

文章编号: 1001-3806(2007)06-0653-03

激光冲击成形对表面光洁度的影响

顾永玉¹, 张兴权¹, 史建国¹, 张永康^{1, 2*}

(1. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013; 2 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要: 为了研究激光冲击成形对板料表面光洁度的影响, 采用 0.5mm 厚铝板 and 304 不锈钢板料作为试样, 选择光斑直径 8mm、波长 1054nm、脉冲宽度 23ns 的激光脉冲进行冲击成形实验, 铝板冲击成形的激光能量为 15.4J, 304 不锈钢的激光能量为 18.92J。冲击成形后对板料表面光洁度进行检测, 结果表明, 激光冲击成形可使板料表面光洁度提高接近两个精度等级。通过理论分析可知, 板料背面光洁度的提高有两个方面的原因, 一方面由于应力波在板料背面的微尖峰中传播时产生一系列的反射波, 当反射波强度超过材料抗拉强度极限时将引起微尖峰的断裂; 另一方面由于板料的高速运动在板料背面的空气中形成高压区, 当作用在板料表面的空气压力大于动态屈服强度时微尖峰发生塑性变形, 因微尖峰断裂和塑性变形使板料背面光洁度提高。

关键词: 激光技术; 表面光洁度; 形成机理; 应力波

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Effect of laser shock forming on surface roughness of targets

GU Yong-yu¹, ZHANG Xing-quan¹, SHI Jian-Guo¹, ZHANG Yong-kang^{1, 2}

(1. School of Mechanical Engineering Jiangsu university, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering East China of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract In order to study the effects of laser shock forming on the surface roughness, metal sheet of aluminum and 304 stainless steel of 0.5mm thickness are used as samples of laser shock forming and laser beams with radius of 0.4mm, wavelength of 1054nm and pulse width of 23ns was applied in laser shock forming while the energy for aluminum sheet was 15.4J and for 304 stainless steel was 18.92J. The measurement results after laser shock forming show that laser shock forming may improve the surface roughness to two roughness rank. There are two reasons for surface roughness improvement. On the one hand, it will generate a series of transmission waves and reflection waves when the stress wave spreads in tiny peak of sheet surface and the tiny peak would rupture if the strength of reflection tensile wave is beyond the tensile strength of targets. On the other hand, a high pressure zone is formed in the air because of high speed motion of sheet and plastic deformation of tiny peak would take place if the pressure of air acted on the back of sheet is greater than the dynamic bend intensity. So the altitude of tiny peak is decreased by the rupture and plastic deformation of tiny peak and it results in improvement of the surface roughness.

Key words laser technique; surface roughness; forming mechanism; stress waves

引 言

利用激光诱导的冲击波作为成形力源使板料发生塑性变形是一种全新的无模或半模成形方式, 具有广阔的应用前景^[1~5]。激光冲击成形在使板料发生塑性变形的同时, 还可以显著降低板料前后表面的粗糙度。板料迎光面表面质量的提高是由于激光辐照产生的汽化物和等离子体的冲蚀和压研作用, 目前已有学者对

其进行分析研究^[6, 7]。板料背面并未受到汽化物的冲蚀和压研而粗糙度同样有所降低, 其机理目前还没有文献进行研究。作者在试验的基础上对激光冲击成形板料背面粗糙度降低的原因进行分析, 有助于更好地控制冲击成形板料的表面质量。

1 实 验

激光冲击成形的装置如图 1 所示, 采用 K9 玻璃作为约束层, 用于提高激光诱导的冲击波的峰值压力和延长冲击波的脉冲宽度。并在板料的表面涂布一层 0.5mm 厚的黑漆作为吸收层, 以提高对激光的吸收率, 从而进一步提高冲击波的峰值压力, 同时还可以隔离激光对板料的热影响。

分别采用 0.5mm 厚的铝板和 304 不锈钢板作为

基金项目: 国家八六三计划资助项目 (2002AA42112Q, 2002AA336030)

作者简介: 顾永玉 (1966), 男, 博士研究生, 从事激光技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujst.edu.cn

收稿日期: 2006-09-21; 收到修改稿日期: 2006-11-27

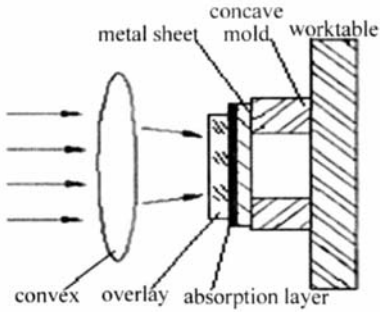


Fig 1 Schematic of laser shock forming

试样, 进行激光冲击试验, 铝板冲击成形的激光参数为光斑直径 8mm, 能量 15.4J, 波长 1054nm, 脉冲宽度 23ns。304不锈钢的激光参数为光斑直径 8mm, 能量 18.92J, 波长 1054nm, 脉冲宽度 23ns。

