文章编号：1000-5773(2005)01-0024-05

脉冲激光产生层裂的一维和二维数值计算*

谭福利[1,2]，李永池[1]，郭 扬[1]，曹结东[1]

(1. 中国科技大学力学与机械工程系，安徽合肥 230027；
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900)

摘要：通过简化的物理分析，将脉冲激光加载简化为一定的力学边界条件，考虑了材料内部的损伤演化，采用含损伤的热粘塑性本构模型模拟了铝合金材料的层裂。由于脉冲激光产生的压力脉冲较短，随后的卸载波将使得靶中传播的冲击波压力幅值下降。一维和二维计算得到的层裂片厚度与已有的实验数据符合很好。通过计算，得到了脉冲激光发生层裂时的应变率。

关键词：激光；层裂；热粘塑性本构；损伤
中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

强激光辐照于材料表面，将产生冲击波，在冲击波到达靶后的自由表面时会发生反射，反射的拉伸波与入射的冲击波相互作用，在靶内将产生拉应力，在一定的条件下会发生层裂。激光引起金属靶层裂的现象，近年来逐渐受到人们的重视，这主要是由于在脉冲强激光的辐照下，在材料中能够产生通常加载手段达不到的高应变率(10^7/s)，这为研究高应变率下材料性能提供了新的加载方式。

脉冲激光引起的层裂，这是一个复杂的物理和力学过程，国内和国外开展了一系列的探索性实验研究和数值分析[1~5]。与通常的加载方式相比，激光驱动产生的冲击几乎是研究高应变率下的动态损伤和动态断裂的唯一有效途径。1969年，Sandia国家实验室的Anderholm[1]首次观察到激光作用下在金属材料中的层裂现象。最早在公开刊物上报道激光层裂实验是在1973年[2]。我国学者对此研究较晚，中国科技大学的唐志平[3]、中国工程物理研究院的庄仕明等于1992年分别在铝、铜及钛合金中成功地进行了激光层裂实验。

近年来，人们开始用强激光来研究镀膜材料的膜层强度[6~8]，随着测试技术的改进，许多学者用VISAR来观测靶背面的自由面速度时程曲线，为深入了解激光引起的层裂现象提供了重要的实验数据。由于激光引起层裂对实验条件和靶材厚度要求较高，所以有必要从数值计算方面进行深入的研究，以了解激光产生的冲击波在材料中的传播和衰减规律。在本研究中，将采用含损伤的热粘塑性材料本构来研究靶中的冲击波传播和衰减规律。

2 含损伤的热粘塑性本构方程和状态方程

激光诱导的冲击波在金属靶内传播是热力耦合的，金属靶的塑性变形将转化为热，温度的升高将对材料有热软化的作用，同时也存在应变率效应。在本研究中实验[3]所用的铝，近似采用铝合金的本构方程和材料状态方程[9]，在文献[9]中，给出铝合金的本构是应力和全应变的关系，由于铝合金的弹性应变较小，故可以看作是屈服应力与等效塑性应变的关系。状态方程采用的是Murnaham形式的状态方

* **收稿日期**：2003-08-11；**修回日期**：2004-06-30
基金项目：国家自然科学基金项目(10272097)；国家863计划强辐射重点实验室基金(20010501)
作者简介：谭福利(1972—)，男，博士，助理研究员，主要从事激光与物质相互作用和冲击动力学方面的研究. E-mail：tfl@ustc.edu.cn

程。其主要公式和参数如下[9]：含损伤时率相关的屈服函数为

$$Y=Y_0(1-D)\varepsilon_p^m(1+A\varepsilon_p^n)\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p_0}}\right)^q\right]\cdot\left[1-B\left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^3\right] \tag{1}$$

式中：Y_0、m、n、A 和 q 为材料常数，其中 Y_0 具有应力量纲而其它皆为无量纲常数；ε_p 是等效塑性应变；$\dot{\varepsilon}_{p_0}$ 为参考应变率，取 $\dot{\varepsilon}_{p_0}=10^{-4}\ s^{-1}$；$B=7.5$ 为温度系数；$T_m=933$ K 为材料熔化温度；$T_r=300$ K 为参考温度；D 为材料的损伤。我们考虑了损伤对材料性能的影响，所采用的损伤演化方程为

$$\dot{D}=[aD+(1-D)\dot{N}_0V_0]\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0}-1\right)^\lambda-\frac{D\dot{V}}{V}\qquad D\leqslant D_c \tag{2}$$

式中：D_c 为极限损伤，当损伤达到此值即认为材料失去承载能力；V_0 为初始孔洞体积；V 为材料体积。

铝合金的状态方程为

$$p=\frac{k_0}{n}\left[\left(\frac{v_0}{v}\right)^n-1\right]=\frac{k_0}{n}\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n-1\right] \tag{3}$$

