

激光诱导冲击波的预应力成形仿真研究

姜银方, 何玉中

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:为了研究预应力对板料激光冲击成形性能的影响,采用数值仿真的方法,分析了不同板料尺寸下,预应力对板料激光冲击成形极限的影响。研究表明,无预应力作用下,不同尺寸板料的激光冲击成形极限深度不同;在预应力作用下,板料的激光冲击成形极限深度有所增加;当预应力在0~10 MPa范围时,板料的激光冲击成形极限随着预应力的增大而增大,超过此范围时,成形极限随预应力变化比较缓慢,并逐渐接近一限定值;在相同预应力作用下,不同尺寸板料的激光冲击成形极限提高的幅度不同。激光冲击预应力成形有利于提高板料的成形性能,研究为有效的控制板料变形过程,实现金属板料的激光冲击成形提供了依据。

关键词:激光冲击成形;成形性能;数值仿真;预应力

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.10.007

Simulation research on pre-stressed forming through shock wave induced by laser

JIANG Yin-fang, HE Yu-zhong

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

Abstract: In order to study the effect of pre-stress on laser shock formability of sheet, this paper analyses the limit of laser shock forming on different pre-stress under different sheet sizes. Results show that the limit of plate with different size is not the same without pre-stress. The limit of laser shock forming is increased under pre-stress. The limit increases with the increase of pre-stress when the pre-stress is within 0 to 10 MPa. When the pre-stress exceeds this range the limit increases slowly and approaches a constant value. The limit growth of different size of plate is different under the same pre-stress. Pre-stress during laser shocking can improve the sheet formability. The research can provide evidence for effectively controlling of sheet forming process and realizing the laser shock forming of metal sheet.

Key words: laser shock forming; formability; numerical simulation; pre-stress

1 引言

激光冲击成形技术是利用激光产生的冲击波使金属板料产生塑性变形的一种具有成形和强化的双重特点的新兴冷成形技术,其成形技术、装置的开发与应用都将是钣金行业的一场具有重要意义的技术革命,在航空航天工业、汽车覆盖件和模具制造业、薄板制造业等方面具有广阔的应用前景和潜在的、巨大的经济效应和社会效益。在以激光为手段的板料成形方法中,激光诱导的高幅冲击波技术已被国

内外学者广泛用于惯性约束聚变和材料表面改性,提高材料表面硬度、抗疲劳寿命和耐磨损性能方面的研究^[1-3],但板料激光冲击成形方面的研究,目前还不成熟,还有很多问题需要解决,如其成形量较

基金项目:国家自然科学基金(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:2012-02-13; **修订日期:**2012-02-23

小,激光冲击成形性能仍有待提高。所以本文提出金属板料预应力激光冲击方法,研究预应力对板料激光冲击成形性能的影响,以便找到板料的变形过程有效的控制方法。

2 激光冲击成形有限元建模

采用动态显式弹塑性有限元软件 ABAQUS 进行数值仿真,激光光斑直径为 8 mm;凹模孔径为 $\varnothing 20$ mm;凹模圆角 2 mm;试样采用 0.3 mm 厚的 3003H16 铝合金薄板。建成的有限元模型如图 1 所示,模型包括三个部件组成:凹模、压边圈和板料。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,先将板料凸缘处的板料固定以约束其所有自由度,然后在板料上面加上压边圈,并加载压边力,以限制板料除了在凹模底座面上的其他自由度,为了节省计算时间,选取模型的四

分之一进行模拟。

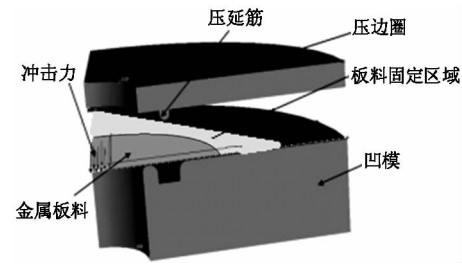


图1 基于预应力的激光冲击成形有限元模型图

由于板料激光冲击成形是一个高度非线性的瞬时动态事件,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 3003H16 铝合金的 Johnson-Cook 本构模型参数。

表 1 3003H16 铝合金 Johnson-Cook 本构模型参数

材料	A/MPa	B/MPa	n	C	Elastic modulus E/MPa	Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Poisson's ratio ν
3003H16AL	172	326	0.22	0.015	69000	2700	0.33

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^[4]等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。

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 $\tau = 23$ 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。

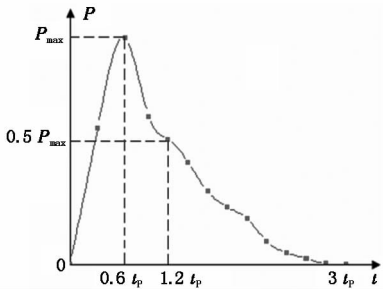


图2 激光冲击波压力加载幅度曲线^[5]

