

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0419-04

基于 ABAQUS 的激光喷丸成形数值模拟

杜建钧, 周建忠, 杨超君, 张兴权, 倪敏雄, 曹向广

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 激光喷丸成形是脉冲激光束冲击金属表面时形成一种冲击波, 传入工件内部使受喷材料在表面及内部产生深层分布的残余压应力场而使板料成形的技术。分析了多点全面喷丸成形、多点选择喷丸成形单曲面和马鞍形双曲面的激光喷丸方法, 建立了激光冲击波加载的数学模型, 并以有限元软件 ABAQUS 为平台, 对不同形状和尺寸的板料进行了激光喷丸成形的数值模拟, 验证了所分析的喷丸轨迹的正确性。发现采用不同轨迹对板料进行喷丸可以得到不同形状的板件。通过模拟, 可以为实验提供更准确的喷丸方案, 从而提高喷丸的效益和替代传统的试喷方法。

关键词 激光技术; 脉冲激光束; 激光喷丸成形; 数值模拟; ABAQUS

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

Numerical Simulation of Laser Peen Forming Based on ABAQUS

DU Jian-jun, ZHOU Jian-zhong, YANG Chao-jun, ZHANG Xing-quan,

NI Min-xiong, CAO Xiang-guang

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

Abstract Laser peen forming (LPF) is a process that elongates the peened metal surface and bends the overall shape with a shockwave, which is formed by a pulsed laser beam shocking the metal surface, penetrates the metal and introduces a residual impress stress field in the surface and inside. The methods of LPF including multi-full peening and multi-selective peen forming single curved face and saddle-saddle-shaped hyperboloid are studied. Mathematical mode of LPF is established, LPF of the sheet metal of different form and size is numerically simulated with the ABAQUS software and the availability of the analytical peen way is proved. The results show that different kinds of deformations can be obtained with diverse ways of peening. The simulation can offer accurate peening schemes for experiments, improve the efficiency and help replace the traditional test-peening with LPF.

Key words laser technique; pulsed laser beam; laser peen forming; numerical simulation; ABAQUS

1 引言

随着激光技术的快速发展,特别是高功率激光诱导冲击波技术的应用给板料成形提供了新的途径。激光喷丸成形技术正是将机械喷丸成形和激光冲击强化两者结合起来形成的一种新的板料塑性成形技术,并已在飞机机翼的制造中得到初步应用^[1]。但是激光喷丸技术发展还不到几年。2002年6月,美国加利福尼亚大学劳伦斯·里弗莫尔国家重点实验室的 Hackel 等申请的专利^[2]得到了美国国家专利局批准,才形象地提出了激光喷丸成形的概念。本文用 ABAQUS 软件进行了激光多点全面喷丸成形和激光多点选择喷丸成形的数值模拟,得到了不

同形状的板料,为激光喷丸成形工艺参数的优化、板料变形的理论分析提供了依据。

2 激光喷丸成形原理

激光喷丸成形技术是利用激光诱导产生的冲击波压力在金属板料内产生深层分布的高幅残余应力场使金属板料产生变形。其基本原理是,高功率密度短脉冲激光束照射覆盖在金属表面的能量转换体。能量转换体由约束层和吸收层组成,当激光束通过透明的约束层照射到试件表面的吸收层时,吸收层吸收激光能量气化产生等离子体。迅速膨胀的等离子体被限制在约束层和金属表面之间,产生一

基金项目: 国家自然科学基金(50475127)、江苏省自然科学基金(BK2004063)、教育部科学技术研究重点项目(204052)和国防航空基金(02H52053)资助课题。

作者简介: 杜建钧(1979—),男,浙江人,江苏大学机械工程学院硕士研究生,主要从事塑性成形方面的研究。

E-mail: dudreams@163.com

个向金属内部传播的高、强压力冲击波,使金属板料产生微观塑性应变,进而在金属表面及内部产生深层分布的残余压应力场。每一种应力场分布都有相对应的板料弯曲形状,故可以通过控制应力场分布形式,实现板料的成形,并且成形后的板料表面均存在残余压应力,如图 1 所示^[3]。

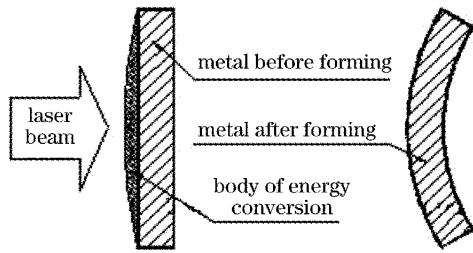


图 1 激光喷丸成形示意图

Fig. 1 Deformation of sheet by laser peening

3 激光喷丸成形的模拟

模拟所用的材料为铝合金 6061-T6,性能参数为屈服强度 255 MPa,抗拉强度 290 MPa,泊松比 0.35,弹性模量 68.9 GPa。实验所用激光器的波长为 1.06 μm,脉宽约 23 ns,能量 25 J 左右,有效光斑直径为 5 mm,激光脉冲为准高斯分布,如图 2 所示。

