

激光冲击波在铝合金薄板中传播特性研究

姜银方, 黄勤, 黄宇, 金华
(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为了研究激光冲击波在铝合金薄板中的传播特性, 采用数值仿真的方法, 分析了不同节点路径下, 冲击波在 3003 铝合金薄板中的传播特性。研究表明, 激光加载初期, 板料表面光斑边缘位置处应力最大, 而板料表面中心区域仅为较小的波动, 1000 ns 后, 表面波传播至板料上的凹模口对应位置, 同时中心位置区域应力增大至 200 MPa, 塑性变形加大, 板料变形不均匀, 易出现减薄失效问题; 沿激光冲击方向, 经历 60 ns 压力波传播至板料自由面, 并回传拉伸波, 在 102 ns 左右, 拉应力达到最大值 1782 MPa, 板料易出现层裂失效问题。因此针对激光冲击波在铝合金薄板中传播特性的研究对提高铝合金薄板激光冲击成形性能具有重要的意义。

关键词: 激光冲击波; 3003 铝合金薄板; 传播特性

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.006

Research on propagation characteristics of laser shock wave in aluminum alloy sheet

JIANG Yin-fang, HUANG Qin, HUANG Yu, JIN Hua
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to research the propagation characteristics of laser shock wave in aluminum alloy sheet, numerical simulation method is used. The paper analyses the propagation characteristics of shock wave in 3003 aluminum alloy sheet through path of different nodes. The result shows that in initial phase of laser loading, maximum stress appears on the edge of laser spot on sheet surface while only small fluctuation occurs in central area. After 1000 ns, the stress in central area increases to 200 MPa when surface wave propagates to the position that corresponds to concave die. At the same time, plastic deformation increases while sheet deformation is uneven, which would cause thinning failure. In laser shock direction, the pressure wave propagates to the free surface of sheet and returns tensile wave after 60 ns. At about 102 ns, the tensile stress reaches maximum value of 1782 MPa, which is liable to cause spallation failure. The results are important for improving aluminum alloy forming performance by laser shock.

Key words: laser shock wave; 3003 aluminum alloy sheet; propagation characteristics

1 引言

激光冲击成形技术是利用激光诱导的冲击波使金属板料产生塑性变形的一种新兴的冷成形技术, 在航天航空、汽车制造、薄板制造业等方面具有广阔的应用前景和很高的工程应用价值^[1]。在以激光为手段的板料成形方法中, 激光诱导的冲击波技术已被国内外学者广泛用于材料表面改性, 提高材料

表面硬度、抗疲劳寿命和耐磨损性能方面的研究^[2], 但是现有的研究中, 对于激光冲击波在材料

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, 教授, 主要从事板料塑性成形理论、激光加工技术、激光冲击技术等方面的教学和研究。E-mail: yfjiang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2012-03-08; **修订日期:** 2012-03-26

内部应力波的传播特性关注较少。激光诱导的冲击波在板料中是以应力波的形式传播的,应力波的传播特性与激光冲击成形性能十分密切,所以本文通过数值仿真的方法,对激光诱导的冲击应力波在3003铝合金薄板中的传播特性进行研究,为优化激光冲击成形工艺参数提供一定的理论依据。

2 有限元模型的建立

本文利用有限元软件 ABAQUS 进行有限元数值仿真分析,有限元的具体步骤如下:

2.1 Johnson-Cook 本构模型的建立

由于板料激光冲击成形是一个高度非线性的瞬态事件,而 Johnson-Cook 模型可以较好地描述金属材料的加工硬化效应、应变率效应和温度软化效应对材料屈服强度的影响,因此选用 ABAQUS/Explicit 中自有的 Johnson-Cook 模型对其模拟。表 1 为 3003 铝合金 Johnson-Cook 本构模型参数。

表 1 3003 铝合金 Johnson-Cook 本构模型参数

材料	A/MPa	B/MPa	n	C	弹性模量 E/MPa	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 ν
3003 铝合金	172	326	0.34	0.015	69000	2700	0.33