3 激光冲击成形的破裂判据

采用厚度减薄率修正准则来作为成形的破裂判据,公式如下^[6]:

$$\begin{aligned} T \geq T_c^* &= \begin{cases} 1 - 0.8 \cdot f_1(\alpha, n = 0.22) & (\varepsilon_2 < 0) \\ 1 - 0.8 \cdot f_2(\alpha, n = 0.22) & (\varepsilon_2 \geq 0) \end{cases} \\ &= \begin{cases} 1 - 0.8(2 - 1.196\alpha^{0.5}) & (\varepsilon_2 < 0) \\ 1 - 0.8(0.682\alpha - 0.094) & (\varepsilon_2 \geq 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, T 为厚度减薄率; T_c^* 厚度变薄率极值; α 为应变比; ε_2 危险点处的最大次应变,为了寻找在不同板料尺寸下预应力对板料激光冲击成形极限的影响,进行了大量的模拟,最终确定板料尺寸为 70×12 的窄板、 70×35 的中宽板和 70×70 的方板三种板型来研究预应力对板料激光冲击成形极限的影响;根据 α, ε_2 及公式(1)可得这三种板料的厚度减薄率,如表 2 所示。

表 2 三种板料的预应力加载路径、应变比 α 、危险点处的最大次应变 ε_2 以及减薄率 T_c^*

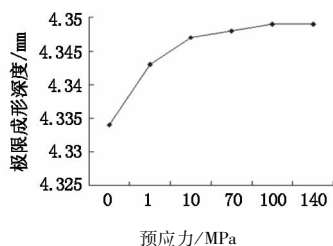
板料	预应力加载路径	α	ε_2	$T_c^*/\%$
70×12	单拉	$-1/2$	<0	20.0
70×35	平面	0	$=0$	27.5
70×70	等双拉	1	>0	52.9

参考传统制作金属薄板成形极限图 (FLD) 常用的凸模胀形法,在模拟时,用激光诱导的冲击波压力来代替凸模对铝合金薄板进行胀形试验模拟,通过改变板料尺寸来获得单拉、平面和等双拉应变比。根据反复的模拟分析,在本研究条件下, 70×12 的窄板是近似处于单拉预应力路径加载状态, 70×35 的中宽板近似处于平面预应力路径加载状态, 70×70 的方板近似处于等双拉预应力路径加载状态。

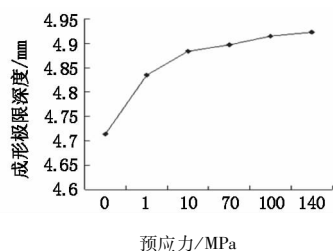
4 结果与分析

4.1 预应力为0(无预应力)时不同尺寸的板料成形极限深度比较

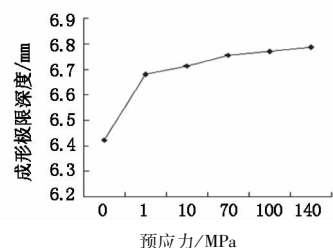
预应力为0(无预应力)时对 70×12 的窄板、 70×35 的中宽板和 70×70 的方板进行激光冲击,由图3可知,预应力为0时,窄板、中宽板和方板的成形极限深度分别为4.334 mm、4.714 mm、6.422 mm。分析认为这是由板料预应力加载路径不同造成, 70×12 的窄板近似处于单拉预应力路径加载状态, 70×35 的中宽板近似处于平面预应力路径加载状态, 70×70 的方板近似处于平面预应力路径加载状态,由表2可知,方板、中宽板和窄板的减薄率分别为52.9%、27.5%和20.0%,这说明在不同的加载路径下,判断板料达到成形极限的厚度减薄率不同;所以,无预应力作用下,不同尺寸的板料成形极限深度不同。



(a) 70×12 板



(b) 70×35 板



(c) 70×70 板

图3 不同板料尺寸下预应力对板料激光冲击成形极限的影响

4.2 预应力对板料的激光冲击成形极限深度的影响

图3中可以看出,不管是在哪种板料尺寸下,加预应力的板料较未加预应力的板料激光冲击成形极限均有所提高。分析认为这是由于板料在激光冲击成形之前所加载的预应力使激光冲击区板料产生了

一定的弹性变形,之后进行激光冲击时,板料就无须再进行这部分的弹性变形,从而使激光冲击区域的板料在凹模孔径内的塑性变形更充分和均匀。图4为加140 MPa预应力前后方板厚度分布云图及激光冲击区板料厚度分布放大云图,对比无预应力和加预应力下激光冲击区板料厚度的变化,可以发现,加预应力后比未加预应力的板料厚度变化梯度小,这说明上述分析是正确的。因此加预应力后板料的成形极限得到提高,板料产生更大的变形量,板料的成形性能得到提高。

