

受拉铝板对连续波 CO₂ 激光的热机械响应

陈海韬 夏生杰 李旭昌 韩金虎 姜在英 靳刚

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘要 本文对受拉伸载荷的铝合金板被强连续波 CO₂ 激光照射时的热机械响应进行了报导。介绍联合加载实验装置, 实验方法和实验结果。对试件的断裂过程以及断裂前的应力应变分布进行了讨论。

关键词 激光破坏机理 连续波 CO₂ 激光 热机械响应

一、引言

金属板对激光的响应, 主要有两种。一种是利用连续波激光对金属板进行热烧蚀, 从而引起材料的熔化和汽化, 以致穿孔破坏。这是纯粹的热响应, 需要很高的激光能量。根据我们的估计^[1], 对于 1cm 厚的金属板, 汽化穿孔时需要吸收的激光能量为几十 kJ。另一种是利用强脉冲激光束对金属板进行冲击破坏。所产生的冲击波可以传播到金属板内部, 引起背面层裂或光斑边缘剪切破坏。这是由于激光加热产生的机械响应, 需要入射的激光功率密度甚高, 达 10^9 W/cm^2 以上^[1]。这时还会遇到金属蒸气等离子体对激光束屏蔽问题, 影响金属表面对激光能量的吸收。

当机械加载和强激光辐照(本文称为联合加载)同时作用于金属板上时, 板内的应力状态应是机械应力与热应力的综合。例如受拉伸载荷的金属板被强激光束连续辐照时, 由于局部温度上升引起材料强度降低, 热膨胀及部分熔化, 产生新的应力分布。最后金属板某处材料的应力达到或超过强度极限, 从而引起破裂。因此, 利用机械和激光的联合作用, 可以在较低的激光功率密度和较小的激光能量密度条件下, 取得破坏金属板的效果。根据估算^[1], 联合加载破坏 1cm 厚的金属板, 需要吸收的激光能量为几个 kJ 量级, 激光功率密度可以降低到 $10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ 范围内。

本文报导受拉伸载荷的铝合金板经受强连续波 CO₂ 激光束辐照时的热机械响应实验研究。介绍联合加载实验装置, 实验方法和实验结果。对试件的断裂过程以及断裂前的应力应变分布进行观察和讨论。

二、联合加载实验装置

图 1 为机械和 CO₂ 激光联合加载装置图。1 为专门设计的拉压加载架; 2 是加载千斤顶; 3 是半球形垫铁; 4 是拉压力传感器; 5 是试件夹头。

激光加载部份包括 CO₂ 激光器 8 和外导光部 6。采用力学研究所研制的 JL 6A 型 CO₂ 流动激光器作为光源。最大输出功率为 2kW。外导光部由两片 45° 镀金金属全反射镜和一

