

两工位激光单次同步冲击 TC4 钛合金薄板成形的数值模拟

张 标 张兴权 王海荣

(安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要 根据现有的激光冲击成形理论,利用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,通过合理的简化、建模及单元的选择、材料属性的设定、网格的划分、约束的施加、求解的控制等,建立了 TC4 钛合金薄板两工位激光单次同步冲击成形的有限元模型,并对成形的过程进行了数值模拟。在后处理中绘制了成形过程的动态响应曲线,分析了冲击波在靶材中的传播及衰减特点;通过路径的操作,绘制了成形后的轮廓曲线,并对应力分布状况进行了深入分析,为激光同步冲击成形的研究与应用提供参考。

关键词 激光技术;激光冲击成形;TC4 钛合金;数值模拟;两工位;路径;轮廓曲线

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.121401

Numerical Simulation of TC4 Titanium Alloy Sheet Forming by Singly Synchronized Two-Station Laser Shocking

Zhang Biao Zhang Xingquan Wang Hairong

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China)

Abstract According to existing theory of laser shock forming, using finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA, through the reasonable simplification and modeling, and by carefully setting up the material properties, selecting elements, meshing, applying constraints, and controlling the solving steps, a finite element model for TC4 titanium alloy sheet forming by single synchronized two-station laser shocking is established and the forming process is simulated. In the post-processing, the dynamic response curve in the forming process is drawn and the characteristics of the shock wave propagation and attenuation in the target are analyzed. By using path operation, the formed contour curve is given and the stress distribution is further studied and analyzed. The study provides reference for the investigation and application of synchronized laser shock forming.

Key words laser technique; laser shock forming; TC4 titanium alloy; numerical simulation; two-station; path; contour curve

OCIS codes 140.3390; 240.6680; 320.5520

1 引 言

随着激光冲击强化(LSP)技术研究的不断深入以及应用的不断推广,激光冲击成形(LSF,也称激光喷丸成形)的理论开始被提出和研究,国内一些有条件的科研机构及院校开展了一些简单的相关成形试验,取得了初步成效。但是,由于激光冲击成形技术仍处于理论需不断深入研究与完善的阶段,同时受到激光器技术发展的限制,有条件开展激光冲击成形试验的单位很少,加之对试验材料制备的要求严格,试验开支大,在这种情况下想通过大量的试验开展研究是不现实的。随着计算机技术的不断发展与应用,利用有限元分析

收稿日期: 2011-08-26; 收到修改稿日期: 2011-09-03; 网络出版日期: 2011-10-25

基金项目: 安徽省自然科学基金(090414156)资助课题。

作者简介: 张 标(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光加工与数值模拟等方面的研究。

E-mail: zhangbiao049054138@126.com

导师简介: 张兴权(1970—),男,博士,副教授,主要从事激光加工、板料成形等方面的研究。

E-mail: zhang20020313@163.com

软件的强大功能,来实施激光冲击成形的数值模拟研究是当前的主要研究方法。

激光加工技术是一种先进的制造技术,在诸多的工业领域发挥了重要的作用,应用前景广阔。当前,激光加工技术在工业上的应用主要有激光焊接、打孔、切割、表面熔凝和涂覆及激光冲击强化等。激光冲击成形技术是激光加工技术最新的应用和研究方向之一,与传统的板料成形工艺相比,具有易于控制、加工柔性高、成形后材料性能好、无污染等优点^[1~3]。研究激光冲击成形技术对于开拓激光加工新领域、充分发挥激光加工技术的优越性和先进性具有重要的意义。

本文基于现有的激光冲击成形理论,利用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,数值模拟了 TC4 钛合金薄板两工位激光单次同步成形的过程。

2 激光冲击成形原理

根据激光与物质的相互作用产生冲击波的力学效应来使靶材发生定向的塑性变形是激光冲击成形技术的根本,其成形机理^[4~6]如图 1 所示,可描述如下。高功率密度(GW/cm^2 量级)、短脉冲(纳秒量级)的激光束透过约束层辐照在附着于靶材表面的吸收层上,吸收层吸收激光能量升温气化,气化后的蒸气持续吸收激光能量由气态变为等离子体。等离子体仍持续吸收激光能量继而发生爆炸,形成爆炸冲击波,冲击波向靶材内传播并在约束层的辅助作用下增强了峰值、延长了作用时间。当冲击波的动压强度大于靶材的动态屈服强度时,靶材发生塑性变形,在约束条件的作用下塑性变形可以定向发生,表现为激光冲击成形。

