

文章编号: 1001-3806(2007)06-0639-03

金属板料激光冲孔成形技术研究

史建国, 张永康*, 顾永玉, 张兴权
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了验证激光冲击波冲孔工艺的可行性, 采用 Nd 玻璃高功率脉冲激光器在 0.4mm 厚锻铝合金板料上进行冲孔试验。推导出激光冲孔工艺中板料脱离时所需理论最小板料运动速度, 分析了激光冲击波冲孔技术的机理及其特点。结果表明, 激光冲击波冲孔后, 孔周围材料未发生扭曲变形、孔口光滑。激光冲孔技术为孔成形工艺提供了全新的加工方法。

关键词: 激光技术; 激光冲击波; 冲孔; 机理
中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Study on sheet metal punched by laser shock waves

SHI Jian-guo, ZHANG Yong-kang, GU Yong-yu, ZHANG Xing-quan
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract Laser punching technique is a new idea about hole forming of sheet metal which is based on the effects of shock waves induced by laser and the high speed punching process. The theoretical minimum movement velocity for the sheet to be punched by laser shock waves was deduced. Also the mechanism and the punching properties was analyzed on the basis of laser shock forming technology. To test the feasibility of laser punching a corresponding experiment was designed. In the experiment a neodymium glass high-power laser was adopted to irradiate the black coating painted on the surface of the 0.4mm thick aluminum sheet through the overlay-K9 glass and the coating was gasified immediately into high-pressure plasma to generate a hole in the sample. The experimental results show there is no obvious distortion around the hole, the edge of hole is smooth, and the size of hole is dependent on the concave die. So the laser punching technique can be used as an effective method for hole forming.

Key words laser technique; laser shock wave; punching; mechanism

引 言

在激光与物质的相互作用中, 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, 并已用于惯性约束聚变和激光冲击处理等多种基础研究和工程应用领域。激光冲击成形正是由激光和材料相互作用所产生的高压冲击波来实现。HACKEL 等人提出了采用激光冲击在工件表面形成一个深的残余压应力层分布, 利用残余应力释放而使金属板材进行三维弯曲成形的成形原理和精确成形方法, 并设想将激光冲击用于板材和杆件的校形^[1]。随着激光技术的快速发展, 高功率、高重复率激光器的出现, 其诱导的冲击波压力也不断增强, 利用其冲击效应进行薄板小孔成形也成为可能。

常规的板材开孔工艺有模具冲孔、钻孔和激光打

孔。模具冲孔可加工出高质量的孔, 但模具加工、装配精度要求高, 加工成本大, 不适合小批量生产或单件修复; 板料厚度很小时, 钻孔容易引起板料变形, 孔的加工质量极低, 甚至出现卡钻头或钻头折断现象, 尤其对于 0.1mm ~ 1.5mm 厚的超薄板材上的孔的成形至今没有理想的钻削方法^[2]; 激光打孔适合于微小孔的成形, 其成形后会在孔的周围和内壁形成不规则的堆溅物和重铸层, 并且孔具有一定的锥度。与上述 3 种孔成形方法相比较, 激光冲孔具有适应性强, 使用范围广泛的优点。本文中对激光冲击过程中板料的变形及孔的形成过程进行了初步分析, 并对冲孔所需要的最低板料速度进行了推导。

1 冲孔机理

强激光的冲击力学效应涉及到激光与材料相互作用的广泛研究领域。当激光的名义激光峰值功率密度 $J_0 > 10^9 \text{ W/cm}^2$ 时, 发生等离子现象, 在固态区产生高压冲击波, 即激光驱动的冲击波。不采用约束层时, 按照解析和数值研究, 激光驱动的冲击波峰值压力 p_0 与

作者简介: 史建国 (1977-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2006-09-25; 收到修改稿日期: 2006-11-16

激光峰值功率密度 J_0 存在以下简单关系^[3]:

$$p_0 = BJ_0^n \quad (1)$$

式中, $B \approx 0.6 \sim 0.8$, $n \approx 0.67 \sim 0.82$, p_0 和 J_0 的单位分别为 TPa 和 10^{14}W/cm^2 。可见当 $J_0 \geq 2 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ 时, $p_0 > 1 \text{TPa}$ 。

