

激光冲击处理提高铝合金性能的研究*

邹鸿承 戴蜀娟 徐明英 张洪生 刘 晔**

(华中理工大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

提要 研究了高功率密度激光冲击处理对 Ly12CZ 铝合金力学性能的影响, 研究结果表明激光冲击处理可大幅度提高铝合金的疲劳寿命, 疲劳寿命的提高是由于微观组织中位错密度的明显增加, 使得材料表层的强度和硬度也明显增加所致。

关键词 激光冲击处理, 疲劳, Ly12CZ 铝合金, 位错密度, 钉合法

1 引 言

激光冲击处理(Laser Shock Processing, 简称 LSP)是一种正待开发的极有前途的材料表面改性技术, 它利用高功率密度的激光束($10^8 \sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$)在极短的脉冲持续时间内($10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ s}$)冲击金属材料的表面, 使金属表面一薄层产生爆炸性气化, 产生动量脉冲, 形成巨大的压应力波(可达 10 GPa), 从而使被冲击材料的表层及内部的组织结构、应力状态发生很大变化, 使材料的强度及硬度明显提高^[1~6]。国外的研究表明 LSP 能提高金属材料的强度、硬度和疲劳寿命。对铝合金产生的效果更为显著, 如对 2024-T351 铝合金可提高其疲劳寿命 2~40 倍, 对 7075-T6 铝合金可提高其微振磨损疲劳寿命 30~100 倍^[1]。国内由于满足这种条件的大功率固体激光器极少, 限制了我国科技工作者对 LSP 技术的研究应用。为了克服这一问题, 我们拟采用小功率的固体脉冲式激光器, 进行多点钉合冲击法, 该方法的特点就是在较大面积范围内, 采用小光斑直径的激光束, 多次均匀分布地冲击试样, 就好象在需要强化的材料部位用许多钉子(激光冲击点)局部强化一样。本文研究这种处理对材料性能的影响。由于这种钉合处理只需较小功率的激光器, 因此它将具有更大的工程应用价值。

2 试验过程

2.1 试验材料及方法

试样化学成分(wt-%)为 Mg 1.54, Mn 0.58, Cu 4.61, Fe 0.29, Si 0.26, Zn 0.1, Ni < 0.024,

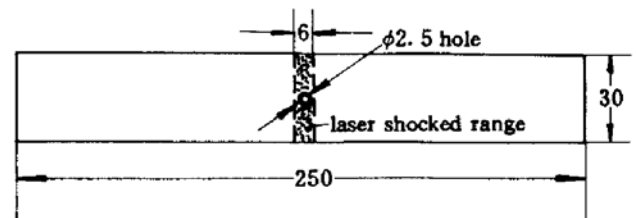


Fig. 1 Geometry and size of test specimens (mm)

* 本研究得到湖北省自然科学基金及华中理工大学激光技术国家重点实验室资助。

** 中国科学院上海光机所。

收稿日期: 1994 年 7 月 21 日; 收到修改稿日期: 1994 年 10 月 21 日

余者为 Al, 试件由 Ly12CZ 铝合金板材制成, 其几何形状及尺寸如图 1 所示。板材厚度为 2 mm 及 1.1 mm 两种, 热处理为常规固溶处理 + 自然时效, 处理后常规机械性能为屈服强度 $\sigma_{0.2} = 374 \text{ MPa}$, 强度极限 $\sigma_b = 488 \text{ MPa}$, 试样加工及试验路线为: 轧制板材剪板至外形尺寸 → 表面磷化处理 → 激光钉合冲击 → 钻 $\phi 2.5 \text{ mm}$ 中心孔 → 疲劳试验。

2.2 试样的激光冲击处理

本试验选用小功率钇铝石榴石固体激光器进行多点钉合冲击, 其设备及冲击原理如图 2 所示。试验参数为激光波长 $1.06 \mu\text{m}$, 光斑直径即冲击点大小为 $\phi 1 \text{ mm}$, 冲击能量为 193 mJ, 脉宽为 5 ns, 脉冲重复频率为 1 Hz, 该激光系统由上海光机所自行研制, 整个装置尺寸约为 $0.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$, 在试样冲击带区内冲击处理 150 次左右, 冲击处理一面后再冲击另外一面, 人工控制冲击点位置。