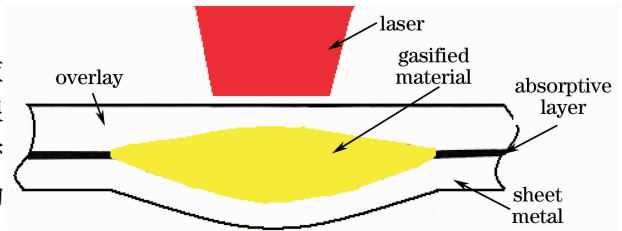


图 1 激光冲击成形示意图

Fig. 1 Schematic of laser shock forming

3 建立有限元模型

3.1 材料属性及模型尺寸

靶材薄板的材料为 TC4(Ti-6Al-4V)钛合金,其化学成分如表 1 所示。

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of TC4 titanium alloy

Compositions	Al	V	Fe	Si	C	H	N	O	Ti
Mass fraction /%	5.5~6.8	3.5~4.5	0.3	0.15	0.1	0.015	0.15	0.15	Rest

TC4 钛合金的材料属性如表 2 所示。在激光冲击的作用下,靶材的应变率高达 10^7 s^{-1} 以上。材料在如此高的应变率下,其力学性能不同于静态,一般情况下材料的动态屈服强度大于静态屈服强度。在分析中,冲击薄板材料本构模型选择理想弹塑性双线性各向同性强化模型,采用 Von Mises 屈服准则,当冲击波的强度大于材料的动态屈服强度时,材料将发生塑性变形。材料的动态屈服极限可根据 $\sigma_y^{\text{dyn}} = E_{\text{HEL}}(1 - 2\nu)/(1 - \nu)$ 算出^[7],其动态屈服强度为 1.34 GPa。而对于凹模和压板则采用刚体模型,并且约束其所有的平动自由度和转动自由度。模型长、宽、厚分别为 60、30 和 0.5 mm。

表 2 TC4 钛合金材料属性

Table 2 Material properties of TC4 titanium alloy

Material	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Poisson's ratio ν	Elastic modulus E / GPa	Hugoniot elastic limit $E_{\text{HEL}} / \text{GPa}$
TC4	4500	0.342	110	2.8

3.2 分析模块选择

ANSYS/LS-DYNA 是功能齐全的非线性显式分析程序包,可以求解各种几何非线性、材料非线性和基础非线性问题,其显式算法特别适于分析各种非线性结构冲击动力问题,如爆炸、冲击、应力波的传播等^[8]。因此,本文采用 ANSYS/LS-DYNA 软件的显式分析功能对两工位激光单次同步冲击成形过程进行模拟分析。

3.3 单元的选择、实常数设定与网格划分

3.3.1 选择单元

对于冲击薄板及凹模与压板,本文均采用 ANSYS/LS-DYNA 中提供的三维实体单元 SOLID164。为了避免出现沙漏问题,单元算法设置为全积分单元算法(Full Int S/R)。

3.3.2 实常数确定

本文采用协调单位 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$,应力单位为 100 GPa。由于采用的是三维实体单元,故实常数部分可以不予设置考虑,根据模型实际尺寸进行建模即可。

3.3.3 网格划分

根据冲击成形工艺及激光冲击成形的特点,在建模中把压板与凹模在冲击区域的口径设置为其冲击区域的 2 倍。由于本文模拟采用直径为 6 mm 的圆形激光光斑,因此压板与凹模的口径为 12 mm,其三维实体模型如图 2 所示。

首先对平面进行分割,以保证划分单元的质量。在对冲击薄板进行网格划分时,在 2 倍于冲击区域的范围内进行了网格细化,并根据冲击成形工艺,在成形的边缘区域对网格进行进一步的细化,共形成单元 100992 个。为了减少计算时间,对于刚体模型压板及凹模采用粗略网格划分,形成单元数分别为 717 个和 912 个,网格模型如图 3 所示。

