

# 激光冲击 LY12CZ 和纯铝的正电子湮没特性<sup>①</sup>

刘富荣 邹鸿承 戴蜀娟 杨 晓 彭寿战\*

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074;

\* 广州建筑职工大学, 广州 510655)

**摘 要** 采用快-快正电子湮没仪分别测定了 LY12CZ 和纯铝经激光冲击处理后的正电子谱, 激光冲击使 LY12CZ 和纯铝的平均寿命降低而捕获率提高, 表明激光冲击使材料内部的缺陷浓度增加且缺陷浓度与激光功率密度呈指数关系。激光冲击硬化是由于激光冲击后在材料内部形成大量位错等缺陷, 这些位错相互缠绕在一起, 相互钉扎, 形成稳定的胞状组织, 从而提高材料的力学性能。

**关键词** 激光冲击(LSP) 正电子谱 缺陷浓度 冲击硬化

激光冲击处理是一种新的材料表面强化技术, 它是用功率密度极高( $10^8 \sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$ )的激光束, 在极短的脉冲时间( $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ s}$ )内辐照材料表面, 使材料表面一薄层迅速蒸发、汽化, 且原子溢出表面时形成一向内部传播的瞬态冲击波, 此冲击波能与材料相互作用, 改变材料性能。研究表明, 激光冲击能大大地提高材料的力学性能, 尤其是疲劳寿命<sup>[1]</sup>。

本文应用准分子激光器和泵浦染料激光器分别冲击处理纯铝和 LY12CZ, 并对回收试样进行正电子谱测试和研究, 分析了冲击试样产生的大量位错对材料冲击硬化效应的影响。

## 1 实验方法

本实验选用纯铝和 LY12CZ (Mg 1.54, Mn 0.58, Cu 4.61, Al 余量)。纯铝经 650~680 °C再结晶退火, LY12CZ 经常规固溶处理+自然时效。将处理好的材料加工成板材, 截取  $10 \text{ mm} \times 21 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$  的块状试样, 进行激光冲击, 试样尺寸为  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 。激光器参数见表 1。

将冲击好的试样, 轻磨表面并抛光, 再线

切割成  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$  的两小块, 与正电子源粘在一起, 进行正电子探测实验。正电子源为  $^{22}\text{NaCl}$ , 源强  $10 \mu\text{Ci}$ , 时间分辨率为 210 ps, 每个谱累计  $10^6$  个, 快-快正电子寿命谱仪示意图如图 1 所示。

