

文章编号: 1001-3806(2013)02-0270-04

激光冲击波作用下 3003H16 铝合金板料层裂的研究

黄利伟 龙 昆 黄 宇 郭海平 丰 琅 周 俊 马睿佳
(江苏大学 机械工程学院 镇江 212013)

摘要: 为了得到工艺参量对层裂的影响,运用有限元模拟的方法,采用最大拉应力瞬时断裂准则来判断板料是否发生层裂,并对各参量对层裂的影响进行了分析;进行了激光冲击成形试验,用电子扫描显微镜对冲击后的试样进行观察,并运用应力波传播分析了层裂的产生、发展、形成。结果表明,层裂易发生在激光冲击区域内,其次是在光斑边缘处,而在冲击区域外不可能发生层裂;脉冲宽度、峰值压力和板料厚度对层裂发生的位置影响较大,而光斑直径对层裂发生的位置几乎没有影响。这对激光冲击成形的发展具有指导意义。

关键词: 激光技术;层裂;有限元;激光冲击波;3003H16 铝合金

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.032

Research of spalling on 3003H16 aluminium alloy sheet under laser shock wave

HUANG Li-wei, LONG Kun, HUANG Yu, GUO Hai-ping, FENG Lang, ZHON Jun, MA Rui-jia
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to understand the influence of the technological parameters on spalling, it was analyzed by means of the finite element simulation. The maximum tensile stress instantaneous fracture criterion was used to check spalling happened or not. Then, the experiment of laser shock forming was carried out. The shocked samples were surveyed with a scanning electron microscope. The emerging, developing and forming of the spalling were analyzed. The results show that the spalling is susceptible to the shock region, and then the spot edge. Spalling will never happen outside the shock region. The influence of pulse width, peak pressure and sheet thickness affect the position of spalling significantly. However, the spot diameter affects it little. These have guiding significance to the development of the laser shock forming.

Key words: laser technique; spalling; finite element; laser shock wave; 3003H16 aluminium alloy

引 言

金属板料激光冲击成形是将高功率密度(10^9 W/cm^2 级)、短脉冲(10^{-9} s 级)的强激光作用在覆盖于金属板材表面的能量转换体上,能量转换体因吸收能量而气化,产生的蒸气急剧吸收激光能量形成等离子体而爆炸,爆炸时形成动量脉冲,并产生向金属成形方向的应力波,板料在应力波的作用下产生塑性变形^[1]。

激光冲击成形技术是在激光冲击强化的基础上发展起来的。1972年, YORK 等人^[2]对铝板进行激光冲击成形研究,自此,基于激光冲击强化基础上的激光冲击成形的研究拉开序幕。1998年,美国的 WILLIAM 等人^[3]在对激光冲击过程进行数值模拟时发现,金属板料在激光脉冲的作用下,形成的等离子体冲击波压力超过板料的动态屈服强度时板料会发生弹塑性变

形。2002年,美国加利福尼亚大学的 Lawrence Livermore 国家实验室 HACKEL 等人^[4]应用激光冲击工件,在工件表面形成残余压应力层,利用残余应力释放而使金属板料弯曲成形。同年4月,美国通用电气公司的 UNTERNAHRER 等人^[5]在申请的专利中也提到了激光冲击成形的理念,并特别强调,进行成形时,对一些工艺参量如激光能量、激光脉冲功率密度以及脉宽的控制非常重要。2003年, THORD 等人^[6]对激光冲击过程中的温度、冲击波压力以及残余应力进行了研究,并指出当冲击波的压力超过板料的动态屈服强度时,板料会发生塑性变形。2005年, FAN 等人^[7]研究了冲击波速率在材料塑性变形阶段受等效塑性应变影响,在激光冲击过程中所产生的冲击波的衰减速率与载荷状态有关,模拟结果可用来进一步地分析冲击波与材料的相互作用,包括冲击波的衰减和冲击波速率改变,以更好地指导激光冲击成形技术的研究^[7-8]。2006年, CHENG 等人的研究指出,激光冲击成形中金属板料的成形极限比准静态成形时高很多,从惯性效应、晶粒尺寸、随应变率改变的材料的本构行为相关的

