

高功率连续波 CO₂ 激光辐照加载铝板的研究*

郑启光 辜建辉 陶星之 王 涛 汪洪海
(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)
李思忠 刘绪发 孙承伟
(西南流体物理研究所, 成都, 610003)

摘要: 对受拉、受压和扭曲加载的 LY12 铝合金板被连续 CO₂ 激光辐照后的热力机械响应、应力状态、变形及破坏等进行了研究, 同时研究了各种不同加载形式下的激光辐照破坏的工艺参数范围, 分析了激光辐照破坏区的微观结构。研究表明, 在激光辐照和机械加载的联合作用下, 激光辐照烧斑区产生部分熔化和凹陷, 在辐照区的边缘产生裂纹和皱折, 最终导致破坏。另外, 还具体分析了几种试件的破坏特征。

关键词: CO₂ 激光 破坏效应 LY12 铝合金

Pre-loaded LY12 aluminum alloy irradiated by high-power laser beam

Zheng Qiguang, Gu Jianhui, Tao Xingzhi, Wang Tao, Wang Honghai
(National Lab. of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)
Li Sizhong, Liu Xufu, Sun Chengwei
(Southwest Institution of Fluid Physics, Chengdu, 610003)

Abstract: Thermal and mechanical response, stress statute, deformation and damage of pre-pulled, pre-pressed and pre-twisted LY12 aluminum alloy specimens caused by irradiation of high-power CW CO₂ laser beam were studied in this paper. The parameters of laser irradiation and the microstructure of laser irradiated area were analyzed for different types of pre-loading and different shapes of specimens.

* 中国工程物理研究院基金资助。

致暗空间光孤子比 Kerr 暗空间光孤子易于实现, 其应用前景较好, 可以被制成柔性波导、光开关、耦合器等多种光孤子器件。

参 考 文 献

- 1 Hasegawa A, Tappet F. A P L, 1973; 23(1): 171
- 2 Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P. Phys Rev Lett, 1980; 45(13): 1095
- 3 Belanger P A, Mathieu P. Appl Opt, 1987; 26(1): 111
- 4 Jeroninek H, Delse C, Tremblay R. Appl Opt, 1986; 25(5): 732
- 5 Swartzlander G A, Andersen Jr D R, Regan J J *et al.* Phys Rev Lett, 1991; 66(12): 1583
- 6 陈险峰, 陈英礼, 李劼. 光学学报, 1996; 16(7): 952

作者简介: 陆 宏, 男, 1967 年 3 月出生。理学博士, 副教授。现在哈尔滨工业大学应用物理系任教, 科研方向为非线性光孤子、光电对抗等。

Under the combined laser beam irradiation and mechanical pre-loading, the laser beam irradiated area on the specimen was melt and depressed, causing fracture on the border area, and finally being damaged.

Key words: CO₂ laser beam damage mechanism LY12 aluminum alloy

引 言

激光对材料的破坏机理(效应)与激光作用时间(或脉冲持续时间)、波长、激光功率密度(或能量密度)、材料的物理性质等密切相关。激光对金属板的破坏作用,有以下几种方式:(1)采用强脉冲激光(功率密度大于 10^9W/cm^2)对金属板进行冲击破坏,即由激光产生冲击波^[1,2],使辐照区边缘产生剪切破坏,或通过传导至金属内部,引起板背面层裂;(2)连续激光对金属板进行热烧蚀,引起材料的熔化和汽化,导致穿孔破坏;(3)联合加载,即机械加载和强激光辐照同时作用于金属板,由于材料局部温度上升引起材料强度降低、热膨胀、热软化及部分熔化产生应力,这种应力是机械应力与热应力的综合。一旦金属板某处应力达到或超过材料的强度极限,即引起破裂。因此,利用机械加载和激光辐照的联合作用,可在较低的激光功率密度($10^4 \sim 10^6 \text{W/cm}^2$)和较小的激光能量密度条件下取得破坏金属板的效果。本研究属于第三种类型的破坏。

