

强激光照射受拉铝板的破坏过程*

陈海韬 夏生杰 李旭昌 姜在英

韩金虎 吴坚

(中国科学院力学研究所北京 100080)

提要 本文介绍受拉伸载荷的铝板试件被强 CO₂ 激光照射时, 铝板断裂破坏, 断口观察以及数学模拟计算等研究. 认为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上萌生, 以后沿着直径两边发展, 直至完全断裂.

关键词 激光破坏机理, 连续波 CO₂ 激光, 热机械响应

一、引言

单纯利用强激光的热响应取得金属板熔化, 汽化以致穿孔破坏, 需要使用高功率的大型激光器. 单纯利用强激光的机械响应取得金属板撕裂或层裂破坏, 需要使用高峰值, 短脉冲, 大能量的激光器. 目前这种高能激光器正处在研制或试用水平. 考虑到一些准备被强激光破坏的金属结构, 是处在高速运动并承受气动载荷的, 其中某些部位上的应力已接近破坏的临界状态, 此时使用中等功率密度 (10^4 — 10^6 W/cm²) 的激光束, 有可能达到破坏目的. 所以, 研究金属板对连续波激光束的热机械响应, 寻找在现有激光器条件下, 获得有效破坏效果的方法, 是有科学意义和实用意义的.

本文报导受拉伸载荷的铝板试件被强连续波 CO₂ 激光照射的热机械响应研究. 介绍联合加载实验装置, 实验方法和实验结果. 对试件断口进行扫描电镜观察. 对试件受载时的温度场和应力场进行数学模拟分析. 对破坏过程进行讨论.

二、联合加载实验装置

本实验装置包括机械加载和激光加载(简称联合加载)两大部分^[1].

激光加载部分包括 CO₂ 激光器和外导光部. 采用力学所研制的 JL6A 型 CO₂ 流动激光器为光源. 额定输出功率为 1.5kW, 最大输出功率为 2kW. 外导光部由两片 45° 镀金铜全反射镜和一片 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照射到试件上.

机械加载部分有两类装置. 一类是利用千斤顶控制位移的拉压力架. 另一类是利用

* 国家高技术激光技术领域基金资助项目
本文于 1992 年 4 月 8 日收到

砝码控制载荷的 6 吨 2 级标准测力机。后一种装置可以减少试件被激光照射伸长后发生的卸载。试件被安装在夹头上。载荷变化由串装在夹头上的传感器测定, 用 X-Y 函数记录仪记录下来。

试件为厚 1.4mm 的 LY-12CZ 铝合金板, 加工成哑铃形试件。中间的宽度分别为 10mm, 15mm, 20mm 和 25mm。试件经过阳极化处理, 再用墨汁涂黑或酸性染料染色。用积分球法测定他们的表面反射系数。其值为

阳极化表面	0.52
涂黑表面	0.16
染黑表面	0.16

图 1 为联合加载装置示意图。CO₂ 强激光束通过功率显示仪测定功率后, 经光闸, 全反射镜和透镜并聚焦于试件的中心部位。试件的两端受标准测力机的重锤牵引, 其拉伸载荷信号由传感器输出。光电管感受 Ne-Ne 激光器的光束, 以测量光闸启闭的时间。这两种信号均由 X-Y 记录仪记录下来。试件在整个实验过程中的变化, 由摄像机记录。

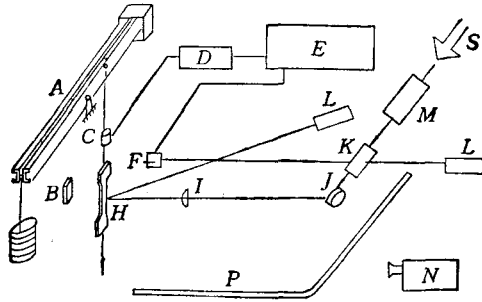


图 1 联合加载装置示意图

Fig. Schematic diagram of united load system

A. 标准测力机 Standard load system B. 耐火砖 Fire brick C. 传感器 Sensor D. 应变仪 Strain gauge
E. X-Y 记录仪 X-Y Recorder F. 光电管 Phototube H. 试件 Test piece I. 透镜 Lens J. 全反射镜
Mirror K. 光闸 Shutter L. He-Ne 激光器 He-Ne Laser M. 功率显示仪 Power meter N. 摄像机
Camera P. 有机玻璃板 Plexiglass S. 强激光 Strong Laser