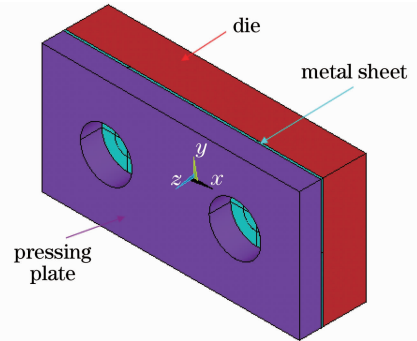


图 2 三维实体模型

Fig. 2 3D solid modal

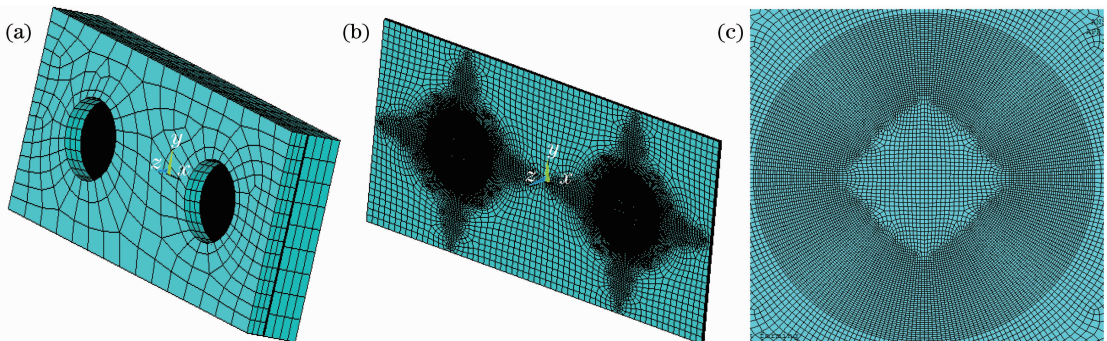


图 3 有限元网格模型。(a)全局网格模型;(b)薄板网格模型;(c)冲击区域局部网格放大模型

Fig. 3 Finite element mesh model. (a) Global mesh model; (b) sheet mesh model; (c) local mesh zoom model of shocked area

3.4 施加约束、载荷与求解控制

3.4.1 施加约束

为了消除边界反射等因素对成形过程的影响,模型对薄板与冲击方向平行的边界面施加非反射边界条件,同时打开膨胀波和剪切波的吸收开关以模拟真实的效果。

3.4.2 载荷处理与加载

把激光冲击波的波形简化为三角波形,峰值压力为 6 GPa。根据试验经验,冲击波的作用时间为脉冲宽度的 3~5 倍,取为 100 ns,半峰全宽为 50 ns,如图 4 所示。分别选择薄板的两个冲击区域的单元创建两个组元,作为施加载荷的载体。

3.4.3 求解控制

通过模拟验证,当求解时间大于 $8 \mu\text{s}$ 时,整个模型的冲击波动能几乎为零,所以求解时间设置为 $8 \mu\text{s}$ 。

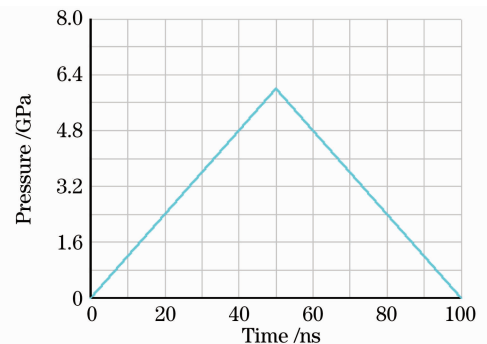


图 4 简化的冲击载荷施加压力曲线

Fig. 4 Simplified load curve of shock pressure

时间步长选择为自动时间步长,打开全部能量控制开关,同时输出 ANSYS 和 LS-DYNA 结果文件,在美国信息互换标准代码(ASCII)输出选项中选择默认的总模型数据(GLSTAT)。

4 模拟结果与分析讨论

4.1 能量分析与讨论

冲击成形过程中的能量动态响应曲线如图 5 所示。从图中可以看出,当求解时间达到 $8 \mu\text{s}$ 时,动能已经趋于零,所以求解结束时间的设置是合理的。在开始加载阶段 $0 \sim 100 \text{ ns}$ 范围内,动能快速上升至峰值。100 ns 之后加载结束,内能增大,时沙漏能量实施控制,动能开始减小并趋于零,总能量在沙漏能量增大时略有降低,之后便保持不变,反映了能量守恒的原理。