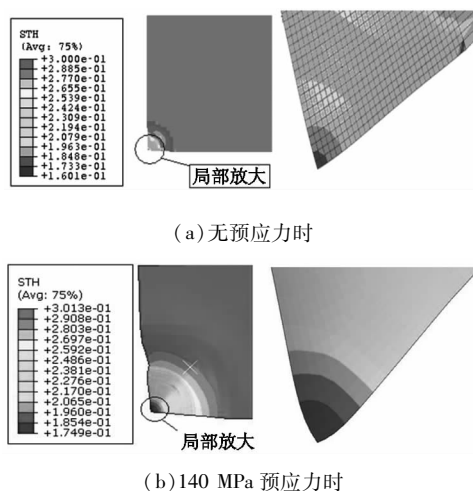


图4 加140 MPa预应力前后方板厚度分布云图及激光冲击区厚度分布放大图

从图3中可知,不管是在哪种板料尺寸下,当预应力在0~10 MPa范围时,板料的激光冲击成形极限随着预应力的增大而增大,超过这个范围时,成形极限随预应力变化比较缓慢,并逐渐接近一限定值。分析认为这是由于板料进行激光冲击前加载的预应力在0~10 MPa范围时,板料的变形还是处于弹性变形范围,之后对板料进行高应变率激光冲击成形时,激光冲击区域的板料在凹模孔径内的塑性变形更充分和更均匀,因此预应力在0~10 MPa范围时,板料的激光冲击成形极限随着预应力的增大而增大;当预应力超过10 MPa时,板料在激光冲击区的弹性变形已经达到或即将达到最大值,之后进行激光冲击时,板料无须再进行弹性变形或少量的弹性变形就使得板料的变形量达到最大值或使板料破裂,至此板料的成形极限就为一定值;这说明当预应力在0~10 MPa范围时,板料的成形极限随着预应力的增大而增大,预应力可以提高板料的成形性能;但当预应力超过这个范围时,板料的激光冲击成形性能并不随着预应力的增大而提高,而是保持为一

稳定的水平。

4.3 在相同预应力作用下,不同尺寸板料的成形极限深度比较

图3中可看出,在相同的预应力作用下,三种不同板料尺寸的激光冲击成形极限并不相同,预应力对板料激光冲击成形极限的影响大小依次为方板(70×70)、中宽板(70×35)和窄板(70×12);经计算,在140 MPa预应力作用下较未加预应力时这三种板料的激光冲击成形极限分别提高了6.5%,5.7%和3.5%左右,分析认为这可能与高应变率激光冲击下的板料宽度有关;由于激光冲击下的板料是高应变率成形,在冲击中心处的材料变形更快,离中心远的材料变形不充分,在进行激光冲击时,若宽度方向上的尺寸较小,有可能发生长度方向上部分材料还未抵抗变形板料就已经破裂,导致板料变形更不充分,所以宽度方向上的尺寸较小时,板料的成形极限就较小;虽然加载预应力的目的是使激光冲击区域的材料在凹模孔径内的塑性变形更充分和均匀,提高板料的成形性能,但是由于板料在宽度方向上的尺寸较小,不能完全达到加载预应力的目的,因此,在相同的预应力作用下,不同尺寸板料的成形极限提高的幅度不同。

5 结论

(1)无预应力作用下,窄板、中宽板和方板的激光冲击成形极限深度不同,成形极限深度分别为4.334 mm,4.714 mm,6.422 mm。

(2)预应力作用下,板料的激光冲击成形极限深度有所增加。

(3)当预应力在0~10 MPa范围时,板料的激光冲击成形极限随着预应力的增大而增大,超过此范围时,成形极限随预应力变化比较缓慢,并逐渐一限定值。

(4)在相同预应力作用下,不同尺寸板料的激

光冲击成形极限提高的幅度不同;经计算,窄板、中宽板和方板三种板料在140 MPa预应力作用下与未加预应力的板料相比,激光冲击成形极限分别提高了3.5%,5.7%和6.5%左右。

参考文献:

- [1] Charles S Mont ross, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 1021 - 1036.
- [2] P Peyre, R Fabbro, et al. Laser shock and processing: a review of the physics and applications [J]. Opt-Quant Electr, 1995, (27): 1213 - 1219.
- [3] Guanglong Wang, Jianzhong Zhou, Xinqian Zhang, et al. Application of laser-induced shock wave in surface modification and forming of sheet metal [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (12): 148 - 152. (in Chinese)
王广龙, 周建忠, 张兴权, 等. 激光冲击波技术在金属表面改性和成形中的应用 [J]. 农业机械学报, 2005, 36 (12): 148 - 152.
- [4] Johnson G R, Cook W H. in: Proceedings of the seventh international symposium on ballistics [J]. The Hague, Netherlands, 1983: 541 - 547.
- [5] Jianzhong Zhou, Minxiong Ni, Yongkang Zhang, et al. Theoretical research and numerical analysis on forming of sheet metal under laser peening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34 (2): 288 - 294. (in Chinese)
周建忠, 倪敏雄, 张永康, 等. 金属板料激光喷丸成形理论研究数值模拟 [J]. 中国激光, 2007, 34 (2): 288 - 294.
- [6] Yinfang Jiang, Zhenzhou Tang, Zhifei Li, et al. Research on the forming limit diagram based on laser shock forming [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 44 - 47: 148 - 152.