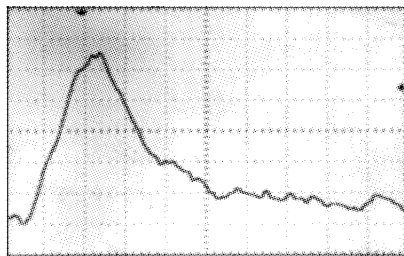
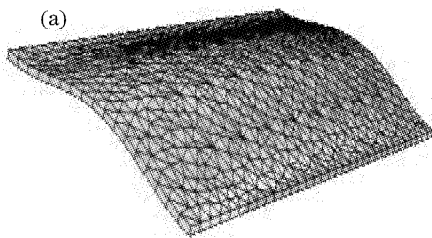


图 2 激光脉冲信号

Fig. 2 Laser pulse signal

3.1 激光冲击波的加载模型

在 ABAQUS 中按照加载方式预先设置一个振幅曲线,然后使载荷按照振幅曲线的变化规律进行



变化。根据资料研究^[4],激光诱导的冲击波的持续时间大约为激光脉冲的 2~3 倍,故模拟中取 70 ns,峰值压力为^[5]

$$p_{max} = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0 Z_{t_0} Z_{c_0} \rho}{(2\gamma-1)(K_0 Z_{c_0} + K_c Z_{t_0})}}, \quad (1)$$

式中 p_{max} 为激光脉冲产生的峰值压力; A 为吸收系数,在 0.80~0.95 之间; γ 为等离子体的绝热指数,取 1.67; Z_{t_0}, Z_{c_0} 分别为靶材和约束层材料的声阻抗; K_0, K_c 分别为与能量吸收和约束层密度有关的参量; ρ 为等离子体的密度,可以看作是约束层材料、能量吸收层和工件材料气化蒸气的综合体; I_0 为激光功率密度。

由于板料激光喷丸成形是一个高度非线性的瞬时动态事件,因此对其模拟主要是在 ABAQUS/Explicit 模块中进行。由于是多点喷丸成形,第一个点喷丸模拟完成后,需将数据带入模块中进行残余应力和回弹分析,并在模块中观察平衡状态下板料的变形,然后再将所得数据导入 ABAQUS/Explicit 模块进行第二点喷丸模拟。如此反复,直至模拟完所有的点,其分析过程如图 3^[6]。

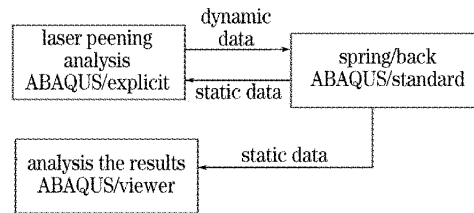


图 3 激光喷丸成形分析过程

Fig. 3 Laser peen forming analysis procedure

3.2 多点全面喷丸成形的模拟

多点全面喷丸成形的模拟所用的板分为两种:第一种是没有筋条,另外一种是有平行筋条的板,几何尺寸均为 100 mm×50 mm×1.2 mm。喷丸轨迹为沿着板件的宽度方向从一边向另一边均匀喷丸。模拟后得到图 4 所示的没有筋条的板件成形图

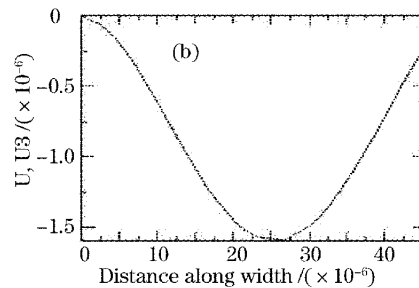


图 4 没有筋条的板件成形图(a)和截面变形曲线(b)

Fig. 4 Deformation of sheet (a) and curve of deformation of section (b) without muscle

和板件沿宽度方向截面变形曲线,图 5 为带有平行筋条的板件成形图和沿宽度方向截面变形曲线,其中 U_3 为位移轮廓。

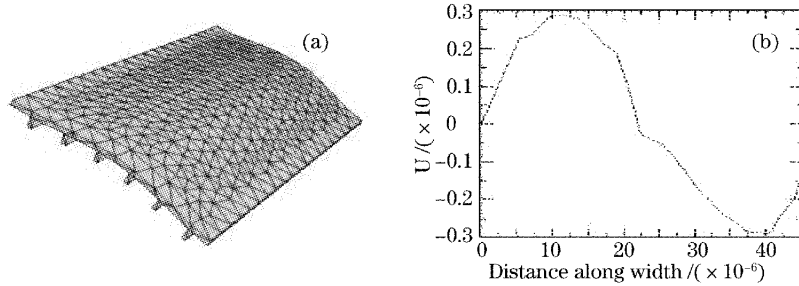


图 5 带有平行筋条的板件成形图(a)和截面变形曲线(b)

