

文章编号: 0258-7025(2010)05-1368-07

激光冲击半模成形板料运动速度的数值模拟

任爱国 张永康 姜银方 裴旭 于水生 尤建

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 利用有限元分析软件 ABAQUS 对恒弹性合金 3J53 超薄板激光冲击半模成形过程进行了数值模拟。探讨了不同激光脉冲能量对板料运动速度和成形精度的影响,以及相同能量下板料不同区域的运动速度规律。数值模拟表明,当激光脉冲能量较小时,板料不能与凹模碰撞,中心区域节点上下往复振动,振幅逐渐减小,最后处于静止状态;当激光脉冲能量较大时,板料中心与凹模底部发生剧烈碰撞,碰撞后产生反向运动,速度逐渐减小,在零值附近缓慢波动一段时间,最终衰减到零。通过调整激光脉冲能量能够得到理想的波形零件。研究表明,利用有限元分析软件 ABAQUS 能够预测板料在激光冲击成形中的速度变化规律,为深入研究激光冲击成形过程提供依据。

关键词 激光技术;激光冲击;半模成形;恒弹性合金;运动速度;数值模拟

中图分类号 TN249;TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1368

Numerical Simulation of Metal Sheet Velocity by Laser Shock Forming with Semi-Die

Ren Aiguo Zhang Yongkang Jiang Yinfang Pei Xu Yu Shuisheng You Jian

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

Abstract The finite element software ABAQUS was used to simulate the processing of constant elastic alloy metal sheet by laser shock waves with semi-die process. The effects of pulse laser energy on metal sheet movement velocity and forming accuracy were investigated. The law of sample velocities in different regions at the same energy was discussed. The results showed that there was no collision between the metal sheet and the concave die when the energy was low. The central node vibrated around the equilibrium position, but the amplitude of vibration decreased gradually and reached zero finally. When the energy was high, the metal sheet collided with the bottom of dies severely, and then the sheet had a reverse movement. The velocity fluctuated slowly for some time and then reached equilibrium state eventually. A good quality waveform sample could be obtained by adjusting pulse laser energies. It was concluded that the software ABAQUS could predict metal sheet velocity in the laser shock forming (LSF) process, and it provides the reference for further study on LSF.

Key words laser technique; laser shock; semi-die forming; constant elastic alloy; velocity; numerical simulation

1 引 言

在精密仪器仪表中,恒弹性合金超薄板(膜片或膜盒)通常用作弹性敏感元件。工作时将压力转换为其中心位移或集中力,通过测量位移或集中力,便可测量出所承受的压力。它在石油、化工、冶金、航空航天、电子、声学 and 医学等许多领域被广泛应用^[1,2]。

目前国内外在膜片成形方面采用的方法有:橡

胶冲压成形法、液压法、爆炸成形法和磁力成形法等几种。通常在生产中采用的是橡胶冲压成形法,这种工艺能获得较高的生产效率,成形的膜片厚度也较为均匀。采用这种方法的软模制造波纹膜片的优点是大大降低了模具加工配合精度,方便、实用;缺点是波形随橡胶的成形力而变,成形精度相对较低。采用双柱式复合模加工出来的波纹膜片精度高,波

收稿日期:2009-07-27;收到修改稿日期:2009-09-29

基金项目:国家自然科学基金(50735001)资助课题。

作者简介:任爱国(1982—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击成形和冲击强化技术方面的研究。

E-mail:renaiguo09@yeah.net

导师简介:张永康(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造和检测技术方面的研究。

E-mail:ykzhang@uj.s.edu.cn

形成形饱满;缺点是寿命低,损坏后不易修复^[3]。另一种常用的方法是液压成形法,对于精度要求较高的膜片,如差压变送器膜片等多数采用这种方法,但生产效率不如冲压成形法高。爆炸成形法和磁力成形法等高能成形方法,成形速度很高,适用于成形硬度较高、塑性较差的材料。爆炸成形适宜加工大型单件的波纹膜片,而磁力成形法适合成形普通的波纹膜片,这方面国外已有许多实例。但是磁力成形装置价格高昂,限制了它的应用^[4]。

