

## 激光功率密度对小孔构件残余应力场的影响

姜银方, 张建文, 井然, 黄勤, 何玉中  
(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:**激光冲击强化通过强激光诱导的冲击波在金属材料表层引入残余压应力, 从而抑制疲劳裂纹的萌生和发展, 是一种新型的金属表面强化技术。以 ABAQUS 有限元软件为平台, 研究了不同激光功率密度下 7050-T7451 铝合金小孔构件的残余应力的分布。结果表明, 冲击表面残余压应力在 X 轴方向上 0~6 mm 区域内分布很均匀, 能量的变化对它的影响不是很大, 表面最大残余压应力都出现在孔边缘处, 整个冲击区域残余应力差别不大, 构件单面冲击下表面只有残余压应力, 然而并不是随着峰值压力的增加而增加, 这是由于未冲击表面的残余压应力是由板料变形引起的。构件厚度方向残余压应力的深度随着冲击波的峰值压力的增大而增大, 同时也造成板料厚度中心靠近上表面处产生过大的残余拉应力, 这对提高材料的抗疲劳性能是极为不利的。

**关键词:**激光冲击强化; 残余应力; 小孔强化

**中图分类号:** TN249    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.08.005

## Analysis of the residual stress field in hole specimen by laser shock processing with different power density

JIANG Yin-fang, ZHANG Jian-wen, JING Ran, HUANG Qin, HE Yu-zhong  
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Laser shock processing is a new technique for fasten holes and the key is how to set the parameters of laser shock processing (LSP). Finite element method has been used to predict the distribution of residual stress with different power density. FEA code ABAQUS is used as a platform to study the residual stress field with different power density. The result indicates that the residual stress distribution caused by different power density within 0~6 mm are basically uniform, the biggest residual compressive stress emerges in the hole edge, the impact region is not very different. In un-impacted side, there is only residual compressive stress, which is induced by the sheet metal's deformation. With the increase of peak pressure, the residual compressive stress in hole inner wall is also increased, which also causes overlarge residual tensile stress near the center of sheet thickness direction, it is very adverse to improve the resistance of the fatigue performance.

**Key words:** laser shock strengthening; fasten holes; residual stress

### 1 引言

激光冲击表面强化技术是 20 世纪 70 年代后期随着大功率、短脉冲激光器的问世而迅速发展起来的一种新型表面强化技术, 它是利用激光诱导的冲击波压力来实现表面强化<sup>[1]</sup>。与传统的机械喷丸相比, 激光冲击后试样表面质量更好, 残余压应力层

**基金项目:**国家自然科学基金项目 (No. 51075193, 51175231); 江苏省自然科学基金项目 (No. BK2009203) 资助。

**作者简介:**姜银方 (1962-), 男, 在职博士, 教授, 主要从事模具 CAD/CAE/CAM, 板料塑性成形理论, 激光加工技术, 激光冲击技术, 压铸技术, 表面工程技术等方面的教学和研究。E-mail: yfjiang@ujs.edu.cn

**收稿日期:** 2011-12-27

更深等优点,从而为小孔表面强化这一难题的解决带来了契机<sup>[2]</sup>。因此,对激光冲击强化后的小孔进行系统地研究,有着极其重大的意义<sup>[3-6]</sup>。

到目前为止,大量的研究证明激光冲击强化技术是延长裂纹萌生时间、降低裂纹扩展速度、提高材料疲劳寿命的有效手段。在飞机构件铆接小孔疲劳关键区采用了孔冷挤压、干涉配合连接、压合衬套和喷丸强化等一系列强化技术来提高结构抗疲劳断裂。但是,其中 $\phi 2.5\text{ mm}$ 和 $\phi 3\text{ mm}$ 的小孔冷挤压强化很难实现,其技术关键是冷挤压的芯棒太小,在挤压过程中极易断棒,折断的芯棒极难从飞机结构中取出;开缝衬套只能一次性使用,费用巨大难以承受,并且对于盲孔和异形孔周边结构强化尚未得到很好解决<sup>[7]</sup>。近年来,随着激光技术的迅速发展,激光表面处理技术因其具有对基体材料的适应范围宽和改善性能幅度大、针对性强等优点而特别引人注目,它在局部表面(如小孔、焊缝、拐角)或不规则复杂空间结构的强化方面,具有喷丸、挤压、滚压强化等常规方法无法比拟的优势<sup>[8-9]</sup>。

