

文章编号: 1001-3806(2010)01-0095-04

激光功率密度对板料激光冲击成形性能的影响

姜银方, 应才苏, 刘赤荣, 石朝阳, 周桂生
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了研究激光功率密度对铝合金板激光冲击成形性能的影响, 采用数值仿真的方法, 选用不同激光功率密度对铝合金板进行激光冲击成形数值模拟, 获得不同激光功率密度与冲击次数下的板料成形极限, 并对不同激光功率密度冲击下板料的成形深度、厚度及应力分布进行了分析。结果表明, 板料在中心处容易发生破裂; 板料的成形极限与激光功率密度大小成反比, 而与激光冲击次数成正比; 通过合理选择激光功率密度和冲击次数可提高铝合金板的成形性能。

关键词: 激光技术; 激光冲击成形; 数值仿真; 激光功率密度; 成形性能

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.027

Effect of laser power density on laser shock formability of sheet metal

JIANG Yin-fang, YING Cai-su, LIU Chi-rong, SHI Chao-yang, ZHOU Gui-sheng

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

Abstract: In order to study the effect of laser power density on laser shock formability of aluminum alloy sheet, the forming limit, depth, thickness and stress distribution of the sheet were simulated under different laser power density and different number of laser shock. The results show that fracture is prone to happen in the centre of sheet and the forming limit is inversely proportional to the laser power density, but directly proportional to the number of laser shock. The formability of aluminum alloy sheet can be optimized through proper choice of laser energy and the number of laser shock.

Key words: laser technique; laser shock forming; numerical simulation; laser power density; formability

引言

板料激光冲击成形是利用激光与物质相互作用产生等离子体爆炸后形成冲击波的压力使金属板料产生变形的成形方法, 是近年来出现的一种柔性洁净的无模成形新方法^[1-3]。金属板料激光冲击成形技术于2002年始见于相关文献, 美国加利福尼亚大学 Lawrence Livermore 国家重点实验室 HACKEL 等人提出用激光冲击强化装置来实现板料塑性成形的原理和方法, 并申请了专利。同年, 美国通用电器公司 JOSEF 等人的专利中也提到了相似的成形概念^[4]。2003年美国的 THORSLUND 等人对激光冲击过程中的温度、冲击波压力以及残余应力进行了研究^[5], 介绍了计算温度、压力和应力的数学模型, 指出在激光冲击过程中, 冲击波的压力超过板料的屈服强度时, 板料会发生塑性变形。同年, 沙特阿拉伯的 ARIF 进行了金属板

料激光冲击的塑性变形和残余应力分布的研究, 并用有限元的方法对激光诱导的冲击波的传播进行了仿真^[6]。国内许多学者也投身于激光冲击成形的研究工作, 利用不同材料进行了大量试验。但关于激光冲击成形的基础理论、关键技术的研究尚未成熟。国内外研究处于初级阶段, 特别是对金属薄板激光冲击成形性能方面的研究还未见报道。因此, 本文中通过数值仿真方法研究激光能量密度对铝合金板激光冲击成形性能的影响。

1 试验与仿真

1.1 试验

试验中采用纳秒高功率钕玻璃激光器, 脉冲宽度为23ns, 激光光斑直径为8mm; 功率密度为2.32GW/cm², 激光波长为1.064μm, 实验材料为40mm×40mm×

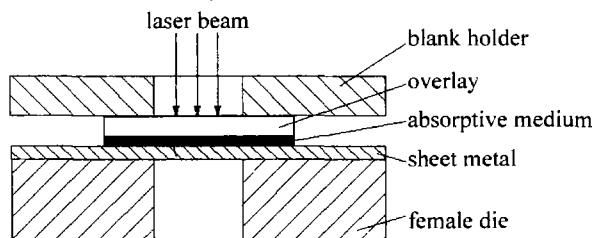


Fig. 1 The schematic diagram of laser shock forming

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50735001)