1990年7月4日收到来稿, 1990年11月5日收到改稿。

片 GaAs 凸透镜组成。可以将激光束按要求的方向, 高度和光斑尺寸垂直地照射到试件的中心上。

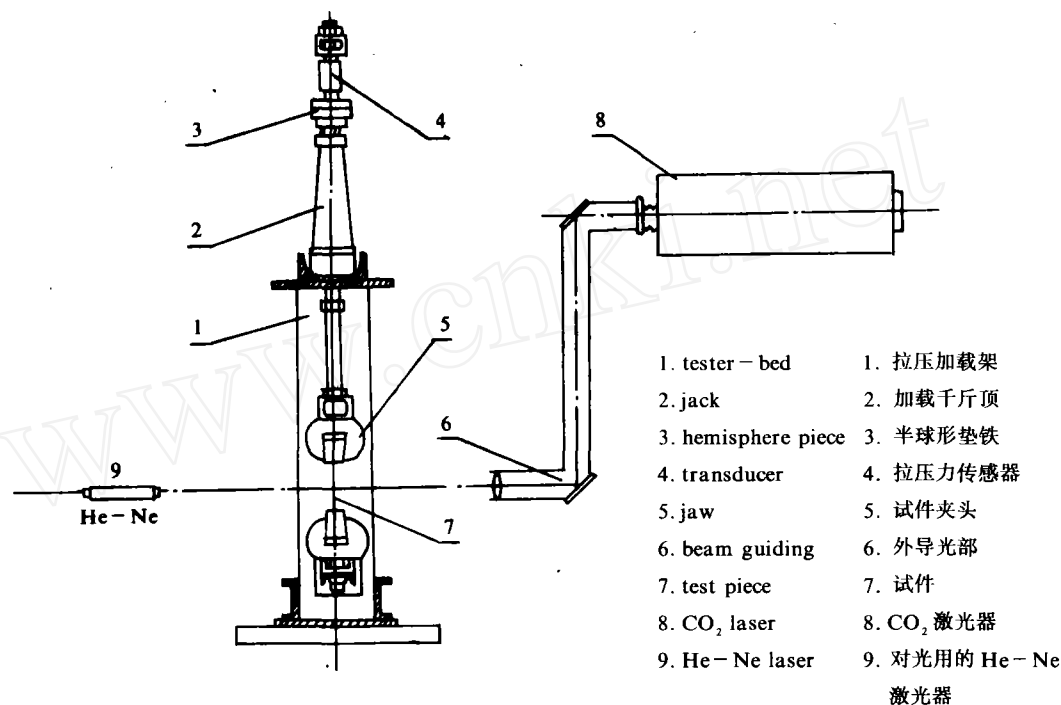


Fig. 1 The united tester of mechanical and CO₂ laser

图 1 机械和 CO₂ 激光联合加载装置

实验用的试件为厚 1.4mm 的 LY-12CZ 铝合金板。加工后成为长 200mm 宽 30mm 的哑铃形试块。中间的宽度为 10, 15, 20 及 25mm。试件表面经过三种不同方式的处理:

1. 阳极化处理—将加工好的试件连接在电解槽的阳极上。通电后表面生成一层灰白色的氧化铝薄膜。

2. 墨水涂黑处理—将阳极化处理过的试件表面涂上碳素墨水。

3. 酸性染黑处理—将阳极化处理过的试件放入酸性染料中染黑。

采用积分球法测定这三种表面的反射系数。它们分别为 0.52, 0.16 和 0.16。

三、实验方法

将上述不同宽度不同表面处理的试件, 分别按下列方法在图 1 所示的加载装置上进行实验: 将试件固定在加载架上, 拉伸加载到 50% 断裂载荷时, 再以千瓦级的 CO₂ 激光束照射 60 秒, 观察试件断裂情况。对未被拉断的试件, 冷却后继续用千斤顶拉伸至断裂时为止。记录此时的载荷。对于容易被拉断的涂黑试件及染黑试件, 再按预拉伸加载至 50% 和 65% 断裂载荷, 激光输出功率 200, 400, 600, 800, 1000 和 1200 W, 光斑直径 $\phi 3\text{mm}$ 和 $\phi 4\text{mm}$ 的条件, 进行联合加载实验, 并拍摄试件断裂过程。

四、实验结果

首先对表面阳极化处理的试件进行加载实验。对于宽度为 10mm 的试件，预加载到 50% 拉伸断裂强度后，用 800~1170W 的激光照射 60 秒，试件未被拉断，只有在辐照区附近有颈缩现象，没有烧斑。试件被加载时，载荷曲线逐级上升。光照开始后，载荷曲线缓慢下降。停止光照后，曲线回升到初值的 80%~90% 处停止。冷却之后，继续加载，曲线逐级上升到断裂时止。这时的断裂载荷比未被辐照过的试件断裂载荷低。这两个断裂载荷之比，称为剩余强度。表 1 列出三次实验所得的剩余强度值。

对于表面涂黑和染黑的试件，在中等强度的激光束照射下，很快便被拉断。在每次实验中，我们记录了载荷，辐照区中心背面的温度以及辐照时间，得到完整的图形如图 2 所示。图上的纵坐标表示载荷和温度，横坐标表示时间。 F 为载荷曲线， T 为辐照区中心背面的温度曲线， τ 为辐照时间曲线。表 2 列出这次实验各参数值。