三、实验方法与结果

实验时, 将试件安装在测力机的夹头上。拉伸加载到一定载荷后, 再以一定功率的激光束照射试件中心部分。记录载荷变化直至拉断为止。

对于只经过阳极化处理过的试件, 拉伸加载到 50% 断裂载荷, 再以 800—1170W 激光束照射 60 秒, 试件未被拉断, 只发现在辐照区附近有颈缩现象。试件冷却之后, 再继续拉伸加载直至断裂为止。发现被激光照射过的试件, 冷却后的断裂载荷降低到原断裂载荷的 43—60%。

对于涂黑和染黑的试件, 按预拉伸加载至 30%, 50% 和 60% 断裂载荷, 激光功率为 100, 200, 400, 600, 800, 1000 和 1200W, 光斑直径为 $\phi 3$, $\phi 4$ mm 的条件, 进行联合加载实验。以测定不同激光功率密度对受拉试件的热机械响应。实验表明, 在拉伸加载过程中, 试件略有伸长而无其他明显变化。当激光开始辐照时, 辐照区出现白色亮点。亮点逐渐扩大到与光斑直径接近时, 垂直于拉伸方向的烧斑直径与烧斑边缘的两个交点附

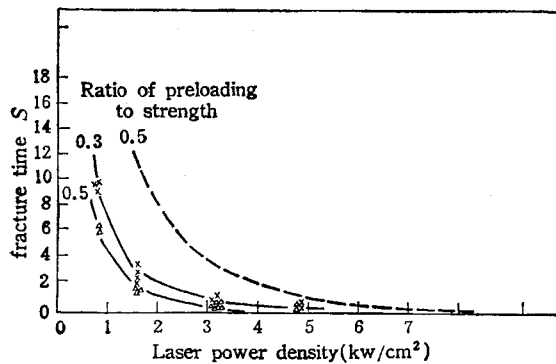


图 2 断裂时间随激光功率密度变化曲线
 Fig. Fracture time versus laser power density
 (material LY12CZ (anodize + dye black))
 thickness of plate 1.4mm width of plate 15mm
 ---- displacement control ——— load control

予拉伸应力与极限强度之比越大,断裂时间越短。板宽越窄,断裂时间短。在功率密度为万瓦级条件下,断裂时间为 1/10 秒级。

被激光辐照过的染黑试件表面上,烧斑附近出现桔红色区域。在这区域中,在一定方向的光线照射下,可以观察到有规律的裂纹分布,如图版 I 照片 1 所示。裂纹分为三族,第一族平行于断裂面。这是由于试件受到预拉伸载荷时略有伸长时,试件表面的脆性氧化铝薄膜不能随着试件变形而断裂生成的。其主应力方向平行于拉伸方向。第二族的曲线向烧斑方向弯曲。离烧斑越近,弯曲程度越显著。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。最大应变的区域对应于裂纹最集中的地方,即烧斑附近。在条纹上各点作垂直线段,便能得到各点的主应力方向。由这些垂线段看出,主应力线是先按平行拉伸方向,然后沿着烧斑外缘弯曲,再按平行拉伸方向发展的。在烧斑的两旁有明显的应力集中。第三族曲线在断裂面附近,是由于试件最终被拉断时产生的。此处材料已被拉开并暴露出来。

四、断口特征

观察试件断裂后的断口剖面,可以了解断裂机理。

承受联合加载水平较高试件的断口如图版 I 照片 2 所示。在断口附近有较大的塑性变形。辐照区因温度过高而发生局部熔化。表面上原有的氧化铝薄膜亦被破坏。整个辐照区形成一个清晰的火山焰口结构。激光照射方向由下向上。主裂纹方向与拉伸方向大体垂直。断口剖面由激光照射区 A,热影响区 B 和正常组织区 C 三部分组成。热影响区相对于激光入射方向呈扇形分布。该二区域界面上存在大量的孔洞。热影响区与正常组织区的交界处有明显的二次裂纹存在。该二区断口呈现典型的纤维状特征。有大量韧窝存在,表明断口有明显的过载现象。