作者简介: 姜银方(1962-), 男, 教授, 主要从事激光加工、材料工程、模具CAD/CAE/CAM、薄板成形及塑性成形理论等方面的教学和研究工作。

E-mail: yfjiang62@163.com

收稿日期: 2008-11-03; 收到修改稿日期: 2009-02-23

0.3mm LY12 铝合金薄板,凹模孔径为 $\varnothing 20\text{mm}$,凹模圆角 2mm,板料激光冲击成形示意图如图 1 所示。

1.2 板料激光冲击成形的破裂判据

由于激光冲击成形下材料的高应变率超快塑性变形理论和力学行为分析还不完善,与喷丸变形、爆炸变形相比,激光冲击作用下板料的应变率高 2 个~3 个数量级,而且材料组织的转变、性能及微观金相组织的变化都不一样。所以,现有的动态塑性变形理论,是否适合解释激光冲击作用下,材料的高应变率塑性变形行为,还需要进一步研究。鉴于以上原因,本文中在判断金属板料激光冲击成形极限时,将采用厚度梯度准则来判断板料的激光冲击成形极限。具体步骤是:将两个相邻测量点中,距颈缩较近的测量点的厚度除以远离颈缩的测量点的厚度得到厚度比,厚度比再除以两个测量点的距离。

应用厚度梯度准则作为有限元分析的破裂准则,首先要在有限元模型中找到变形过程中厚度明显变薄的区域,然后跟踪这个区域中的单元在整个变形过程中的厚度变化,当该区域中的厚度梯度值小于临界梯度值 R_c ,即认为试件发生颈缩。厚度梯度准则可以表示为^[7-9]:

$$R < R_c \quad (1)$$

式中, R 为成形后试件中的厚度梯度值; R_c 为临界厚度梯度值。

对 LY12 铝合金进行了激光冲击成形试验,使受冲击区板料产生微裂,采用特制千分尺对板料厚度进行测量,获得激光冲击试样出现颈缩时,沿垂直于颈缩方向测得的厚度分布图,见图 2,其中横坐标为沿垂直于颈缩方向的坐标网格编号。

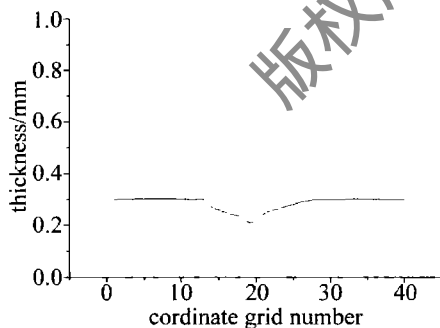


Fig. 2 Thickness distribution perpendicular to necking direction of the test sample

由厚度分布图可进一步计算得到板料厚度梯度值,通过计算得出其临界厚度梯度值 $R_c = 0.91$ 。故认为试件中的厚度梯度值 $R < 0.91$ 时认为颈缩发生。因此在仿真时,当板料厚度梯度 R 满足(1)式时,即认为材料已经发生颈缩。

1.3 仿真模型与参量

采用动态显式弹塑性有限元软件 ABAQUS 进行

数值仿真,激光冲击作用时间为 70ns;激光光斑直径为 8mm;凹模孔径为 $\varnothing 20\text{mm}$;凹模圆角 2mm;试样采用 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ 的 LY12 铝合金薄板,材料本构关系采用考虑了应变率与硬化效应的 Johnson-Cook 模型,基本参量见表 1;板料单元类型为 S4R;有限元计算模型如图 3 所示,板料网格半径为 0.5mm。

Table 1 The characteristic parameters of material^[10]

density	$2770\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Poisson ration	0.3
elastic modulus	654GPa
A	265MPa
B	426MPa
n	0.34
C	0.015

