

# 激光对金属背面含能材料的点火阈值

王伟平<sup>a,b</sup> 谭福利<sup>b</sup> 张可星<sup>b</sup> 吕百达<sup>a</sup>

(<sup>a</sup>四川大学物理系, 成都, 610064) (<sup>b</sup>中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳, 621900)

摘要: 实验研究了 Nd YAG 激光束通过辐照薄金属片, 而对其后紧贴的含能材料的点火阈值。分析了激光对含能材料点火的过程和机理, 并讨论了激光光斑尺寸、激光入射角度对点火的影响。

关键词: 激光 激光加热 含能材料 点火阈值

## Ignition threshold of metal covered energetic material by laser beam

Wang Weiping<sup>a,b</sup>, Tan Fuli<sup>b</sup>, Zhang Kexing<sup>b</sup>, L Baida<sup>a</sup>

(<sup>a</sup> Department of Physics, Sichuan University, Chengdu, 610064)

(<sup>b</sup> Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang, 621900)

**Abstract:** Based on experiments, the ignition threshold of metal covered energetic material by Nd YAG laser beam is investigated. Then the process and mechanism are analyzed. Finally, the effects of laser spot size and incident angle on ignition threshold are discussed.

**Key words:** laser laser heating energetic material ignition threshold

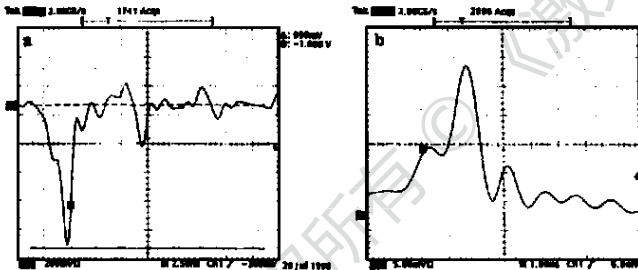


Fig. 3 a- the curve of the input current b- the curve of the optical pulse

由图 3a, 图 3b 可见, 利用电脉冲调制的方法, 在整形电脉冲的宽度较大时, 可以实现整形光脉冲的输出(图 3a 中横轴 2.5ns/格; 图 3b 中 1ns/格)。

### 3 总 结

在本文中, 我们推导了产生各种光脉冲所需的泵浦电脉冲解析式。

对于纳秒高斯、整形光脉冲, 对应的泵浦电流条件是: 直流偏置在阈值附近, 调制电流为相应的高斯、整形电脉冲; 但当光脉冲脉宽较窄时, 调制电流形状将发生偏离。同时, 我们利用整形电脉冲调制半导体激光器, 在实验上实现了整形光脉冲的输出。

### 参 考 文 献

- 1 Agrawal G P, Dutta N K. Semiconductor Lasers. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993: 275~ 292
- 2 Way W L J Lightwave Technol, 1987; LT5: 305~ 315
- 3 Kibar O. Appl Opt, 1998; 37: 6136~ 6139
- 4 Jian H, Lee W. Casperson, 1993; 25: 369~ 390

作者简介: 康 俊, 男, 1970 年 11 月出生。硕士。从事半导体激光器的研究工作。

收稿日期: 2000-03-17

# 引言

在强激光的效应研究中,常常涉及激光对金属/含能材料(火药、炸药等)结构点火的问题。已有数篇文章对激光辐照下带有金属壳的炸药点火机理进行了探讨<sup>[1,2]</sup>,认为激光加热金属壳,使得与其接触的炸药温度升高,发生化学反应,当温度达到某一临界值时,反应加骤,导致“热爆炸”。“热爆炸”的临界点就是温度-时间( $T-t$ )曲线上的拐点。激光熔穿壳体辐照内部含能材料,或激光直接辐照含能材料,含能材料的化学反应由3个基本阶段构成<sup>[3]</sup>,即光引发的化学反应、材料自身的慢化学反应(热积累过程)和材料的快速化学反应等3个基本过程,增加辐照样品的激光强度,可以缩短化学反应阶段中的热积累过程,即缩短含能材料的点火延迟时间。我们针对某些应用,实验研究了Nd:YAG激光束辐照薄金属片以及油漆面,而对其后紧贴的以硝化棉为主的某种混合型含能材料的点火阈值。含能材料未密封在壳内时,只发生燃烧现象。

## 1 理论分析

### 1.1 单层金属材料的激光加热

如图1所示,一束激光辐照在钢板上,光斑半径为 $R_s$ ,在实际应用中,一般考虑两种能量空间分布。

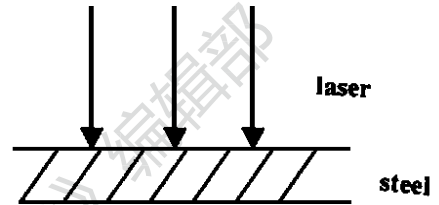


Fig. 1 Laser heating metal layer

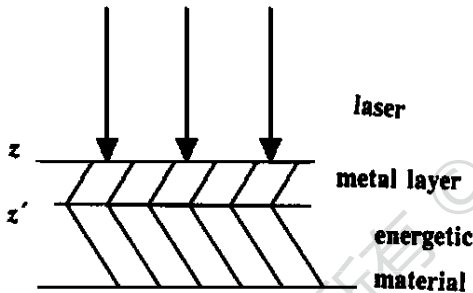


Fig. 2 Laser heating metal/energetic material

(1) 能量均匀分布在半径为 $R_s$ 的光斑上:

$$I(r) = \begin{cases} I_0 & r \leq R_s \\ 0 & r \geq R_s \end{cases} \quad (1)$$

