

强激光脉冲引起铝靶层裂的计算分析

贝新源 张志杰

提要 用弹塑性模型和流体模型,对强激光脉冲辐照铝靶引起层裂分别进行了计算,并作了比较。对弹塑性模型用不同的断裂判据进行了计算,断裂判据不同对结果的影响也作了比较。当固定激光功率密度与波形时,给出不产生层裂的厚度阈值。

1. 引言

我们用流体弹塑性模型(简称弹塑性模型)计算了高能激光辐照铝靶时的层裂效应^[1]。该文中曾与我们过去的结果^[2]作了比较,但是,过去用流体模型做的计算,所用的输入压力波形、断裂判据及有关参数与该文不同,所以不够确切。我们用^[1]中的有关参数,压力波形及损伤积累断裂判据^[3],对流体模型又重新作了计算,并与弹塑性模型的计算结果重新作了比较。

目前动载断裂判据有多种^[4],我们以弹塑性模型分别用动载断裂临界应力判据和损伤积累断裂判据作了计算。在相同条件下,铝靶受强激光辐照产生的破坏和层裂,用这两种断裂判据作计算结果有所不同。究竟那种断裂判据能较正确描述靶材的破坏和层裂,损伤区和破坏区的分布是否像数值计算结果那样,都迫切需要进行实验验证。

由文献^[1]中图4.2和图4.3看出,塑性波在铝靶内传播过程中衰减很大,经过0.5厘米几乎衰减掉60%。当铝靶增厚,塑性波到达自由表面时,其峰值将进一步减小。这样一来,使塑性波到达自由表面后向靶内反射的中心稀疏波减弱,于是中心稀疏波与塑性波后跟着的稀疏波相互作用,对靶材的拉伸作用也减小。当靶厚达到一定程度,使这种拉伸作用小到刚好不能拉断靶材,这时的靶厚称为厚度阈值。我们对文献^[1]中给出的激光脉宽和波形,对四种功率密度的情况分别算出了厚度阈值。我们以 $r_{小}$ (=0.5厘米)和 $r_{大}$ (不产生层裂的厚度)为寻查区间,利用优选法中的黄金分割法确定厚度阈值。 $r_{大}$ 是试算给出的不产生层裂的靶厚。令

$$r = r_{小} + \frac{\sqrt{5}-1}{2}(r_{大} - r_{小})$$

当靶厚取 r 时,产生层裂,则取 $r_{小}=r$,继续利用上式求 r 进行计算,若靶厚取 r 时,不产生层裂,则取 $r_{大}=r$,继续利用上式求 r 进行计算。当

$$r_{大} - r_{小} \leq 0.01 \text{厘米}$$

时结束计算。

2. 计算结果及讨论

利用[1]中的差分方程组,只要取 Lamé 系数 $\mu=0$,就得到流体模型的差分方程组。其它参数与[1]中取的相同。对激光功率密度 q° 为 5.0×10^9 瓦/厘米² 的情况进行了计算。计算的主要结果绘于图 1 和图 2 中。

图 1 表示用两种模型计算时,波头到达靶板自由表面时刻的应力波形。由图看出:弹塑性模型中的弹性前驱波以纵声速传播,比塑性波速和流体内激波速度大,所以它到达自由表面的时刻较流体模型中波头到达的时刻早了约 $0.09 \mu\text{s}$ 。其次,由图看出弹塑性模型的应力峰值比流体模型的压强峰值小,由于流体模型波后振荡较大,所以峰值的差 2.1 GPa ,仅可作量级上的参考。

图 2 表示两种模型都用损伤积累断裂判据得出的开始断裂时刻的波形。首先由图看出,弹塑性模型开始断裂的时刻比流体模型的开始断裂时刻约晚 $0.07 \mu\text{s}$,这是由于弹塑性模型的负压绝对值比流体模型小,需要较长的损伤积累时间。第一个断点从开始积累到断裂用 $0.09 \mu\text{s}$,而流体模型中第一个断点从积累到断裂只用了 $0.04 \mu\text{s}$ 。其次,弹塑性模型的第一崩片比流体模型的第一崩片厚,约厚 0.005 cm 。

图 3 绘出了以弹塑性模型分别用两种不同断裂判据计算得出的靶材的破坏情况,以及流体模型用损伤积累断裂判据计算得出的靶材的破坏情况。动载断裂临界应力取为 $Y_m = 0.987 \text{ GPa}$ ^[5] (该数据是 2024AI 的实验值)。