4.2 成形轮廓分析与讨论

脉冲激光诱发的冲击应力波在靶材内传播超过材料的动态屈服极限时,薄板靶材发生屈服。在压板和凹模的辅助作用下,在特定区域发生预期的宏观变形,放大显示后其变形应力分布如图 6 所示。为了进一步分析轮廓的形貌,在靶板的长度方向几何对称轴线上定义一条路径,将变形轮廓的节点位置映射到路径上,其形状如图 7 所示。从图 7 可以看出,在冲击区域的中心处,靶材的变形最大,轮廓的开口口径是 12 mm,这是因为在凹模和压板的辅助作用下,限制了冲击成形后的轮廓口径的大小。

4.3 应力分析与讨论

4.3.1 压力波的传播与衰减过程

为了便于观察靶板不同位置压力波的传播与衰减情况,依次选择从一个冲击区域中心至靶板上表面几何中心处的 5 个单元作为研究对象,其位置分别位于靶板冲击区域中心、冲击区域内部边缘、2 倍冲击区域边缘即凹模模口位置、模口与上表面几何中心距离的 $1/2$ 处和上表面集合中心。单元号依次分别为 26913、14232、14517、24885、24948,其应力波的传播如图 8 所示。从图 8 可以看出,A、B 两单元在 $0 \sim 100 \text{ ns}$ 的压力波的响应与压力波的加载完全同步,其原因在于它们位于冲击波冲击区域内。随着冲击波在靶材内的传播,离冲击区域渐远的位置对冲击波的响应时间依次滞后,并且冲击波的峰值减小、波长拉长,这是因为冲击波在板材内传播时,由于变形能、塑形功、阻抗等的作用而发生了衰减。

4.3.2 应力分布

为了清晰地观察应力在冲击成形后的分布情况,把应力也映射到之前定义的路径上,同时绘制出轮廓曲线与应力的分布曲线,以进行比较分析,如图 9 所示。从图中可以看出,最大应力集中在靶材在凹模模口的位置,这

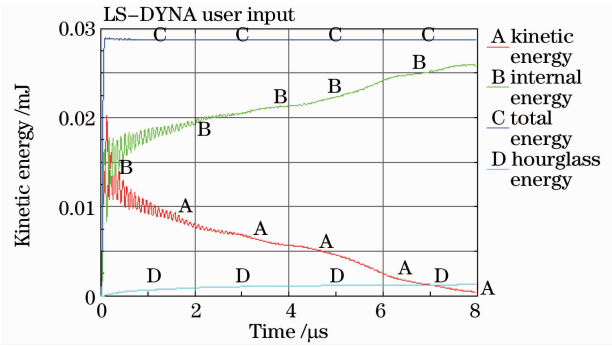


图 5 冲击成形过程中的能量变化曲线
Fig. 5 Energy evolution curve during laser shock forming

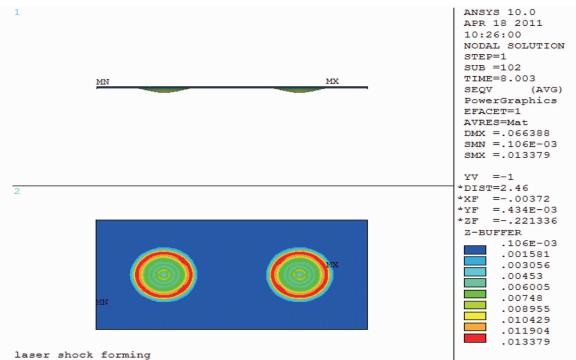


图 6 模拟成形后的 Von Mises 应力主视图和俯视图
Fig. 6 Front view and top view of the Von Mises stress after forming