一、实验条件与方法

图 1 示出机械加载与 CO₂ 激光辐照装置示意图。破坏试验所用

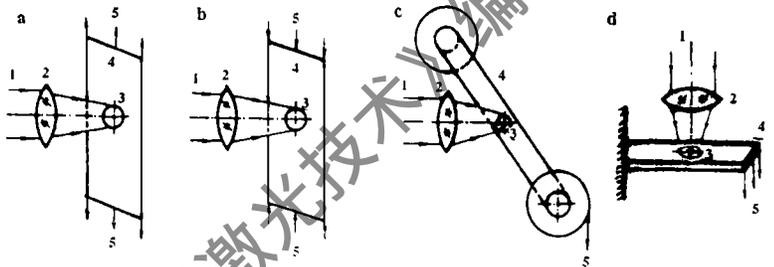


Fig. 1 Illustrations of experimental setup for different loading cases
a- pull loading b- press loading c- twist loading d- bend loading
1- CO₂ laser beam 2- focusing lens 3- laser irradiated area on specimen
4- specimen 5- loading force

Table 1 Chemical composition of LY12 aluminum alloy

	Al	Cu	Mg	Mn
composition(wt%)	92.4~94.7	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9

的试件材料为 LY12 铝合金,其成分见表 1。试件被加工成板条试件(150mm × 10mm × 2mm)、宽板试件

(100mm × 60mm × 0.8mm)和扭曲试件(120mm × 0.7mm × 90mm)。

试验时,将试件固定在加载架上。几种不同试件的激光辐照参数见表 2、表 3 和表 4。

Table 2 The parameters of laser irradiating pre-pressed strip specimens

No. of specimen	laser power (kW)	pre-pressed loading (kg)	irradiated time (s)	degree of damage
303	2	11	3.04	bent
302	2	24	2.648	bent
301	2	28	2.40	bent
309	2	32	1.68	bent
308	2	40	1.60	bent
310	2	45	0.928	bent

Note: The area of laser beam on the specimen is 11mm × 11mm

Table 3 The parameters of laser beam irradiating plate specimens a- pre-pulled plate specimens

No. of specimen	laser power (kW)	stress of pre-pulling (μE)	irradiated time (s)	degree of damage
201	2.0	33	3.04	bent
201	2.0	72	2.648	bent
203	2.0	84	2.40	bent
204	2.0	98	1.68	bent
209	2.0	120	1.60	bent
210	2.2	25	3.00	melt
211	2.1	1106	1.00	broken
212	2.0	1191	0.8	broken

b—pre-pulled plate specimens

No. of specimen	laser power (kW)	stress of pre-pressing (μE)	irradiated time(s)	degree of damage
400	4.58	355(not blacked)	10	not bent
402	4.59	334(blacked)	5.0	melt in center and broken
401	4.80	70(blacked)	4.0	melt and deformed
402	5.00	109(blacked)	4.0	melt in center and broken
403	4.78	665(blacked)	2.5	bent to back
404	5.00	834(blacked)	2.5	bent to front
405	4.70	812(blacked)	2.5	bent to front
406	5.08	472(blacked)	3.0	bent to front
407	4.62	583(blacked)	3.5	bent to front
408	4.60	287(blacked)	3.5(unloading at 2.90s)	bent to front
409	4.58	710(blacked) (50 μE remained after unloading)	3.5	bent to front
410	4.55	1027(blacked) (300 μE remained after unloading)	3.5	bent to front
411	4.96	792(blacked) (50 μE remained after unloading)	3.5	bent to front

Note: The area of laser beam on the specimen is $\phi 36\text{mm}$

Table 4 The parameters of laser irradiating pre-twisted specimens

No. of specimen	laser power (kW)	pre-twisted loading (kg)	irradiated time (s)	degree of damage
701	5.0	19(not blacked)	10	no any damage
700	5.0	19(blacked)	1	broken
706	4.0	8(blacked)	0.8	twisted $3.5^\circ \sim 5.5^\circ$
703	4.0	13(blacked)	1	twisted $5^\circ \sim 17^\circ$
709	4.0	16(blacked)	0.4	twisted $5.5^\circ \sim 22^\circ$ (380 μE remained after unloading)
702	4.0	19(blacked)	1.5	twisted 30°
710	4.0	22(blacked)	0.3	twisted $7^\circ \sim 16^\circ$
705	4.0	25(blacked)	0.4	damaged (250 μE remained after unloading)
704	4.0	25(blacked)	0.4	broken
707	4.0	30(blacked)	0.3	fractures in laser irradiated area
708	4.0	27(blacked)	0.4	broken