本文以有限元分析软件 ABAQUS 为平台,建立激光冲击的模型,采用先冲击后开孔的方法,模拟了不同激光功率密度对小孔残余应力场的影响。

### 2 有限元数值模型

为了研究激光冲击在小孔强化领域的应用,本文采用 ABAQUS 为有限元分析软件,模拟中所用的材料为 7050-T7451 航空铝合金材料参数如表 1 所示,其长、宽为 14 mm,厚度为 5 mm。由于激光光斑直径很小,只能覆盖很小的区域;而在实际应用中要强化的区域有相当大的一片,所以本次模拟采用搭接率为 50% 的多次冲击强化来达到预期的效果,如图 1 所示。数值分析结果对网格密度非常敏感。激光冲击工艺过程,材料对瞬态、高压冲击的响应十分剧烈,网格尺寸有限元分析的要求很严格。考虑到激光冲击成形的特点,采用细网格划分的显式线性缩减积分单元 C3D8R,它是一个 8 节点带有简化积分模式和沙漏控制的三维连续实体单元,可以进行大应变、塑性、高应变率等分析。

表 1 7050-T7451 的材料参数

Tab. 1 the material properties of 7050-T7451 aluminum alloy

Material	Density /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Elasticity Modulus/GPa	Poisson's rate	Yield stress/MPa
7050-T7451	2830	69	0.33	454

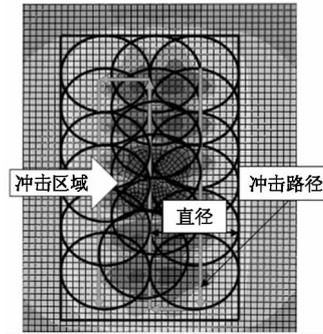


图 1 激光冲击原理图

本次激光冲击模拟的条件是激光脉宽 10 ns,板料厚度为 5 mm。光斑直径为 3 mm 以及搭接率为 50%,加载的峰值压力 2.0/2.5/3.0/4.0 GPa。由图 2 可以清楚地看到残余应力的分布和应力测量的路径。

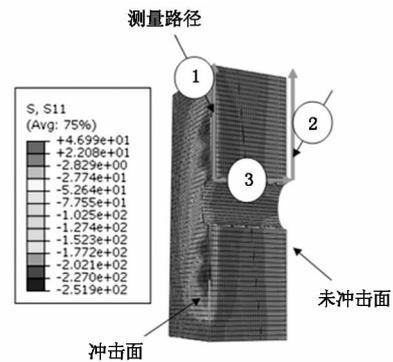


图 2 测量路径原理图

表 2 Johnson-Cook 模型材料特性参数

Tab. 2 the model parameter

Material	A/GPa	B/GPa	n	C
7050-T7451	0.454	319.5	0.32	0.027

激光冲击工艺中,激光诱导的等离子体冲击一般为几 GPa,属于中等强度冲击载荷,而且时间极短,属于纳秒级,应变率高达  $10^6 \sim 10^7\text{ s}^{-1}$ ,此时材料的力学响应将明显不同于准静态时的情况。因此,根据板料应变率响应分析,材料本构模型选用 Johnson-Cook 模型,材料参数如表 2 所示。其本构方程<sup>[1]</sup>:

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

其中,A 是屈服强度;B 是强化模量; $\epsilon$  是塑性应变; $\dot{\epsilon}$  是应变率;C 是应变率敏感系数;m 是热传导系数。

### 3 结果与分析

图 3 显示了单面冲击下,冲击面、未冲击面和孔边缘深度方向残余应力的分布曲线,应力分布情况都是离孔中心 1.25 mm 开始算起。图 3(a)表示了激光冲击面残余应力的分布曲线,可以看到由不同功率密度引起冲击表面 0~6 mm 范围内残余应力

的分布基本上很均匀,表面最大残余压应力都出现在孔边缘处,整个冲击区域残余应力差别不大,这是由于经过多次连续冲击后,材料残余应力场存在一定的饱和效应。在激光功率密度为 2.0 GPa 时孔边缘压应力达到了 -352 MPa,当峰值压力增加到 2.5 GPa 时,残余压应力值为 -298 MPa;当功率密度为 3 GPa 时,残余压应力值为 -421 MPa;当峰值压力为 4 GPa 时,残余压应力为 -365 MPa。可见,孔边缘残余压应力值并不是随着峰值压力的增加而增加,而是在 3 GPa 时达到最大值,这可能是由于边缘效应引起的。同时冲击边缘区域都是较大的拉应力。其原因是因为激光冲击后,激光冲击区域会发生塑性变形,而它四周的材料要抵抗这种变形,就产生了残余压应力;对于未冲击区域来说,冲击过后,冲击区表层产生纯轴压缩,同时在平行于表面的平面内使冲击区表面发生伸长,这也就导致了拉应力的生成。