作者简介: 黄利伟(1987-),男,硕士研究生,主要从事激光冲击强化及成形方面的研究。

E-mail: liwei Huangqq@126.com

收稿日期: 2012-05-28; 收到修改稿日期: 2012-07-16

微成形性 3 个方面进行分析,并且预测了激光微冲击成形技术将成为适用于多种材料的重要成形技术^[9]。中国科学技术大学高强度激光研究所通过对激光冲击过程中约束层和吸收层的作用进行试验研究发现,约束层声阻抗高时冲击波的脉宽为激光束脉宽的 2 倍~3 倍,符合通常模型中的假设^[8,10]。JIANG 等人采用模拟与实验相结合的方法,研究了能量、功率密度、光斑模型等参量对板料成形性能的影响^[11-13],采用厚度减薄梯度准则和考察层裂现象相结合的分析方法,在失稳理论的基础上,初步建立了激光冲击波成形的破裂准则^[14]。

经过半个世纪的发展,激光成形技术的研究已经取得了很大的成果,但仍然存在很多问题亟待解决,如板料激光冲击作用下的成形性能、损伤理论、破裂等,在激光冲击作用下板料极易发生破裂,严重影响板料激光冲击成形性能。

1 板料激光冲击成形层裂准则

激光冲击板料时,板料非冲击面会有裂片带着一部分动量与板料主体分离剥落,这种现象叫做层裂。在进行模拟时需要判断板料发生层裂的时间,即层裂准则。

最早提出的动态断裂准则是最大拉应力瞬时断裂准则^[15]。按照这一准则,一旦拉应力 σ 达到或超过材料的抗拉临界值 σ_c ,亦即:

$$\sigma \geq \sigma_c \quad (1)$$

则立刻发生层裂。 σ_c 是表征材料抵抗动态拉伸断裂性能的常数,称为动态断裂强度。本文中选取 3003H16 铝合金的最大静态抗拉强度来近似代替材料的抗拉临界值 σ_c 。而 3003H16 铝合金的静态抗拉强度范围为 170MPa~210MPa,在模拟中,一旦某一时刻板料中拉应力达到 210MPa,即认为板料发生层裂。

2 工艺参量对层裂的影响

2.1 脉冲宽度对层裂的影响

分别选择 10ns, 23ns, 33ns 和 50ns 共 4 个脉冲宽度进行模拟,其对应的冲击波持续时间约为 70ns, 100ns, 150ns 和 300ns,板料是厚为 0.3mm (40mm × 40mm) 的 3003H16 铝合金方板,峰值压力 3.5GPa,光斑直径 8mm。

图 1 是不同脉冲宽度下层裂时刻板料在冲击中心处沿冲击方向路径上的应力分布,从图中可以看出不同脉冲宽度下层裂时刻的拉应力及层裂发生的位置(超过 210MPa 即是层裂的位置)。层裂基本上发生在板料的自由面附近,只不过随着脉冲宽度的增大,层裂处距自由面渐远。

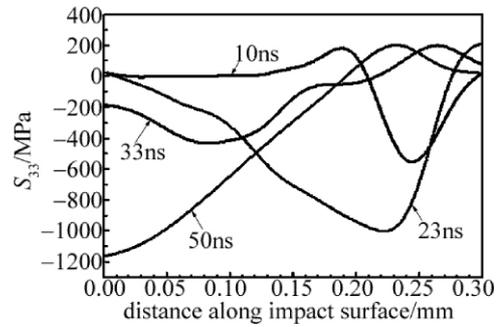


Fig. 1 Distribution of stress in the shock path for different pulse widths

2.2 峰值压力对层裂的影响

模拟中分别取 1GPa, 2GPa, 3.5GPa 和 5GPa 4 个峰值压力来考察峰值压力对层裂的影响,脉冲宽度为 23ns,板料是厚为 0.3mm (40mm × 40mm) 的 3003H16 铝合金方板,光斑直径为 8mm。