二、实验结果与分析

在激光对板试件的破坏试验中,采用两种加载方式,一种是预拉加载,另一种是预压加载,

试验用的激光功率是从 2kW 到 5kW, 激光作用光斑为 $f36\text{mm}$, 在第一种拉伸加载方式时, 保持激光功率不变, 改变拉伸载荷, 从表 3a 中可看到, 随着预拉伸载荷的增加, 试件发生破坏所需激光作用时间变短。当试件预加载荷为 $25\mu\text{E}$ 时, 激光作用时间为 3s, 板试件只发生上部穿孔, 下部熔化, 未断。当试件预加载荷为 $1106\mu\text{E}$ 时, 激光作用时间为 1s, 试件断裂。当试件预加载荷加到 $1191\mu\text{E}$ 时, 激光作用时间只需 0.8s, 试件就发生断裂。

在预压加载宽板试件的破坏试验中, 情况与预拉伸试件类似, 即随着试件预压载荷的增大, 试件产生破坏所需的激光作用时间缩短。另外从表 3b 中还看到, 在预压宽板试件的激光破坏试验中, 所需的激光功率比预拉伸载荷大, 而且试件并未发生弯曲破坏。而当试件发黑处理后, 尽管预压载荷减小了, 但这时只需 5s 试件板中心就熔化断裂, 可见试件经发黑后(即提高试件材料对激光的吸收率), 产生破坏所需的激光作用时间和作用功率比未发黑试件要小得多。试验发现, 在预加拉伸载荷时, 激光烧斑区内材料出现热软化, 随着激光作用时间的增长, 温度进一步升高, 材料出现熔化, 凹陷, 并伴随喷射出纤维状的熔化物, 在垂直拉伸方向的激光烧斑区, 由于热应力与机械应力的联合作用引起应力集中, 在烧斑区边缘产生最大的拉伸应力^[2], 沿激光烧斑处萌生裂纹, 裂纹沿直径方向向基体扩展, 且裂纹呈层状。图 2 示出激光作用预加弯曲载荷试件的层裂状况。

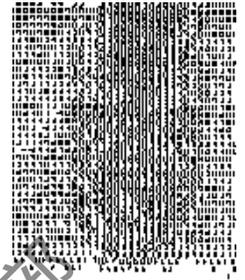


Fig. 2 Laminar fracture of pre-bent specimen caused by irradiation of laser beam (1000 \times ; laser beam power $P = 2.0\text{kW}$; pre-bent loading $L = 6.0\mu\text{E}$)



Fig. 3 Micro-holes in laser damaged area of pre-bent specimens (2500 \times ; $P = 2.0\text{kW}$; $L = 6.0\mu\text{E}$)

Fig. 4 The center of laminar fracture on pre-bent specimens (50 \times ; $P = 2.0\text{kW}$; $L = 6.0\mu\text{E}$)

研究表明, 在激光烧斑区出现晶界显示^[3], 某些部位形成孔洞(见图 3), 并在孔洞周围产生辐射状裂纹。当激光辐照功率一定时, 随着加载应变的加大, 裂纹萌生和扩展的速度加快, 试件发生破坏所需的时间短。随着激光辐照功率的加大, 激光烧斑区边缘的应力会增加很快, 一旦某处的应力达到或超过该处材料的强度极限, 将导致此处的破坏(见图 4)。

图 5 和图 6 示出预加弯曲载荷的试件受激光辐照后断裂处的断口照片。从图 6 中看到, 激光辐照破坏处断口呈层状, 之所以会形成这类层状断口, 是因为在激光烧斑区表面温度高, 造成板材表面熔化, 并有部分熔化物喷射出去, 在此处造成凹陷或形成孔洞, 这是激光热作用破坏区。而在烧斑表面与背面之间的中间层, 材料并未达到熔点, 但已造成材料软化, 由于激光热作用和机械加载的联合作用, 也会造成应力集中, 此处可视为塑性破坏区。而在板材的背