激光冲击成形(LSF)是利用高能脉冲激光与物质相互作用所产生的冲击波的力效应使金属板料产生塑性变形的新技术^[5,6]。利用激光冲击成形技术使恒弹性合金膜片产生特定的波纹形状在国外鲜见报道。在国内,江苏大学开展了这方面的初步研究。但对不同脉冲能量作用下膜片成形过程中速度的变化规律,以及相同能量下膜片不同区域的运动规律没有详细的研究。由于激光诱导的冲击波作用时间极短(仅为几十纳秒),板料变形速度超快,难以利用

仪器测量出成形过程中不同时刻的速度。因此有限元模拟成为研究此过程中板料速度变化规律的有效手段。利用该方法能够预测成形规律、成形精度以及成形后表面应力分布情况^[7,8],为恒弹性合金波纹膜片成形的研究提供了一种新的方法。

2 激光冲击半模成形有限元模拟

由于 ABAQUS/Explicit 是一个基于动力显式算法的有限元分析模块,适用于求解非线性动力学问题和准静态问题,特别是模拟冲击和爆炸等短暂、瞬时动态事件^[9]。而激光冲击成形过程是一个瞬时、高速、非线性(几何非线性和材料非线性)过程^[10],所以采用 ABAQUS/Explicit 模块模拟膜片冲击成形过程。冲击后,当恒弹性合金膜片动能为零,内能保持为恒定值时,说明已处于静态平衡状态。

以恒弹性合金 3J53 圆形膜片为冲击靶材,其化学成分和力学性能如表 1 和表 2 所示^[11]。

表 1 恒弹性合金 3J53 的化学成分及含量(质量分数,%)

Table 1 Material components of constant elastic alloy 3J53 (mass fraction, %)

Chemical constituents	Fe	Ni	Cr	Ti	Al	C	Mn	Si
Content	47	41.0~43.5	4.9~5.75	2.2~2.75	0.30~0.80	0.06	0.8	1.0

表 2 恒弹性合金 3J53 的机械性能

Table 2 Mechanical properties of constant elastic alloy 3J53

Constant elastic alloy 3J53	Properties
Elastic modulus E /GPa	177~191
Shear modulus G /GPa	64.0~73.5
Density d /(g/cm ³)	8.0
Tensile strength σ_b /MPa	1373
Yield strength σ_s /MPa	750

2.1 有限元模型的建立

基于模型和冲击载荷的对称性,采用 1/2 模型进行模拟。因为凹模中心截面轮廓比较复杂,故利用 CATIA 软件强大的曲线曲面造型功能模块建立模型然后将其导入到 ABAQUS 分析软件中的 Part 模块。建立的有限元仿真模型如图 1 所示。

凹模中心截面轮廓曲线为正弦波形,中心区域底部为一圆平面,其直径为 3.6 mm 与侧壁有 0.2 mm 的圆形倒角。各环形区域中心距凹模圆心的距离分别为 r_1, r_2 和 r_3 ,其中 $r_1 = 3.8$ mm, $r_2 = 6.4$ mm, $r_3 = 9.5$ mm。初始时刻与膜片接触的波峰处距凹模圆心距离分别为 l_1, l_2 和 l_3 ,其中 $l_1 = 2.5$ mm, $l_2 = 5.1$ mm, $l_3 = 7.7$ mm。膜片直径为 24 mm,厚度为