表 1 是不同峰值压力下板料发生层裂的时间、层裂处距冲击面的距离及层裂处的拉应力 S_{33} 随着峰值压力的变化,板料发生层裂的时间及层裂处距冲击面的距离均在变化;当峰值压力从 2GPa → 3.5GPa → 5GPa 变化时,层裂发生的时间延迟,而当峰值压力为 1GPa 时,层裂发生的时间较 2GPa 和 3GPa 时晚;当峰值压力从 1GPa → 2GPa → 3.5GPa 变化时,层裂发生的位置距冲击面渐远,则距自由面就渐近,尤其是峰值压力为 3.5GPa 时,层裂几乎发生在板料自由面上,而当峰值压力为 5GPa 时,板料层裂处距冲击面的距离比 2GPa 时还远,所以说,峰值压力对层裂的影响比较复杂。图 2 是不同峰值压力下层裂时刻板料在中心处沿冲击方向路径上的应力分布,从图中可以看出,不同峰值压力下层裂时刻的拉应力及层裂发生的位置,层裂基本上发生在板料自由面附近。

Table 1 Spallation time, distance from spallation place to impact surface and tensile stress in spallation place of sheet metal for different peak pressures

peak pressure /GPa	spalling time /ns	distance of spalling to shocked surface/mm	S_{33} /MPa
1	73.5	0.267917	220.32
2	72.5	0.282710	218.68
3.5	73	0.297478	214.08
5	74.5	0.281465	268.52

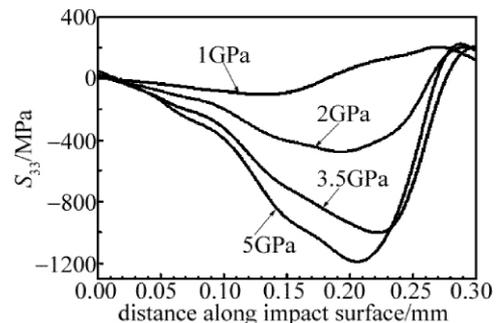


Fig. 2 Distribution of stress in the shock path for different peak pressures

2.3 光斑直径对层裂的影响

分别选择 6mm、8mm、10mm 和 12mm 4 个光斑直径进行模拟,板料是厚为 0.3mm (40mm × 40mm) 的 3003H16 铝合金方板,峰值压力为 3.5GPa,脉冲宽度为 23ns。

表 2 是不同光斑直径下板料发生层裂的时间、层裂处距冲击面的距离及层裂处的拉应力,无论光斑直径怎样变化,板料发生层裂的时间一样(均为 73ns),同时发生层裂的位置也基本上一样;由此可知,光斑直径对层裂的发生时间及位置基本上没有影响。分析认为,当其它参量均没变化时,只改变光斑直径,变化的只是激光加载区域,因此,对层裂发生的时间及层裂在厚度方向上发生的位置没有影响;层裂发生的区域随着激光加载区域的变化而变化,当光斑直径变大时,激光加载区域就变大,则发生层裂的区域就变大、变多,一旦这些层裂处连接起来,就会形成一个或多个连续的断裂面,这些断裂面穿过整个材料剖面,使板料产生断裂破坏,当层裂区域变大时,就会加快材料的断裂破坏,因此,为了提高板料的成形性能,降低由层裂导致的破坏,光斑直径不宜过大。图 3 是层裂时刻不同光斑直径下,板料在中心处沿冲击方向路径上的应力分布,从图中可以看出,不同光斑直径下应力分布曲线基本上重合,层裂时刻的层裂发生的位置在板料自由面附近。

Table 2 Spallation time, distance from spallation place to impact surface and tensile stress in spallation place of sheet metal for different spot diameters

spot diameters /mm	spalling time /ns	distance of spalling to shocked surface /mm	S_{33} /MPa
6	73	0.297340	215.169
8	73	0.297478	214.082
10	73	0.297331	213.334
12	73	0.297324	213.838