当脉宽为几十个纳秒, 功率密度大于 10^9W/cm^2 的短脉冲强激光透过透明约束层辐照在吸收层上, 吸收层材料吸收激光脉冲能量后在极短时间内气化, 气化物又被穿行其中的激光加热形成等离子体。约束层则限制了等离子体的膨胀, 增强了与激光能量的耦合和冲击波的相互作用, 提高了激光诱导的冲击波的峰值, 导致等离子体压力迅速升高^[4]。最后施与靶面一个冲击加载, 产生向金属内部传播的强冲击波。激光诱导冲击波形成见图 1。

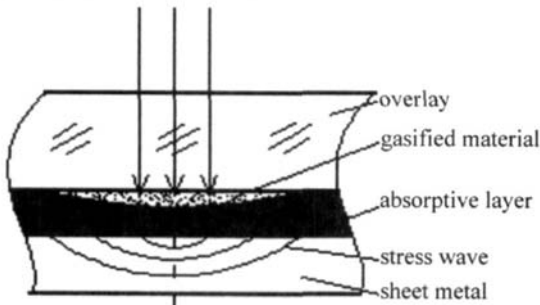


Fig 1 Forming process of laser induced shock wave

实验采用的激光冲击冲孔的装置见图 2 约束层可选择各种透明材料如玻璃或水溶液, 其作用是为了提高冲击波的峰值压力和延长激光冲击波的脉冲宽度, 从而增强激光诱导的冲击波的冲击效果。涂敷在金属板料表面的吸收层材料为黑漆, 在激光冲击冲孔中的作用是增加激光的吸收率, 从而提高冲击波的峰值压力。

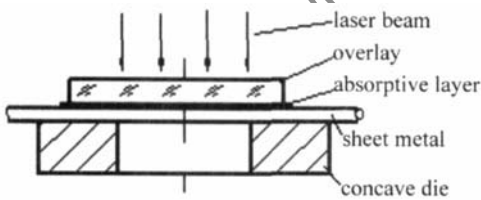


Fig 2 Schematic of laser punching device

PERRY 等人根据约束模型, 对冲击波峰值压力进行了估算^[5]。冲击波的峰值压力由下式给出:

$$p_0 = \left[\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right]^{2\gamma/(\gamma-1)} \frac{\rho_0}{\gamma + 1} \left[\frac{2(\gamma^2 - 1)J_0}{\rho_0} \right]^{2/3} \quad (2)$$

式中, p_0 为冲击波的峰值压力 (Pa); ρ_0 为等离子体的初始密度 (kg/m^3); γ 为等离子体的绝热指数 (常数), J_0 为激光峰值功率密度。

激光冲击冲孔的过程可分为冲击波形成、板料塑性变形、冲塞和柱塞飞离 4 个阶段。

在冲击波的压力作用下板料发生塑性变形, 见图 3a 随着板料塑性变形量的增加, 变形区域边界处的剪

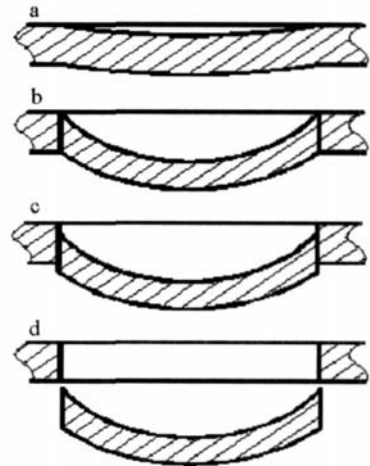


Fig 3 Schematic of hole forming process

切应力也逐步增大。如果冲击波的强度足够大, 则当板料的变形量达到极值时将在变形区域边界处形成滑移剪切带, 见图 3b。滑移剪切带形成后, 变形区域的板料在冲击波的压力以及自身惯性作用下沿滑移剪切带向下运动形成冲塞, 见图 3c。当冲塞的位移大于板料厚度时, 冲塞飞离基体, 在板料上留下一个和凹模直径相同的孔, 见图 3d。