式中：p、v、ρ 分别为压力、比容和密度，v_0、ρ_0、k_0 和 n 为常数。

有关的材料参数为：$Y_0=846$ MPa，$m=0.38$，$n=0.72$，$A=-0.59$，$q=-0.046$，$k_0=71.47$ GPa，$n=3.204$，$\rho_0=2\,470\ kg/m^3$，$a=7.0\times10^5\ s^{-1}$，$\dot{N}_0V_0=0$，$\sigma_0=155.0$ MPa，$\lambda=3.2$，$D_c=0.25$。

3　强激光产生的压力脉冲近似公式

强激光辐照金属表面产生冲击波的过程是非常复杂的，涉及到等离子体的输运和激光维持的爆轰波。强激光产生的应力幅值与激光功率密度、等离子体特性等密切相关。R. J. Trainor 等给出了压力与激光功率密度间的经验公式，C. R. Phipps 等[10]将激光脉冲宽度、激光波长及靶材性质考虑在内，得到了激光产生的冲击波压力的大小，唐志平等[3]在 C. R. Phipps 等工作的基础上，假定激光产生的压力波形是矩形的，并且给出了峰值的大小。在本研究中，我们没有考虑复杂的冲击波形成过程，而是根据理论上的分析，给出了激光产生冲击波的峰值和脉冲波形。根据实验测得的压力波形，激光产生的冲击波在开始时有个快速上升的过程，即很快达到峰值压力，由于激光脉宽较窄，压力又很快衰减下来，这样，压力脉冲的波形应该是有一个快速上升的过程，然后按照指数或线性衰减，据此，当激光产生的等离子体的离子电荷量 Z 远远大于 1 时，由 Phipps 等人给出的靶面峰值压力公式和唐志平[3]的结果，我们给出激光产生的冲击波压力波形

$$p=p_0\exp(-t/t_0) \tag{4}$$

式中：$p_0=52.65[A^{7/16}(I/10^{12})^{3/4}]/(Z^{9/16}\lambda^{1/4}\tau_0^{1/8})$ (GPa)；t_0 为压力脉冲的脉宽，假设其为激光脉宽的两倍。式中 A 为靶材的原子量，I 为激光的功率密度(W/cm^2)，Z 为离子的电荷量，λ 为激光波长(μm)，τ_0 为激光脉宽(ns)。

在本研究中，采用的激光波长为 1.06 μm，激光的功率密度为 550 GW/cm^2，激光的脉宽为 4 ns。对于铝靶，可以估算出靶面的峰值压力为 27.6 MPa[3]。

4　数值计算结果和分析

4.1　一维计算结果分析

短脉冲强激光诱导的层裂一维计算程序是用差分方法编制的程序，材料本构采用含损伤的热粘塑性本构。靶片的厚度为 0.435 mm，脉冲激光产生的压力为 27.6 GPa。图 1 给出了脉冲激光产生的应力波在靶板内传播不同时刻的轴向应力分布图，可以看出，轴向应力在传播过程中是不断衰减的，这是由材料的粘塑性耗散以及由于压力脉宽较窄激波随后的卸载波追赶卸载产生的。数值计算得到的层裂片厚度为 41 μm，与文献[3]实验得到的层裂片厚度 40 μm 接近，发生层裂的时间为 78 ns。图 2 给出了发生层裂时刻的温度分布情况，在层裂位置由于温升软化和损伤软化的共同作用下，材料的塑性流动增大，进一步提高了材料的温度，可以看出，在层裂位置的温度比附近的其它区域高，层裂位置的温度达到 350 K 左右；在靶的表面由于载荷较大，塑性变形相对其它区域也大，所以靶表面的温度较高。图 3 给

出了层裂时刻的损伤分布，在层裂位置损伤最大，在损伤和温度的共同作用下，材料失效，发生层裂。图4给出了自由面的速度时程曲线，与平板撞击实验测得的自由面速度曲线相似。发生层裂时刻的应变率为 5.6×10^7，与文献[3]给出的应变率是相同的数量级(1.6×10^7)。