Fig. 5 Deformation of sheet (a) and curve of deformation fo section (b) with muscles

3.3 多点选择喷丸成形模拟

对于纵向和横向刚度差值不大的整体厚蒙皮零件,或刚度差值较大而且零件长度比又很大的整体厚蒙皮零件,采用激光选择喷丸方法成形单曲面和马鞍形双曲面。

3.3.1 单曲面成形模拟

模拟选用的板料尺寸为 $100 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times$

0.5 mm 。首先对板件的全部外表面进行激光喷丸,当板料横向曲率基本达到图纸所要求的双曲率外形时,可沿纵向对另一表面上的两条长边进行喷丸,使板料边缘的材料延展,消除由于全面激光喷丸方法在纵向所产生的曲率。图 6 为经模拟后得到的板料成形图及截面变形曲线。

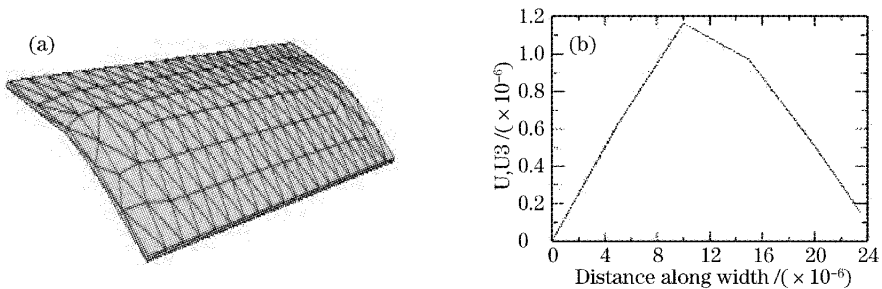


图 6 (a)板料成形图;(b)截面变形曲线

Fig. 6 (a) Deformation of sheet; (b) curve of deformation of section

3.3.2 马鞍形双曲面的成形

马鞍形双曲面的成形是在单曲面已经成形的基础上进行的,与单曲面不同的是,马鞍形双曲面成形

时需对板料长边的正反两面进行喷丸,并且激光能量增加到 50 J ,使边缘的材料延展得更多。经模拟后得到图 7 板料成形图及沿长度方向截面变形曲线。

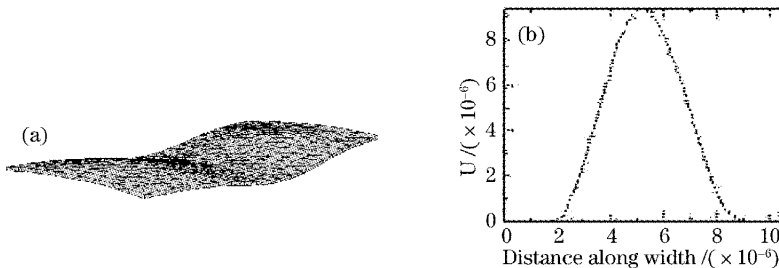


图 7(a)板料成形图;(b)截面变形曲线(长度方向)

Fig. 7 (a) Deformation of sheet; (b) curve of deformation of section (length)

4 结 论

金属板料的激光喷丸成形是一个较为复杂的过程,利用有限元模拟的方法,可以为设计者提供合理的设计依据和工艺安排。本文采用数值模拟的方法得到了激光喷丸轨迹与板料形状的关系模型,分析与模拟得到了较好的吻合。板料的变形量在毫米级范围内。采用模拟与实验相结合的研究方法,必将对激光喷丸成形技术应用于生产实践起推动作用。

参 考 文 献

- 1 Lloy A. Hackel, Hao-lin Chen. Laser peening-A processing tool to strengthen metal or alloys to improve fatigue lifetime and retard stress-induced corrosion cracking [J]. *Laser Science and Technology*, September 2003
- 2 Hackel, Llyod, Harris *et al.*. Contour Forming of Metals By Laser Peening [P]. US Patent Number: W001/05549A2, 2002-06-25
- 3 Arnie Heller. Laser process forms thick, curved metal parts [J]. *Science and Technology*, October 2003
- 4 Li Zhiyong, Zhu Wenhui, Cheng Jingyi *et al.*. Experimental study of high-power pulsed laser induced shock waves in aluminum targets [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(3): 259~262
李志勇,朱文辉,程经毅等. 实验研究脉冲强激光在铝靶中诱导的冲击波 [J]. *中国激光*, 1997, **A24**(3): 259~262
- 5 Zhou Jianzhong, Yang Jichang, Zhou Ming *et al.*. Experimental study on the effects of overlay lproperties on laser-induced shock waves [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 1041~1044
周建忠,杨继昌,周明等. 约束层刚性对激光诱导冲击波影响的研究 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11): 1041~1044
- 6 William Braisted, Robert Brockman. Finite element simulation of laser shock peening [J]. *International J. Fatigue*, 1999, **21**: 719~724