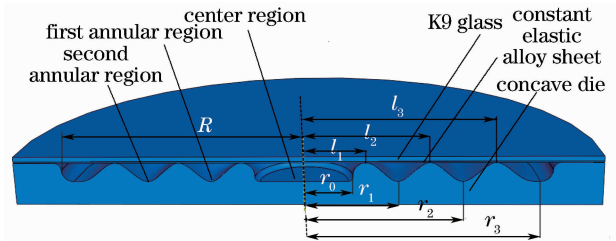


图 1 激光冲击半模成形有限元分析模型

Fig. 1 Finite element analysis model for LSF with concave die

0.06 mm,冲击前距凹模底部为 0.8 mm。

基于大光斑单次激光冲击的薄板半模成形,激光光斑直径较大($D = 20$ mm)。光斑作用区域为以膜片中心为圆心,以 $R = 10$ mm 为半径的圆域。

2.2 激光冲击波峰值压力及加载方式的选取

文献^[12~14]对约束模式下激光冲击过程中作用在靶材上的压力值进行了研究,约束层能将激光诱导的冲击波的作用时间延长 2~3 倍,实验采用的激光脉宽 $\tau = 23$ ns,这样每一次冲击加载的作用时间约为 69 ns,模拟时取 70 ns。根据实际测量的激光脉冲信号如图 2 所示,定义加载幅值曲线如图 3 所示。

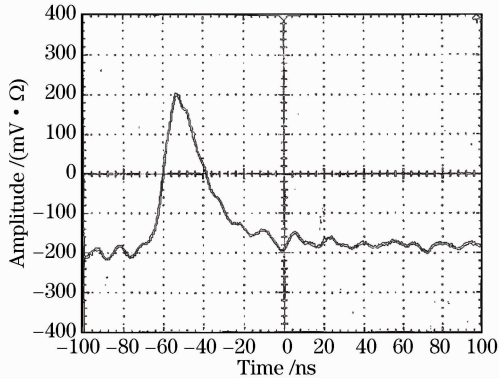


图2 激光脉冲信号图

Fig. 2 Signal of laser pulse

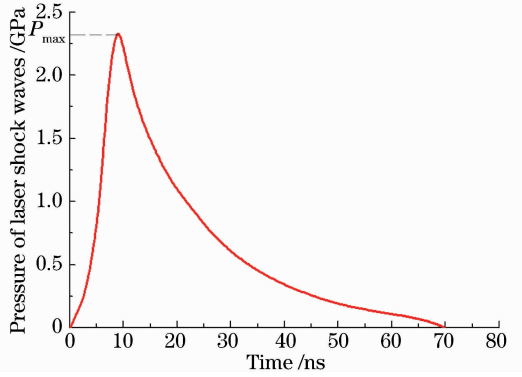


图4 激光冲击波加载曲线

Fig. 4 Curve of shock waves loading

代入(2)式可得 $Z = 2.21 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.3 有限元网格的划分

考虑到激光冲击成形的特点和膜片在成形过程中将会发生非常大的网格扭曲,采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。为控制沙漏现象,在厚度方向划分为 6 个单元。为了得到精确的求解结果,将网格细化,直径方向单元尺寸为 0.2 mm,膜片共划分为 67680 个单元。膜片部分网格如图 5 所示。

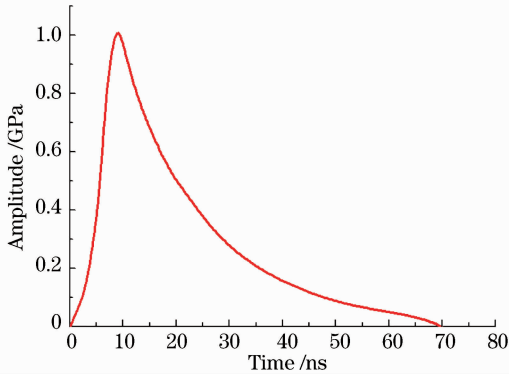


图3 冲击波加载幅值曲线

Fig. 3 Amplitude curve of laser shock wave loading

针对为提高激光冲击波峰压而广泛采用的约束模式,Fabbro 等^[13]对靶材表面的冲击波峰值压力进行了估算

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}, \quad (1)$$

式中 $\alpha = 0.1 \sim 0.2$,为激光作用于靶材的能量转变为冲击波压力的系数, I_0 为入射激光功率密度, Z 为靶材与约束层合成冲击波的声阻抗,定义为