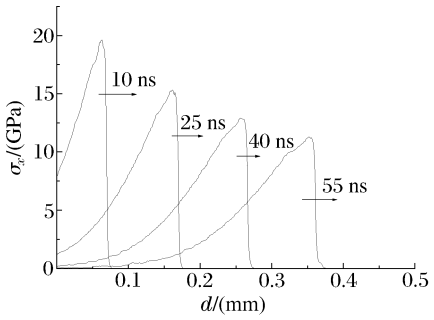


图 1 不同时刻轴向应力波波形图

Fig. 1 Distribution of axial stress at different time

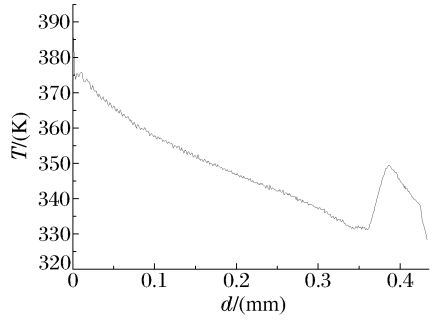


图 2 发生层裂时刻的温度空间分布

Fig. 2 Distribution of temperature at spallation time

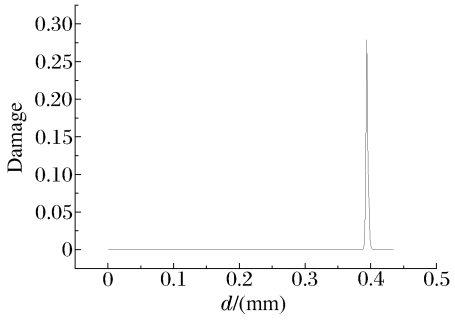


图 3 层裂时刻的损伤空间分布

Fig. 3 Distribution of damage at spallation time

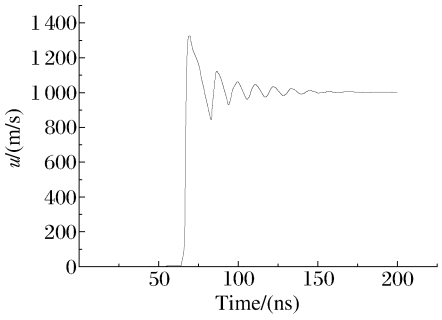


图 4 铝合金靶后自由面的速度时程曲线

Fig. 4 Velocity of free-surface varying with time

4.2 二维计算结果分析

采用二维有限元方法计算轴对称平板的层裂问题。板的直径为 2.0 mm，板厚 $h=0.435$ mm，在板的一侧布有直径为 1.4 mm 的面载荷，沿厚度方向剖分 60 等份，沿径向剖分 100 等份。将含损伤的热粘塑性材料本构和损伤演化方程嵌入到 HIP 程序内，计算得到的层裂片厚度为 43.5 μm，层裂时刻为 84.5 ns，与一维计算结果符合很好。图 5 给出了沿对称轴方向不同时刻的应力波剖面，可以看出应力幅值也是衰减的，和一维差分计算的结果相比，要衰减得多些，这是由于二维计算考虑了旁侧稀疏的影响；图6给出了层裂时刻对称轴上的温度分布，可以看出，分布趋势与一维计算的结果一致，但是温度要

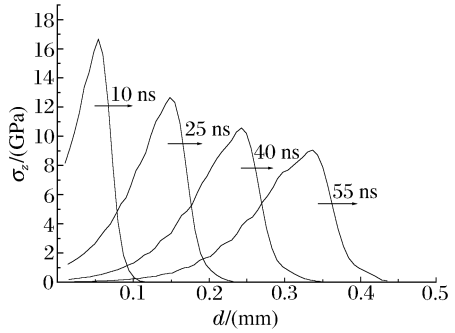


图 5 不同时刻的轴向应力波波形图(二维)

Fig. 5 Distribution of axial stress at different time(2D)

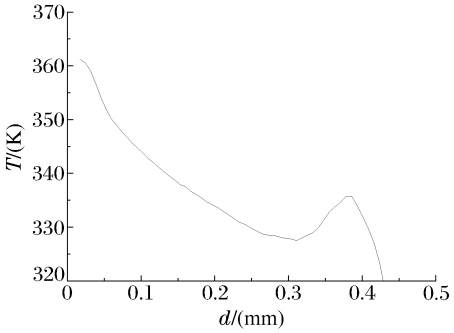


图 6 发生层裂时刻的温度空间分布(二维)

Fig. 6 Distribution of temperature at spallation time(2D)

稍低些;图 7 给出了层裂时刻对称轴上的损伤分布;图 8 给出了靶后自由面的速度时程曲线,计算得到的最大速度要比一维的低;图 9 给出了 84.5 ns 时的损伤分布云图;图 10 给出了层裂时刻的温度分布图像,可以看到靶表面的温度最高,这是由于靶表面的压力脉冲的持续时间较长,产生的塑性功累积量较大所致,温度比一维计算的稍小些,这是由于二维计算考虑了旁侧稀疏的影响;图 11 给出了铝靶层裂时刻的轴向应力分布图像;图 12 给出了 85 ns 时金属靶的层裂图像。

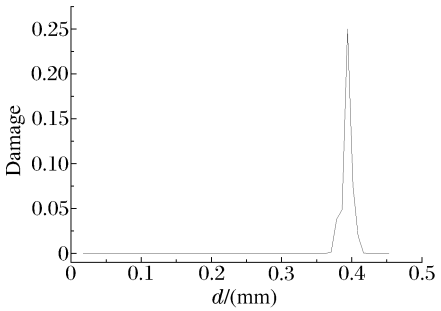


图 7　层裂时刻的损伤空间分布(二维)