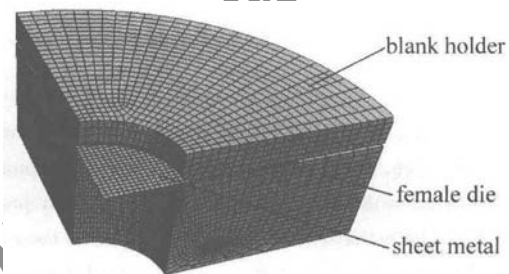


Fig. 3 Finite element model

表 1 中 4 个参量 A, B, C 和 n 都是与材料相关的系数。其中, A 为材料在准静态下的屈服强度; B 和 n 为应变硬化的影响; C 为应变率敏感指数。

2 结果与分析

采用不同激光能量密度及冲击次数对板料进行单点激光冲击,势必能得到板料的临界破裂状态。为了获得激光能量密度与板料最大成形深度的关系,选择了 3 种冲击方案:(1)单点 3 次激光冲击使板料破裂达到最大成形深度;(2)单点 2 次激光冲击使板料破裂达到最大成形深度;(3)单点 1 次激光冲击使板料破裂达到最大成形深度。

2.1 成形深度的分析

板料变形量随着冲击次数的增加而增大(见图 4),当峰值压力为 3.4GPa,3 次冲击后板料达到最大成形深度;当峰值压力为 4.2GPa,2 次冲击后板料达到最大成形深度;而当峰值压力为 5.6GPa,经过 1 次冲击板料就已经达到其最大成形深度。

对 3 种不同激光峰值压力、冲击次数与板料的最大成形深度进行对比(见图 5)。比较发现,虽然不同的激光能量密度在不同的冲击次数下均可以冲击板料发生破裂现象,但是在激光能量密度较大单次冲击板料破裂时的成形极限深度最小,而在激光能量密度较

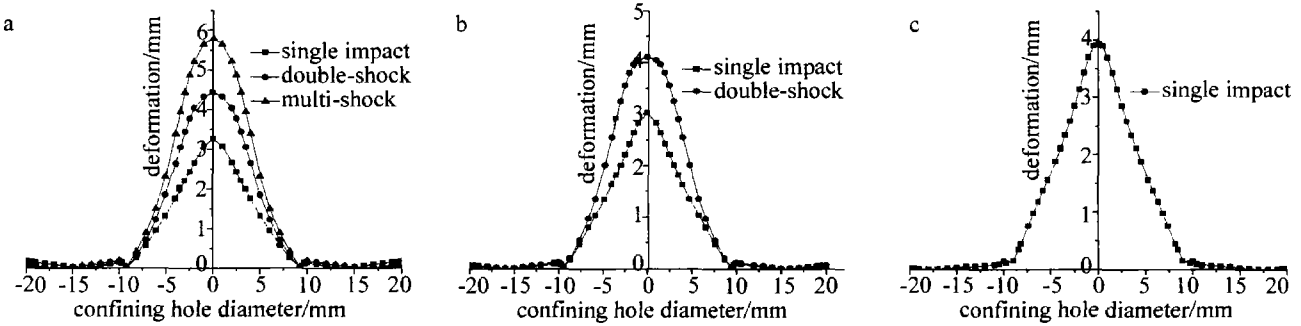


Fig. 4 The deformable models of sheet under various number of shock
 a—peak pressure 3.4GPa b—peak pressure 4.2GPa c—peak pressure 5.6GPa

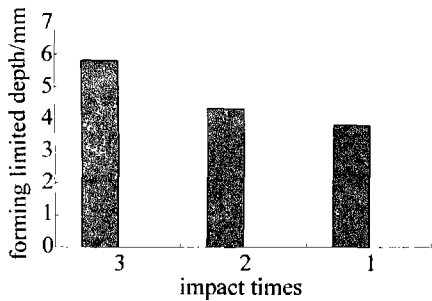


Fig. 5 The forming limit of sheet under the various laser power

小冲击次数较多的情况下,板料的成形极限深度最大,即板料成形极限深度与激光能量密度大小成反比,而

与激光冲击次数成正比。这与传统多步冲压板料可以提高其成形深度相同,因此,通过合理选择激光能量密度和冲击次数,在满足板料较大成形深度的需要的同时,不使板料受冲击发生破裂现象。

