

激光引爆炸药和冲击加载铝板的数值研究

张忠珍* 段祝平** 刘小苹** 孙承纬*

(*西南流体物理研究所, **中国科学院力学研究所)

摘要 本文用一维反应流体力学程序SSS^[1]模拟研究PETN炸药的激光引爆过程。分别讨论了激光波形、窗口厚度的影响,认为激光功率密度在 $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,其引爆机制主要为热机制;炸药受热膨胀是激光能量损耗的主要因素之一。此外,本文还讨论了激光引爆后,爆轰波与铝靶的相互作用。

关键词 激光 点火

一、问题的提出

自六十年代以来,国内外研究者利用脉冲激光成功地引爆了各种猛炸药,并研究了一些引爆装置^[2-9]。同时,曾提出各种引爆机制,但仍无法成功地描述激光的点火及其发展过程。借助激光可实现多点大面积瞬时引爆。激光引爆使研究大面积、高能率加载下材料的性能具有更可观的前景。

激光与猛炸药作用的过程,国内外从实验解释、数值计算上进行了大量的研究。其点火方式主要有以下几种:(1)加热紧贴在炸药表面的金属膜;(2)加热金属膜以发射高速飞片撞击炸药表面;(3)光直接作用在受限制和未受限制的炸药表面;(4)炸药掺杂等各种方法实现快速DDT过程。目前,较为人们广泛接受的点火机制主要有热点机制和冲击点火机制。在1989年的第九届国际爆轰会议上D. L. Paisley^[10]用260~308nm波长,功率密度 $10^8 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 的调Q激光,实现了无窗口的直接引爆,并提出了光子打断分子链机制。激光与物质的作用是一很复杂的过程。巨脉冲的激光效应有很多方面,如光压、光化学反应、电击穿和布里渊效应等。当激光功率不超过吉瓦量级时,热效应(炸药的加热、熔化和汽化)是主要的。激光与炸药的相互作用涉及激光光学参数、炸药参数及两者耦合关系。本文用一维拉格朗日流体力学程序SSS计算模拟激光点火过程,以及靶材料在炸药作用下的响应过程。考虑了不同激光波形和几何条件对点火的影响。分析影响点火的主要因素并将计算结果与现有的实验结果比较分析。

二、基本方程和参数

本文计算中采用流体弹塑性模型^[11];固态介质在屈服前满足线弹性本构关系,服从Hook定律,采用Von Mises屈服条件。对熔化采用Kennedy熔化模型(根据计算需要,对

1990年7月11日收到改稿。

比容 $V < V_0$ 做了修正)。用应力梯度判据处理层裂, 人为粘性采用 PIC 形式, 同时假定炸药服从 Arrhenius 定律。

由于激光脉冲强度不超过 GW 量级, 假设炸药对激光的吸收服从 Bouguer-Lambert-Beer 定律, 质量吸收系数 ν_m 为常数。激光脉冲宽度不超过几百纳秒, 在这期间炸药颗粒位置近似不变。假设炸药的光入射界面位于 R_0 , 平行光束自右方入射, 则比内能变化率(即 Q_L)为:

$$Q_L = (1 - A) \frac{\nu B(t)}{\rho_0} \exp[-\nu(R_0 - R)] \quad (1)$$

式中 Q_L 是炸药因吸收激光能量引起的比内能变化率; A 为激光在炸药表面的反射率; $B(t)$ 为入射激光功率($10\text{GW}/\text{cm}^2$); ν 为线吸收系数($1/\text{cm}$); ρ_0 为炸药初始密度(g/cm^3) 和 R 为 Euler 半径(cm)。

所有材料状态方程均采用 HOM 状态方程, PbN_6 的参数尚未公开发表, 本文所用参数是根据实验结果凑成, 产物状态方程采用 GAMA 状态方程^[13], 激光与炸药耦合在表 1 中给出。

表 1 材料热导率及其激光耦合参数

材 料	λ ($\text{Mbar} \cdot \text{cm}^2/\text{cm} \cdot \text{K} \cdot \text{s}$)	ν ($1/\text{cm}$)	A
铝	1×10^{-4}	5.58×10^3	0.80~ 0.98
铜	4×10^{-4}		
PETN	2.506×10^{-7}	134	0.6~ 0.8
PbN_6	1.674×10^{-7}	1000	0.6~ 0.8
PYREXGLASS	2.50×10^{-7}	0	0

三、激光引爆 PETN 炸药的计算

本文主要通过数值计算分析 PETN 炸药的激光点火过程、影响点火的因素, 并对激光引爆后爆轰波载荷下铝板的力学效应做了初步探讨。下面将根据讨论的问题介绍计算结果及分析。

1. 激光点火过程及影响点火的主要因素

近二、三十年来国内外学者进行了大量的激光点火的实验和理论研究, 一般认为当功率不大时点火机制主要是热机制, 在这种机制下激光波形、热传导是否有影响? 影响引爆的主要因素是什么? 热机制模型是否正确?