当试件承受的联合加载水平较低时,激光照射区温度较低,只形成半熔化状态。断口仍由三个区域组成,但热影响区加大。

当试件承受加载水平更低时,试件表面已无大面积的熔化区。整个断口呈纤维状特

近开始发生裂纹。然后裂纹沿此直径向两边发展,直至拉断为止(图版 I 照片 1)

由记录仪绘出的载荷随时间变化曲线表明,激光开始辐照时,载荷曲线开始下降。试件断裂时曲线急剧下降。由载荷曲线开始下降至急剧下降的时间为试件受联合加载作用时的断裂时间。图 2 为板宽 15 mm 试件的断裂时间随激光功率密度变化曲线。图上的虚线是由位移控制加载的实验曲线。实线是由载荷控制加载的实验曲线。可以看出,

征,并在激光照射区入射侧有少量的二次裂纹。

试样的开裂区均起源于受热区中面对激光照射一侧的表面上。裂纹顺着激光入射方向呈扇形向板内扩展。这一点已由断口表面的放射状外貌特征清楚地显示出来。在入射激光功率密度较高的情况下,开裂源点发生于合金的过烧组织上。这里合金成分发生变化,韧性降低,容易开裂。由显微照片观察,裂纹扩展是穿晶的。这是 LY12 铝合金具有良好延性的必然结果。

将试件辐照区断口边缘沿拉力方向切开,用传统的光学金相方法进行显微观察,发现在正常组织区内,金属晶粒沿冷变形方向拉长。冷凝后的熔化区内为柱状结晶结构。在热影响区中因受热面发生变化,原有的变形晶粒变为等轴晶粒,而且尺寸变大。用探针分析仪得到的吸收电子象看出,在热影响区,材料的化学成份与正常组织区的化学成份明显不同。

五、断裂机理分析

当试件在预拉伸应力为强度极限 σ_b 的 50% 时,受到强度很高的激光束照射,并假定热量沉积很快,温度超过熔点,试件很快被烧穿,但热量尚未传导到辐照区外,因而铝合金板仍可以被看作是低温的线性材料,便可以将问题简化为中心有圆孔的无限大板两边均匀受拉的情况。在这种情况下,在烧穿的孔边(假定为圆孔),最大应力为 $\frac{1}{2} \sigma_b \times 3 = 1.5\sigma_b$, 试件便在孔边被拉裂,导致破坏。

考虑合金板温度由于热传导而上升,并且材料性能随温度变化,可以利用热传导偏微分方程及弹性力学的有限元方法计算铝板的温度分布和应力分布,从而对联合加载的破坏过程进行分析描述。

考虑长宽厚为 $24 \times 15 \times 1.5\text{mm}^3$ 的铝板,在 y 方向两端有均匀的拉伸载荷。拉伸应力 $\sigma = 211\text{MPa}$ 、约为常温时拉伸强度的 45%。在板中心直径为 5mm 的圆形区域上受到垂直于板面的连续波 CO_2 激光束均匀而恒定的辐照。激光功率为 1200W。铝板表面的反射系数有 $\beta = 0.15, 0.5$ 和 0.85 三种。室温为 20°C 。

铝板被激光束辐照后,辐照区吸收能量,温度升高。用差分法解不定常热传导偏微分方程可以求到不同时间辐照区内外的温度分布。

平面应力场的计算采用有限元方法。取铝板的第一象限作为计算对象,并将它分割为 122 个有限单元。在 78 个节点上建立平衡方程:

$$[K]\{\delta\} = \{R_0\} + \{R_T\}$$

式中的 $[K]$ 为有限元刚度矩阵, $\{\delta\}$ 为节点的位移向量, $\{R_0\}$ 为拉伸载荷向量, $\{R_T\}$ 为加热引起的节点力向量,包括材料的线膨胀和材料性能随温度变化两项。先求出刚度矩阵,再求出各节点上的位移向量,便能求出各节点上的应变和应力。

我们采用 Tresca 最大剪切应力屈服准则作为材料进入屈服区的判据,即

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq \sigma_{0.2} \text{ (屈服极限)}$$