2.2 ABAQUS 建模要点

模型几何尺寸:模型包括三个部件组成,即凹模、压边圈和板料。凹模孔直径 20 mm,孔边缘倒圆角半径 1 mm;压边圈孔直径 20 mm;板料直径 40 mm,厚度 0.3 mm,在建模过程中,沿板料厚度方向,将板料等厚剖分十层。

单元选择和网格划分:激光冲击过程中,材料对瞬态、高压冲击的响应十分剧烈,有限元分析对网格类型和尺寸的要求很严格。考虑到板料激光冲击成形的特点,板料及压边圈选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,凹模因有圆角而选择 C3D4 类型网格,本文中将压边圈和凹模设置为刚体,其网格大小设置为 0.5 mm,而板料网格大小设置为 0.008 mm。网格划分如图 1 所示。

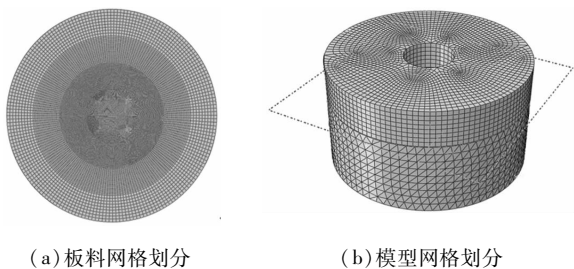


图 1 网格划分图

边界条件的定义:在激光冲击成形模拟过程中,将板料自由放置在凹模底座上,然后在板料上面加压边圈,并施以 2 MPa 的压边力,以约束板料 Z 轴方向和绕 X 轴、Y 轴的自由度同时设置接触面间的摩擦系数为 0.2。

冲击波载荷的设置:在建立金属板料激光冲击成形模型时,将激光诱导的冲击波简化为作用在冲击区域内的压力载荷,然后将其直接作用在板料表面上。Fabbro 等^[3]建立了激光冲击波传播的一维模型,并对靶材表面的冲击波峰值压力进行了估算,本文中峰值压力大小为 3000 MPa,激光光斑直径为 10 mm。

冲击波压力加载历史曲线近似符合高斯分布,如图 2 所示,其压力作用时间取激光脉宽的 3 倍。由于模拟时采用的激光脉宽 $\tau = 23 \text{ ns}$,这样每一次冲击加载的作用时间就为 70 ns 左右,取为 70 ns,载荷施加效果如图 3 所示。

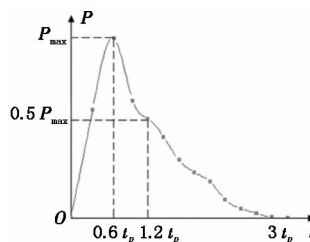


图 2 激光冲击波压力加载幅度曲线^[4]

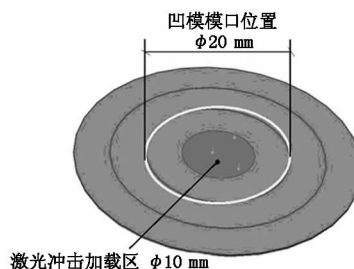


图 3 板料载荷加载图

3 节点路径的定义

节点路径在某一时刻的应力分布称为波形曲线,而用一系列的不同时刻的波形曲线可以形象的刻画出应力波的传播^[5],因此本文将从节点路径的角度来对激光冲击波在板料中的传播特性进行研究。

在铝合金板料的冲击正面上定义一条沿直径方向的水平节点路径(以下简称表面水平路径),该路径的起点和终点为板料冲击正面上直径两端边缘处的节点,如图 4(a)所示;类似地,在板料厚度方向上定义一条沿冲击方向的竖直节点路径(以下简称冲击方向路径),该路径的起点和终点分别为板料上

