

文章编号: 0258-7025(2010)08-2121-05

# 放大自发辐射对激光强化 7050 铝合金 残余应力的影响

管海兵 叶云霞 鲁金忠 张永康 钱晓明 吴忠

(江苏大学机械工程学院, 江苏, 镇江 212013)

**摘要** 利用高能高重复频率钕玻璃激光器对 7050 铝合金进行了冲击强化处理。研究了在激光介质抽运功率保持不变的情况下,通过改变放大自发辐射(ASE)的大小,激光冲击强化 7050 铝合金,并用 X 射线衍射技术测量 7050 铝合金表面产生的残余应力。结果表明,在保持激光介质抽运功率不变的情况下,ASE 和铝合金表面产生的残余应力有一定的关系。随着 ASE 的增大,铝合金表面产生的残余压应力逐渐减小;当 ASE 增大到 16.20 J 时,吸收层铝箔已经被完全熔融,有效脉冲直接冲击铝合金表面,在铝合金表面产生 21 MPa 的拉应力,直接影响激光冲击的强化效果。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;放大自发辐射;残余应力;7050 铝合金

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.2121

## Effect of Amplified Spontaneous Emission on Residual Stress of 7050 Aluminum Alloy by Laser Shock Processing

Guan Haibing Ye Yunxia Lu Jinzhong Zhang Yongkang Qian Xiaoming Wu Zhong

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

**Abstract** The 7050 aluminum alloy is processed by laser shock processing (LSP) with high energy high repetition rate Nd:glass laser. After LSP with the unchanged pump power and different amplified spontaneous emissions (ASE), the surface residual stress of 7050 aluminum alloy is measured by using X-ray diffraction (XRD) technology. Results show that there is a certain relationship between ASE and the surface residual stress of aluminum alloy after LSP with unchanged pump power. With the increase of ASE, the compressive residual stress of the sample surface gradually decreases. When ASE increases to 16.20 J, the absorbing layer (aluminum foil) has been completely molten, and the effective pulse directly impactes aluminum surface and generates 21 MPa tensile residual stress which directly affects the effect of LSP on 7050 aluminum alloy.

**Key words** laser technique; laser shock processing; amplified spontaneous emission; residual stress; 7050 aluminum alloy

### 1 引 言

自 1960 年梅曼发明了红宝石固体激光器以来,固体激光器已经广泛应用于国防、民用、商业等方面。1972 年,美国巴特学院(B. P. Fairand)等首次用固体激光器激发的高功率脉冲激光诱导的冲击波来改变 7075 铝合金的显微结构组织以提高其机械性能,从此固体激光诱导的冲击波成为改善金属性能的一种重要的技术。当短脉冲(几十纳秒内)的高峰值功率密度的激光辐射金属表面时,金属表

面吸收激光能量发生爆炸性气化蒸发,产生高压(吉帕)等离子体,该等离子体受到约束层的约束爆炸时产生高压冲击波,作用于金属表面并向内部传播。在材料表层形成密集、稳定的位错结构的同时,使材料表层产生应变硬化,残留很大的压应力,显著地提高材料的抗疲劳和抗应力腐蚀等性能<sup>[1~4]</sup>。

国内外学者从理论和实验上深入研究了金属表面经过激光冲击强化后表面的残余压应力。C. Rubio-Gonza'lez 等<sup>[5~7]</sup>研究了激光功率密度、激光冲

收稿日期: 2009-11-16; 收到修改稿日期: 2009-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(50735001,50705038)资助课题。

作者简介: 管海兵(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光加工、激光器件等方面的研究。E-mail: ghb\_2007@163.com

导师简介: 张永康(1963—),男,博士,教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

击光斑耦合率对金属表面残余应力的影响, Y. X. Hu 等<sup>[8~12]</sup>用有限元分析、数值仿真等方法预测激光冲击后金属表面的残余压应力。

在激光冲击强化过程中,强调的是纳秒级的短脉冲激光作用在材料表面,然而在固体激光器输出短脉冲激光过程中,放大自发辐射(ASE)的存在是不可避免的<sup>[13~15]</sup>, ASE 的存在影响了调 Q 激光器的脉冲能量和脉冲宽度,从而影响了激光输出的功率密度,影响了激光冲击强化效果;而且 ASE 的波长为微米量级,吸收层铝箔吸收 ASE 后主要表现为热效应,对金属强化效果不利。目前很少有文献对激光器中 ASE 对激光冲击金属后表面的残余应力影响进行研究。本文主要研究激光冲击强化过程中含有 ASE 的激光总能量对 7050 铝合金强化后表面

