

文章编号 1004-924X(2006)03-0396-06

激光冲击金属板料变形的 最小激光能量估算及其实验研究

杨超君¹, 周建忠¹, 张永康¹, 张 昉²

(1. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 沙洲职业工学院 机电工程系, 江苏 张家港 215600)

摘要:介绍了激光冲击板料变形的机理和冲击波产生的原因,提出了激光冲击板料变形中激光-能量转换体-靶材系统的爆轰波压力估算式。根据此压力估算式和材料的动态屈服强度,对激光冲击板料变形中所需的最小激光能量进行了估算,板料厚度为0.5 mm,约束凹模孔径 $\Phi 20$ mm,在光斑直径6 mm,脉宽25 ns条件下的不锈钢靶材变形所需的最低脉冲能量大约为11 J。实验结果表明估算的最小激光能量与板料变形所需的能量阈值基本一致,且板料变形量随激光能量的增加呈非线性增大。最小激光能量的估算以及能量与板料变形的实验研究为板料变形的精确控制和预测提供了理论依据。

关键词:激光冲击成形;冲击波;金属板料;变形;激光能量

中图分类号:TG156.99;TN249 **文献标识码:**A

Study on calculation of minimum laser energy of sheet metal deformation by laser shock forming

YANG Chao-jun¹, ZHOU Jian-zhong¹, ZHANG Yong-kang¹, ZHANG Fang²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. Mechanical and Electrical Engineering Department, Shazhou Vocational Institute of Technology,
Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: The mechanism of laser shock deformation and the reasons of producing the shock wave were introduced, and the estimated formula of shockwave pressure was put forward, which shows clearly the relation between the peak value of shockwave and the overlay, energy absorbed layer, sheet metal properties and laser parameters. Based on both the formula and the tensile yield strength of sheet metal, minimum laser energy needed by deformation was estimated, the results show that the lowest pulse energy needed by the target deformation of stainless steel is about 11 J under the conditions of sheet thickness of 0.5 mm, the bore diameter of cavity die of 20 mm, the beam diameter of 6 mm and the pulse width of 25 ns. The experimental results also show that minimum energy calculation accords with critical value of deformation, and the deformation increases with the increase of laser energy in a nonlinear way. By studying on the calculation of minimum laser energy and the deforma-

收稿日期:2005-06-14;修订日期:2006-04-20.

基金项目:国家自然科学基金(No. 50275068, 50475127),国家高技术研究发展计划(863计划)课题(No. 2002AA421120, 2002AA336030),教育部科学技术研究重点项目(No. 204052),江苏省自然科学基金(No. DK20044063),江苏省汽车工程重点实验室开放基金(No. QC200406)资助。

tion experiment, the paper provides exactly a theoretical foundation for controlling and predicting deformation of sheet metal.

Key words: laser shock forming; shock wave; sheet metal; deformation; laser energy

1 引言

金属板材成形件在航空航天、船舶工业、汽车覆盖件等生产行业占有举足轻重的地位,金属板料的无模成形技术一直是国内外众多塑性成形工作者不断探索的主题,对旋压成形、成形锤渐进成形、多点成形、数字化渐进成形,以及喷丸成形、爆炸成形、激光热应力成形等,都进行了较为深入的研究,并取得了丰硕的成果。随着激光技术的发展,激光诱导的高压冲击波已成为动高压技术的一种有效手段,目前讨论较多的是应用激光冲击处理进行材料表面改性方面的研究,而对激光冲击波技术用于金属板料成形加工为目的的研究则较少。激光冲击成形^[1]是一种利用激光与材料作用所产生的冲击波压力使材料变形的一种新的无模新技术。激光冲击金属板料变形时,由于冲击波压力达数个 GPa 量级,远大于材料的动态屈服强度,使材料发生塑性变形,显然激光冲击成形是利用高能激光诱导的高幅冲击波压力的力效应而非热效应来实现金属板料的塑性成形。本文对激光冲击下板料变形所需的最小激光能量进行了估算,并对最小激光能量与冲击波压力、板料变形之间的相互关系进行探讨,以便为板料冲击变形过程的有效控制提供理论依据。