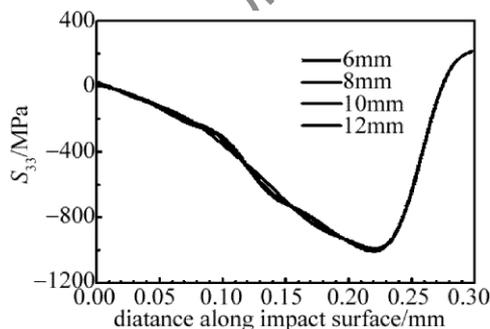


Fig. 3 Distribution of stress in the shock path for different spot diameters

2.4 板料厚度对层裂的影响

为考察板料厚度对层裂的影响,分别选择 0.3mm、0.6mm、0.9mm 和 1.2mm 厚的 40mm × 40mm 的 3003H16 铝合金方板进行模拟,模拟中脉冲宽度为 23ns,峰值压力为 3.5GPa,光斑直径为 8mm。

图 4 是层裂时刻不同板料厚度下,板料在中心处沿冲击方向路径上的应力分布,从图中可以直观地看出,不同板料厚度下,板料中最大拉应力(超过 210MPa)的位置就是层裂发生的位置,同时可以知道,层裂发生在自由面附近。

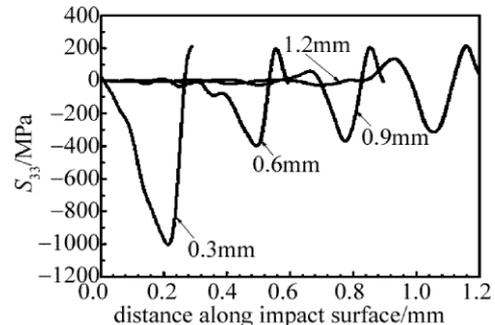


Fig. 4 Distribution of stress in the shock path for different sheet thicknesses

3 板料发生层裂的试验研究

试验中采用的 3003H16 铝合金试样的厚度为 0.3mm,直径为 40mm,激光器能量 12.2J,脉宽为 23ns,波长 1064nm,光斑直径 5mm。图 5 是试样冲击 1 次得到的实物。



Fig. 5 Physical specimen

激光冲击作用下,变形早期的微细裂纹特征是很难观测到的,但对破裂后的裂口可以进行观测分析。图 6 为试样冲击区板料背面发生层裂时的扫描电子显微镜的形貌图和局部放大图,从图中可以明显地看到,试样冲击区板料背面有一层剥落,同时可以看到,断口拉伸时留下来的坡面,从裂口坡面可以明显看出板料 1 区域、2 区域的层级变化,此种现象即为层裂现象,分析认为,这主要是由于激光与板料相互作用时,被强脉冲激光辐照而附着在板料表面的铝箔上产生的等离子体,由于受到约束层(流水)的限制,产生瞬时高压;施于冲击面一冲击压力,向板料内传播一个压缩加载波,随着激光的持续辐照,陆续传入板料内的压缩波会形成一个阵面陡峭的激波;在激光与板料相互作用的后期,由于激光功率密度的下降,板料表面等离子体的压力降低,会向板料内传播一系列稀疏波,由于稀疏波在板料中的传播速度大于压缩波在板料中的传播速度,

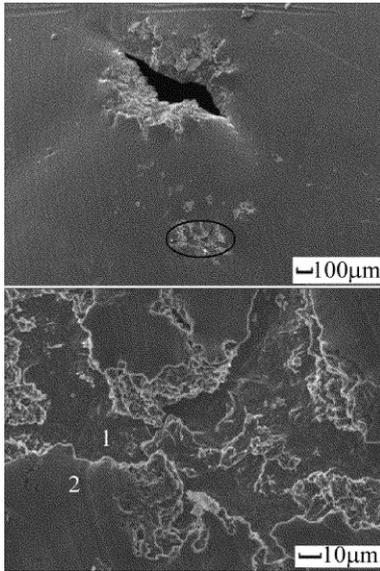


Fig. 6 Scanning electron microscope morphology and partial enlarged drawing of sheet back after laser shock