残余应力的影响,研究结果对激光冲击强化过程中控制 ASE 的大小有一定的参考作用。

## 2 试验方案

### 2.1 试验装置

试验是在激光冲击强化设备高能钕玻璃激光器上进行的。激光输出波长为  $1.054 \mu\text{m}$ , 调 Q 脉宽 23 ns, ASE 的脉宽为  $1 \mu\text{s}$ , 以  $\phi 8 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的磷酸盐 Nd 玻璃棒作为振荡级激光棒, 一级磷酸盐 Nd 玻璃激光预放大级 ( $\phi 14 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ), 四级磷酸盐 Nd 玻璃激光主放大级 (分为 2 路, 每路由  $\phi 16 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$  及  $\phi 20 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$  2 根 Nd 玻璃棒串联) 最后通过 2 m 的聚焦透镜聚焦在铝箔表面上, 其聚焦光斑直径为 6 mm, 如图 1, 2 所示。

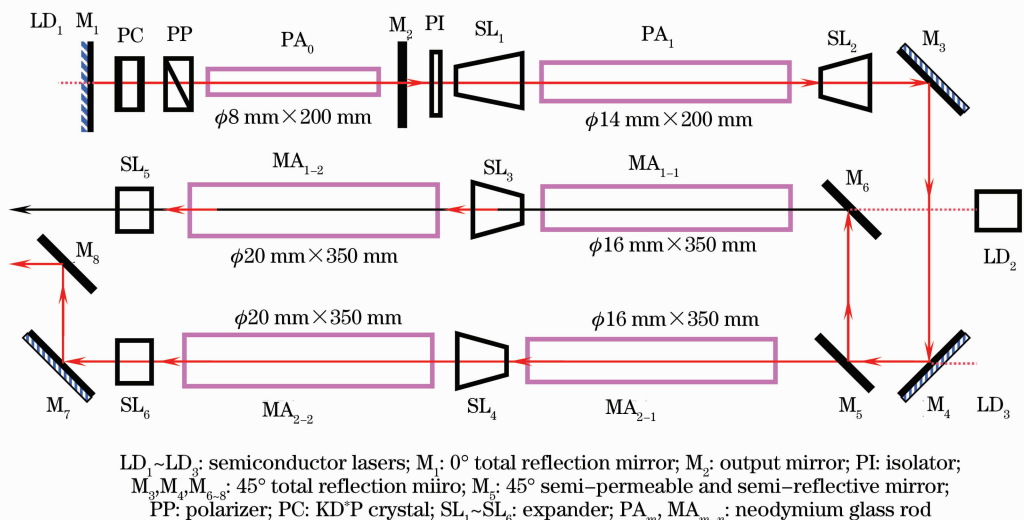


图 1  $3 \times 2$  组合式激光器系统总体光路布置图

Fig. 1 Overall optical layout of  $3 \times 2$  combined laser system

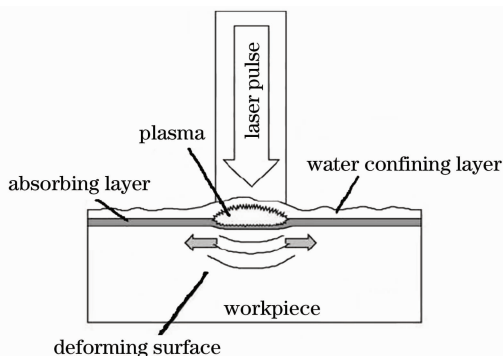


图 2 激光冲击强化示意图

Fig. 2 Sketch of laser shock processing

### 2.2 试验方法

试验过程中保持抽运功率不变,通过微调 KD\*P 晶体的半波电压来改变光通过晶体时的  $x'$ ,

$y'$  轴,从而使得相位延迟发生变化,起到了改变 ASE 的效果。首先用 PT-1C 型激光能量计测出 ASE 的能量,测出 7 组不同大小 ASE 的能量和相应的总能量。在测量 ASE 时,激光能量计调为 2 J 或者 20 J 档,测量精度为 0.001 J 和 0.01 J,测总的输出能量时激光能量计调为 200 J 档,测量精度为 0.1 J。然后分别用已经测出的激光总能量冲击 7050 铝合金,其厚度为 3 mm;厚度为 0.1 mm 的铝箔作为吸收层;约束层水的厚度为 2 mm。