2.2 板料厚度分析

由图6可知,随着冲击次数的增加,板料中心处的板料厚度减薄最快,最容易发生破裂。由于光斑半径是4mm,受激光冲击的区域内板料厚度减薄的比较快,所以,在距板料中心距离小于4mm之内的板料厚度相对4mm之外的板料厚度减薄较快。

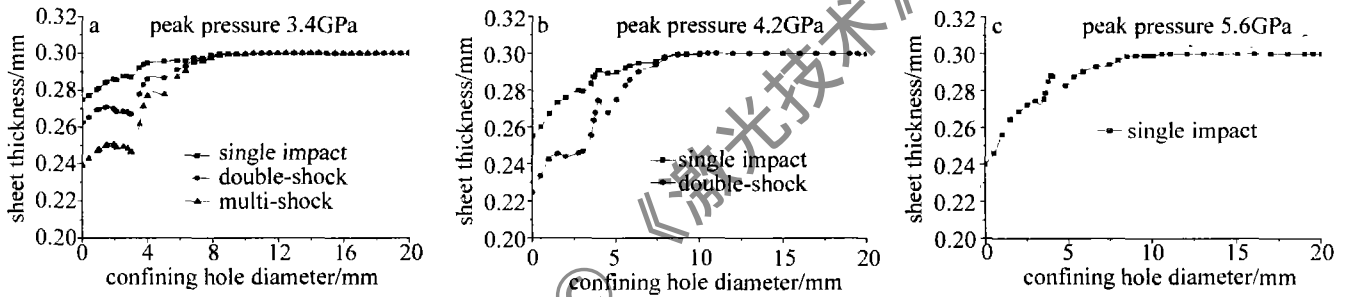


Fig. 6 The thickness under various number of impact

2.3 径向截面应力分析

沿板料中心到边缘径向方向定义一截面来研究板料在激光冲击发生破裂时其应力应变状况,该截面的Mises 应力状况如图7所示,3种峰值压力时的应力分布趋势基本相同。在板料中心处(破裂处)的应力并不是最大,但是其等效应变值却是最大(见图8),这说明了板料中心处材料发生塑性变形更大,厚度减薄最快,最容易发生破裂。主要是因为该点已经发生破裂,

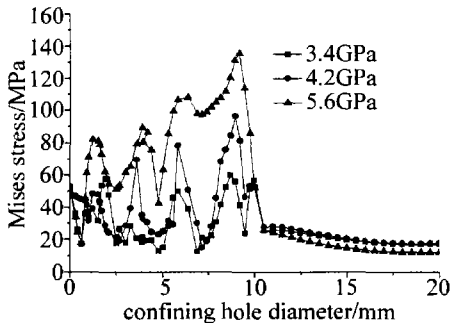


Fig. 7 The radial section stress of sheet under various number of peak pressure

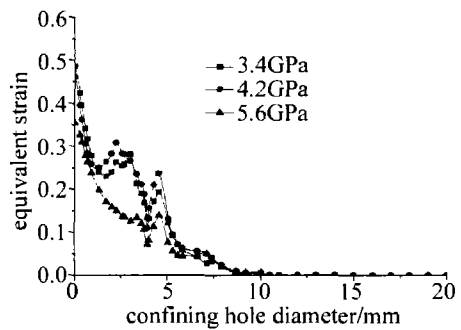


Fig. 8 The distributing radial section equivalent strain under various number of peak pressure

应力释放较大,因此应力较小。

3 结论

(1)提出了应用厚度梯度准则作为金属板料激光冲击成形有限元仿真的破裂判据。(2)板料的成形深度随着激光能量密度的增大而增加;板料成形极限与激光能量密度大小成反比,而与激光冲击次数成正比,通过合理选择激光能量密度和冲击次数可提高铝合金板的