AB 段为预加载段，拉伸预加载到 50% 断裂载荷时为止。C 点是激光开始辐照的时刻。D 点为断裂点，由此载荷曲线突然下降至零。从 C 点到 D 点的时间称为断裂时间。本次的断裂时间为 1 秒。由温度曲线看出，辐照区背面温度趋向熔点（约 600℃）。断裂之后，温度迅速上升。

表 1 不同激光功率照射 60 秒后铝板的剩余强度
Table 1 The residual strength of Al plate after 60 second radiation in the different laser power

laser power (W)	width × thickness (mm × mm)	residual strength
800	10 × 1.4	0.57
800	10 × 1.4	0.60
1170	10 × 1.4	0.43

表 2 图 2 的实验参数
Table 2 Parametes of Fig. 2

experimental No.	F5
width	25mm (dye black)
laser power	1000 W
beam diameter	4 mm
loading coordinate	0.9 kN/div
temperature coordinate	5 mV/div
time coordinate	1 s/div

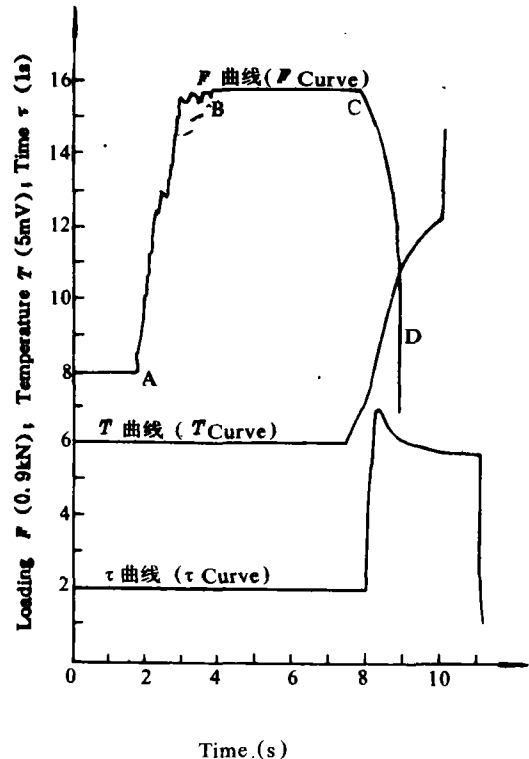


Fig. 2
Loading F ; Temperature T ; Radiation Time τ

图 2
载荷 F ; 温度 T ; 辐照时间 τ

不同试件在不同激光功率密度照射下的断裂时间如图 3 所示。试件的宽度越宽，断裂时间越长。激光功率密度越高，断裂时间越短。在功率密度为万瓦级条件下，断裂时间为秒

级。为了比较,图上虚线表示板宽25mm的小激光光斑($\varnothing 3\text{mm}$)实验曲线。可见激光光斑较小时,断裂时间较长。

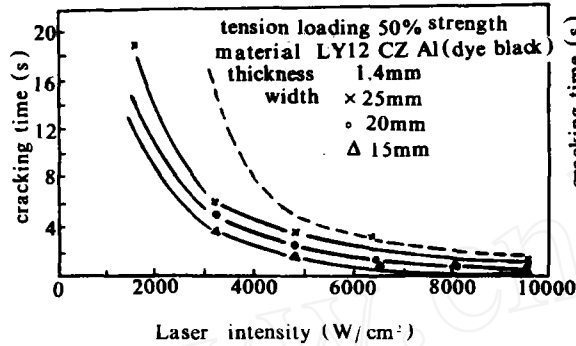


Fig. 3

图 3

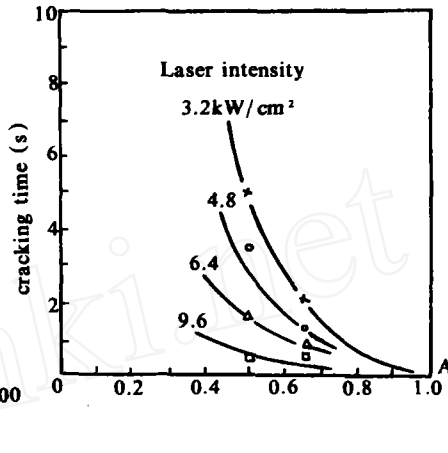


Fig. 4 Ratio of preloading to strength

图 4 预拉伸载荷与拉伸强度之比