Fig. 7　Distribution of damage at spallation time(2D)

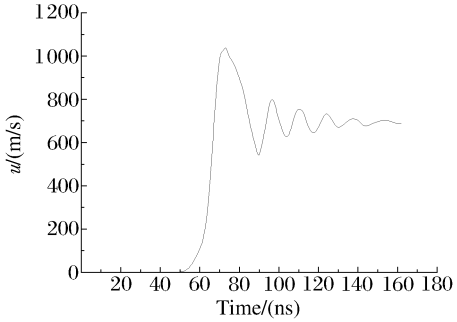


图 8　铝合金靶后自由面的速度时程曲线(二维)

Fig. 8　Velocity of free-surface varying with time(2D)



图 9　铝合金靶层裂时刻的损伤分布图像

Fig. 9　Image of damage distribution at spallation time



图 10　铝合金靶层裂时刻的温度分布图像

Fig. 10　Image of temperature distribution at spallation time



图 11　铝合金靶层裂时刻的轴向应力分布图像

Fig. 11　Image of axial stress distribution at spallation time



图 12　铝合金靶层裂时刻的图像

Fig. 12　Image of material spallation

5 结 束 语

从计算结果可以看出,应力波在材料内传播,由于材料粘塑性耗散和追赶卸载会有一定的衰减,一维和二维的计算结果给出了激光诱导材料靶发生层裂时的应力、温度和层裂图像。若能给出激光在材料靶表面产生的应力波波形,将能够很好地估算层裂片的厚度和发生层裂的时间以及各个时刻的有关量,这将是我们进一步深入研究的问题。

感谢王肖钧教授、胡秀章副教授在计算中给予的帮助和建议。

References:

[1] Anderholm N C. SC-TM-69-735,1969.

[2] Fox J A,Barr D N. Laser-Induced Shock Effects in Plexiglass and 6061-T6 Aluminum [J]. Appl Phys Lett,1973,22:594.

[3] Tang Z P,Li X Z,Zhou G Q,et al. The Experimental Study of Metal Spallation Induced by Laser [J]. Sciense Bulletin,1992,37:2100. (in Chinese)
唐志平,李欣增,周光泉,等. 激光引起金属靶层裂的实验研究 [J]. 科学通报,1992,37:2100.

[4] Eliezer S,Gilath I. Laser-Induced Spall in Metals:Experiment and Simulation [J]. J Appl Phys,1990,67(2):15.

[5] Rothman S D,Evans A M,Eagleton R T,et al. Material Properties Experiments Using the Awe High Power Laser,Helen [J]. Int J Impact Eng,1999,23:803－810.

[6] Sartori C,Oltra R,Dubief P. A Pulsed Laser Technique for an Evaluation of the Spall Resistance of Sputtered Oxide Films:Diagnostic by Interferometric Probing [J]. Surface and Coatings Technology,1998,106:251－261.

[7] Zhou M,Zhang Y K,Cai L,et al. Optical Interferometry Diagnostics in Laser-Induced Spallation on Film-Substrate Systems [J]. Surface and Coatings Technology,2003,165:146－153.

[8] Youtsos A G,Kiriakopoulos M,Timke Th. Experimental and Theoretical/Numerical Investigations of Thin Films Bonding Strength[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,1999,31:47－59.

[9] Guo Y. The Experimental and Theoretical Study on the Dynamic Properties of Al-Li Alloy [D]. Hefei:USTC,2003. (in Chinese)
郭 扬. 铝锂合金材料动态力学特性的实验和理论研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学,2003.

[10] Phipps C R. Impulse Coupling to Targets in Vacuum by KrF,HF,and CO_2 Single-Pulse Lasers [J]. J Appl Phys,1988,64(3):15.

One-Dimensional and Two-Dimensional Computation of Metal Spallation Induced by Laser

TAN Fu-Li[1,2],LI Yong-Chi[1],GUO Yang[1],CAO Jie-Dong[1]

(1. *Department of Mechanics and Mechanism Engineering,USTC,Hefei* 230027,*China*;
2. *Institute of Fluid Physics,CAEP,Mianyang* 621900,*China*)

Abstract:A thermo-visco-plastic constitutive relation for the metal,which can cover plastic hardening (softening) behaviors,thermo-softening behaviors and damage-softening behaviors,is adopted in the numerical computation for analyzing the metal spallation induced by laser. Computations are carried out in one-dimensional and two-dimensional cases,respectively. Attenuation of shock wave pressure is calculated,as well. The calculated spallation thickness is in good agreement with the experimental observations.

Key words:laser;spallation;thermo-visco-plastic relation;damage