(1) 激光波形对点火的影响

本文计算了矩形 1、三角形 2、3、4 和高斯分布形 5 的激光脉冲点火。图 1 为这几种波形激光功率密度随时间的变化。图 2 为计算模型结构示意图。表 2 给出了这几种波形激光功率密度 $I(t)$, 反射系数 A 、线吸收系数 ν 、点火时间和点火时炸药吸收的激光能量 E_p^* 。所谓点火, 即指炸药发生热失控, 反应部分(汽态)的质量分数 λ 近似为 1。图 3 是三角形脉冲 2 ($t_c = 0.1\mu\text{s}$, t_c 为激光功率达到最大值的时间)点火时, 炸药表面单元压力、温度、比容和 Euler 坐标变化历史。图 4 为炸药点火前的空间温度场(其中虚线为反应前炸药吸收的能量空间分布)。图 5 给出了炸药表面单元在这几种激光波形点火时的温度历史。

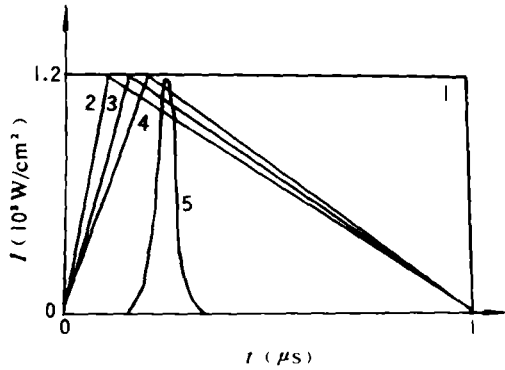


图 1 几种激光波形

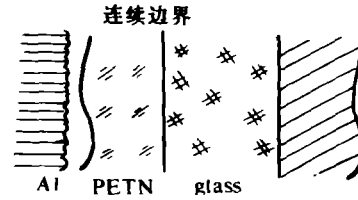


图 2 计算模型结构

表 2 矩形、三角形和高斯分布型激光点火时间及能量

波形	$I (10^8 \text{W/cm}^2)$	R	$v (1/\text{cm})$	$t_1 (\mu\text{s})$	$E_0^* (\text{J/cm}^2)$
1 矩形	$1.2t, t \leq 1\mu\text{s}$	0.8	134	0.041	0.984
2 三角形	$12t, t \leq 0.1\mu\text{s}$ $4(1-t)/3, 0.1 < t \leq 1\mu\text{s}$	0.8	134	0.091 ~ 0.099	0.994
3 三角形	$8t, t \leq 0.15\mu\text{s}$ $24(1-t)/17, 0.15 < t \leq 1\mu\text{s}$	0.8	134	0.099 ~ 0.119	0.950
4 三角形	$6t, t \leq 0.2\mu\text{s}$ $3(1-t)/2, 0.2 < t \leq 1\mu\text{s}$	0.8	134	0.119 ~ 0.129	0.998
5 高斯分布	$1.2 \exp[-800(t-0.25)^2],$ $t \leq 0.5\mu\text{s}$	0.6	134	0.249	1.974

从表2可以看出点火时间与激光功率密度的时间梯度成反比，而点火能量矩形、三角形差不多。高斯分布是其它的两倍。也就是说在100ns以前点火能量对激光波形不敏感，这与A·Volkova, A·D·Zinchenko^[3]等人的实验结果是一致的。计算中认为窗口是无限厚的。从图4以及紧接着炸药表面仅上升几度(点火前)，可以认为热传导没什么影响。孙承纬^[9]对考虑和不考虑热传导的计算结果做了比较，也发现热传导没什么影响。因此本文认为波形对引爆有影响，而热传导可以忽略不计。