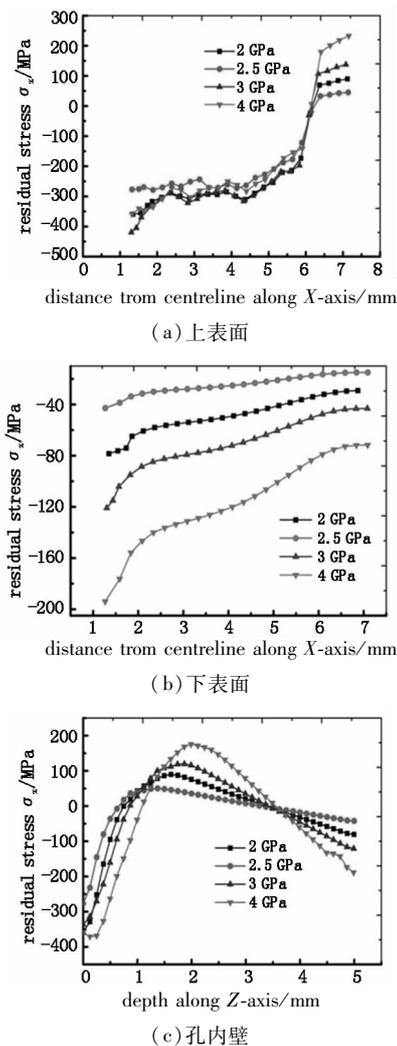


图3 单面冲击不同能量下残余应力场的分布

图3(b)表示了单面冲击下,未冲击表面残余应力的分布,可以清楚地看到,板料未冲击表面只有残

余压应力;随着峰值压力由 2 GPa 增加到 2.5 GPa 时,残余压应力值反而减小了,这是由于板料背面当激光能量增大时,大部分材料区域发生屈服,反而使残余应力减小;即使冲击波峰值压力达到 3 GPa 时,残余压应力提高的也不是很大,当峰值压力达到 4 GPa 时,材料发生进一步的屈服变形,残余压应力有了明显的提高,相对于 2 GPa 时,提高了近三倍多。

图3(c)表示了单面冲击下,表示孔内壁的残余应力的分布,随着功率密度的升高孔壁残余应力层深度明显不一样,峰值压力为 2 GPa 的残余压应力层明显比 2.5 GPa 的要深,而中间都是残余拉应力,当激光峰值压力为 4 GPa 的残余压应力最大而且压应力层也是最深,同时拉应力要比另外三个大的多,所以并不是激光能量越大越好,存在一个最佳范围。

由图4(a)表示了双面冲击下,上表面残余应力的分布,在激光峰值压力为 2.0 GPa 时,孔边缘残余应力为 -251 MPa;当峰值压力增加到 2.5 GPa 时,残余应力为 -375 MPa;峰值压力持续增加到 3.0 / 4.0 GPa 时,残余压应力稳定在 -400 MPa 左右;可见孔边缘残余应力是随着激光能量的增加而增加,但是最终将稳定在某个范围内,应力趋于饱和。下表面残余应力分布与上表面的相类似。双面冲击厚度方向残余应力的分布在激光峰值压力为 2.0 ~ 3.0 GPa 时比单面冲击更加平稳,应力分布规律也是随着峰值压力的增加而增加。

如图4所示,板料正面经双面冲击后产生的残余压应力最大,其次是双面冲击的背面、单面冲击的正面,虽然双面冲击反面残余压应力相对于单面冲击来说提高了 2 倍多,然而双面冲击正反两面以及单面冲击的正面都会在板料的边缘产生边界效应及残余拉应力,单面冲击虽然产生的残余压应力比较小,但是在板料背面会出现均匀的残余压应力表面,没有出现残余压应力,这对于提高板料的寿命极为有利。双面冲击上表面残余应力分布与单面冲击大致相同,但是下表面残余应力的分布截然不同,这是因为对于单面冲击来说下表面的残余应力是由板料变形而引起的;双面冲击的下表面的残余应力是由激光冲击所引起的。对于两种冲击厚度方向残余应力分布而言,双面冲击厚度方向残余应力的分布在激光峰值压力为 2.0 ~ 3.0 GPa 时比单面冲击更加平稳,应力分布规律也是随着峰值压力的增加而增加。但是一旦峰值压力增加到 4.0 GPa 时,在板料厚度方向 2.0 ~ 3.0 mm 处会产生较大的拉应力,相对于单面冲击提高了 38%,这对提高材料抗疲劳性