由于激光诱导的冲击波的脉冲宽度小于冲击波阵面超过板料的时间, 因而在板料发生整体塑性变形前, 冲击波将其全部冲量传递给板料, 使其获得一个初速度, 冲击波作用结束后板料在惯性作用下运动变形。冲击波传递给板料的冲量为:

$$I = \int_0^t \int_0^r p(r, t) dt dr \quad (3)$$

式中, $p(r, t)$ 为冲击波的压力, r 为光斑半径, t 为时间。假设激光诱导的冲击波在空间上均匀分布, 即 $p(r, t) = p(t)$, 则:

$$I = \pi r^2 \int_0^t p(t) dt \quad (4)$$

根据动量定理得:

$$I = m v_0 \quad (5)$$

式中, m 为变形区域的质量 ($m = \pi R^2 h \rho$, R 为变形区域半径, h 为板料厚度, ρ 为板料密度), v_0 为板料运动的初速度。因而板料获得的激光冲击动能为:

$$E = \frac{1}{2} \frac{I^2}{m} \quad (6)$$

在激光冲击冲孔过程中, 冲击波传递给板料的能量可分为 3 个部分, 即:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (7)$$

式中, E 为冲击波传递给板料的总能量, E_1 为板料塑性变形消耗的能量, E_2 为冲塞克服变形区域边界上的剪切应力消耗的能量, E_3 为冲塞飞离基体带走的动

能。当板料的变形量达到极值时在变形区域边界形成剪切带并形成冲塞, 设此时板料的运动速度为 v_1 , 则冲塞过程中板料的运动方程为:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -2\pi r \tau_y (h - x) \quad (8)$$

式中, x 为冲塞移动的距离, τ_y 为板料的剪切强度极限。解得:

$$x(t) = \frac{1}{2} \left[\left(v_1 \sqrt{\frac{h}{\tau_y}} - h \right) \exp \left[\sqrt{\frac{h}{\tau_y}} t \right] + \left(v_1 \sqrt{\frac{h}{\tau_y}} + h \right) \exp \left[-\sqrt{\frac{h}{\tau_y}} t \right] \right] + h \quad (9)$$

当冲塞的移动距离等于板料厚度时冲塞脱离板料形成冲孔, 则令 $x = h$, 得冲塞脱离板料的时间为:

$$t_m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h}{\tau_y}} \ln \frac{v_1 \sqrt{\frac{h}{\tau_y}} + h}{v_1 \sqrt{\frac{h}{\tau_y}} - h} \quad (10)$$

此时冲塞的残余速度为:

$$v(t_m) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h}{\tau_y}} \left[\sqrt{v_1 \sqrt{\frac{h}{\tau_y}} - h} + \sqrt{v_1 \sqrt{\frac{h}{\tau_y}} + h} \right] \quad (11)$$

则冲塞带走的残余动能为:

$$E_3 = \frac{1}{2} m v(t_m)^2 \quad (12)$$

由 (11) 式可见, 冲孔所需的最小速度必须满足:

$$v_1 > \sqrt{\tau_y h} \quad (13)$$

否则将不能形成冲孔。

2 实验

实验采用 0.4mm 厚的锻铝合金板料作激光冲击试样, 凹模半径为 10mm, 激光光斑半径为 3mm, 实验中的 Nd 激光器主要参数为: 激光波长为 1.06 μ m, 脉冲宽度为 23ns, 能量为 17.6J, 约束层材料为 K9 玻璃。冲击后的试样见图 4。

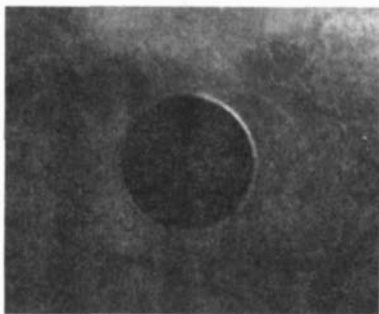


Fig 4 Sample by laser punching

对冲孔后的试样进行分析, 发现激光冲击冲孔的孔口边缘光滑。断口光滑的原因分析可以归结为绝热剪切作用的产生。当整个变形过程是在很短的时间内完成的, 激光冲击过程正是一个高速变形过程, 变形过