(2) 激光照射在镀铝膜窗口上引爆PETN炸药
由于铝与激光的耦合效率高其线吸收系数较一般炸药高2~3个量级，因此人们在窗口

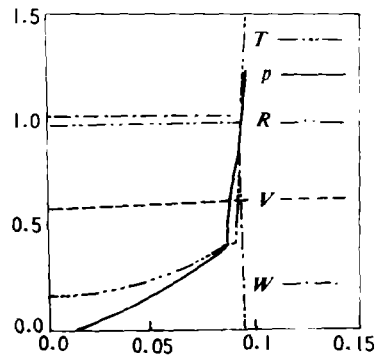


图 3 三角形脉冲 2 点火时炸药表面单元压力 $p (10^4 \text{bar})$ 、温度 $T (10^3 \text{K})$ 、比容 $V (\text{cm}^3/\text{g})$ 、质量比 W 和 Euler 坐标 $R (\text{cm})$ 变化历史

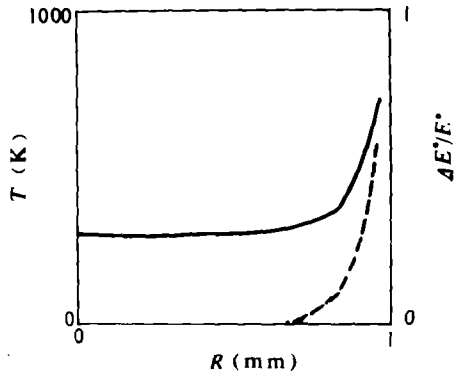


图 4 三角形脉冲 2 点火时炸药发生反应前空间温度场(虚线为吸收的激光能量)

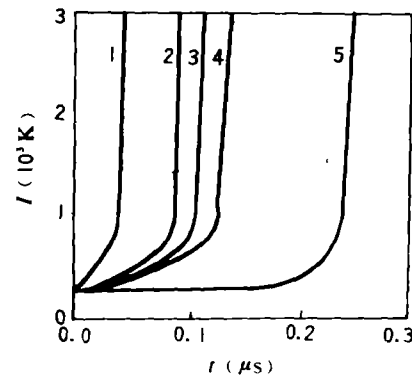


图 5 几种激光波形点火时表面单元温度历史

与炸药接触面上镀一层铝膜以降低引爆阈值。本文在窗口与炸药间加了层 $0.15 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 的铝膜。计算结果表明加铝膜后引爆功率密度阈值下降, 未加铝膜为 $10^7 \text{W}/\text{cm}^2$ 量级, 加铝膜后为 $10^6 \text{W}/\text{cm}^2$ 量级。计算时铝对激光反射率为 90%, 其线吸收系数见表 1。

(3) 窗口的影响

一般激光照射在未加窗口的炸药表面, 炸药吸收激光能量, 温度迅速上升, 表面薄层发生熔化, 汽化, 又因迅速膨胀而冷却, 不能发生化学反应或反应无法持续下去。对于猛炸药实验发现一般激光(超紫外除外)即使功率密度较高 ($5 \times 10^9 \text{W}/\text{cm}^2$ 以上)也无法引爆^[10]。本文的计算结果与实验是一致的。

实验上已成功地实现了有一定窗口限制的 PETN 引爆。本文在计算上实现了有窗口限制的 PETN 引爆。计算结果表明当窗口小于一定厚度时, 引爆阈值将随窗口厚度下降而上升。以三角形脉冲为例:

激光功率密度

$$\left(\frac{I}{10^8 \text{W}/\text{cm}^2}\right) = \begin{cases} 24 \left(\frac{t}{\mu\text{s}}\right), & t \leq 0.05 \mu\text{s} \\ \frac{24}{19} \left(1 - \frac{t}{\mu\text{s}}\right), & 0.05 < t \leq 1 \mu\text{s} \end{cases}$$

脉冲宽度为 $1 \mu\text{s}$ 的三角形激光脉冲, 照射在窗口厚度 0.02mm , 密度为 $1.74 \text{g}/\text{cm}^3$ 的 PETN 炸药上, 炸药吸收激光能量, 温度升高, 前几个单元发生慢化学反应, 由于比容的迅速膨胀, 温度急剧下降, 使反应无法持续下去, 其表面单元比容、温度和质量比 W (未反应炸药的质量分数) 变化历史如图 6 所示。当激光波形为矩形时则实现了引爆, 或把窗口厚度增加到 0.04mm 厚时也实现了引爆。把激光功率降到

$$\left(\frac{I}{10^8 \text{W}/\text{cm}^2}\right) = \begin{cases} 18 \left(\frac{t}{\mu\text{s}}\right), & t \leq 0.05 \mu\text{s} \\ \frac{18}{19} \left(\frac{t}{\mu\text{s}}\right), & 0.05 < t \leq 1 \mu\text{s} \end{cases}$$