### 2.3 样品制作

用线切割法将试样加工成尺寸为  $15 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的小块,表面用 100~800 # SiC 砂纸逐级打磨,再进行抛光处理,然后用乙醇清洗、风干,试样化学成分如表 1 所示。

表 1 7050 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 7050 aluminum alloy

Composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Mass fraction /%	0.12	0.15	2.0~2.6	0.1	1.9~2.6	5.7~6.7

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 试验结果

将振荡级和放大级的电容充电电压保持不变，

表 2 放大自发辐射对应的残余应力

Table 2 Corresponding residual stress with amplified spontaneous emission

ASE /J	0.015	0.919	3.01	6.10	10.03	13.47	16.20
Pulse energy /J	33.755	32.851	30.76	27.67	23.74	20.30	17.57
Residual stress /MPa	-110	-97	-74	-51	-30	-7	21

#### 3.2 分析和讨论

在调 Q 高能钕玻璃固体激光器中,当调 Q 运转时,Q 开关关闭期间,由于反转粒子数的累积,腔内会建立起很高的增益,致使自发辐射被放大,增益介质内的反转粒子数大量被消耗,抵消了抽运的作用,使抽运效率下降,从而使激光器的整体效率降低<sup>[15]</sup>。调 Q 相对于振荡级和放大级的延时时间设为 230 μs,因此,ASE 较有效脉冲提前 230 μs 之内输出,作用在铝箔表面上,接着有效脉冲输出。ASE 通过放大级时消耗了大量的亚稳态粒子数,降低了能级间的粒子反转数,导致了放大级的储能效率下降,单元放大级储能密度因 ASE 导致的损耗<sup>[14]</sup>为

$$\delta_E(x, y, \rho) = E_{\text{ASE}}(x, y, \rho) \times \{1 - \exp[E_s(x, y, \rho)z/(\Delta\nu I_s)]\}, \quad (1)$$

式中  $E_{\text{ASE}}$  为自发辐射能量,  $E_s$  是体积元  $\Delta\nu$  内的储能,  $z$  为光线经过体积单元的路径,  $I_s$  为激光增益介质的饱和通量。根据(1)式可知 ASE 降低了放大级的储能密度,因此当有效脉冲通过放大级时,所产生的增益下降,脉冲能量就下降<sup>[15]</sup>。因此在保持抽运功率不变的条件下增大 ASE,直接导致了有效脉冲能量的下降,同时根据文献[15]中所述的,ASE 的增大也增大了有效脉冲的宽度。激光功率密度  $I$  和激光冲击波产生的压力  $P$ <sup>[1]</sup> 分别为

$$I = \frac{E}{(\pi d^2/4)\tau}, \quad (2)$$

$$P = BI^{1/2}, \quad (3)$$

式中  $E$  是激光能量,  $d$  是光斑直径,  $\tau$  是激光脉冲宽度,  $B$  对于水约束层等于 10.1, 从(2)式和(3)式中可知,ASE 的增加导致的有效脉冲能量的降低和激

即保持抽运功率不变,充电电压分别设为 1620, 1850, 1850, 1900, 1850 和 1900 V,使得激光输出总能量保持不变,为 33.77 J。通过改变调 Q 晶体的半波电压来改变 ASE 的大小,用含有 ASE 的激光总能量冲击 7050 铝合金,相应产生不同的残余应力。残余应力是用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测量的,实验结果如表 2 所示。

光脉冲宽度的增加,直接使得激光冲击波产生的压力降低。在激光冲击强化中,当有效脉冲功率密度小于介质击穿功率密度时,随着激光冲击波产生的压力的增加,材料表面产生的残余压应力也随着增加。残余压应力  $\sigma_y$  和激光冲击波产生的压力  $P$  的关系<sup>[16]</sup>为

$$\sigma_y = \frac{1-\nu}{\nu} P \exp(-bx), \quad (4)$$

式中  $\nu$  为位错运动平均速度,  $b$  为位错柏氏矢量,  $x$  为位错运动平均距离。

激光冲击波产生的压力的增加使得相应的残余压应力也随着增加。而随着 ASE 的增加,导致有效激光脉冲能量降低和有效脉冲的脉宽增加,使得激光功率密度下降,最终使得激光冲击波产生的压力降低,因此由(4)式可知,激光冲击波产生的压力降低导致了相应的残余压应力也降低。