铝板冲击成形后的试样如图 2所示, 变形区域中

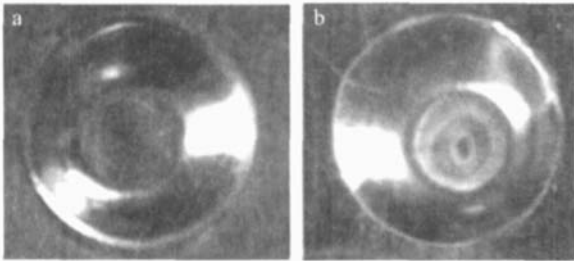


Fig 2 Appearance of aluminum sample in deformation area
a- concave side b- protrudent side

心的圆斑是由于板料变形量过大撞击工作台形成的。304不锈钢冲击成形后的试样如图 3所示。从试样上

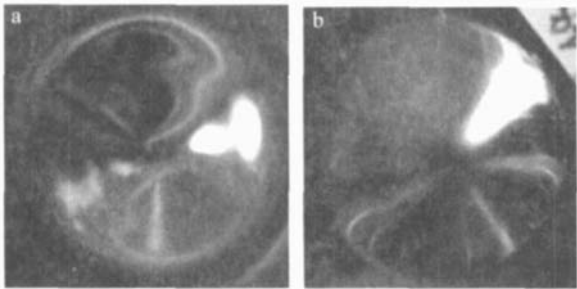


Fig 3 Appearance of 304 stainless steel sample in deformation area
a- concave side b- protrudent side

可以看出, 板料冲击后表面粗糙度有明显降低, 变形量区域无论是迎光面还是背光面都呈镜面状, 且板料表面原有的划痕都消失了。对试样表面的粗糙度进行检测, 结果表明, 冲击成形后板料的表面粗糙度降低幅度接近于两个等级。

2 成因分析

一般材料表面, 由于机械加工总会留有加工的痕迹, 在微观上表现为存在大量的峰谷, 如图 4所示。这些尖峰的高度越大, 板料表面的粗糙度就越大。当激光诱导的冲击波到达板料背面时, 冲击波从基体向板料表面的尖峰中传播, 由于尖峰的截面积由大到小逐

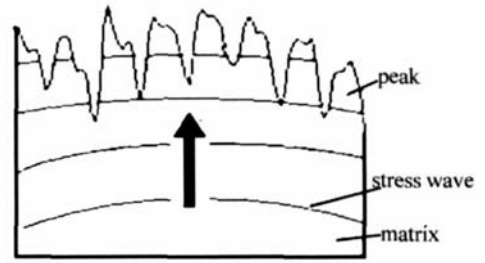


Fig 4 Appearance schematic of sample back surface

渐变化, 将引起应力波的透射和反射^[8,9]。根据变截面杆中应力波的传播特性, 尖峰中的透射波为强度渐增的压缩波, 而反射波则为拉伸波。板料表面的尖峰可以看作是一系列截面发生间断的阶梯杆, 见图 5。

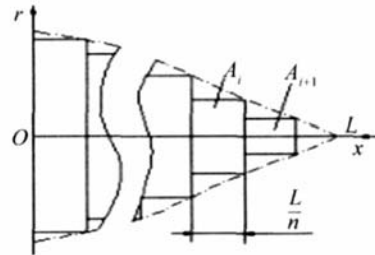


Fig 5 Schematic of ladder bar turned from taper bar

应力波在每一个截面间断处都将发生反射和透射, 在第 i 个截面处透射波和反射波分别为:

$$\sigma_{t_i} = \frac{2A_{i-1}}{A_{i-1} + A_i} \sigma_{t_{i-1}} \quad (1)$$

$$\sigma_{r_i} = \frac{A_i - A_{i-1}}{A_i + A_{i-1}} \sigma_{t_{i-1}} \quad (2)$$

式中, σ_{t_i} , σ_{r_i} 分别为第 i 个截面处的透射压缩波和反射拉伸波的强度, $\sigma_{t_{i-1}}$ 为第 $i-1$ 个截面处的透射波强度, A_{i-1} , A_i 分别为第 $i-1$ 个, 第 i 个截面的截面积。

当板料表面的尖峰形状确定后, 选取一定的划分长度, 就可以求出各个截面上的透射压缩波和反射拉伸波的强度。例如对于一个底部半径为 $30\mu\text{m}$, 顶部半径为 $2\mu\text{m}$, 高为 $8\mu\text{m}$ 的圆锥状尖峰, 取划分长度为 $0.08\mu\text{m}$, 则该尖峰可看成是一个有 100级台阶的阶梯杆。当强度为 -1 的压缩波在尖峰中传播时, 透射压缩波和反射拉伸波的强度曲线如图 6所示。由图可见, 随着应力波在尖峰中的传播, 透射压缩波和反射拉