而窗口厚度为 0.04mm , 则同样是前几个单元发生慢反应, 表面温度因膨胀而下降, 但第二

个单元温度却逐渐上升, 燃烧持续下去, 发展为爆轰。图 7 为前几个单元温度和质量比 W 分布, 可明显看出热失控始于第二个单元而不是表面单元。

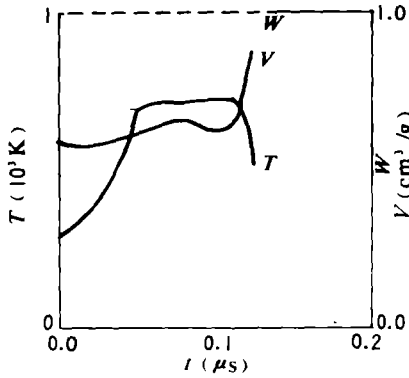


图 6 表面单元的温度、比容和质量比历史

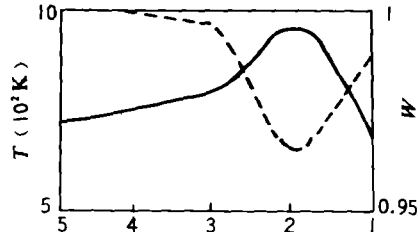


图 7 前几个单元的温度、质量比

从上面的计算结果可以看出当窗口厚度小于临界厚度(大于该厚度时引爆阈值不变)时, 随着窗口厚度的减少, 临界引爆功率密度增加, 且与激光脉冲波形有关。当激光功率密度接近临界值, 且窗口较薄, 引爆发生在炸药内部而不是表面。这是由于窗口较薄无法抑制住表面炸药的膨胀, 表面炸药能量损失而温度降低无法发生热失控。而里面的炸药吸收的激光能量逐渐积累, 窗口和外层炸药限制其膨胀, 炸药温度升高至热失控一点火发生。A·Volkova, A·D·Zinchenko^[3] 等人已在实验上观察到当窗口厚度小于 0.1 mm 时, 引爆能量阈值随窗口减少而增加, 如图 8 所示。

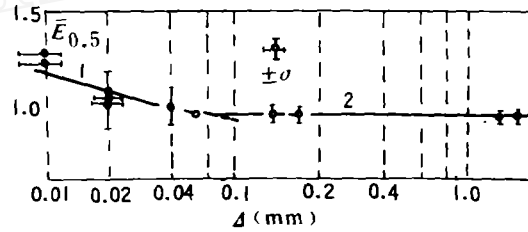


图 8 临界引爆能量与窗口厚度

(4) 激光与炸药耦合关系的影响

功率密度 $1.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 、脉冲宽度 $1 \mu\text{s}$ 的矩形脉冲穿过透明玻璃窗口辐照在炸药表面, 炸药表面的反射率为 60%, 炸药线吸收系数分别为 1340 cm^{-1} 、 134 cm^{-1} 和 38 cm^{-1} , 结果发现当 $\nu^{-1} > \Delta x$ (步长) 时, 点火时间随 ν 增加而减少, 这在功率密度接近临界值时会更加显著。

2. 靶板的力学效应

功率密度为

$$\left(\frac{I}{10^8 \text{ W/cm}^2} \right) = \begin{cases} 10 \left(\frac{t}{\mu\text{s}} \right), & t \geq 0.12 \mu\text{s} \\ \frac{15}{11} \left(1 - \frac{t}{\mu\text{s}} \right), & 0.12 < t \leq 1 \mu\text{s} \end{cases}$$

的三角形激光脉冲,通过 0.5mm 的透明玻璃窗口,自右方照射在 4mm 厚的 PETN 药柱上,紧贴着药柱为 4mm 厚的铝靶,窗口的右边界和靶板的左边界均为自由面。激光入射后,紧贴着玻璃窗口的 PETN 炸药吸收激光能量,温度迅速上升,炸药表层发生熔化,部分汽化。当温度升高到 700K 左右,炸药开始化学反应,反应波在药柱上发展为爆轰波,加载紧贴着药柱表面的铝靶。冲击波传到靶后界面(自由面)后反射一稀疏波,其与紧随冲击波后的稀疏波相交,使靶内部分区域进入负压状态,直至发生层裂,其原理见图 9,图中 t_0 为点火时刻, t_p 为层裂发生时刻。计算结果表明首次层裂在激光入射后 1.35~1.45 μ s 时发生,层裂厚度为 1.52mm。图 10 为 1.1 μ s 时靶内应力分布。