表面激光冲击中心区域的节点和下表面的中心区域节点,如图4(b)所示。

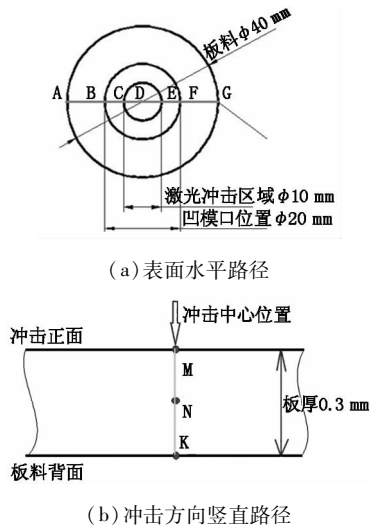


图4 表面水平路径和冲击方向路径示意图

4 结果与分析

4.1 表面水平路径下的应力波传播特性分析

图5为表面水平路径下应力波在板料表面的传播图,在横坐标轴上,20 mm位置处表示板料激光冲击中心位置,光斑区域为[15,25],凹模口对应位置为[10,30]。图5(a)表明,26 ns后,板料表面开始出现较为明显的表面波,随着时间的推移,应力波的幅值先增大后减小,且波的传播区域位于[15,25],即激光冲击区域。66 ns时,Missess应力增大至180 MPa左右,如图5(b)所示,同时板料激光冲击中心位置开始出现微小的波动,随着时间的推移,至190 ns时,在光斑边缘位置处出现两个主波峰,同时波开始向光斑外围区域传动,且板料激光冲击中心区域波动情形加剧,如图5(c)、图5(d)所示。