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{\text{target}}} + \frac{1}{Z_{\text{K9 glass}}}, \quad (2)$$

根据能量与功率密度的关系式

$$E = \frac{\pi D^2 \tau I_0}{4}, \quad (3)$$

对于不同的脉冲激光能量,可先按照(1)~(3)式联立求解对应的峰值压力,然后用峰值压力乘以幅值曲线上各点纵坐标值就可得到冲击波加载曲线,把此曲线输入到 ABAQUS/load 模块里面,来实现冲击波的加载。图 4 是当脉冲能量为 15 J 时所对应的冲击波加载曲线。

对恒弹性合金,其声阻抗为 $38.47 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$;对约束层 K9 玻璃,其声阻抗为 $1.14 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,

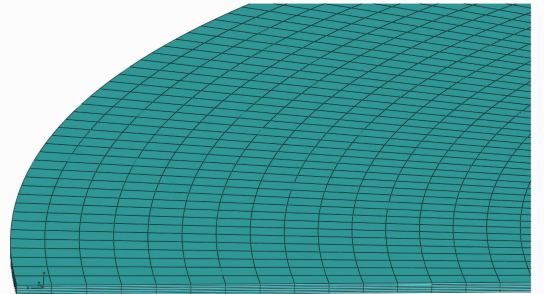


图5 膜片网格的划分

Fig. 5 Finite element mesh of the diaphragm

2.4 边界条件和接触类型的处理

由于采用 1/2 几何模型,模型的中心剖面均设置为对称边界条件。凹模和 K9 玻璃看作是刚体,设置为固定边界条件,即约束所有的自由度。膜片为三维可变形实体,与凹模和 K9 玻璃接触的边缘区域只是限制其厚度方向的自由度。

由于在激光冲击成形过程中,接触面区域的大小和位置以及接触状态都是随时间变化的,因此选用通用接触算法,即冲击成形过程中 ABAQUS/Explicit 自动生成包含所有实体的面,在这个面上定义自接触,能够自动判断接触面和接触位置。接触属性选择有限滑移。

3 有限元模拟结果

3.1 激光脉冲能量为 5 J 时,膜片不同区域的运动速度

把恒弹合金圆形膜片分为 3 个区域,即中心区域、第一环区域和第二环区域,如图 1 所示。分别以各个区域截面的中心节点为研究对象,分析其速度变化情况。

当激光脉冲能量为 5 J 时,根据(1)式可得峰值压力为 1.384 GPa,各个区域截面中心节点运动速度-时间曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,在前 1000 ns 内,膜片各个区域保持相同的速度向下运动,1000~3000 ns 之间,中心区域运动速度最小,而第二环区域速度最大,2500~6000 ns 第一环和第二环区域速度逐渐减小,但方向仍然向下,而中心区域速度继续增加到 6000 ns。6000 ns 以后中心区域速度逐渐减小到零,随后膜片向上运动,速度为正。以后中心区域出现上下往复振动现象,幅值越来越小,并趋向于零。第

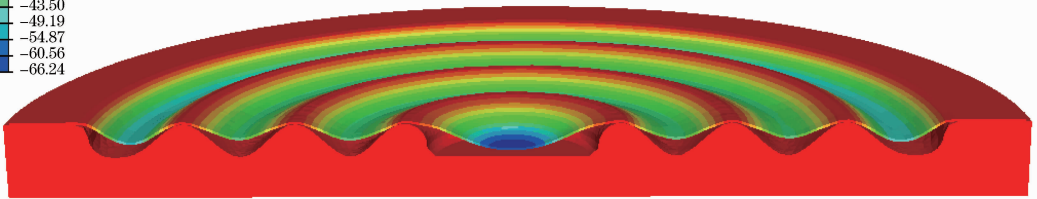
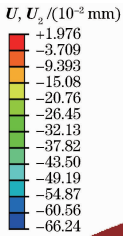