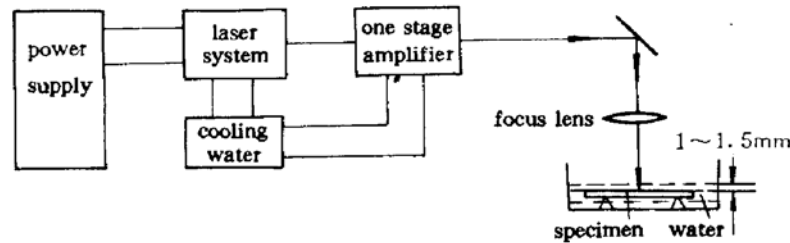


Fig. 2 Scheme of the laser shock processing setup

该设备输出的能量通过 PT-1 型平面体吸收激光能量卡计测得其输出能量为 193 mJ, 该激光脉冲持续时间是通过设备的调 Q 开关控制为 $5 \times 10^{-9} \text{ s}$, 则在光斑直径为 1 mm 条件下可得到本试验冲击处理的功率密度为 $4.9 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$, 试样在水中距水面约 1~1.5 mm 的距离, 水的作用是作为约束层, 使材料的表层受到激光冲击处理后产生气化而形成的巨大蒸气压力受到约束而冲击金属的表层及内部^[1]。

2.3 试件的疲劳试验

对两种厚度的试样, 分别进行成组对比试验, 疲劳试验在 10 T 程序控制高频疲劳试验机上进行, 试验参数为轴向加载, 最大应力 $\sigma_{\max} = 135.24 \text{ MPa}$, 平均应力 $\sigma_m = 73.4 \text{ MPa}$, 应力比 $\gamma = 0.085$, 试验频率 $f = 82 \sim 94 \text{ Hz}$, 室温。

3 试验结果

将两种不同厚度的试样分别进行成组对比试验, 即对激光冲击处理后的试样与未激光处理的试样进行同样试验条件下的疲劳试验, 试验结果见表 1, 表 2。

Table 1 Fatigue lifetimes of specimens of two millimetres thick

Specimen	Unshocked specimens						Shocked specimens					
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11	1-12
Fatigue lifetimes ($\times 10^5$)	22	22.9	14.8	21	19.5	20.1	30	21	80	36	25.6	70

Table 2 Fatigue lifetimes of specimens of 1.1 millimetres thick

Speciment	Unshocked specimens					Shocked specimens				
	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10
Fatigue lifetimes ($\times 10^5$)	21	28	24	16.7	18.2	29.9	35.4	45	41.3	42.8

对表 1, 表 2 中二组对比疲劳寿命数据进行数理统计处理^[7], 即分别进行 F 检验, t 检验及疲劳寿命区间估计, 对表 1 数据经过上述处理后, 在 95% 置信度下, 二组试样的中值疲劳寿命比为

$$1.105 < N_{50\text{冲击}}/N_{50\text{未冲击}} < 3.4$$

对表 2 数据同样处理后可得

$$1.365 < N_{50\text{冲击}}/N_{50\text{未冲击}} < 2.415$$

可见经激光冲击处理后的试样较未经激光冲击处理试样的疲劳寿命都有较大幅度的提高。

4 结果分析与讨论

4.1 硬度变化

由于激光冲击处理是利用高功率密度的激光束瞬间(纳秒级)冲击金属表面, 这样, 金属的表面有一极薄层被气化而形成金属蒸气, 在约束层的约束下, 该蒸气在金属的表层以巨大的压应力波冲击该金属表层, 从而使材料的硬度及强度、微观结构发生显著的变化, 由于本试验是利用小功率的脉冲激光装置, 每次冲击区域的大小只有 $\phi 1 \text{ mm}$ 大小, 在一个强度比较薄弱的区域多次冲击, 好象用多根钉子把这些区域钉合起来而增强抵抗破坏的能力。为研究冲击后的强硬化效果, 测定了试样冲击点的硬度值及未激光冲击区域的硬度值, 在载荷为 15 gf 时, 其硬度值之比为

$$H_{\text{LSP}}/H_{\text{未LSP}} = (93.3 \sim 117.64)/(18 \sim 23.4) = 5 \sim 5.2$$