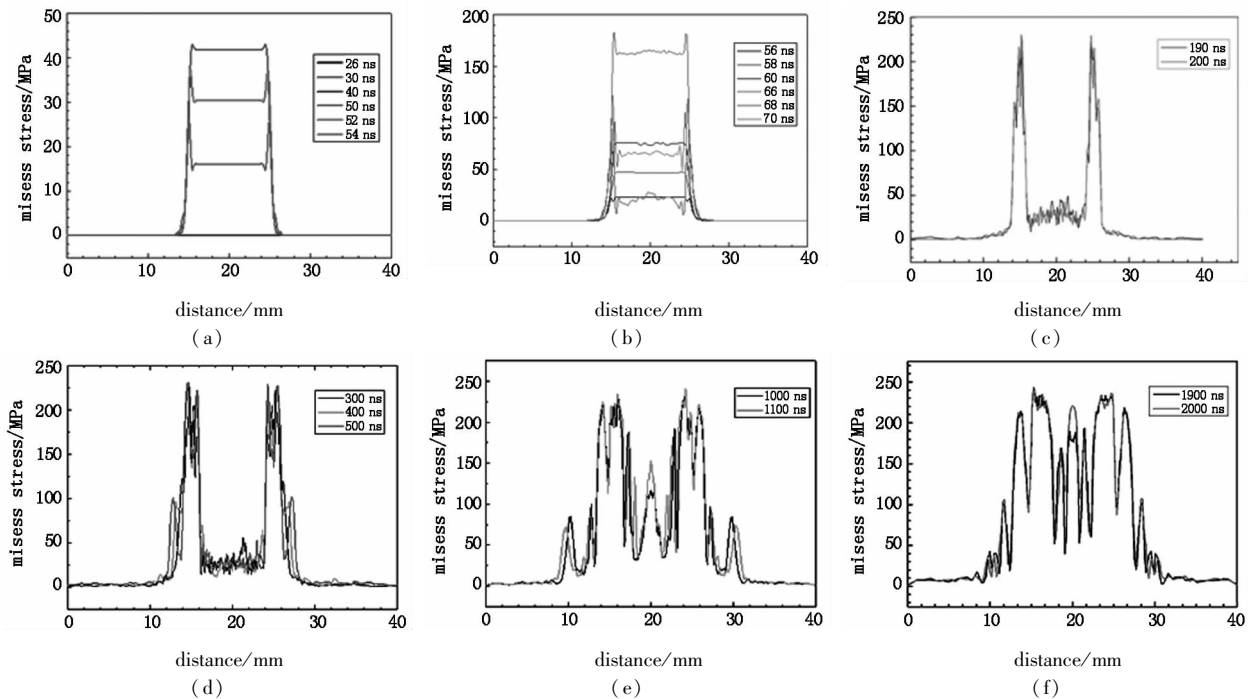


图5 表面水平路径下应力波在板料表面传播图

1000 ns后,应力波振荡愈加剧烈,应力波在板料表面的弥散加剧,较之于加载初期不同的是,波传播的区域扩展至凹模口边缘位置,而在板料中凹模口外围对应的位置区域应力值近似为零,同时板料激光冲击中心位置不再是先前的微小振动,而变成较为清晰的波动,且幅值得到极大的增加,至200 MPa左右。使得板料塑性变形加大。图5(e)、图5(f)表明,板料表面变形不均匀,易出现减薄失效问题。

4.2 冲击方向路径下的应力波传播特性分析

图6是冲击方向路径下的应力波传播图,在ABAQUS软件中,S33表示Z轴方向上的应力 σ_z ,这里亦即板料中沿冲击方向上的应力。在图6(a)中,当时间为4~16 ns时候,逐渐形成压力波,8 ns时,板料的压应力值为400 MPa,大于铝合金的屈服强度172 MPa,开始出现塑性加载波,此后应力波波形图中都有一个明显的主峰,如图6(b)所示。当时间从18 ns推移至20 ns时,压应力增大至其最大值

