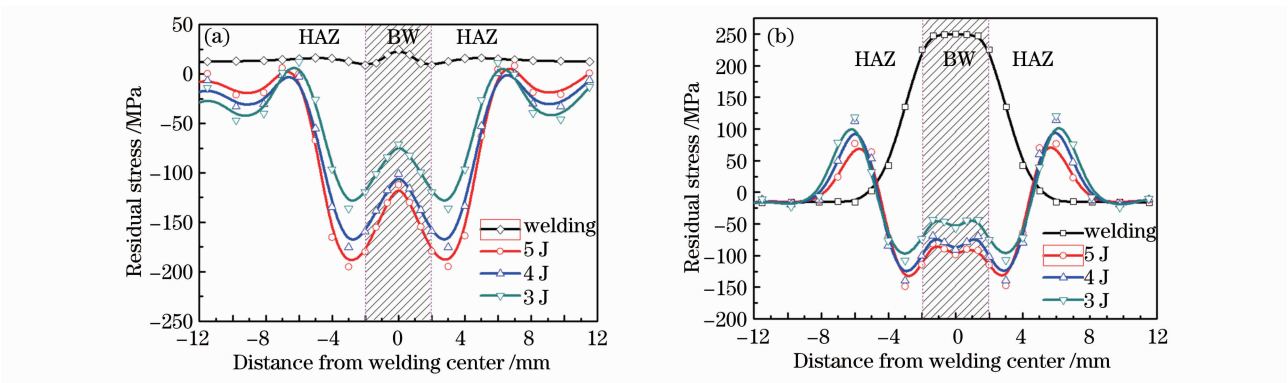

图 6　不同激光脉冲能量下焊缝区域的(a)横向和(b)纵向残余应力分布

Fig. 6　Residual stress distributions of welding line in (a) transversal direction and (b) longitudinal direction under different laser pulse energies

差比较大，这是因为激光光束为准高斯分布，激光脉冲能量越大，光斑中心至光斑边缘的激光脉冲能量密度差距就越明显，激光脉冲能量增加到一定程度，残余应力趋于饱和。在实际的激光冲击强化过程中，针对不同材料选用合适的激光脉冲能量，可以合理改善焊缝区域的残余应力分布。

3.3　激光光斑尺寸对焊缝残余应力分布的影响

为研究激光光斑尺寸对焊接残余应力场的影响，设定激光能量为 4 J，对焊缝区域进行单点单次冲击。激光光斑直径分别为 3、4、5 mm。图 7 为不同激光光斑尺寸下焊缝区域的残余应力分布情况。光斑直径为 4 mm 时，冲击区域的平均横向残余应力为－125 MPa，光斑直径为 3 mm 和 5 mm 时，焊缝区域至热影响区的横向残余应力落差过大；激光光斑直径为 3 mm 和 4 mm 时，冲击区域的平均纵向残余应力分别为－64 MPa 和－89 MPa，激光光斑直径为 5 mm 时，焊缝中心至热影响区的纵向残余应力落差过大。造成的原因主要是小直径光斑冲击靶材后，焊缝宽度不能被单个冲击光斑覆盖，在其表面形成类似球形冲击波，其衰减率为 $1/r^2$，大直径光斑冲击靶材后，在其表面形成平面冲击波，其衰减率为 $1/r$[15]。当焊缝宽度为 4 mm、光斑直径为 5 mm时，其全部能量不能完全加载至焊缝上，形成了类似平面冲击波效应，能量损失严重，从而造成残余应力落差过大。