图 7 激光脉冲能量为 5 J 时的成形轮廓图

Fig. 7 Skeleton drawing of the waveform sample obtained at the laser pulse energy of 5 J

3.2 激光脉冲能量为 15 J 时,膜片不同区域的运动速度

按照 3.1 节中的方式,把圆形膜片分为同样的 3 个区域。当激光脉冲能量为 15 J 时,根据(1)式可得峰值压力为 2.397 GPa,各个区域截面中心节点速度-时间关系曲线如图 8 所示。

从图 8 可以看出,在前 1250 ns 内,板料各个区域运动速度相同,速度曲线近似为直线,为匀加速直线运动。在 1250~2500 ns 内,中心区域运动速度最慢,第二环区域速度最快。大约在 3000 ns 时膜片中心区域与凹模底部发生碰撞,速度由 -230 m/s 迅速变为 120 m/s。碰撞过程消耗了大量的动能。然后中心区域节点速度逐渐衰减,在零值附近缓慢波动,最后衰减到零。第一环和第二环区域速度逐渐减小,很快进入静止状态。

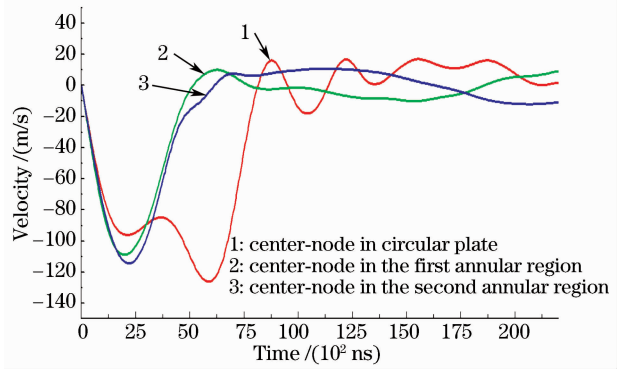


图 6 激光脉冲能量为 5 J 时,不同区域中心节点的速度-时间曲线

Fig. 6 Velocity-time curves of different region center-nodes at the laser pulse energy of 5 J

一环和第二环区域速度绕零线附近上下波动并逐渐趋近于零。在此过程中膜片的动能转变为内能和塑性变形能等其他形式的能。

采用 5 J 的脉冲能量得到的波形零件轮廓如图 7 所示,其中 U, U_z 为沿冲击方向的位移。

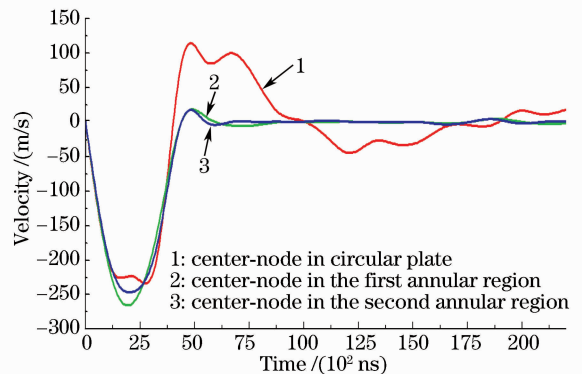


图 8 激光脉冲能量为 15 J 时,不同区域中心节点的速度-时间曲线

Fig. 8 Velocity-time curves of different region center-nodes at the laser pulse energy of 15 J

采用 15 J 的脉冲能量得到的波形零件轮廓如图 9 所示。

从图 7,9 可以看出,当脉冲能量为 5 J 时,膜片不能到达凹模底部,而当脉冲能量为 15 J 时,膜片中心部位与凹模碰撞产生反向塑性变形,成形精度下降。故在 5~15 J 范围内调节激光脉冲能量,使贴合