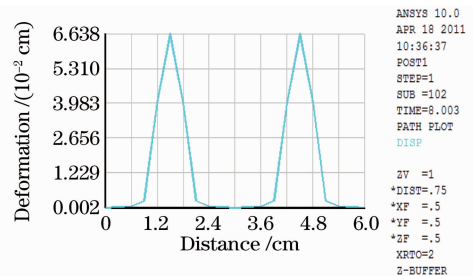


图 7 成形后轮廓曲线
Fig. 7 Formed contour curve

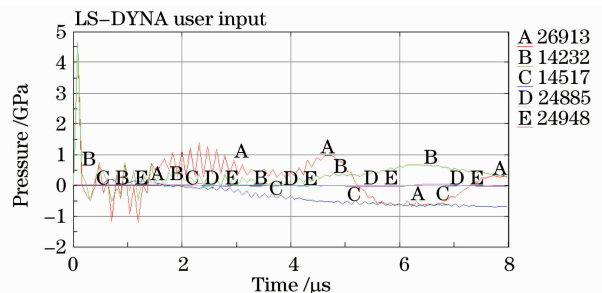


图 8 压力时间历程曲线
Fig. 8 Pressure evolution curve

与冲击成形工艺特点完全吻合。在几何图形上显示应力的分布如 10 所示,直观地反映了应力在靶材内的分布情况和特点。

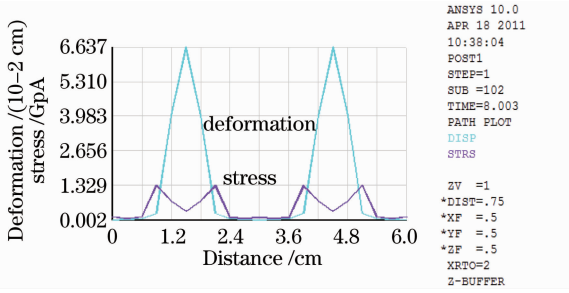


图 9 路径上成形轮廓曲线与应力分布曲线
Fig. 9 Forming contour curve and stress distribution curve on the path

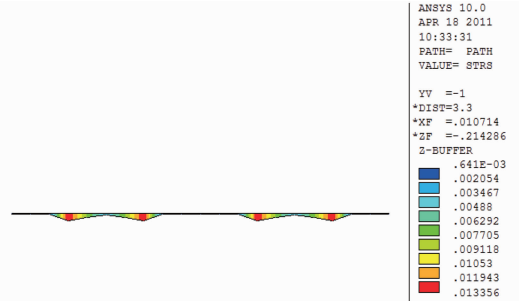


图 10 路径上显示的几何模型二维应力状态
Fig. 10 2D stress state of geometric model on the path

5 结 论

利用 ANSYS 软件,建立了两工位激光同步冲击 TC4 钛合金靶板成形的有限元模型,讨论了冲击成形过程中能量的变化过程与机理。绘制了冲击波在靶材内的动态响应曲线,并分析了冲击波在靶材内的传播与衰减的特点。通过路径的定义与使用,直观地反映了冲击成形后的轮廓形状与应力分布情况。本文结果可为激光同步冲击成形的研究与应用提供参考。

参 考 文 献

- Ji Zhong, Liu Ren, Sun Sheng. Advances in laser peen forming[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 061403
季 忠, 刘 韧, 孙 胜. 激光冲击成形研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(6): 061403
- Yang Jichang, Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang *et al.*. Study on laser shock forming of metal sheet[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2002, **23**(1): 1~4
杨继昌, 周建忠, 张永康 等. 激光冲压金属板料成形的研究[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2002, **23**(1): 1~4
- Tong Yanqun, Yao Hongbing, Zhang Yongkang *et al.*. Experimental research of high-speed plate deformation process shocked by strong and short pulsed laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0203007
佟艳群, 姚红兵, 张永康 等. 强短脉冲激光冲击薄板高速变形的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0203007
- Du Jianjun, Zhou Jianzhong, Ni Minxiong *et al.*. Analysis of sheet deforming by pulsed laser shocking [J]. *Electromachining & Mould*, 2006, (suppl.): 30~33
杜建军, 周建忠, 倪敏雄 等. 脉冲激光冲击金属板料变形的数值模拟[J]. *电加工与模具*, 2006, (suppl.): 30~33
- Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Yang Jichang *et al.*. A new technique on plastic forming of metal sheet by laser shock wave[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, **13**(22): 1938~1940
周建忠, 张永康, 杨继昌 等. 基于激光冲击波的板料塑性成形新技术[J]. *中国机械工程*, 2002, **13**(22): 1938~1940
- Zhou Jianzhong, Zhang Ying. Sheet metal forming by using laser shock wave[J]. *Metal Forming Technology*, 2002, (1): 26~31
周建忠, 张 莹. 金属板料的激光冲击成形技术[J]. *金属成形工艺*, 2002, (1): 26~31
- Wang Lili. *Foundation of Stress Waves*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985. 149~159
王礼力. *应力波基础*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985. 149~159
- Shang Xiaojiang, Su Jianyu, Wang Huafeng. *ANSYS/LS-DYNA Dynamic Analysis Methods and Projects*[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. 3~7
尚晓江, 苏建宇, 王化锋. *ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. 3~7