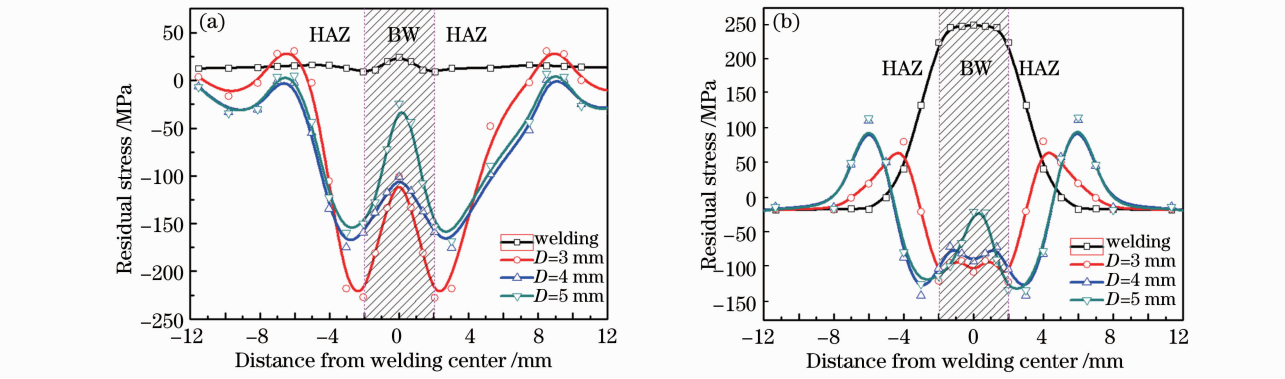

图 7　不同激光光斑尺寸下焊缝区域的(a)横向和(b)纵向残余应力分布

Fig. 7　Residual stress distributions of welding line in (a) transversal direction and (b) longitudinal direction under different laser spot sizes

3.4　搭接率对焊缝残余应力分布的影响

激光冲击强化焊缝后纵向残余应力较为均匀，而横向残余应力则分布不均，甚至落差过大，为使焊缝获得较均匀的横向残余应力，设定激光能量为 4 J，光斑直径为 4 mm，采用 η 为 30%、50%、70%和 90%的搭接率进行单行模拟分析。搭接率 η 可由公式 $\eta=\frac{\omega}{2R}\times100\%$ 计算获得，其中 ω 为在相邻光斑的圆心连线上光斑的重叠长度；R 为光斑半径。焊缝区域在不同激光搭接率下的横向残余应力分布如图 8所示。

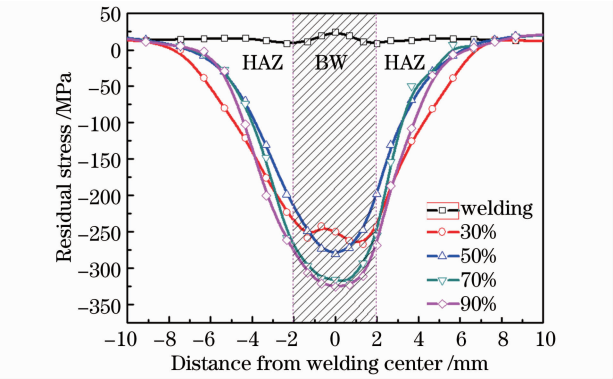

图 8　不同激光搭接率下焊缝区域的横向残余应力分布

Fig. 8　Residual stress distributions of welding line in transversal direction under different overlapping rates

图 9 为不同激光搭接率下的横向残余应力分布云图。在 η 为 30%、50%、70%和 90%时，所冲击的焊缝区域的横向残余应力分别平均约为－235、－271、－313、－321 MPa。η 为 30%时，应力分布有轻微波动；η 为 50%和 70%时，光斑中心由于相邻光斑的多次加载，有效避免了“残余应力洞”带来的影响，焊缝区域的横向残余压应力明显提高，并趋于均匀；η 进一步提高至 90%，残余压应力达到饱和，与 70%的残余应力比较，不再有明显增加。因此从激光冲击强化的效果和效率角度考虑，选用 50%～70%的搭接率，焊缝区域可以获得较为理想的残余应力场。

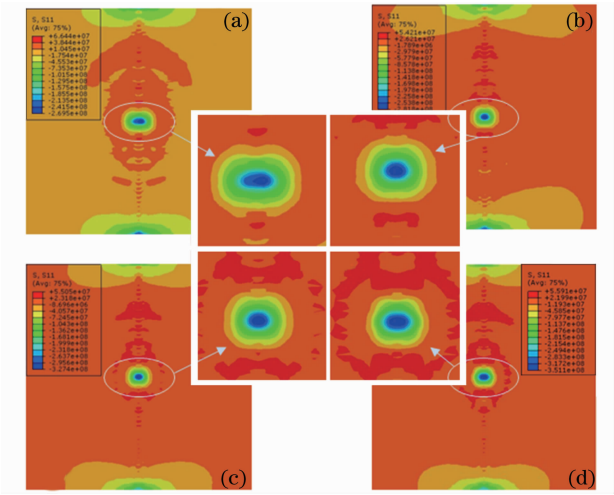

图 9　不同激光搭接率下焊缝区域的横向残余应力云图。(a) 30%；(b) 50%；(c) 70%；(d) 90%

Fig. 9　Residual stress contours of welding line in transversal direction under different overlapping rates. (a) 30%; (b) 50%; (c) 70%; (d) 90%

4　结　　论

1）采用生死单元技术，利用 Fortran 语言实现高斯热源的加载、Python 语言编写程序实现载荷循环加载，获得焊接温度场，将其导入显式动态分析模块进行结构应力分析，获得焊接残余应力场，在此基础上，建立了激光冲击强化 7075-T6 铝合金焊缝模型，实现了激光冲击铝合金焊缝区域残余应力模拟与计算。