对于同一种试件在不同预拉伸载荷条件下的联合加载实验,可以得到和图4相似的曲线。图4是由染黑的宽度为20mm的试件得到的实验结果绘制的。预拉伸载荷有断裂载荷的50%和65%两种。不同的曲线对应于不同的激光功率密度。纵坐标为断裂时间。由图4可见,激光功率密度为 $9.6\text{kW}/\text{cm}^2$ 时,断裂时间少于1秒。预拉伸载荷越高,断裂时间越短。如果预拉伸载荷与拉伸强度之比为1.0,即图4上的A点,则断裂时间为零。如果预载荷为零,即图4上的0点,则断裂时间为无穷大。实验证明,当激光束辐照在两端固定但没有预拉伸载荷的试件上时,试件只能被烧穿,不能拉断,只有试件中部因受热膨胀而弯曲。

测量拉伸载荷与激光辐照联合作用下试件宏观形变的实验是在表面涂黑宽度为10mm的试件上进行的。试件被固定在加载架的上下两个夹头上。下夹头固定在加载架底座上。上夹头随着千斤顶的动作上下移动。在单纯的拉伸断裂实验中,试件断裂时,上方的位移计移动16mm而下方的位移计移动2mm。在联合加载实验中,试件断裂时,上方的位移计仅移动2.2mm。可见在联合加载下,试件断裂如此之快,使得整个试件,除烧斑之外,没有出现严重的塑性拉长。

五、断裂过程

由未被拉断的试件照片观察到,断裂的过程是这样的。当激光开始辐照时,辐照区出现白色的亮点。亮点逐渐扩大至与光斑直径接近时,垂直于拉伸方向的烧斑直径与烧斑边缘的两个交点附近开始发生裂纹。裂纹沿此直径向两边发展,直至拉断为止。辐照区附近的黑色氧化铝薄膜变成桔红色。图5是根据一张裂纹开始发生的照片绘制的。中心的孔表示烧斑,尖角部份表示开始出现的裂纹。

图6是试件的断裂横截面图。激光的方向是由上而下。断裂面可以分为三个区域:在被激光照射的烧斑面上是凹陷的熔化区(A),拉断时出现片状或纤维状的熔化物。烧斑背面是塑性区(B),此处材料未达熔点,但已变软,拉断时出现延性断裂的纤维状物。烧斑以外是

脆性断裂区(C), 此处材料的温度升高得不多, 仍然保持弹性状态。用扫描电子显微镜观察, 断面具有冰糖状结构。

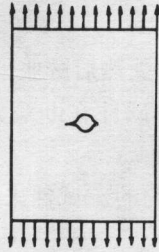


Fig. 5
图 5

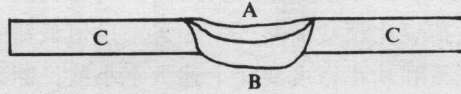


Fig. 6
图 6

六、实验分析的若干结果

利用云纹法测定试件在断裂前的应力分布没有取得成功。原因是塑胶网板很容易受热弯曲并烧毁。但在弯曲之前可以观察到, 平行云纹转变为放射形状, 和有中心圆孔的板单向被拉伸时出现的云纹图象相似。可以认为, 激光照射受拉板的应力分布和有圆孔的板受拉伸时的应力分布是相似的。

在经染黑阳极化处理过的试件表面上, 激光辐照之后, 烧斑附近出现一种有规律的裂纹分布。这是由于脆性的阳极化薄膜不能随着试件变形而断裂生成的。生成的原理和实验应力分析中的脆性涂层法^[2]的相同, 可按裂纹的方向确定最大正应变区域和主应力的方向。