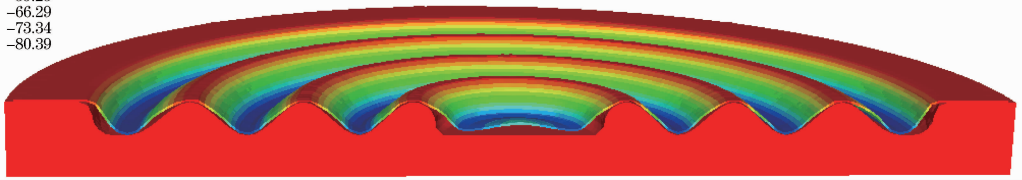
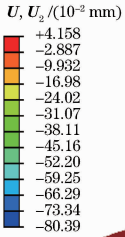


图 9 激光脉冲能量为 15 J 时的成形轮廓图

Fig. 9 Skeleton drawing of the waveform sample obtained at the laser pulse energy of 15 J

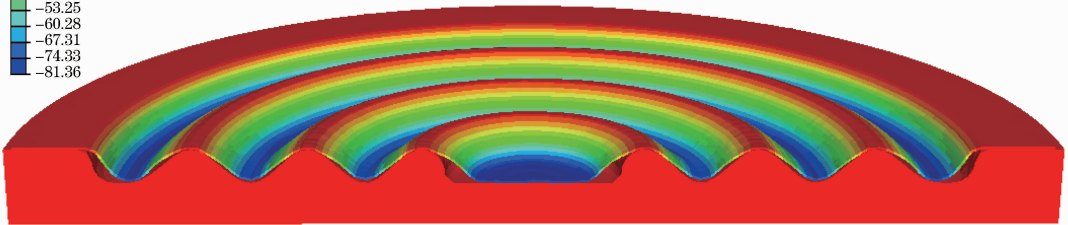
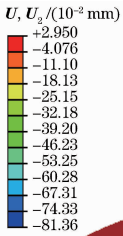


图 10 激光脉冲能量为 12 J 时的高精度成形轮廓图

Fig. 10 Skeleton drawing of the waveform sample obtained at the laser pulse energy of 12 J

3.3 不同脉冲能量对运动速度的影响

分别采用 5, 8, 12 和 15 J 的激光脉冲能量,对恒弹合金膜片成形过程进行模拟,选择圆心处厚度方向中心节点的速度历史为研究对象,在不同的脉冲能量下,其运动速度如图 11 所示。

当激光脉冲能量分别为 5 J 和 8 J 时,膜片未到达凹模底部。中心区域则会出现上下往复振动现象,并且振动幅值越来越小,逐渐趋向于零。而当脉冲能量为 12 J 时,膜片与凹模底部发生碰撞,并产生反向运动速度,而未产生反向塑性变形。当脉冲能量为 15 J 时,膜片与凹模底部发生剧烈碰撞,且碰撞后速度迅速由负值变为正值,并在零值附近缓慢波动,最后衰减到零,并产生了反向塑性变形。从图 11 中还可以看出,随着激光脉冲能量的增大,在冲击波作用时间内,膜片向下的运动速度也越来越大。