Fig. 5 Micro-graph of the broken pre-bent specimen (iv) (500 \times ; $P = 2.0\text{kW}$; $L = 6.0\mu\text{E}$)

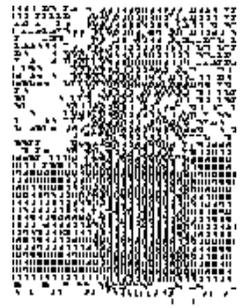


Fig. 6 Micro-graph of the broken pre-bent specimen (v) (2000 \times ; $P = 2.0\text{kW}$; $L = 6.0\mu\text{E}$)

面和激光烧斑区以外区域,激光热作用减弱,这时主要是机械应力作用,故此区域属脆性断裂区。由于上述三个区域所受的激光热应力和机械应力的不同,故其断口呈层状(或类似阶梯状)结构。

图7和图8示出扭曲试件受激光辐照后破坏的纵向和横向断面照片。从图7中可清楚看到,在激光热作用和扭曲加载的联合作用下,试件断裂区沿纵向的微观结构呈扭曲状,并看到断裂区的“晶柱”结构沿扭曲方向依次变短,这是因为在激光烧斑区表面,由于激光热作用熔化试件首先被拉断,远离激光烧斑表面,激光热作用减弱,材料只产生热软化,这时主要是机械扭曲应力使其被拉断(此处主要为脆性断裂)。

从图8看到,扭曲试件断裂区的横断面的显微结构呈瓦片状,在瓦片状结构中可清楚地观察到宏观破坏痕迹。同时还看到微观裂纹平行于激光作用方向,且裂纹沿试件扭曲方向扩展,这是激光热作用应力和机械扭曲应力综合作用的结果。



Fig. 7 Micro-graph in longitude of laser damaged pre-twisted specimen (100 \times ; $P = 4.0\text{ kW}$; $L = 75\mu\text{e}$; $t = 0.4\text{ s}$)



Fig. 8 Micro-graph in cross-section of laser damaged pre-twisted specimen (100 \times ; $P = 4.0\text{ kW}$; $L = 75\mu\text{e}$; $t = 0.4\text{ s}$)

三、结 论

(1) 激光作用预加拉伸载荷的LY12铝板时,随着拉伸载荷的增加,试件发生破坏的时间缩短;随着激光功率密度的增加,试件破坏所需的时间减少;随着试件板加宽,断裂破坏时间增加。(2) 在激光与机械拉伸加载的联合作用下,激光烧斑区会产生部分熔化、凹陷,在垂直拉伸的方向上,激光烧斑区产生应力集中,烧斑区边缘产生的拉伸应力最大,在此处易萌生裂纹,裂纹沿烧斑直径方向向基体扩展,且裂纹呈层状。(3) 在激光辐照和扭曲加载联合作用下,试件破坏呈扭曲断裂破坏,其断裂处断面呈瓦片状结构,瓦片状结构内的微观裂纹沿扭曲方向扩展。

参 考 文 献

- 1 周益春,段祝平. 强激光与粒子束,1993;5(2): 221
- 2 陈裕泽,李思忠,张光军 *et al.* 强激光与粒子束,1995; 7(2): 246
- 3 宋武林,朱蓓蒂,罗慧倩 *et al.* 应用激光,1996; 16(2): 63

作者简介: 郑启光,男,1944年12月出生。教授,博士生导师。现从事激光与物质相互作用及大功率CO₂激光导光、传输理论的研究。

收稿日期: 1997-07-18

• 产品简讯 •

二极管激光器多功能驱动电源

美国ILX Lightwave公司研制出LDC-3700系列的二极管激光器驱动电源。该电源采用低噪声电流和温控二极管激光器。新的处理器使用高效高速的CPIEB并与遥控器相联操作。此电源的精密电流控制可选择如下操作方式:恒流操作、恒功率操作、模拟调制及触发功能控制。

育明 巩马理 供稿