在[1]中我们提出了损伤区和破坏区的划分,这是利用损伤积累断裂判据的直接结果。该判据给出当拉伸应力大于 Hugoniot 弹性限时,材料发生损伤,并进行积累,当积累到一定程度材料发生断裂。由于弹塑性波在材料中传播时逐渐减弱,拉伸应力也逐渐衰减,最后弱到小于 Hugoniot 弹性限,则停止了损伤积累。这时在材料的相当大的区域内虽已开始损伤并积累到一定程度,但是,尚未发生断裂,这样的区域我们称为损伤区。在损伤区,材料产生了永久变形,即可能产生滑移或孪晶。由于损伤的积累程度

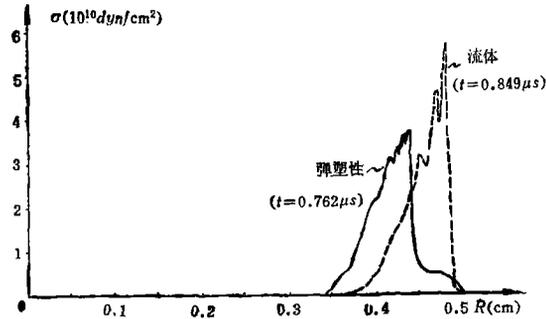


图 1 波头到达自由表面时的波形
实线—弹塑性模型 虚线—流体模型

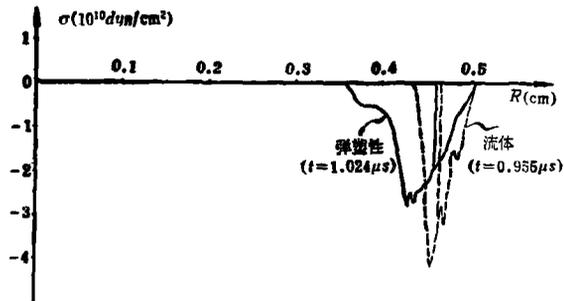


图 2 出现断裂时的波形

有所不同, 严重处可能产生微裂纹等, 可以预料, 在损伤区内材料的组织结构和力学性能将有较大的变化。

当材料的某处损伤积累到断裂时, 在此断裂点附近的各点也很快发生断裂, 这些断裂点常常连在一起, 发生逐点断裂, 这样的区域我们称为破坏区。例如, [1] 中给出对 5.0×10^9 瓦/厘米² 激光, 铝靶内三个连续的空间点发生断裂, 对 5.0×10^{10} 瓦/厘米² 的激光, 铝靶内五个连续的空间点发生了断裂, 在这样的破坏区内可以认为是发生了粉碎性破坏。

由图 3 看出, 用断裂临界应力判据得不出损伤区, 只得出五个痂片, 并且第一痂片比用损伤积累断裂判据计算的第一痂片约薄 0.024cm, 差一倍以上。可见用断裂临界应力判据比较适合材料的脆性断裂情况, 对绝大多数的金属合金材料, 用这种动态断裂判据, 不能够全面地反映材料的动态破坏情况。而用损伤积累断裂判据, 则能较全面地反映材料的动态破坏情况。目前强激光脉冲引起金属靶的层裂已在实验中观察到[6], 但是, 在损伤区内材料力学性能变化的情况尚需做实验研究。

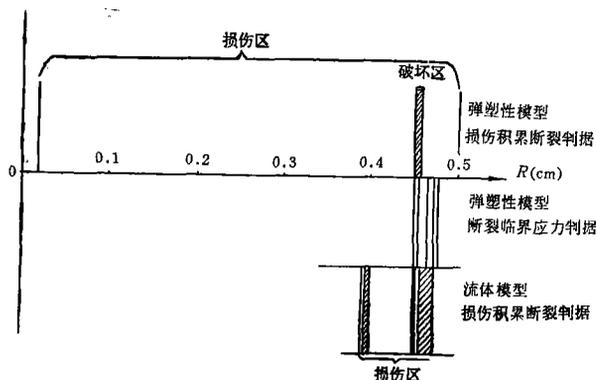


图 3 弹性模型, 损伤积累断裂判据与断裂临界应力判据结果的比较, 并附流体模型损伤积累断裂判据的结果

流体模型和弹塑性模型都用损伤积累断裂判据的计算结果也绘于图 3 中。由图看出流体模型破坏区比弹塑性模型大得多, 但损伤区却比后者小得多。流体模型的破坏区比弹塑性模型的结果约大 2 倍, 在破坏区损失了大量能量, 所以损伤区的范围仅是后者的四分之一左右。由此看来, 两者的差别较大, 可以预见, 对很强的激光两者的差别将大大减小, 由[1]中图4.15~4.18可看出, 其波形与流体模型的波形几乎无差别。但是, 当激光并不太强时, 如本文中所取的激光功率密度情况, 则两者的差别就很大, 此时, 显然应该采用弹塑性模型。