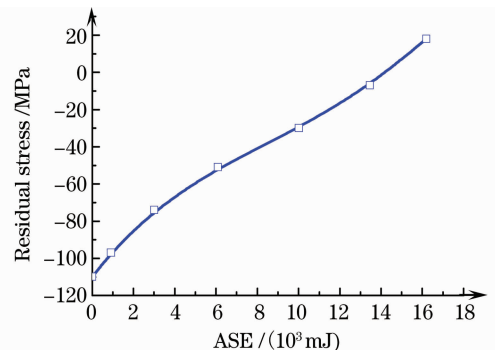


图 3 放大自发辐射对应的残余应力

Fig. 3 Corresponding residual stress with ASE

因此,如表 1 和图 3 所示,ASE 的增加,导致了相应的有效脉冲能量减小,且有效脉冲的脉冲宽度增大,

使得激光功率密度下降,间接降低了激光冲击波产生的残余压应力,最终导致产生的残余压应力减小。当残余应力为正时,表现为残余拉应力。

由于 ASE 的脉冲宽度为微秒量级,铝箔吸收 ASE 后主要表现为热效应,当 ASE 足够大时,使得厚为 0.1 mm 的铝箔被融化,有效脉冲直接聚焦在铝合金表面,相当于铝合金表面没有涂层,有效脉冲直接作用于其表面的模式。在这种模式下,有效脉冲就会融化和气化铝合金表面材料,铝合金表面就会被破坏,降低了其抗疲劳和抗应力腐蚀等性能<sup>[17]</sup>。图 4 显示了激光冲击时铝箔的破坏情况,其中图 4(a)~(d)分别是 ASE 能量为 0.015, 3.01, 10.03 和 16.20 J 时铝箔被破坏的图片,从图 4(a), (b)中可以看出,ASE 能量比较小时,对铝箔的熔融程度比较小,铝箔的破坏主要是有效脉冲气化掉一

部分铝箔材料;而 4(c), (d)则清楚地显示了铝箔表面被 ASE 熔融的程度,尤其图 4(d)中的铝箔已经被完全熔融,有效脉冲直接冲击铝合金表面,即没有涂层的模式下激光冲击强化,有效脉冲诱导的压力幅值比有涂层时诱导的压力幅值小 1~2 倍<sup>[17]</sup>,明显降低了有效脉冲诱导铝合金表面产生的残余压应力;而且有效脉冲直接作用在铝合金表面,有效脉冲烧蚀和熔融材料导致材料表面损伤,在材料表层产生拉应力,结合图 3,当 ASE 能量为 16.20 J 时,表面产生了 21 MPa 的拉应力;有效脉冲直接作用铝合金表面产生的高热会使材料表面产生氧化层,增加了铝合金表面的粗糙度,降低了铝合金抗应力腐蚀和抗疲劳性能,影响了激光冲击强化的效果<sup>[18,19]</sup>。

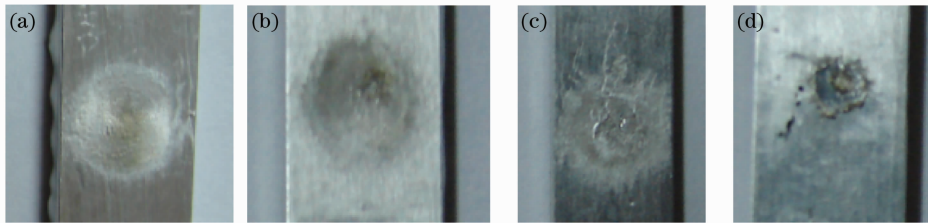


图 4 铝箔表面的破坏

Fig. 4 Destruction of the surface of aluminum foil

因此,在保持抽运功率不变的情况下,必须控制 ASE 的大小,使得铝箔被 ASE 熔融深度和有效脉冲气化深度之和小于铝箔的厚度,这样有效脉冲才不会直接冲击靶材表面,影响靶材的机械性能。