度提高。当脉冲能量为 12 J 时,波形膜片的成形轮廓如图 10 所示。

从图 10 可以看出,波形膜片第一环和第二环区域与凹模贴合紧密,中心部位大部分区域贴合紧密,只有圆角处很小区域没有贴合,成形精度明显提高。

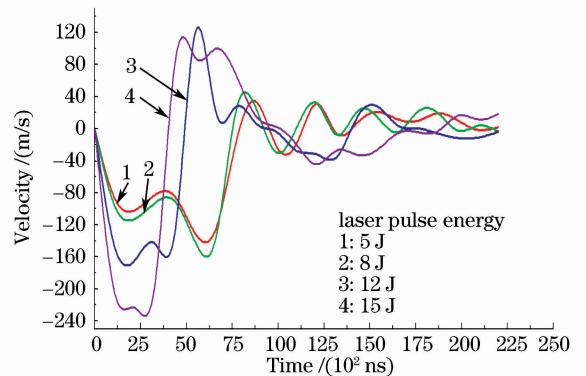


图 11 不同激光脉冲能量下中心区域节点的速度-时间曲线
Fig. 11 Center-node velocity-time curves with different laser pulse energies

在不同的脉冲能量下,膜片在前 1200 ns 内,都近似为匀加速直线运动,且随着脉冲能量的增加,加速度逐渐增加。

根据分析,可以从速度-时间曲线图中看出膜片中心是否与凹模产生碰撞,具体操作为:以膜片圆心处厚度方向中心节点为研究对象,找出其临界碰撞状态,即膜片圆心恰好与凹模底部接触,做出此能量下节点的速度-时间曲线,称之为临界碰撞曲线。然后根据下列方法判断:

1) 无论膜片是否与凹模产生碰撞,中心节点速度都经历一个从负值迅速变化到正值的过程,称之为速度反向变化过程。若某一曲线上此过程发生在临界碰撞曲线上速度反向变化过程前(即某一曲线上此过程在临界碰撞曲线上速度反向变化过程的左边),则这条曲线为与凹模底部发生碰撞的曲线,反之则为无碰撞曲线。

2) 碰撞与无碰撞相比,膜片中心区域节点速度衰减比较缓慢,达到平衡状态的时间会更长。比临界碰撞速度曲线衰减缓慢,达到平衡状态时间长的为发生碰撞的曲线。

4 激光冲击半模成形薄板运动方程

以膜片的中心区域为研究对象(其他环形区域研究方法为中心区域类似),以初始时刻膜片与凹模接触的平面为 xoz 平面,冲击方向为 y 轴负方向,圆心为坐标原点建立直角坐标系。在膜片运动的某一时刻,在半径为 r 处取宽度为 Δr 的环状微元,如图 12 所示。

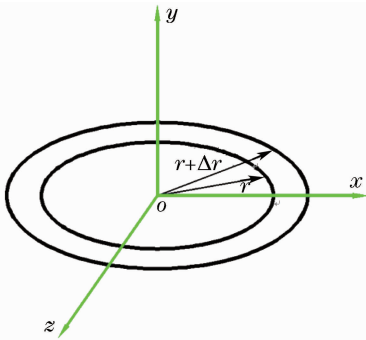


图 12 中心区域环状微元

Fig. 12 Annular element in central region

则环状微元的运动方程为^[15]

$$\frac{\partial^2 y(r,t)}{\partial t^2} = \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^3 y(r,t)}{\partial r^2 \partial t}, \quad (4)$$

式中 ρ 为靶材的密度, η 为比例常数。这是一个三阶偏微分方程,难以求得满足全部边界条件的精确解析解。利用实验拟合的方法得到方程的近似解为^[15]

$$y(r,t) = \frac{\rho a^2 v_0}{2\eta + \rho a^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\eta t}{\rho a^2}\right) \right] \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right), \quad (5)$$

式中 a 为变形区域半径, v_0 为膜片的初速度,表示为

$$v_0 = -0.01 \frac{\theta}{h\rho} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_p}{\theta}\right) \right] \times \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{\frac{2Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}} \sqrt{I_0}, \quad (6)$$