式中的 σ_1 和 σ_3 分别为节点上的最大主应力和最小主应力。同样,采用

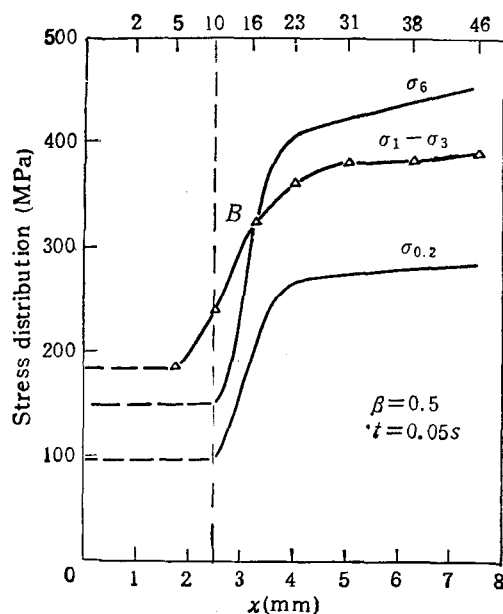


图 3

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq \sigma_b \text{ (强度极限)}$$

作为材料发生开裂的判据。

根据计算结果,有 $\sigma_y > \sigma_x$, 故取 $\sigma_y = \sigma_1$, $\sigma_x = \sigma_3$ 。比较同一半径的圆弧上各节点的应力,发现在 x 轴的节点上,有较大的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 值。可以认为, x 轴的横断截面是铝板破坏的危险断面。

可以绘出不同反射系数 β 和不同辐照时间 t 时 x 轴上的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 应力分布。图 3 为 $\beta = 0.5$, $t = 0.05s$ 时的分布图。三角形点是计算点, OA 为辐照区半径。图上并绘出各计算点的 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 分布曲线。可以看出,此时辐照区内 $\sigma_1 - \sigma_3$ 已经超过 σ_b , 材料遭受破坏。由虚线到 B 处, $\sigma_1 - \sigma_3 > \sigma_b$, 材料开裂。 B 点以后, $\sigma_b > \sigma_1 - \sigma_3 > \sigma_{0.2}$, 材料进入塑性状态。裂纹的端点,即 B 点,是从辐照区的边缘 A 处沿 x 轴向外发展的。激光功率密度越高,断裂速度越快。裂纹萌生的时间可以从 A 点到达塑性区的时间估计出来。

六、结 论

由上述实验和计算结果,可以对铝板的破坏过程描述如下: 铝板受激光照射后,辐照区温度升高,发生热膨胀,对辐照区外部材料产生热应力。在激光束斑与恒定拉力垂直的直径两端,拉应力与热应力的合应力最大。同时由于辐照区及其附近的材料温度升高,发生过热,过烧,甚至接近熔化状态,合金组织发生变化,宏观力学性能恶化,便在此处形成裂源,并向 x 轴两边发展,最后导致断裂。此外,辐照区的材料性能恶化,还能削弱试件的横截面,起到类似受拉力集中试件上圆孔的作用。

由此,可以得到简短的结论如下:

(1) 利用机械载荷和激光辐照的联合作用,可以在较低的激光功率密度条件下,取得

破坏金属板的效果。在我们的试验中,激光功率为万瓦级时,断裂时间为 1/10 秒级。

(2) 在条件相同的情况下,试件越宽,断裂时间越长。激光功率密度越高,断裂时间越短。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。

(3) 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上萌生,以后沿直径两边发展,直至完全断裂。

(4) 试件的断口由三个区域组成: 激光照射区, 热影响区和正常组织区。试样的开裂起源于受热区中面对激光照射的一侧。

(5) 开裂的原因有二: 其一, 由于当地材料温度升高, 强度下降。其二, 由于辐照区材料的屈服或熔化, 削弱了试件的横截面积, 引起应力集中。

作者感谢王震鸣, 王庆绥, 李端义, 吕文涛, 祝思恭等同志在本工作中给予的大力支持和有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] 陈海韬、夏生杰、李旭昌、韩金虎、姜在英、靳刚、受拉铝板对连续波 CO₂ 激光的热机械响应. 强激光与粒子束, 1992, 4, (1): 141