## 4 结 论

采用钕玻璃调 Q 激光器对 7050 铝合金进行激光冲击强化试验,在抽运功率保持不变的情况下,通过改变 ASE 的大小来研究其对激光冲击强化 7050 铝合金残余应力的影响。在激光抽运功率不变化的情况下,随着 ASE 的增加,7050 铝合金表面产生的残余压应力逐渐减小,当 ASE 增大到 16.20 J 时,铝箔已经被完全熔融,有效脉冲能量直接作用在铝合金表面,产生的高热烧蚀和熔融铝合金表面,产生了 21 MPa 的拉应力,而且增加了表面粗糙度,降低了铝合金抗疲劳和抗应力腐蚀等性能。调 Q 激光器输出能量中 ASE 所占比例越低,材料表层产生的残余压应力越大,冲击强化的效果越好。

## 参 考 文 献

1 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the

- physics and applications[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1995, **27**(12): 1213~1229
- 2 Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *Int. J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 3 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~784
- 4 A. King, A. Steuwer, C. Woodward *et al.*. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, **435-436**: 12~18
- 5 C. Rubio-Gonzalez, G. Gomez-Rosas, J. L. Ocan *et al.*. Effect of an absorbent overlay on the residual stress field induced by laser shock processing on aluminum samples[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2006, **252**(18): 6201~6205
- 6 J. L. Ocan, C. Molpeceres, J. A. Porro *et al.*. Experimental assessment of the influence of irradiation parameters on surface deformation and residual stresses in lasershock processed metallic alloys[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2004, **238**(1-4): 501~505
- 7 Jon E. Rankin, Michael R. Hill, Lloyd A. Hackel. The effects of process variations on residual stress in laser peened 7049 T73 aluminum alloy [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, **349**(1-2): 279~291
- 8 Y. X. Hu, Z. Q. Yao. FEM simulation of residual stresses induced by laser shock with overlapping laser spots[J]. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, 2007, **21**(2): 125~132
- 9 William Braisted, Robert Brockman. Finite element simulation of laser shock peening[J]. *Int. J. Fatigue*, 1999, **21**(7): 719~724
- 10 Abul Fazal M. Arif. Numerical prediction of plastic deformation and residual stresses induced by laser shock processing[J]. *J.*

- Mater. Process. Technol.*, 2003, **136**(1-3): 120~138
- 11 Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1068~1072  
张永康, 陈菊芳, 许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1068~1072
- 12 Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 316~320  
曹子文, 邹世坤, 刘方军等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 316~320
- 13 Feng Guoying, Lü Baida. Amplified spontaneous emission in multisegment amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(6): 489~494  
冯国英, 吕百达. 多段阵列式钽玻璃放大器中放大自发辐射问题的研究[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(6): 489~494
- 14 He Shaobo, Yu Haiwu, Zheng Wanguo *et al.*. Research of amplified spontaneous emission in high power slab laser amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(5): 603~606  
贺少勃, 於海武, 郑万国等. 高功率激光片状放大器中自发辐射放大研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(5): 603~606
- 15 Wang Chunyu, Lu Yutian, Zhu Xiaolei. Effect of amplified spontaneous emission on performance of all solid state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 433~437  
王春雨, 陆雨田, 朱小磊. 放大自发辐射对全固态激光器调 Q 性能的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 433~437
- 16 Zhang Yongkang, Dai Ximin, Cai Lan. Mathematical models of mechanics effect for laser shock processing[J]. *Applied Laser*, 1999, **19**(3): 129~132  
张永康, 戴希敏, 蔡兰. 激光冲击强化力学效应的数学模型[J]. *应用激光*, 1999, **19**(3): 129~132
- 17 T. J. Magee, R. A. Armistead, P. Krehlt. Laser-induced stresses in coated and uncoated targets[J]. *Appl. Phys.*, 1975, **8**(5): 498~504
- 18 Thord Thorslund, Franz-Josef Kahlen, Aravinda Kar. Temperatures, pressures and stresses during laser shockprocessing[J]. *Opt. Lasers in Eng.*, 2003, **39**(1): 51~71
- 19 Patrice Peyre, C. Carboni, P. Forget *et al.*. Influence of thermal and mechanical surface modifications induced by laser shock processing on the initiation of corrosion pits in 316L stainless steel[J]. *J. Mater. Sci.*, 2007, **42**(16): 6866~6877