2 激光冲击波压力估算

2.1 激光冲击成形机理

图 1 为激光冲击成形的模型,当高能量的激光束幅照到板料上由约束层和吸收层组成的能量转换体上时,能量转换体上和金属板料相接触的一侧薄层因吸收能量而汽化,汽化后的蒸汽急剧吸收激光能量并形成等离子体而爆炸^[2-3],产生冲击波的压力超过板料的动态屈服强度,从而使得板料发生塑性变形。在金属板料的激光冲击变形中,因作用的激光功率密度高(GW/cm^2 量级)、脉冲短(ns 量级),因而可形成高压冲击波,促使材料在极短的时间内发生塑性变形。可见激光冲

压成形是一种高应变率超快塑性变形,属于高能率金属动态成形。

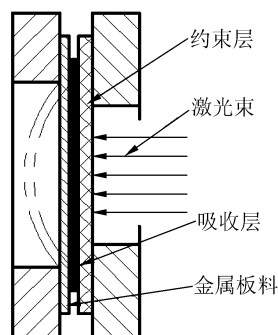


图 1 激光冲击成形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser shock forming

2.2 激光冲击的约束模型

为了获得足够高的冲击波压力,曾出现过两种激光冲击的物理模型(图 2):非约束模型和约束模型。非约束模型图 2(a)就是将激光直接辐照在金属材料上。这种模型不仅产生的冲击波压力不高,而且激光直接作用于金属材料上往往会引起材料性能的破坏。为防止非约束模型引起的

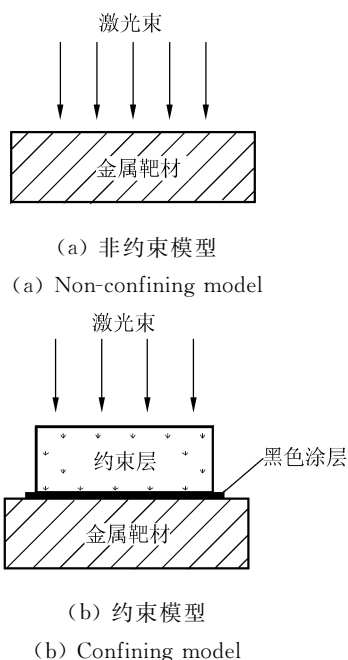


图 2 激光冲击的物理模型

Fig. 2 Physics model of laser shock

对材料性能的破坏,激光冲击成形中采用约束模型图 2(b),即首先在金属表面覆盖一层对激光波长不透明的物质(通常为黑色涂层)即吸收层,然后再在其上加上对激光透明的材料,也就是约束层,二者组成了前述的能量转换体。当激光束透过透明约束层时,激光能量被不透明的黑色涂层强烈吸收,仅有很薄的一部分涂层被牺牲气化以形成等离子体,这样激光对金属表层的热影响被有效抑制,从而保护了被冲击工件。

2.3 激光冲击波压力估算

金属板料的激光冲击波成形中,高能激光能量沉积在能量转换体的吸收薄层上,能量吸收层被瞬间加热、汽化电离,形成高温等离子体爆炸向外喷溅,由于受到约束层的限制,压力迅速增大,产生更高的冲击波压力;当激光冲击波压力大于板料的动态屈服强度时,作为靶材的板料在冲击波压力作用下,发生较大的宏观变形。同时约束层介质也会在高压冲击波作用下发生变形直至破裂,这时等离子体打开界面做功占主要地位,导致靶材和约束层之间的约束空间增大,约束层的约束效果减弱,因而在激光冲击成形中,必须考虑激光与能量吸收层和约束层相互作用产生冲击波及在其中的传播,并且在激光脉冲作用期间等离子体的横向膨胀效应不可忽略。由 R. Fabbro 等人^[4]建立的激光冲击波传播的一维模型及其压力估算式正是由于忽略了冲击波在约束层和吸收层中的传播和衰减,以及没有考虑等离子体的横向膨胀效应和高幅冲击波下材料的声阻抗并非为常数等影响,导致其计算结果与实际结果不一致。所以应对此模型及其压力估算式进行修正,为此下面提出激光冲击板料变形中激光-能量转换体-靶材系统的爆轰波压力估算式。