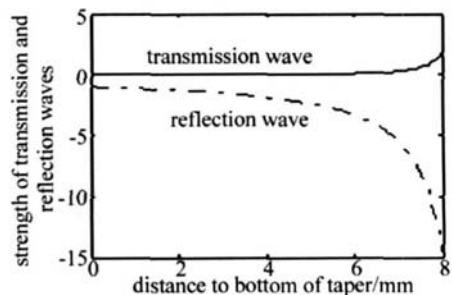


Fig 6 Strength curve of transmission wave and reflection wave

伸波的强度逐渐增加,反射拉伸波的强度在 $7.84\mu\text{m}$ 处达到初始入射波的强度,而在锥顶处接近于初始入射波强度的 2 倍。

如果初始入射波的强度很高,则随着应力波在尖峰中传播,反射波的强度逐渐增加,当反射拉伸波的强度超过材料的动态强度极限时,将引起尖峰的断裂,使尖峰的高度降低,宏观上表现为板料背面的粗糙度降低。

激光冲击成形中,板料完成塑性变形的时间不超过微秒量级。在这么短的时间内工件产生显著变形,板料的运动速度高达千米每秒量级。当板料高速运动时,背面的空气在板料的推动下形成一个高压区。

把板料背面的空气流动简化为一维不定常流,以工件刚开始运动的位置为原点,工件运动方向为 x 轴正向建立 $x-t$ 坐标系,根据空气动力学理论,工件背后波动区域的空气压力为^[10]:

$$p = p_0 \left[1 + \frac{k-1}{2} \frac{u}{c_0} \right]^{\frac{2k}{k-1}} \quad (3)$$

式中, p , u 为空气的压力和速度,而 p_0 , c_0 , k 分别为静止空气的压力、声速和多方指数。在工件表面,气体运动速度和工件的运动速度相同。即: $u = w(t)$, $w(t)$ 为工件的运动速度,则作用在工件表面的空气压力为:

$$p = p_0 \left[1 + \frac{k-1}{2} \frac{w(t)}{c_0} \right]^{\frac{2k}{k-1}} \quad (4)$$

空气的多方指数取为 $k = 7/5$, 声速 $c_0 = 334\text{m/s}$, 压力 $p_0 = 0.1\text{MPa}$, 则工件表面的压力和工件运动速度之间的关系如图 7 所示。由图可见,随着速度提高的增

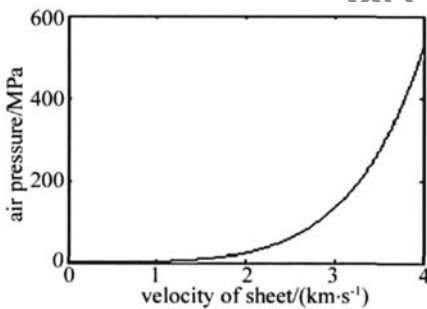


Fig 7 Relation curve of air pressure vs velocity of sheet

加,作用在工件表面的空气压力急剧上升。

如果 23ns 的激光脉冲使工件产生 2mm 的变形量,激光诱导冲击波的作用时间通常为激光脉冲宽度的 2 倍 ~ 3 倍,即不超过 70ns 。由于惯性影响工件变形时间应当大于冲击波作用时间,假定工件变形时间

为冲击波作用时间的 5 倍,即约为 350ns ,工件运动的平均速度约为 $w(t) = 5\text{km/s}$ 左右,则作用工件表面的平均空气背压在 800MPa 左右,这么高的压力已超过一般材料的动态强度,它将对板料背面产生很强的冲刷和压研作用,使板料背面的微尖峰发生塑性变形而被墩粗,相应的尖峰高度也随之降低。

由于尖峰的断裂和墩粗,使板料背面的微尖峰的高度大幅度降低,在宏观上就表现为表面粗糙度显著降低。

3 结 论

激光冲击成形时,一方面由于应力波在板料背面的微尖峰中传播时,反射拉伸波的强度超过材料的抗拉强度极限时将引起微尖峰的断裂,使尖峰高度降低;另一方面由于板料的高速运动在板料背面的空气中形成高压区,当作用在板料表面的空气压力大于动态屈服强度时,微尖峰发生塑性变形。板料背面的微尖峰因断裂和塑性变形而降低了高度,在宏观上表现微表面粗糙度降低。

参 考 文 献

- [1] GELGER M, MERKLEN M, PITZ M. Laser and forming technology—an idea and the way of implementation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(3): 3~ 11.
- [2] ZHOU J Zh, YANG J Ch, ZHANG Y K *et al*. A study on super speed forming of metal sheet by laser shock waves [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1): 241~ 244.
- [3] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M *et al*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. Chinese Journal of Laser, 2005, 32(1): 135~ 138 (in Chinese).
- [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] JIN Ch, YIN SM, CAI W Q *et al*. Research on the method of creation of shocked trace during laser shock [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 142~ 144 (in Chinese).
- [6] MONTROSS C S, TAO W, LIN Y *et al*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys—a review [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10): 1021~ 1036.
- [7] YAK METS J, RICHARD C, BERANGER G. Laser peening processing effect on mechanical and tribological properties of rolling steel 100Cr6 [J]. Wear, 2004, 256(3): 311~ 320.
- [8] MA X Q. Shock dynamics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992. 62~ 70 (in Chinese).
- [9] WANG L L. The foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. 47~ 50 (in Chinese).
- [10] LIU X. One-dimensional non-steady flow and shock waves [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. 118 (in Chinese).