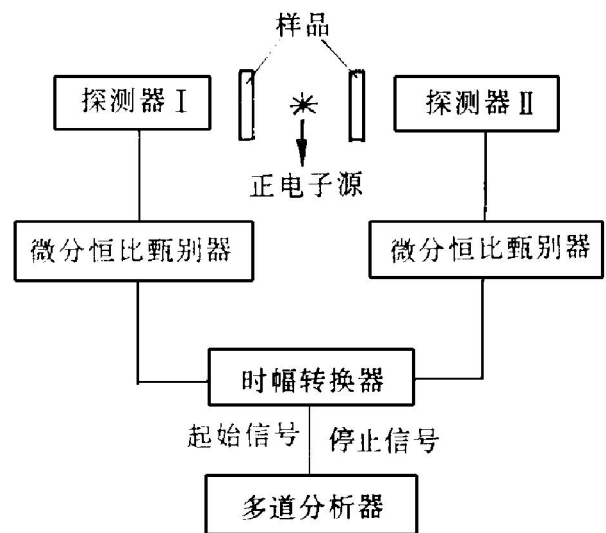


图 1 快-快正电子寿命谱仪

## 2 实验结果及分析

测试结果如图 2 所示。采用捕获模型对上述正电子谱进行解谱, 获得正电子湮没的各参数如表 2 所示。

① 收稿日期: 1996-04-10; 修回日期: 1996-11-04

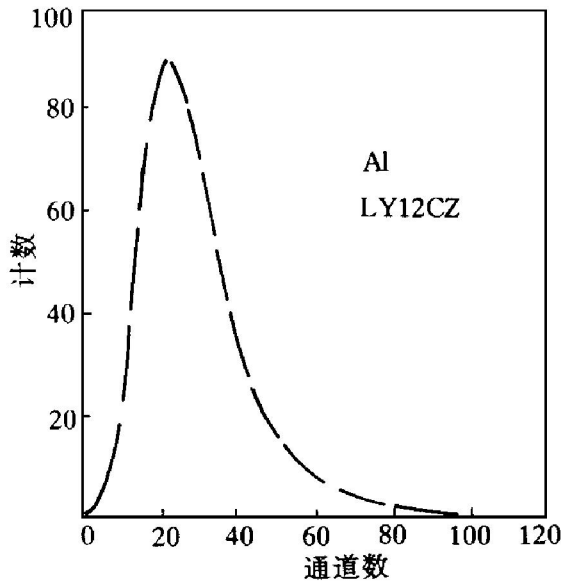


图 2 Al 和 LY12CZ 正电子谱

表 1 激光器参数

组号	激光器型号	输出能量 / mJ	脉宽 / ns	光斑大小 / mm	功率密度 / W·cm <sup>-2</sup>	波长 / μm
I	EMG201MSC 准分子激光器	90	28	1×3	1.06×10 <sup>8</sup>	1.06
II	钇铝石榴 镉体激光器	190	5	d1	4.92×10 <sup>9</sup>	1.06
III	uum 泵浦 染料激光器	20	0.15	d0.31	1.77×10 <sup>11</sup>	0.532

表 2 正电子湮没各参数

类别	$\tau_1$ / ps	$\tau_2$ / ps	$\tau_m$ / ps	$K$ / ns <sup>-1</sup>	激光冲击功率 密度 / W·cm <sup>-2</sup>
纯铝	1	156	330	0.882	1.06×10 <sup>8</sup>
	2	152	321	0.940	4.92×10 <sup>9</sup>
	3	132	276	1.542	1.77×10 <sup>11</sup>
LY12 -CZ	1	156	315	0.753	1.06×10 <sup>8</sup>
	2	152	305	0.847	4.92×10 <sup>9</sup>
	3	142	301	1.042	1.77×10 <sup>11</sup>

$\tau_1$  代表  $e^+$  在完整晶格处湮没的寿命, 同时也反映缺陷对它的捕获, 一般缺陷浓度增加, 则  $\tau_1$  寿命变短。所以, 激光冲击后  $\tau_1$  寿命缩短, 说明材料中的缺陷浓度增加。 $\tau_2$  反映  $e^+$  在缺陷处湮没的寿命, 能够表达缺陷的类型。对于晶界、空位、位错三种缺陷,  $e^+$  在它们处湮没的寿命依次降低(晶界>空位>位错)。同时, 辐照对晶界的影响很小, 所以表中  $\tau_2$  的寿命显著变小, 说明激光冲击使材料内部的空位和位错的浓度增加。 $K$  为  $e^+$  的捕获率, 一般认为缺陷对正电子的捕获率  $K$  正比于缺陷浓度

$c$ , 即  $K = u \times c$ , 式中  $u$  为单位浓度的缺陷对正电子的捕获率, 即比捕获率, 它对同种材料中的同种缺陷在一定条件下为一常数, 所以  $K$  值的变化直接反映材料内部缺陷浓度的变化。 $\tau_m$  代表  $e^+$  在材料中的平均湮没寿命。

另外, 从表中还可以看出, 用功率密度为  $1.06 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  的准分子激光器冲击试样, 其各参数变化不大, 而经  $1.77 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  泵浦染料激光器冲击后的变化很大, 如图 3 所示。 $\tau_m$  随  $\lg P_d$  的增加而线性降低, 缺陷的捕获率  $K$  随  $\lg P_d$  的增加呈指数增加, 说明激光冲击的功率密度对材料内部的显微缺陷影响很大, 并且随着激光功率密度的增加, 材料内部的缺陷浓度呈指数增加。

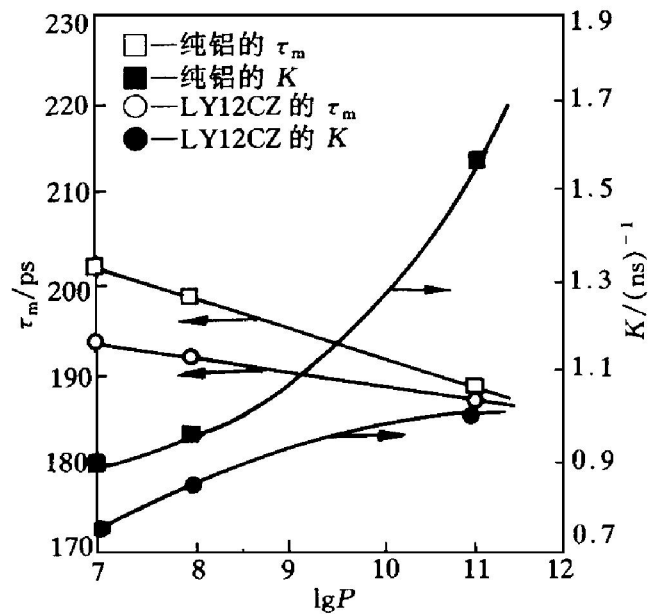


图 3 激光功率密度与  $\tau_m$ 、 $K$  的关系

材料与强脉冲作用下的表面硬化机制, 一般分为相变机制、孪晶机制、动态应变时效机制<sup>[2]</sup>。这三种机制的实质都是形成位错组态。所以, 可以将激光冲击强化的机制简化为位错机制。激光冲击在材料内部形成瞬态冲击波。冲击波在材料内部传播的同时, 将在不同的滑移面上形成剪切应力, 当此剪切应力超过最小剪切应力时, 滑移面开动, 同时形成大量位错。图 4 清晰地反应出激光冲击处理在纯铝中形成的大量位错。这些位错缠结在一起, 形成