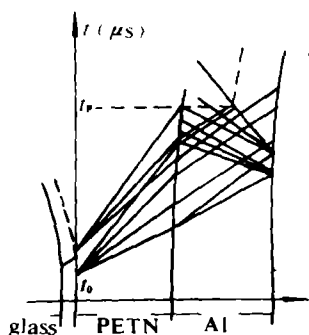


图 9 爆轰波、铝靶相互作用的 $x-t$ 图

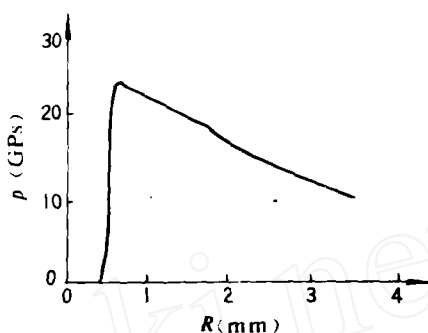


图 10 应力波在铝靶中的传播

本文还计算了 0.5mm 厚的 PbN_6 药膜加载在 4mm 厚的铝靶上,计算结果表明靶材料未发生层裂,这与实验结果是一致的^[13]。

3. 模型讨论

从本文的计算结果与其它研究者的实验和计算结果比较,可以看出本文的计算结果是可信的,计算模型及所选参数基本上是合理的。由计算结果与实验结果的一致性可以认为在本文所讨论的功率密度范围内,窗口或窗口镀膜的引爆机制均主要为热机制。激光波形对引爆是有影响的,受热膨胀是引爆能量损耗的主要因素,激光与炸药耦合效率在一定范围内影响着点火。实验发现大多数激光引爆都存在 DDT 过程,本文未考虑,因而计算结果只能是定性或半定量的。

四、几点结论

本文用一维拉格朗日反应流体力学程序 SSS 模拟激光引爆 PETN 过程,并对点火后爆轰波对铝靶的加载做了初步探讨,有如下几点看法:

1. 在本文所讨论的功率密度范围内($10^6 \sim 18^8 \text{W/cm}^2$)激光与 PETN 炸药作用机制主要为热机制;
2. 激光波形,激光与炸药耦合关系对点火有影响;
3. 在一定范围内点火阈值随窗口厚度增加而降低,无窗口无法实现点火。当窗口较薄,且激光功率密度接近临界值时点火发生在炸药内部而不是外表面。炸药受热膨胀是激光能量损耗的主要因素之一,热传导可以忽略不计;
4. 窗口与炸药间加上适当厚度铝膜可以降低引爆阈值。

参 考 文 献

- [1] 孙承纬, 私人通讯.
- [2] T. Boddington, AD-619542(1964).
- [3] 孙承纬, 激光引爆, p1~12, 北京工业学院技术资料(1978).
- [4] Robert J. Harrah, *J. Appl. Phys.*, 47(6), 2473~2482(1976).
- [5] A. A. Volkova, A. D. Zinchenko, I. V. Sania, V. I. Tarzhanov, and B. B. Tokarev, *Fizika Goreniya i Vzryva*, 13(5), 760~766(1977).
- [6] A. V. Chernai, *Fizika Goreniya i Vzryva*, 18(6), 48~53(1982).
- [7] Jia Baoren, et al., Proceeding of the International Symposium on Pyrotechnics and Explosive, Beijing China, 12~15 Oct., 1987, p49~56.
- [8] L. C. Yang, *Appl. Phys. Lett.*, 19(11), 473~475(1971).
- [9] 孙承纬, 爆炸与冲击, 8(1), 1~5(1988).
- [10] D. L. Paisley, Proceeding of the 9th Symposium (International) on Detonation, Vol. 1, 492~495(1989).
- [11] 孙承纬, 计算物理, 3(2), 142~154(1986).
- [12] C. L. Mader, Numerical Modeling of Detonation, University of California Press, (1979).
- [13] 段祝平等, 私人通讯.

NUMERICAL SIMULATIONS OF LASER IGNITION OF PETN AND INTERACTIONS OF EXPLOSION WAVES WITH Al TARGETS

* Zhang Zhongzheng, ** Duan Zhuping, Liu Xiaoping, and * Sun Chengwei
(*Southwest Institute of Fluid Physics, ** Institute of Mechanics, Academia Sinica)

ABSTRACT The Process of high explosive PETN ignited by a laser beam has been simulated with a 1-D code SSS. The effects of the thickness of transparent glass window and the shape of the laser pulse are discussed, respectively. The explosive expansion is one of the most important factors for energy loss during the ignition. The response of the aluminum plate driven by PETN explosive is also discussed.

KEY WORDS laser, ignition