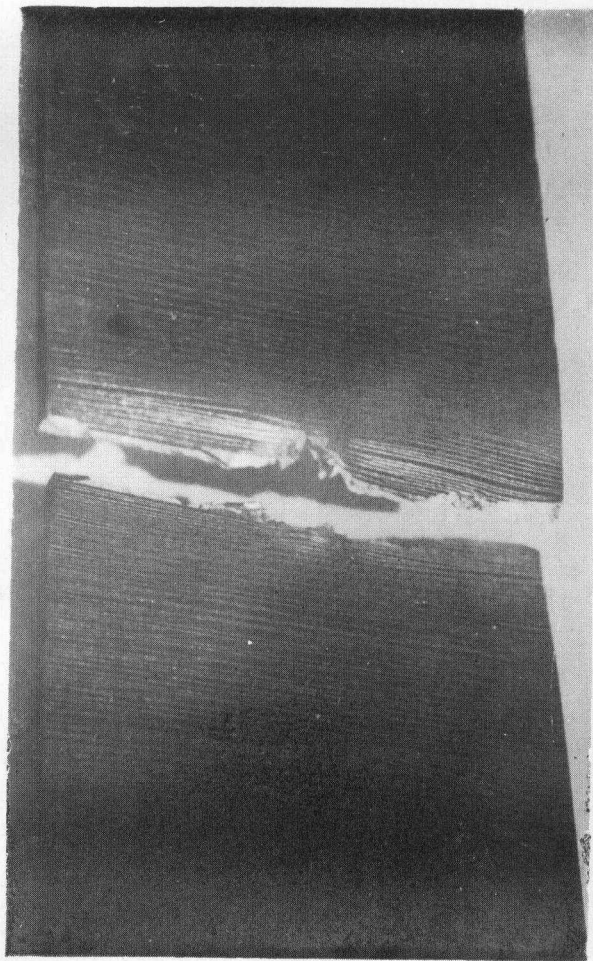
THE DAMAGE PROCESS OF A TENSILE ALUMINIUM PLATE UNDER THE INTENSE LASER RADIATION

Chen Haitao Xia Shengjie Li Xuchang Jiang Zaiying,
Han Jinhu and Wu Jian

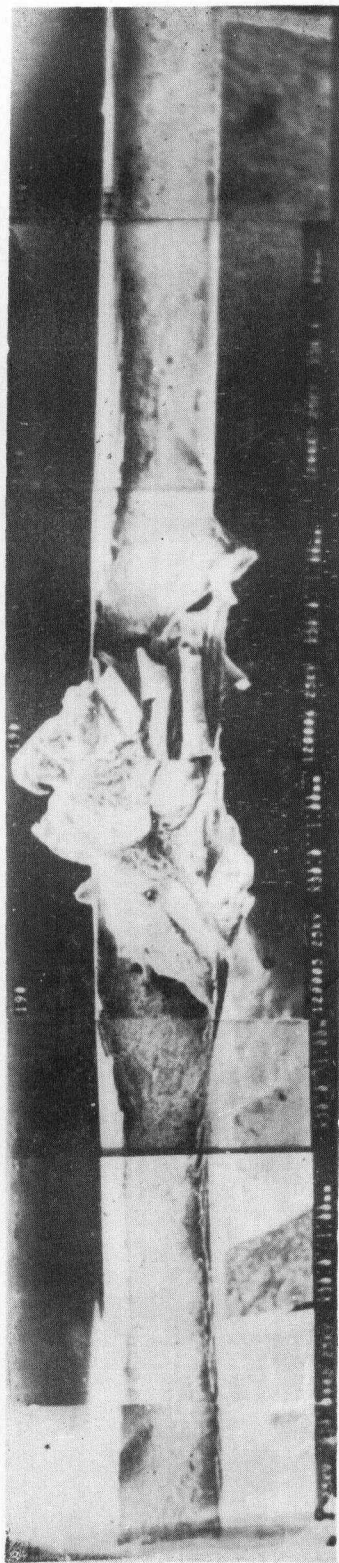
(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080)

Abstract The damage process, fracture observation and numerical simulation study of a tensile aluminium plate under the intense CO₂ laser radiation is presented. It is found that cracking initiates at the intersection of the laser radiation edge and a diameter which is perpendicular to the tension direction, and then, develops outward along this diameter until failure.

Key words laser damage mechanism, continuous wave CO₂ laser, thermal mechanical response



照片 1



照片 2