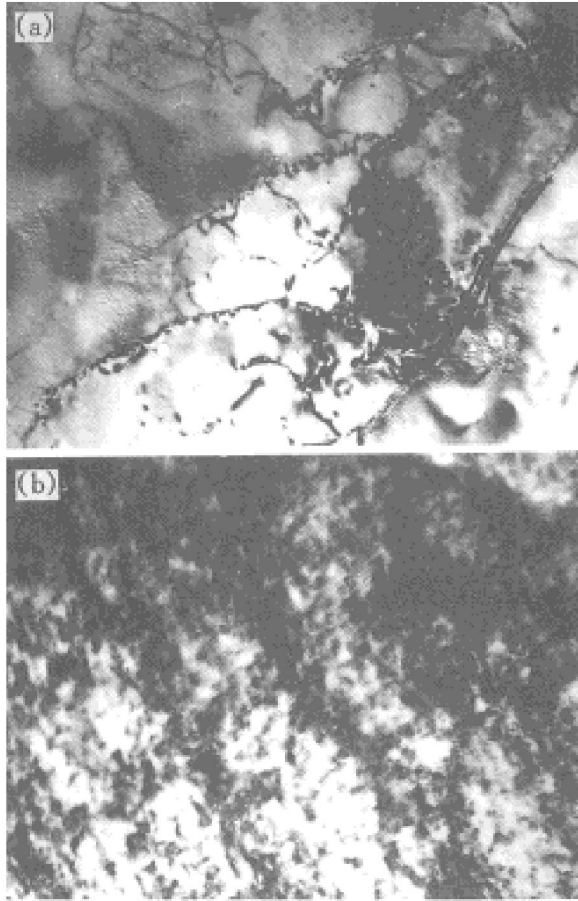


图4 纯铝的TEM照片  
(a) 未冲击; (b) 一经LSP冲击

一些小的胞状组织,从而提高了材料的力学性能。一般来说,滑移面的剪切应力只有达到最小剪切应力时,才能打破原子键的结合力,使滑移面移动,所以,激光冲击的功率密度一般要求大于  $10^8 \text{ W/cm}^2$ 。

另外, Trainor 等人<sup>[3]</sup>,通过解析和数值研究,建立了激光冲击波压力  $P$  与激光功率密度  $I_0$  的如下关系:  $P = B \times I_0^n$ , 式中  $P$  为激光冲击波峰值压力;  $I_0$  为激光功率密度,  $B$  为材料常数,一般为  $0.6 \sim 0.8$ 。所以,在材料条件不变的情况下,激光功率密度增加,激光冲击波峰值压力增大,在材料中将有更多的滑移面开动,导致更多位错等缺陷的形成。对于纯铝和 LY12CZ 两种材料,由于 LY12CZ 是铝合金,材料内部弥散地分布着一些  $Q$  相和  $T$  相,阻止了冲击波推动的滑移面的移动,不利于位错等缺陷的形成,  $e^+$  湮没的各参数变化不大。

#### 参考文献

- 1 刘富荣, 邹鸿承等. 航空工艺技术, 1996, (1): 182.
- 2 李明山等. 表面技术, 1993, (4): 22.
- 3 Trainor J *et al.* Phys Fluids, 1982, 25: 1898.

## POSITRON ANNIHILATION CHARACTER OF LY12CZ AND PURE Al PROCESSED BY LASER SHOCK

Liu Furong, Zou Hongcheng, Dai Shujuan, Yang Xiao, Peng Shouzhan  
*National Key Lab of Laser Technology,  
Huazhong University of Technology, Wuhan 430074*

**ABSTRACT** Positron lifetime spectra of LY12CZ and pure Al with laser shock processing(LSP) by positron annihilation instrument were measured, that the average lifetime decreased with increasing trapping rates showed that the defect densities in the materials with LSP were improved. Besides, the relation between the laser power density and the defect densities was analysed, the effect of laser shock hardening was also investigated and explored.

**Key words** laser shock processing positron lifetime spectra defect densities laser shock hardening

(编辑 彭超群)