能是极为不利的。

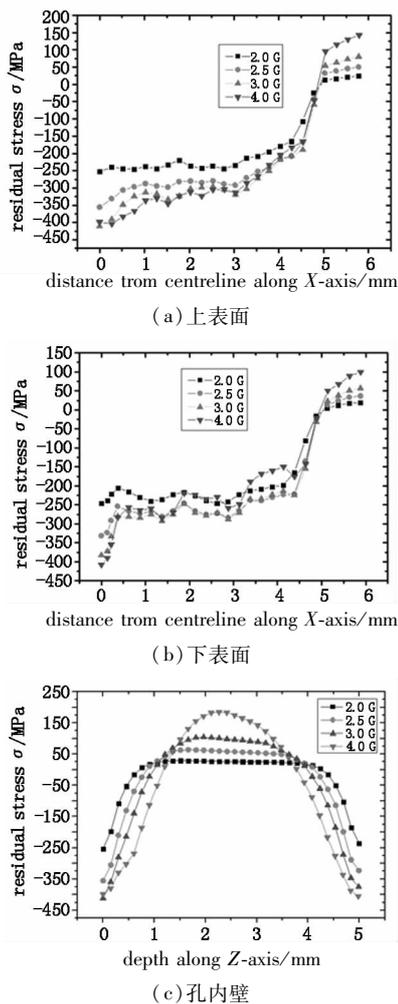


图4 双面先后冲击不同能量下残余应力场的分布

#### 4 结论

对强化后的小孔进行了上表面、下表面和厚度方向的残余应力的分析,根据以上的分析可以得出以下的结论:

(1) 冲击表面残余压应力在  $X$  轴方向上  $0 \sim 6$  mm 区域内分布很均匀,能量的变化对它的影响不是很大,表面最大残余压应力都出现在孔边缘处,整个冲击区域残余应力差别不大,这是由于经过多次连续冲击后,材料残余应力场存在一定的饱和效应。

(2) 构件单面冲击下表面只有残余压应力,然而并不是随着峰值压力的增加为增加,当峰值压力达到 4 GPa 时压应力最大,这是由于未冲击表面的残余压应力是由板料变形引起的。双面冲击下表面残余应力分布与上表面类似,因为上下表面都是经激光冲击过的,残余应力产生的方式大致相同。

(3) 构件厚度方向残余压应力的深度随着冲击波的峰值压力的增大而增大,当峰值压力达到 4 GPa 时,残余压应力的深度明显增大,并且也造成

板料厚度中心靠近上表面处产生过大的残余拉应力,这对提高材料的抗疲劳性能是极为不利的。

#### 参考文献:

- [1] Clauer A H, Fairand B P. Applications of lasers in metals processing [J]. Ohio: Metals Park, 1979: 229 - 253.
- [2] Lloyd A Hackel, Haolin Chen. Laser peening—a processing tool to strengthen metals or alloys to improve fatigue lifetime and retard stress-induced corrosion cracking [R]. New York: Laser Science and Technology, 2003.
- [3] Zhang Yongkang, Gao Li, Yang Chaojun. Theoretical analysis and experiment on deformation of TA2 sheet under laser shock [J]. Chinese J. Laser, 2006, 33 (9): 1282 - 1287. (in Chinese)  
张永康, 高立, 杨超君. 激光冲击 TA2 板料变形的理论分析和实验研究 [J]. 中国激光, 2006, 33 (9): 1282 - 1287.
- [4] Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Liu Huixia, et al. Experiments and FEM analysis of LD31 sheet deforming by pulsed laser shocking [J]. Applied Laser, 2004, 24 (6): 339 - 341. (in Chinese)  
周建忠, 张永康, 刘会霞, 等. 脉冲激光冲击 LD31 薄板变形的实验和数值模拟 [J]. 应用激光, 2004, 24 (6): 339 - 341.
- [5] Zhang Xinquan, Zhang Yongkang, Gu Yongyu, et al. Experimental study on metal sheet of LD31 aluminum alloy shocked by intense laser [J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech., 2007, 35 (Sup. I): 139 - 142. (in Chinese)  
张兴权, 张永康, 顾永玉, 等. 强激光冲击锻铝薄板的实验 [J]. 华中科技大学学报, 2007, 35 (Sup. I): 139 - 142.
- [6] Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming, et al. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. Chinese J. Laser, 2005, 32 (1): 135 - 138. (in Chinese)  
周建忠, 张永康, 周明, 等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析 [J]. 中国激光, 2005, 32 (1): 135 - 138.
- [7] Peyre P, Merrien P, Lieurade H P, et al. Laser induced shock waves as surface treatment for 7075 - T7351 aluminium alloy [J]. Surface Engineering, 1995, 11 (1): 47 - 52.
- [8] C S Montross, T Wei, L Ye, et al. Laser shock processing and its effect on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 1021.
- [9] Shang Deguang, Wang Ruijie. Fatigue life prediction based on dynamic response finite element simulation for spot-welded joint [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41 (5): 49 - 53.