程中材料的应变率很高, 可达 $10^7 \text{ s}^{-1} \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$ ^[6], 此过程中 90% 以上的塑性功转化为热能并且来不及散失, 所以近似认为在此高应变速率下的变形过程为绝热过程。材料在高应变速率条件下的变形特点由 3 个互相竞争的因素来决定: (1) 由于变形程度的增加而导致的应变强化效应; (2) 应变率强化效应; (3) 由于绝热温升而导致的热软化效应。当热软化效应占优时, 材料就会发生热粘塑性本构失稳^[7-9], 形成所谓的绝热剪切带 (adiabatic shearing band ASB), 这是一个剪切变形高度局域化的窄带形区域, 宽度一般为 $10^2 \mu\text{m}$ 量级^[10]。绝热剪切带的出现造成了材料的强度和韧性下降, 并使得冲击区域和四周的冷的基体材料产生很大的温度梯度, 产生很大的应力梯度, 和凹模的刃口共同作用, 其结果是产生贯串式剪切断裂, 同时断口在遇到四周的“冷壁”的作用下, 发生重结晶, 所以断口光滑。

在板料厚度等其它参数相同的情况下, 相对于激光冲击成形, 激光冲孔对激光器的提出了更高的要求, 需要更高的功率密度以诱导产生更强的冲击波峰值压力。当激光诱导的冲击波的峰值压力小于材料的动态屈服极限时, 材料不发生动态塑性变形, 随着激光功率密度的提高, 冲击波的峰值压力提高, 板料将发生塑性变形, 冲击区材料表面局部的层裂, 最后冲击区域的材料从母体上脱落下来的断裂。激光冲击产生的孔尺寸的大小是由凹模的尺寸的大小决定, 因此在冲击前, 需要根据要加工孔的尺寸的大小, 制造出相应尺寸的凹模; 由于凹模尺寸的精度决定孔的精度, 冲击的过程中, 凹模的相当于冲裁过程中的定刀, 因此凹模孔口应保持锐边; 另外激光冲击波的压力是由激光辐照引起的, 产生的爆轰波主要沿着光束的方向运动, 冲击波的压力主要集中在光斑辐照的区域, 因此当光斑小于凹模孔口的尺寸时, 板料在冲出的孔口的四周有突起不平整, 甚至孔不能被冲出, 为了保持孔周围材料的平整性, 在冲击时光斑的尺寸最好大于孔的尺寸。

3 结束语

激光冲击冲孔是利用激光诱导的冲击波的力学效应对板料进行孔的成形加工, 本文中分析了激光冲击冲孔过程中的能量分配和冲塞形成后的板料运动, 并推导出板料塑性变形后, 为形成冲孔所必需的最小速度阈值。通过试验验证了激光冲击冲孔的可行性, 并对冲击冲孔的孔口质量进行了分析, 试验表明激光冲击冲孔的孔口光滑, 没有毛刺, 质量高于激光打孔。

总之, 随着计算机技术、数控技术、高功率激光器设计与制造技术等相关技术的发展, 必将和激光打孔、

(下转第 645 页)

好于一般的多重分形方法。例如,在图 3a 中重构图像比较模糊,从图中只能识别很少的特征点,其主要原因在于前期的边缘没有精细、完整的提取,导致了一部分纹理(低频)和边缘(高频)信息的缺失。实际上,图像重构提供了一种检验边缘提取效果的直观方法。同时,在最奇异流形集合基础上通过增大扩大分形集合 F_{h_0} 的范围,即增加重构系数的数目考察重构图像的峰值信噪比。这里 Δh 每增加 0.01,利用(4)式、(9)式计算相应重构图像的信噪比,得到图 4 所示结果,图

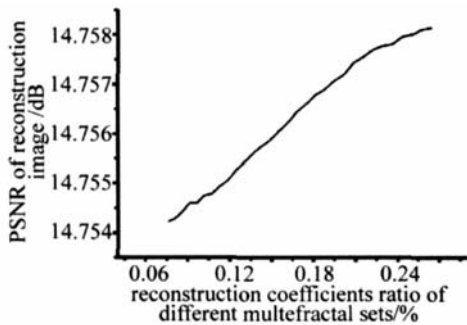


Fig 4 PSNR of the reconstruction images from the different multifractal coefficient ratio