成形性能。(3)不同激光能量密度下板料在中心处厚度减薄最快,最容易发生破裂,且该点等效应变值最大。

参 考 文 献

- [1] GAO L,ZHANG Y K. FEM studies on deformation of TA2 sheet metal by laser shock [J]. Applied Laser,2006,26(3):154-156 (in Chinese).
- [2] ZHOU J Z,ZHANG Y K,ZHOU M, *et al.* Study on technique of laser shock forming of metal sheet [J]. Laser Technology,2002,26(6):478 (in Chinese).
- [3] CHEN Y B,ZHOU J Zh,HUANG Sh, *et al.* Study on the numerical simulation of laser forming of sheet metal based on ABAQUS code [J]. Applied Laser,2007,27(3):175-180 (in Chinese).
- [4] JOSEF R U,TAYLOR W L,PHILLIP R S, *et al.* Short-pulse high-peak laser shock peening; U S,252620 [P]. 1999-02-16.
- [5] THORSLUND T,KAHLEN F J,KAR A. Temperature, pressure and stress during laser shock processing [J]. Optics and Lasers in Engineering,2003,39(1):51-71.
- [6] ARIF A F M. Numerical prediction of plastic deformation and residual stress induced by laser shock processing [J]. Journal of Materials Processing Technology,2003,136(1):120-138.
- [7] NARASIMHAN K. A novel criterion for predicting forming limit strains [C]//Materials Processing and Design; Modeling, Simulation and Applications. 2004 Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. Columbus, Ohio: American Institute Physics,2004:850-855.
- [8] CHEN W, GUO W G, HOU B, *et al.* Prediction of forming limit diagram in sheet metal forming based on thickness gradient criterion [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18 (18): 2246-2248 (in Chinese).
- [9] CHEN W, FENG H Y, YANG J C, *et al.* Application of thickness gradient criterion in establishing forming limit diagram [J]. Journal of Jiangsu University, 2008, 29 (1): 13-16 (in Chinese).
- [10] JOHNSON G, COOK W. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Hague; Netherlands International Ballistics Committee, 1983: 541-547.
- [9] TAPANES E. Dual-purpose fibre optic system providing simultaneous, real-time communication and distributed vibration sensing for pipeline applications [C]//International Pipeline Conference. Calgary: American Society of Mechanical Engineers, 1998:103-110.
- [10] LAFFREY D, LUBBERS J, KING B, *et al.* An effective and proven technique for continuous detection and location of third party interference along pipeline [C]// Proceedings of the 4th International Pipeline Conference. Core, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2002:947-952.
- [11] ZHOU Y, JIN Sh J, ZHANG Y Ch, *et al.* Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline leakage detection [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16 (8): 935-938 (in Chinese).
- [12] KURMER J P, KINGSLEY S A, LAUDO J S, *et al.* Distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection [J]. SPIE, 1991, 1586:117-128.
- [13] WASSEF W A, BASSIM M N, HOUSSNY-EMAM M. Acoustic emission spectra due to leaks from circular holes and rectangular slits [J]. J Acoust Soc Amer, 1985, 77 (3): 916-923.

(上接第33页)

- [3] CHEN H B, TU Y Q. Summary of leak detection methods for oil pipeline [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2000, 22 (1): 38-41.
- [4] BUCARO J A, HICKMAN T R. Measurement of sensitivity of optical fibers for acoustic detection [J]. Appl Opt, 1979, 18 (6): 938-940.
- [5] NIKLES M, VOGEL B, BRIFFOD F, *et al.* Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring [J]. SPIE, 2004, 5384: 18-25.
- [6] CAI D S, DAI H Ch, CAI Sh D, *et al.* Monitoring the temperature in concrete structure of three gorges dam by using distributed optical fiber sensor [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34 (5): 88-91 (in Chinese).
- [7] MENDOZA M, CARRILLO A, MÁRQUEZ A. New distributed optical sensor for detection and localization of liquid hydrocarbons part II: optimization of the elastomer performance [J]. Sensors and Actuators, 2004, A111 (2/3): 154-165.
- [8] WANG Y N, ZHAO Y L, JIANG Zh D, *et al.* Study on the distributed optical fiber sensor for long-distance natural gas pipeline leakage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37 (9): 933-936 (in Chinese).