根据图 1 所示的板料激光冲击成形机理,把激光冲击波成形过程中激光-能量转换体-靶材系统的相互作用分成如图 3 所示的几个区域。根据爆轰波稳定传播的理论,在冲击波阵面上,由质量、动量和能量保持守恒及冲击波波速之间的关系等^[5-7]推得修正后的激光诱导冲击波压力的估算式为^[8]

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0 Z_{t0} Z_{c0} \rho}{(2\gamma-1)(K_a Z_{c0} + K_c Z_{t0})}}, \quad (1)$$

式中 A 为吸收系数,取 $0.80 \sim 0.95$; γ 为等离子体的绝热指数,这里取 1.67 ; Z_{t0} , Z_{c0} 分别为靶材

和约束层材料的声阻抗,单位: $\text{kg/m}^2 \text{s}$; K_a , K_c 分别为与能量吸收层和约束层密度有关的参量,单位: kg/m^3 ; ρ 为等离子体的密度,单位: kg/m^3 ,可看作是约束层材料、能量吸收层和工件材料气化蒸汽的综合体; I_0 为激光功率密度,单位 W/m^2 ; p_{\max} 为冲击波压力峰值,单位: GPa 。

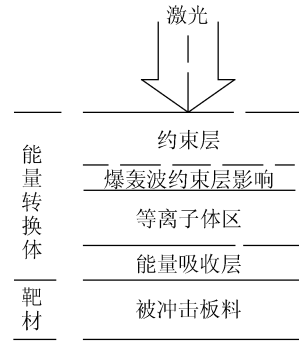


图 3 激光-能量转换体-靶材系统的相互作用关系
Fig. 3 Interaction relationship of laser-energy transfer medium-target system

如果设 $V_0 = \frac{Z_{t0} Z_{c0}}{K_a Z_{c0} + K_c Z_{t0}}$ (m/s) 为与靶材-能量吸收层-约束层有关参量,代入式(1),得到激光冲击波峰值压力的估算式的另一表达式

$$p_{\max} = [A(\gamma-1)/(2\gamma-1)]^{1/2} V_0^{1/2} \rho^{1/2} I_0^{1/2}, \quad (2)$$

可见估算式(1)或(2)能直观地反映冲击波压力与激光脉冲能量、约束层、能量吸收层及靶材物理量之间的关系。

3 最小激光能量估算

激光冲击板料能否发生宏观变形,主要取决于作用在靶面上的冲击波压力的大小,由于激光脉冲能量的大小影响作用在靶材表面的冲击波压力大小,为此激光器发出的脉冲能量必须大于板料变形所需的某一临界值即最小功率密度值 $I_{0\min}$,这就意味着需要估算板料变形所需的最小能量。众所周知,只有当激光冲击波压力诱导的板料拉应力大于其动态屈服强度时,板料才会产生拉伸变形。所以计算时可反过来,先根据材料的动态屈服强度,估算出作用在板料上所需的最小压力,然后根据前面冲击波压力估算式,估算所需激光脉冲的最小能量,并通过调整激光器控制电源上的主放电电压大小来实现脉冲能量的激发。

采用图 4 所示的实验方案时,在单次激光冲

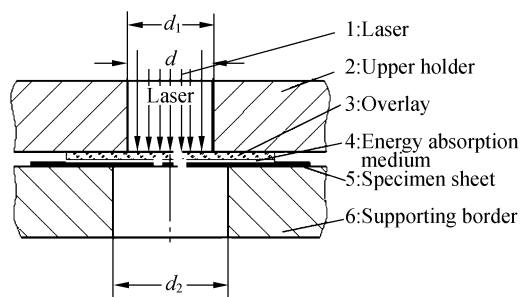


图 4 用于板料冲击变形的实验方案

Fig. 4 Schematic set-up of laser shock forming of sheet metal

击下板料的变形属于拉胀变形方式,而变形所需的压力可用下式进行估算^[9]:

$$p = K_F \frac{2t_0}{d_2} \sigma_S^D, \quad (3)$$

式中 t_0 为板料厚度 (mm); d_2 为约束凹模孔径 (mm); K_F 为系数,一般取 1.1; σ_S^D 为金属的动态屈服强度,单位为 GPa。

Whiffin A. C. 对动态屈服强度进行了多次试验,实验表明在冲击载荷作用下材料的动态屈服强度一般高于静态屈服强度,且证明了金属的动态屈服强度和静态屈服强度 (0.2% 残余变形的应力) σ_S^S 之间满足以下关系^[10],对于钢:

$$\frac{\sigma_S^D}{\sigma_S^S} = 1.6 - 2.42 \lg \sigma_S^S, \quad (4)$$

对于铝合金:

$$\frac{\sigma_S^D}{\sigma_S^S} = 0.67 - 1.89 \lg \sigma_S^S, \quad (5)$$

式中 σ_S^S 与 σ_S^D 的单位为 GPa。

由上可知,只要知道材料的静态屈服强度就能方便地求出其动态屈服强度。将式(3)代入由激光冲击下靶体系统所产生的冲击波压力估算式(2),变化得到板料在激光冲击下发生变形所需的功率密度估算式为:

$$I_{0min} = \frac{(2\gamma-1)K_F^2}{A(\gamma-1)V_0\rho} \left(\frac{2t_0}{d_2}\right)^2 \sigma_S^{D2} \text{ (GW/cm}^2\text{)}, \quad (6)$$

如果已知板料厚度,约束凹模孔径及其他相关参数,则可估算所需的最小功率密度。而激光能量 E 与激光参数如功率密度 I_0 、激光脉宽 τ 和光斑尺寸 d 等之间的关系满足:

$$E = \frac{1}{4} \pi d^2 \tau I_0, \quad (7)$$

将上式代入式(6)得板料变形所需的最小激

光能量为:

$$E_{min} = \frac{1}{4} \pi d^2 \tau \frac{(2\gamma-1)K_F^2}{A(\gamma-1)V_0\rho} \left(\frac{2t_0}{d_2}\right)^2 \times \sigma_S^{D2}, \quad (8)$$

由于实验中激光脉宽不变,在光斑尺寸确定后,即可估算出板料发生变形时激光单次激发所需的最小能量。如果取板料厚度为 0.5 mm,约束凹模孔径 $\Phi 20$ mm,在光斑直径 6 mm,脉宽 25 ns 的条件下,靶材变形所需的最低脉冲能量大致为:铝:6 J;不锈钢:11 J;45 钢:18 J。可见由于 45 钢的屈服强度较不锈钢、铝板试样要高,所以其变形需要的冲击波压力也大。

4 激波加载下金属板料塑性变形的实验研究

影响板料冲击变形的因素较多^[11],主要有激光参数、试样材料、板料几何参数、约束边界等,下面讨论激光能量对 SUS304/TiN 试样材料进行板料冲击变形的实验研究。

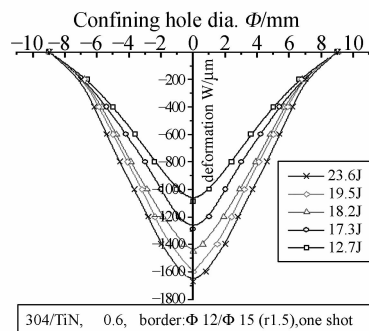


图 5 激光能量对 SUS304/TiN 试样成形轮廓尺寸的影响

Fig. 5 Laser energy vs forming profiles of the specimen

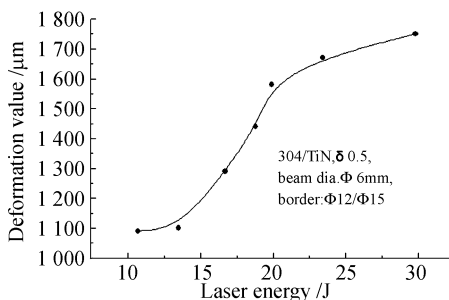


图 6 激光能量与 SUS304/TiN 试样最大变形量的关系

Fig. 6 Maximum deformation of the specimen vs laser energy

由于激光脉冲能量的大小影响作用在靶材表面的冲击波压力大小,从而直接影响板料的变形。图 5 为不同的激光能量下,厚度为 0.6 mm 的 SUS304/TiN 矩形薄板试样在约束边界为 $\Phi 12/\Phi 15$ 条件下板料变形的轮廓形状,图 6 为其最大变形量与激光能量的关系曲线。由图 5、图 6 可见,板料变形的截面形状像锥形,在激光能量较小,但大于板料变形所需的能量阈值即估算的 11 J 左右时,能量的变化对板料变形的影响不太明显;当激光能量大于 15 J 时,板料变形量随激光能量的增加而明显增大。由于受到板料变形能力的限制,当激光能量继续增大达到 22 J 时,板料变形量的增大趋于缓慢。这说明激光能量的增加与 SUS304/TiN 板料变形量的增大是非线性的,在本实验条件下,当激光能量约为 20 J 时,板料变形具有较优值,即在充分利用激光能量的同时,又能获得较好的板料变形量。