图 7 是一张典型的薄膜裂纹照片。图的中心为烧斑和试件断裂线。拉伸载荷的方向为上下方向。裂纹分为三族。第一族平行于断裂线(照片上未显出), 这是由于试件受到预拉伸载荷时略有伸长而使脆性薄膜断裂而出现的均匀性裂纹。第二族的曲线向烧斑方向弯曲。离烧斑越近, 弯曲的程度越大。这是由于试件受热后产生的热应力与原来的预拉伸应力共同作用后形成新的应力分布所引起的。最大正应变区域对应于裂纹集中的地方, 亦即烧斑附近。在条纹上每点作垂直线段, 便能得到该点的主应力方向。第三族是在试件断裂面附近, 平行于断裂面的白色线族。此处材料已被拉开并暴露出来。

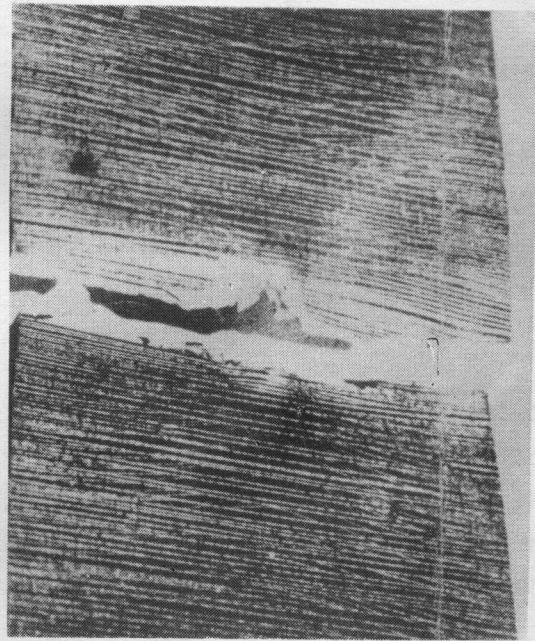


Fig. 7
图 7

七、讨 论

LY-12 CZ 硬铝合金板对 CO₂ 激光的表面反射系数很高, 即使是表面经过阳极化处理,

仍然不能耦合足够的能量。但是, 经过阳极化处理后再用墨水涂黑或酸性染料染黑的铝板表面, 能够耦合足够的激光能量。具有这种表面的铝板试件, 在联合加载实验中便容易地被拉断。在我们的实验中, 破坏厚度为 1.4mm 的铝板, 需用激光能量为 10^3 J, 激光功率密度为 10^5 W/cm²。

本实验采用千斤顶加载的固定位移式加载架, 试件在照射受热后膨胀, 引起卸载。试件断裂时的载荷要比预载荷略低。如果采用恒载荷式的加载架, 试件在断裂过程中载荷不变, 需用激光能量和功率密度要比上述数字小些, 断裂时间要短些。

试件被预拉伸到拉伸强度极限的 50% 时, 应力分布是均匀的。试件未被拉断。

试件被预拉伸后再受激光辐照时, 辐照区温度上升。试件受热产生的热应力与预拉伸应力共同作用, 使得在垂直于拉伸方向的烧斑直径与烧斑边缘的两个交点附近, 产生最大的拉伸应力。从图 7 上的脆性薄膜裂纹可以看出, 此两处的裂纹最密。亦即在这两处拉伸长度最大, 应力最大。

试件继续受热至辐照区温度接近或达到材料的熔点时, 烧斑区域材料强度降低, 原来所承受的拉伸应力便由温度较低的未被激光照射的区域来承受。在后面这区域内, 平均拉伸应力加大。从图 7 上的脆性薄膜裂纹可以看出, 垂直于裂纹的主应力方向, 已经偏离烧斑, 集中到未被激光照射的区域上去了。