中横坐标表示不同分形集合的重构系数比,它表示(4)式所定义的分形集合所包含的像素数目与全体像素数之比。从图中可知,随着重构像素数的增加,重构图像的信噪比有明显的上升趋势。因此,获得尽量多的边缘信息有助于得到较高的重构质量。

4 结 论

利用 SEMA 进行图像的奇异性分析方法,利用此方法计算奇异性指数,结果准确、可靠、鲁棒性强,且检测的图像最奇异流形集合蕴含了图像中视觉最重要的部分。通过提取的分形集合重构原图像,为我们提供

了一种检验边缘提取效果的直观方法。为后续的工作,例如基于轮廓的图像编码打下良好的基础。

参 考 文 献

- [1] CASTLEMAN K R. Digital image processing [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2003. 375~404.
- [2] JIANG Zh Q. Some questions in the applications research of fractal and analysis of its present situation and foreground [J]. Journal of Changchun Post and Telecommunication Institute, 2004, 22(1): 58~61 (in Chinese).
- [3] PENTLAND A. Fractal-based description of nature scene [J]. IEEE Transaction Pattern Analysis Machine Intelligence, 1984, 6(6): 661~674.
- [4] YI H Y, LÜ B D, JI Y S. Target recognition under different complicated background of cloud [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 133~140 (in Chinese).
- [5] DECOSTER N, ROUX S G, ARNEODO A. A wavelet based method for multifractal image analysis II: Application to synthetic multifractal rough surface [J]. European Physical Journal, 2000, B3(15): 704~739.
- [6] AN B, CHEN H X, CHEN Zh P. Real time edge enhancement of optical image with liquid crystal TV [J]. Laser Technology, 2002, 26(1): 44~46 (in Chinese).
- [7] TURIEL A, PARGA N. The multifractal structure of contrast changes in natural images from sharp edges to texture [J]. Neural computation, 2000, 12(4): 763~793.
- [8] TURIEL A, MATO G. The self-similarity properties of natural images resemble those of turbulent flows [J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(5): 1098~1101.
- [9] NEVADO A, TURIEL A, PARGA N. Scene dependence of the non-gaussian scaling properties of natural images [J]. Network Computation in Neural Systems, 2000, 11(2): 131~152.
- [10] LYVERS E P, MITCHELL O R, MARK L *et al*. Subpixel measurement using a motion-based edge operator [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1293~1308.
- [11] TURIEL A, POZO A D. Reconstructing images from their most singular fractal manifold [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2002, 11(4): 345~350.

(上接第 641 页)

激光切割一样得到广泛的应用,并产生良好的经济效益和社会效益。

参 考 文 献

- [1] HACKEL, LLOYD, HARRIS *et al*. Contour forming of metals by laser peening [P]. US, 6410884, 2002-07-25.
- [2] SU H L, LU B J. Prole to working progress of drilling holes in thin plates [J]. Mechanical Engineer, 2003(3): 65~66 (in Chinese).
- [3] TRANOR R J, LEE Y T. Analytic models for design of laser-generated shock-wave experiments [J]. Physics of Fluids, 1982, 25(10): 1898.
- [4] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M *et al*. Study on technique of laser shock forming of metal sheet [J]. Laser Technology, 2002, 26(6): 478~480 (in Chinese).
- [5] PIRRI A N. Theory of momentum transfer to a surface with a high power laser [J]. Physics Fluid, 1976, 16(9): 1435~1440.
- [6] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P *et al*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. JAP, 1990, 68(2): 775~784.
- [7] BAI Y L. Adiabatic shear banding [J]. Research in Mechanics, 1990, 31(2): 133~203.
- [8] YANG Zh Y, ZHAO J P. The review of the microstructure of adiabatic shear bands in metallic materials [J]. Journal of North University of China, 1995, 16(4): 327~333 (in Chinese).
- [9] WANG L L, YU T X, LI Y Ch. Progress of impact dynamics [M]. Heifei University of Science and Technology of China Press, 1992, 2~6 (in Chinese).
- [10] YANG Y, CHEN X L. Current status and trends in researches on adiabatic shearing [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(3): 401~408 (in Chinese).