2800 MPa,而此时对应激光压力脉冲加载至峰值3000 MPa的时刻。20 ns以后,板料中沿冲击方向节点路径上的压应力值出现下降趋势。由图6

(a)~图6(e)可以看出,压力波在60 ns左右传播至板料的自由表面,在此期间,整个板料处于压应力状态,应力波幅值不断降低,出现衰减现象。

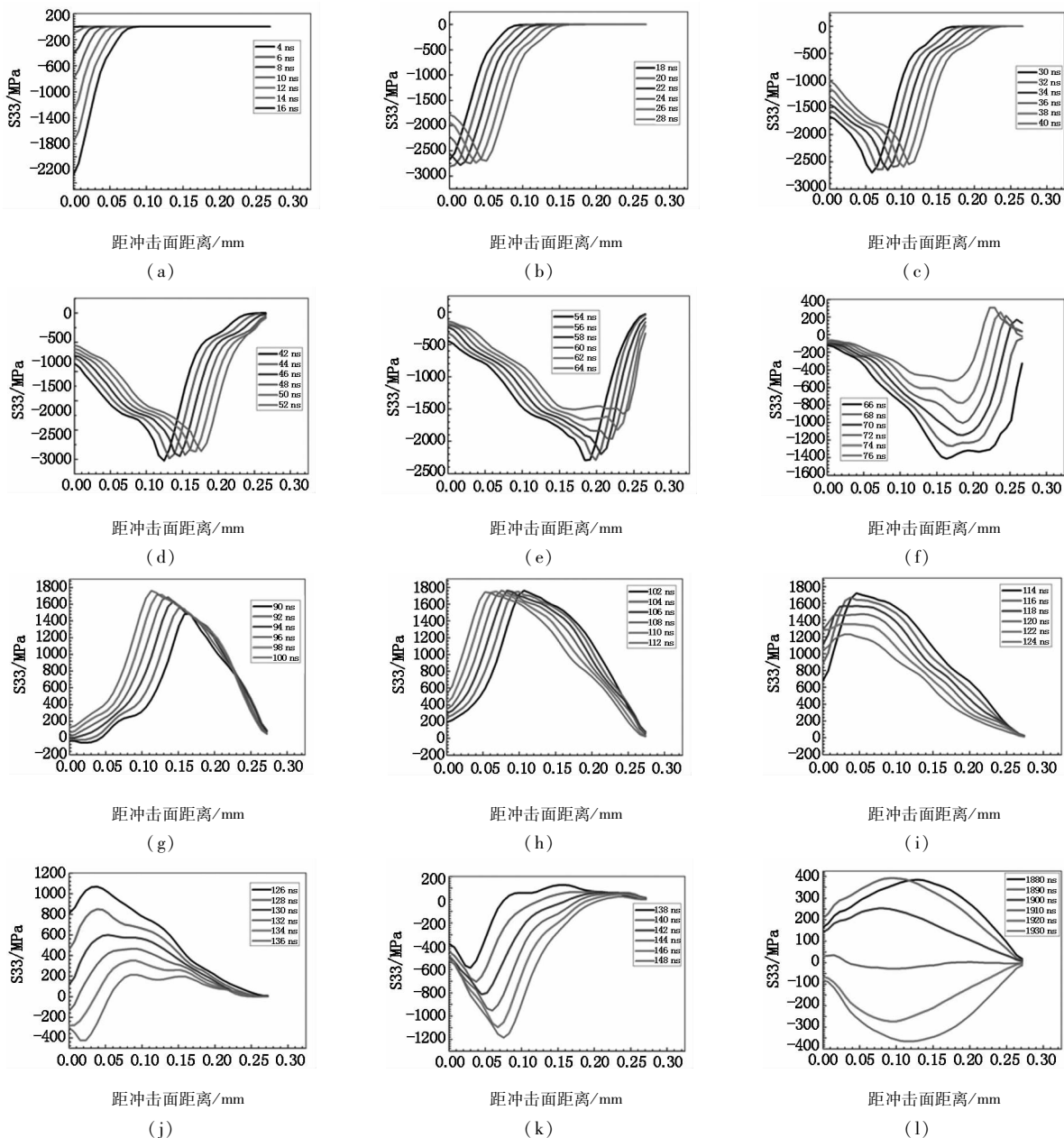


图6 冲击方向路径应力波传播图

70 ns时,开始出现拉伸波,如图6(f)所示,随着时间的推移,拉伸波处于回传过程中,且拉应力不断增大,102 ns左右达到其最大值1782 MPa,如图6(h)所示,而板料因不能承受较大的拉应力而可能出现层裂失效问题。

图6(j)显示,130 ns时,应力波已经回传至板料冲击正面,而此时,激光加载压力脉冲早已卸载,板料中传播着弹性卸载波及塑性卸载波,二者将先后与回传的拉伸波相遇,对拉伸波起到削弱作用。

132 ns以后,板料又重现出现压应力,且随着时间的推移,压应力在不断的变大,如图6(k)所示,但较之于之前的压力波,其幅值明显要小,最大压应力仅达到1200 MPa左右。此后的时间内,应力波在冲击方向上主要以振荡的形式在不断的传播及相互作用,如图6(l)所示,同时因材料的塑性变形产生的能量耗散和材料的硬化作用,应力波的衰减加剧。

5 结论

(1)加载初期,板料表面光斑边缘位置处应力

最大,66 ns 时 Misess 应力值为 180 MPa,而板料激光冲击中心区域仅为微小的波动,1000 ns 后,表面波传播至板料上与凹模口边缘对应位置,同时中心位置区域应力增大至 200 MPa,塑性变形加大,板料变形不均匀,易出现减薄失效问题;

(2)板料沿激光冲击方向上,经历 60 ns 压力波传播至板料自由面,并回传拉伸波,在 102 ns 左右,拉应力达到最大值 1782 MPa,板料易出现层裂失效问题。

参考文献:

- [1] Wang Fei. Theoretical and experimental research on laser shock forming[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University,2008:8-9. (in Chinese)
王飞. 脉冲激光冲击成形的理论与实验研究[D]. 上海:上海交通大学,2008:8-9.
- [2] Liu Dexin, Feng Hongqin, et al. Study on dynamic response of thin elastic plate by laser measuring[J]. Laser & Infrared,2003,33(6):419-421. (in Chinese)
刘德新,冯洪庆,等. 利用激光测量弹性薄板动态响应研究[J]. 激光与红外,2003,33(6):419-421.
- [3] Fabbro R, Peyre P, Berthe L, et al. Physics and applications of laser-shock processing[J]. Journal of Laser Application,1998;10:265-79.
- [4] R Fabbro, et al. Laser shock and processing:a review of the physics and applications[J]. Opt-Quant Electr,1995:121.
- [5] Wang Lili. Foundation of stress waves[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2010:15-16. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,2010:15-16.