即经 LSP 后试样表层的硬度可大幅度地提高, 且这种硬化层的深度可达 0.1~0.2 mm 左右, 这说明 LSP 可以局部地大幅度地提高材料的强度及硬度。

4.2 疲劳裂纹的形成及扩展

前面的试验结果已表明经 LSP 后的试样较未处理试样的疲劳寿命有显著的提高, 所有疲劳裂纹的形成都是在试样中心孔截面最小处, 试验过程中还可发现经 LSP 后的试样, 其裂纹形成周次明显推迟, 裂纹扩展速率也减慢, 在裂纹扩展前沿遇有冲击点时, 裂纹会绕过该冲击点后继续扩散。在疲劳裂纹形成及扩散的缺口处, 经 LSP 的试样往往会形成两条或更多的小裂纹非均匀一致地扩展, 如图 3 所示。显然在这样的条件下, 试样的疲劳破坏会消耗更多的能量, 也就是说要有更高的寿命, 而未经 LSP 的试样都只有一条主裂纹扩展至断裂。



Fig. 3 The effect of LSP on the formation and propagation of fatigue cracks of specimens of aluminum alloy ($\times 50$). Fatigue life was 36×10^4 cycles

4.3 断口分析

将两组对比试样的疲劳断口在 JEOL-100 CX I 型透射电镜的扫描附件 ASID 下进行观察,结果见图 4,由图可见经 LSP 试样的断口上疲劳辉纹间距小于未冲击处理试样,而辉纹间距又表征了一个应力循环周次下的裂纹扩展量,这也说明了经 LSP 的试样疲劳裂纹扩展速率较慢。由图还可见经 LSP 试样的辉纹线连续、均匀,显示出有较好的延性,而未经 LSP 的试样的疲劳辉纹则表现不够连续均匀,显示出有一定的脆性。

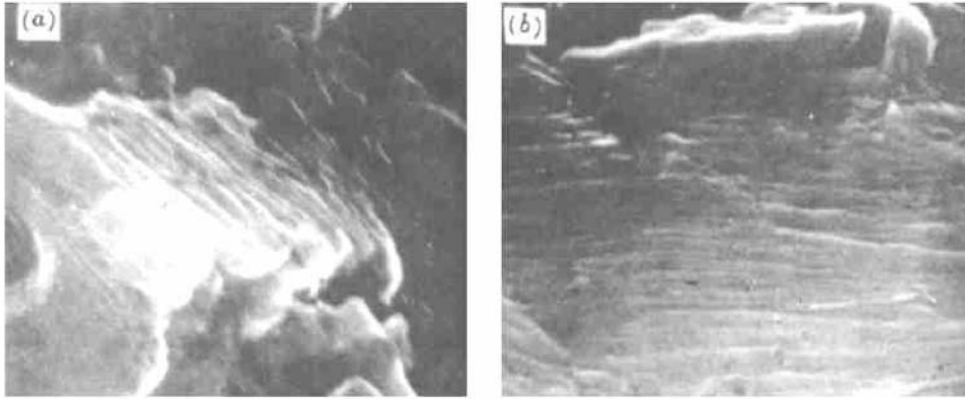


Fig. 4 Fatigue fractures of specimens without LSP (a) and specimens with LSP (b)
(a) $\times 500$, $N_f = 24 \times 10^4$ cycles, (b) $\times 1000$, $N_f = 35.4 \times 10^4$ cycles