经过一段时间后,稀疏波追赶上前面的激波,二者相互叠加,从而使激波波阵面的压力降低,其剖面大致呈三角形,即所谓三角形剖面激波。当该激波传播到板料自由面时发生反射,此时压缩波转换为拉伸波,自由表面处的应力为 0,质点速度加倍;当拉伸波的波头与入射压缩波的波尾相遇时,拉应力达到最大值^[16]。当拉伸波的最大拉应力大于材料的极限抗拉强度时,板料则会发生层裂。

4 结 论

通过有限元模拟得到:层裂易发生在激光冲击区域自由面附近,其次是在光斑边缘处,而在冲击区域外不可能发生层裂;脉冲宽度、峰值压力和板料厚度对层裂发生的位置影响较大,而光斑直径对层裂发生的位置几乎没有影响。在相同脉冲宽度下,板料越厚,板料越难发生层裂;在相同板料厚度下,脉冲宽度越小,板料越难发生层裂;为了避免层裂,在进行激光冲击成形时,应使板料厚度尽量厚一些,脉冲宽度尽量小一些。对冲击后的试样进行观测,可以看出发生层裂的位置以及层级变化,并对层裂的产生、发展和形成进行了分析,这对激光冲击成形的发展具有指导意义。

参 考 文 献

[1] ZHOU J Z, ZHANG Y K, YANG J C, *et al.* New technique on

- plastic forming of metal sheet by laser shock wave[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(22): 1938-1940 (in Chinese).
- [2] O'KEEFE J D, SKEEN C H, YORK C M. Laser-induced deformation modes in thin metal targets[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44(10): 4622-4626.
- [3] WILLIAM B, ROBERT B. Finite element simulation of laser shock peening[J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(7): 719-724.
- [4] HACKEL L, HARRIS F. Contour forming of metals by laser peening: US, WO01/05549A2[P]. 2002-06-25.
- [5] UNTERNAHRER J R, LOTSHAW W T, STAVAR P R. Shot-pulse high-peak laser shock peening: US 252620[P]. 2002-07-28.
- [6] THORD T S, KAHLEN F J, ARAVINDA K. Temperatures, pressures, stresses during laser shock processing[J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2003, 39(1): 51-71.
- [7] FAN Y, WANG Y, VUKELIC S, *et al.* Wave solid interactions in laser-shock-induced deformation processes[J]. *Journal of Applied Physics* 2005, 98(10): 1-11.
- [8] LIU X J. Experimental study for micro laser peen forming of 8011 aluminium alloy foil[D]. Jinan: Shandong University, 2009: 5-6 (in Chinese).
- [9] CHENG G J, DANIEL P. Characterizations on microscale laser dynamic forming of metal foil[C]//International Conference on Manufacturing Science and Engineering. Ypsilanti, USA: Manufacturing Engineering Division 2006: 8-11.
- [10] HONG X, WANG S B, GUO D H, *et al.* Confining medium and absorptive overlay: their effects on a laser-induced shock wave[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1998, 29(6): 447-455.
- [11] JIANG Y F, YING C S, LIU C R, *et al.* Effect of laser power density on laser shock formability of sheet metal[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(1): 95-98 (in Chinese).
- [12] TANG Z Z, JIANG Y F, LI Z F, *et al.* The effect of spot model on the formability of laser shock forming[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tool*, 2011(10): 101-104 (in Chinese).
- [13] YUAN G D, SHI D Q, JIANG Y F, *et al.* Study on residual stress distribution of laser shock forming metal-sheet[J]. *Laser Technology* 2010, 34(3): 303-305 (in Chinese).
- [14] JIANG Y F, SHI C Y, REN X D, *et al.* Investigation on fracture criterion of sheet-metal based on laser shock forming[C]//The 3rd International Conference on Rapid prototyping and Manufacturing and the 2nd International for Bio-manufacturing. Beijing: Manufacturing Engineering Division 2008: 39.
- [15] ZHAO Y T, LIN J W, SHI L. Research of spalling under impulse loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(2): 122-126 (in Chinese).
- [16] ZHANG X Q, ZHOU J Z, GU Y Y, *et al.* Experimental study on aluminum target dynamic damage under laser shock waves loading[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2006, 37(3): 122-125 (in Chinese).