表 1 给出对应于四种激光功率密度的厚度阈值。当固定激光脉宽和波形时, 激光功率密度与厚度阈值间的关系曲线绘于图 4 中。

表 1

激光功率密度 (瓦/厘米 ²)	激光脉宽 (毫微秒)	厚度阈值 (厘米)
5.0×10^9	30	0.57
5.0×10^{10}	30	0.66
1.0×10^{11}	30	1.44
5.0×10^{11}	30	6.83

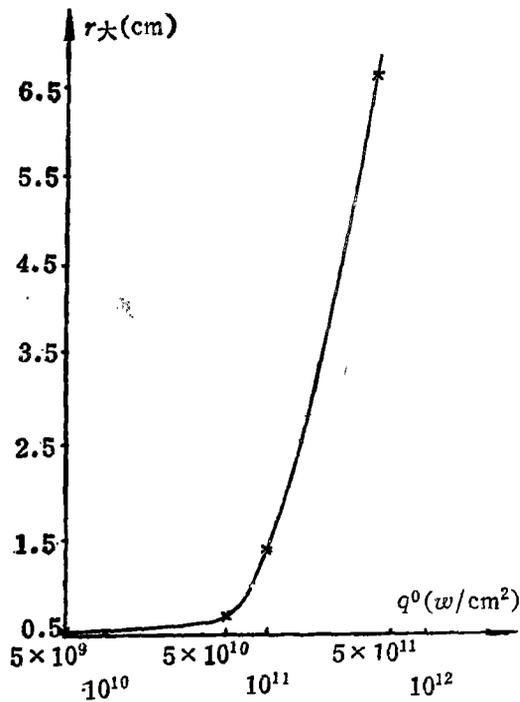


图 4 激光功率密度与厚度阈值关系曲线

参 考 文 献

- [1] 张志杰、贝新源：强激光脉冲引起铝的弹塑性流动及层裂的计算，《国防科技大学学报》，1981年第3期71页。
- [2] 5222任务组：高能激光辐照固体材料时热激波效应的计算，国防科技大学《工学学报》，1979年第3期71页。
- [3] F.R.Tuler; B.M.Butcher: "A Criterion for the Time Dependence of Dynamic Fracture", *Int.J.Fracture Mech.* **4** (1968), 431.
- [4] L.J.Cohen; H.M.Berkowitz: "Time—Dependent Fracture Criteria for 6061—T6 Aluminum Under Stress—Wave Loading in Uniaxial Strain", *Int.J.Fracture Mech.* **7** (1971), 183.
- [5] R.Kinslow: "High—Velocity Impact Phenomena", New York and London(1970), 463. J.W.Gehring, JR. "Engineering Considerations in Hypervelocity Impact".
- [6] J.A.Fox and D.N.Barr: *Appl. Phys. Lett.* **22**(1973), 594. [译文见“专题技术译丛—激光技术”，**6**, 国防科技大学情报资料研究室(1980), 115.] J.A.Fox, *Appl.Phys.Lett.* **24**(1974), 340. [译文见“专题技术译丛—激光技术”，**6**, 国防科技大学情报资料研究室(1980), 162.]

C.G.Hoffman, LA—6189—MS(1976). [译文见“专题技术译丛—激光技术”, 6, 国防科技大学情报资料研究室(1980), 179.]

A Calculation Analysis of the Spall Induced by Intense Laser Pulse in Aluminum Target

Bei Xin—yuan Zhang Zhi—jie

Abstract

The spall phenomena induced by intense laser radiation pulse in aluminum target have been calculated with the elastic—plastic model and the hydrodynamic model. The results are compared. For the elastic—plastic model the calculation is performed by using different fracture criterions, and the effects of them on the results are also compared. In this paper the thresholds of thickness at which the spalling is just prevented are obtained in the case when the laser power density and the wave shape are fixed.