式中负号表示运动方向与 y 轴正向相反, h 为膜片厚度, θ 为冲击波压力衰减常数, τ_p 为冲击波的脉冲宽度。

5 结 论

利用有限元分析软件 ABAOUS 对恒弹性合金 3J53 超薄板激光冲击成形过程进行了数值模拟,模拟结果表明,当激光脉冲能量较小时,膜片未能到达凹模底部,中心区域节点出现上下往复振动现象。第一环和第二环区域速度先增大后减小,在零值附近缓慢波动一段时间后静止。当激光脉冲能量较大时,膜片中心区域与凹模底部产生碰撞,碰撞后迅速反向运动,并出现反向塑性变形。随后其速度在零值附近缓慢波动一段时间后静止。而第一环和第二环区域未与凹模产生碰撞,运动速度先增加后减小,很快处于静止状态。为提高成形精度,需对膜片运动速度进行控制,使其中心区域能与凹模产生碰撞且碰撞后不产生反向塑性变形,这样膜片才能与凹模紧密贴合,获得更高的成形精度。

参 考 文 献

- Zeng Zongfu. Mechanical Basis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. 263~265
曾宗福. 机械基础[M]. 北京:化学工业出版社, 2007. 263~265
- Qu Xinghua. Instrument Manufacture Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. 196~199
曲兴华. 仪器制造技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2005. 196~199
- Liang Wenguang, Wang Daifu, Wang Xingt. Precision Components Welding Practice [M]. Beijing: China Machine Press, 1994. 42~44
梁文广,王代富,王兴体. 精密元器件焊接实践[M]. 北京:机械工业出版社, 1994. 42~44
- Weng Shanchen, Lin Youde, Xu Zhenting. Instrument Elastic Element Design Foundation [M]. Beijing: China Machine Press, 1982. 232~236
翁善臣,林友德,徐振廷. 仪表弹性元件设计基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1982. 232~236
- Zhang Yongkang, Gao Li, Yang Chaojun. Theoretical analysis and experiment on deformation of TA2 sheet under laser shock [J]. Chinese J. Lasers, 2006, 33(9):1282~1287
张永康,高立,杨超君. 激光冲击 TA2 板料变形的理论分析和实验研究[J]. 中国激光, 2006, 33(9):1282~1287
- Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming et al.. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. Chinese J. Lasers, 2005, 32(1):135~

- 138
周建忠,张永康,周 明 等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. 中国激光, 2005, **32**(1):135~138
- 7 Chen Ruifang, Gao Naiguo, Hua Yinqun. Numerical simulation of effects of laser shock parameters on residual stress field induced by laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):931~936
陈瑞芳,高乃国,花银群. 激光冲击参数对残余应力场影响的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2008, **35**(6):931~936
- 8 Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):846~851
胡永祥,姚振强,胡 俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析[J]. 中国激光, 2006, **33**(6):846~851
- 9 Zhao Tenglun. The Application of ABAQUS 6.6 in Mechanical Engineering [M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. 5~7
赵腾伦. ABAQUS 6.6 在机械工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007. 5~7
- 10 J. Z. Zhou, J. C. Yang, Y. K. Zhang *et al.*. A study on super-speed forming of metal sheet by laser shock waves [J]. *Journal of Materials Technology*, 2002, **129**:241~244
- 11 Ma Ruzhang, Jiang Minhua, Xu Zuxiong. Introduction to the Functional Materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006. 133~139
马如璋,蒋民华,徐祖雄. 功能材料概论[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006. 133~139
- 12 Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing *et al.*. Property of laser-induced shockwave with confinement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(8):981~984
王声波,范 勇,吴鸿兴 等. 约束结构下激光冲击波特性试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(8):981~984
- 13 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physics study of laser produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2):775~784
- 14 D. Devaux, R. Fabbro, L. TOLLIER *et al.*. Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(4):2268~2273
- 15 Gu Yongyu, Zhang Xingquan, Shi Jianguo *et al.*. Design of a new type investigation of inverse deformation in laser shock forming with half die [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(1):95~97
顾永玉,张兴权,史建国 等. 激光半模冲击成形中板料反向变形研究[J]. 激光技术, 2008, **32**(1):95~97