这种情况和中心有圆孔的无穷大板两边均匀受拉伸的情况相似。在后面的情况中, 纵向应力沿试件中部 AB 截面的分布如图 8 的实线所示。A 点为应力集中点。最大应力为 $(\frac{1}{2}\sigma_b) \times 3 = 1.5\sigma_b$ (σ_b 为材料的拉伸强度极限)。试件便会在此处被拉断, 导致破坏。在我们的情况中, 烧斑区并未穿透, AB 截面的应力分布应如图 8 的虚线所示。只要当地拉伸应力超过当地强度极限, 裂纹便会在此处发生。

由于 AB 截面最窄, 应力最高, 裂纹发生后便沿 AB 向外发展, 直到试件断裂为止。

八、结 论

1. 对于表面经过染黑或涂黑并经阳极化处理的 LY-12 CZ 铝试件, 可以采用预拉伸载荷和强激光辐照的联合作用将其拉断。这个激光的功率密度比激光蒸发金属引起的冲击波破坏所需的功率密度低得多。这个激光的能量密度比激光引起穿孔破坏所需的能量密度也小得多。

2. 对于表面未经染黑或涂黑的但经过阳极化处理过的 LY-12 CZ 铝试件, 被强激光照射之后, 其极限强度要降低。

3. 由联合加载断裂实验看出: 试件越宽, 断裂时间越长。激光功率密度越高, 断裂时

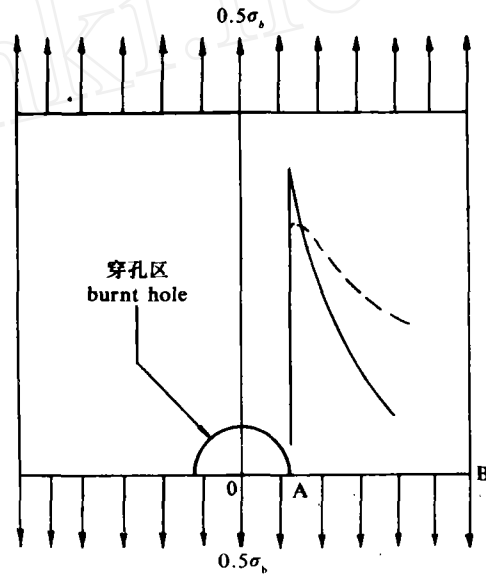


Fig. 8

图 8

间越短。激光功率密度为万瓦级时, 断裂时间为秒级。激光光斑直径越小, 断裂时间越长。预拉伸载荷越高, 断裂时间越短。

4. 试件在联合加载引起断裂时, 裂纹在垂直于拉伸方向的烧斑直径与烧斑边缘的两个交点附近开始发生。以后裂纹沿直径向两边发展, 直至完全断裂为止。

5. 试件的断裂面可以分成三个区域: 在被激光照射的烧斑面上是凹陷的熔化区, 拉断后出现纤维状的熔化物。在烧斑背面是塑性区, 拉断后出现延性断裂的纤维。烧斑以外是脆性断裂区, 断裂面出现冰糖状结构。

6. 由于试件表面上的脆性阳极化薄膜不能随着试件变形而产生有一定规律的裂纹族。可以由此看出试件断裂前的最大正应变区域和主应力方向分布。

7. 联合加载时试件的断裂机理和有孔板被拉伸的情况接近, 即由于光斑边界附近应力集中, 以后高温区的极限强度降低, 导致试件破坏。

致 谢 本文与力学研究所王震鸣研究员进行了有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] 陈海稻, 金属板对连续波激光的热机械响应, 1989 年激光与材料相互作用的热和力学效应学术会议文集(1)。
- [2] G. H. Lee, 实验应力分析, 高等教育出版社, 251-259 (1960)。

THERMOMECHANICAL RESPONSE OF Al PLATES UNDER TENSION TO CW CO₂ LASER RADIATION

Chen Haitao, Xia Shengjie, Li Xuchang, Han Jinhu
Jiang Zaiying, and Jin Gang

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080*)

ABSTRACT Thermomechanical response of Al plates under tension to high energy CW CO₂ laser radiation is discussed. The combined loading experiment device, method, and results are presented.

KEY WORDS mechanism of laser damage, continuous wave CO₂ laser, thermomechanical response.