5 结束语

从上可见,金属板料的激光冲压成形是冲击

力作用下的力效应,而非热效应,高能激光束与能量转换体相互作用产生高压冲击波,使金属板料产生冷塑性成形。上述通过对激光冲击金属板料变形机理的研究,针对激光冲击广泛采用的约束模型,指出对 R. Fabbro 等人建立的激光冲击波传播的一维模型及其压力估算式的不足,提出了激光冲击成形中激光-能量转换体-靶材系统的爆轰波压力估算式。通过修正后的冲击波压力值及材料的动态屈服强度,估算金属板料发生塑性变形所需的激光脉冲最小能量,并通过了试验验证。实验结果表明:估算的最小激光能量与实验时板料发生塑性变形所需的能量阈值基本一致,板料变形量随激光能量的增加呈非线性增大。当然,影响板料激光冲压成形的因素较多,板料变形情况不仅与激光能量有关,还与试样材料、板料几何参数、约束边界等诸多因素有关,而当激光能量较大时,也会引起成形区冲裂破坏,因而本文的研究只是侧重于一个方面,还有许多方面值得继续研究。

参考文献:

- [1] 周建忠,张永康,杨继昌. 基于激光冲击波技术的板料塑性成形新技术[J]. 中国机械工程,2002,13(22):1938-1940.
ZHOU J ZH, ZHANG Y K, YANG J CH. New technique on plastic forming of metal sheet by laser shock wave[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(22):1938-1940. (in Chinese)
- [2] QI L H, NI Q L, CHEN B. Experimental investigation of laser-produced-plasma EUV source based on liquid target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(5):604-607.
- [3] 鲁建业,王军,马玉刚,等. 纯净靶激光等离子体力学特性的理论模拟[J]. 光学精密工程 2004,12(5):550-554.
LU J Y, WANG J, MA Y G, et al. Theoretical simulations of the mechanical characteristics of laser induced plasma for monatomic target[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(5):550-554. (in Chinese)
- [4] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical study of laser induced plasma in confined geometry[J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, 68(2):755-784.
- [5] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
WANG L L. *Stress wave basis*[M]. Beijing: National Defence Industry Press. 1985. (in Chinese)
- [6] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社. 1992.
MA X Q. *Shock dynamics*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press. 1992. (in Chinese)
- [7] LAWRENCE Y Y, ZHANG W, CHEN H. Advances in micro-scale laser peening technology[C]. *ICFDM'2002*, 6-12.
- [8] 周建忠. 金属板料激光冲击成形加载机制及变形特性研究[D]. 江苏大学,2003.
ZHOU J ZH. Study on the mechanism of shock wave loading and the properties of deformation of sheet metal of laser shock forming[D]. *Jiangsu University*, 2003. (in Chinese)
- [9] 邓步,王先进,陈鹤峥. 金属薄板成形技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1993.

DENG B, WANG X J, CHEN H ZH. *Technique of sheet metal forming* [M]. Beijing: Publishing Company of Weapon Industry. (in Chinese)

[10] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京:国防工业出版社,1984. 12.

QIAN W CH. *Armor-piercing mechanics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press. (in Chinese)

[11] 周建忠,张永康,杨继昌,等. 金属板料激光冲压成形技术实验研究. *应用激光*,2002(2)

ZHOU J ZH, ZHANG Y K, YANG J CH, *et al.* Experimental study on laser shock forming of metal sheet[J]. *Applied Laser*, 2002(2):165-168. (in Chinese)

作者简介:杨超君(1965—),女,江苏大学机械学院副教授,研究方向为激光新技术应用和磁力机械。