2）焊接后焊缝残余应力场为拉应力状态，横、纵向残余拉应力分布相对均匀；单点激光冲击强化后，焊缝表面残余应力由拉应力状态转变为压应力状态，改善效果明显，但横向残余压应力受“残余应力洞”的影响，在受冲击区域分布不均。

3）研究了激光脉冲能量、激光光斑尺寸和搭接率等激光冲击强化工艺参数对铝合金焊缝残余应力场的影响，结果表明：根据基材和焊缝宽度选择合适的激光脉冲能量、激光光斑尺寸和搭接率，可以明显改善焊缝区域和热影响区的残余应力分布。从激光冲击强化的效果和效率角度考虑，选用 50%～70% 的搭接率，可以提高焊缝区域残余压应力值和改善均匀性，避免“残余应力洞”的产生。

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 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.

3 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.

4 Liu Kaixin, Zhang Jinxiang, Liu Yin, *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.

5 Guan Jianjun, Chen Huaining. Numerical simulation of relieving residual stresses in medium-thick plate butt-joints by explosive treatment [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 105－108.
管建军，陈怀宁. 爆炸消除中厚板焊接残余应力工艺数值模拟[J]. 焊接学报，2011，32(9)：105－108.

6 Zhang Jie, Sun Aihua, Zhu Le, *et al*.. Finite element simulation of laser shock processing on the welding line restored by electro-spark overlaying [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 529－532.
张　洁，孙爱华，祝　乐，等. 激光冲击电火花堆焊焊缝表面的有限元模拟[J]. 稀有金属材料与工程，2011，40(S2)：529－532.

7 Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 846－851.
胡永祥，姚振强，胡　俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析[J]. 中国激光，2006，33(6)：846－851.

8 Zhou Liucheng, Zhou Lei, Li Yinghong, *et al*.. Effect of laser shock processing on tensile strength of welded joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 52－54.
周留成，周　磊，李应红，等. 激光冲击强化对不锈钢焊接接头拉伸性能的影响[J]. 焊接学报，2011，32(4)：52－54.

9 Zhou Jianzhong, Zuo Lidang, Huang Shu, *et al*.. Analysis on mechanical property of 6061-T6 aluminum alloy by laser shot peening based on strain rate [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0503003.
周建忠，左立党，黄　舒，等. 基于应变速率的激光喷丸强化 6061-T6 铝合金力学性能分析[J]. 中国激光，2012，39(5)：0503003.

10 Nie Guifeng, Feng Aixin, Ren Xudong, *et al*.. Effect of laser shock processing parameters on residual principal stresses and its directions of 2024 aluminum alloy [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103006.
聂贵锋，冯爱新，任旭东，等. 激光冲击参数对 2024 铝合金冲击区域的主应力及其方向的影响[J]. 中国激光，2012，39(1)：0103006.

11 Li Liqun, Zhang Liang, Dai Jingming. Numerical simulation of temperature and stress fields in wire filling laser multilayer welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003002.
李俐群，张　亮，戴景明. 激光填丝多层焊温度场和应力场的数值模拟[J]. 中国激光，2011，38(10)：1003002.

12 Yu Shurong, Fan Ding, Xiong Jinhu, *et al*.. CO_2 laser welding of tailored aluminum alloy sheets with different thickness and numerical simulation [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1795－1800.
余淑荣，樊　丁，熊进辉，等. 铝合金不等厚板的 CO_2 激光拼焊

及数值模拟[J]. 中国激光，2008，35(11)：1795－1800.

13 Wang Shengbo，Fan Yong，Wu Hongxing，*et al*.. Property of laser-induced shockwave with confinement [J]. High Power Laser and Particle Beams，2004，16(8)：981－984.
王声波，范　勇，吴鸿兴，等. 约束结构下激光冲击波特性实验研究[J]. 强激光与粒子束，2004，16(8)：981－984.

14 Guan Haibing，Ye Yunxia，Zhang Yongkang，*et al*.. Effects of amplified spontaneous emission on laser shock processing 7050 aluminium alloy [J]. High Power Laser and Particle Beams，2011，23(1)：16－20.
管海兵，叶云霞，张永康，等. 放大自发辐射对激光冲击强化 7050 铝合金的影响[J]. 强激光与粒子束，2011，23(1)：16－20.

15 R Fabbro，P Peyre，L Berthe，*et al*.. Physics and applications of laser-shock processing [J]. Journal of Laser Application，1998，10(6)：265－279.

栏目编辑：韩　峰