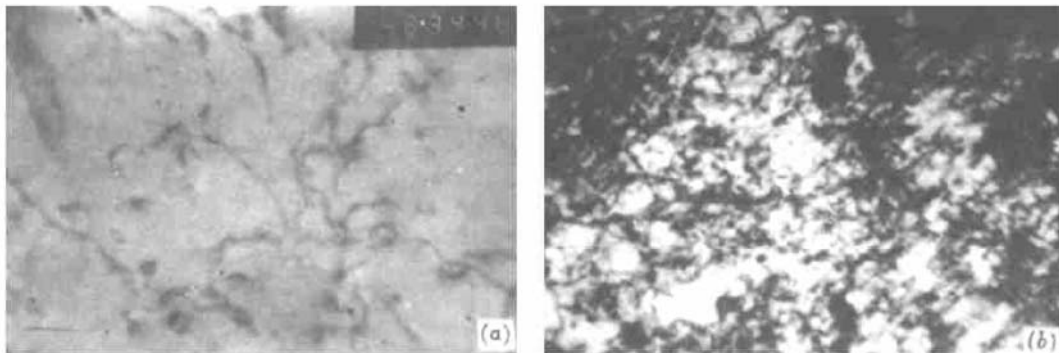


Fig. 5 Original substructures of layers of specimens without LSP (a) and specimens with LSP (b)

4.4 微观结构观察

为了观察 LSP 对材料微观亚结构的影响,取其冲击区表层试样,线切割至 0.3 mm 厚,外表层直接抛光后从另一面逐渐减薄至所要求的厚度约 0.03~0.05 mm,然后进行电解双喷,将制备好的金属薄膜在 JEOL-100CX I 型透射电镜下观察其亚结构,如图 5 所示,可见未经 LSP 试样的表层其位错密度低,呈长直螺位错,而经过 LSP 的试样表层则显示出极高的位错密度,且位错交割、缠结、交互作用明显,这说明金属表层在承受激光冲击的同时,表层也经受了剧烈的塑性变形过程,由于位错的运动、增殖、滑移使得内部的位错密度急剧增加,从而使表层的强度硬度明显增加,由于疲劳裂纹的萌生都是在金属表层的驻留滑移带、挤出脊、浸入沟等处形成,而这些都是与交变载荷下位错运动相关,位错密度的急剧增加使得位错运动的阻力增加,从而使疲劳裂纹形成的阻力增大,时间推迟,也就是说使疲劳寿命增加。

参 考 文 献

- 1 Clauer A. H. , Fairand B. P. Interaction of laser-induced stress waves with metals. Appl. of lasers in materials processing, proceedings of a conference, Washington, D. C. Apr. 18~20, 1979. Publ. by ASM (Mater. / Metalwork Technol. Ser.). 1979. 291~315
- 2 Bates William F. Jr. Laser shock processing of aluminum alloys. Appl. of lasers in materials processing, proceedings of a conference. Washington, D. C. Apr. 18~20, 1979. Publ. by ASM (Mater. /Metalwork Technol. Ser.). 1979. 317~330
- 3 Fairand B. P. , Clauer A. H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials. *J. Appl. Phys.* , 1979, **50**(3) : 1497~1502
- 4 Gnanamuthu D. S. Laser surface treatment. *Opt. Eng.* , 1980, **19** : 783~792
- 5 王卫林. 激光冲击强化技术. 航空制造工程. 1992. 12
- 6 Fairand B. P. , Wilcox B. A. , Gallagher W. J. *et al.* . Laser shock induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum. *J. Appl. Phys.* , 1972, **43**(9) : 3893~3895
- 7 高镇同 编著. 疲劳应用统计学. 北京: 国防工业出版社, 1986. 272~304

Study on Improvement of Properties of Aluminum Alloy by Laser Shock Processing

Zou Hongcheng Dai Shujuan Xu Minying Zhang Hongsheng Liu Ye

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Sci. and Tech. , Wuhan 430074)

Abstract The effects of high power density laser shock processing on mechanical properties of Ly12CZ aluminum alloy have been studied. The results show that fatigue life of Ly12CZ after laser shock processing can be improved. The improvement of fatigue life is due to the increment of dislocation density in microstructure, resulting in obvious increases of strength and hardness.

Key words laser shock processing, fatigue, Ly12CZ aluminum alloy, dislocation density, nailing method