(2) 能量为高斯分布,有两种形式:

$$I_1(r) = I_0 \exp(-r^2/R_s^2) \quad (2)$$

$$I_2(r) = I_0 \exp(-2r^2/R_s^2) \quad (3)$$

式中,  $R_{s2} = \sqrt{2}R_{s1}$

设钢板的厚度为 $l$ ,钢板表面对激光的反射率为 $R$ ,激光辐照时间内的热扩散长度为 $l_{th} = \sqrt{a\tau_p}$ , $a$ , $\tau_p$ 分别为材料的热扩散率、激光出光时间。若 $R_s \gg l_{th}$ ,且 $l \ll l_{th}$ ,可作为一维热薄板处理,考虑 $R_s > 10\text{mm}$ , $l < 1\text{mm}$ ,激光作用的时间2~4s,上述模型近似可用。钢板背面温度为:

$$T(l, t) = (1-R)I_0at/hl - (1-R)I_0l/6k \quad (4)$$

### 1.2 金属/含能材料双层结构的激光加热

如图2所示,在光斑尺寸足够大( $R_s \gg l_{th}$ ),只考虑沿 $z(z')$ 方向的热传导,并且假设金属和含能材料界面理想热接触,即热阻为0,并考虑含能材料为惰性加热阶段,即化学反应放热可忽略,则金属层和含能材料层的温度分别为<sup>[4]</sup>:

1.2.1 金属层温度

$$T_1(z, t) = \frac{AI_0}{kT_1} \left[ (4a_1t)^{1/2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \xi^{n!} \text{ierfc} \left[ \frac{|z - 2nh|}{(4a_1t)^{1/2}} \right] \right] \quad (5)$$

$$\xi = (kT_1 \sqrt{a_2} - kT_2 \sqrt{a_1}) / (kT_1 \sqrt{a_2} + kT_2 \sqrt{a_1})$$

式中, $kT_1, kT_2, a_1, a_2$ 分别是金属层和含能材料层的热导率和热扩散率。 $A, I_0, h$ 分别是金属

材料表面吸收率、激光强度和金属层厚度。

$$1.2.2 \text{ 含能材料层中的温度 } T_2(z', t) = [2T_s / (\Lambda + 1)] \sum_{n=0}^{\infty} \xi^n I_1(z^*) \quad (6)$$

式中,  $T_c = 2AI_0(a_2t)^{1/2} / (kT_2\sqrt{\pi})$ ,  $\Lambda = kT_1(a_2/a_1)^{1/2} / kT_2$

$$z^* = z' / (2\sqrt{a_2t}) + (2n+1)h / (2\sqrt{a_2t}), I_1(x) = \sqrt{\pi} \operatorname{erfc} x.$$

在上述模型中, 因含能材料的热扩散率比金属低约两个量级, 故考虑为无限厚。

### 1.3 含能材料的热点火

当含能材料层温度不断上升, 其化学反应放热项不可忽略, 此热源项可近似由 Arrhenius 定律得到:

$$q = \rho_2 Q f e^{-E/RT_2} \quad (7)$$

式中,  $\rho_2, Q, f, E, T_2, R$  分别为含能材料的密度、爆热、指前因子、活化能、温度以及气体常数。若化学反应生成的热量大于热传导损失的热量, 则该区域内的炸药化学反应就能够自持, 进而导致热点火。热点火的临界点就是  $T-t$  曲线上的拐点<sup>[2]</sup>。

## 2 实验装置

如图 3 所示, YAG 激光束通过一个聚焦透镜( $f = 2m$ ) 辐照在金属面上, 金属表面涂深色漆以增加吸收。调节透镜与样品之间的距离, 即可改变样品表面的光斑尺寸。分束片反射一部分光到光电二极管, 由示波器记录激光波形, 激光器内部可给出输出功率值。含能材料点火的时间由高速摄影记录并处理。实验总控系统用于对激光器出光、波形记录以及高速摄影记录的同步控制。实验前, 用靶斑测试仪对样品表面的光斑尺寸进行了精确测量。由波形记录和功率计读数可看到, 该激光器输出功率基本上不随时间变化, 波形接近矩形波。而靶斑测试仪对光强空间分布的测量表明, 其强度空间分布介于均匀分布和高斯分布之间, 接近均匀分布。

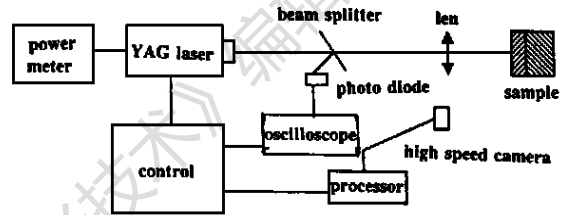


Fig. 3 Experimental setup

不同的含能材料, 因其物理性质不同, 对热的敏感度不一样, 热爆发点温度也有差异, 因而在其它条件不变的情况下, 激光通过辐照金属面对其点火的阈值也不一样。

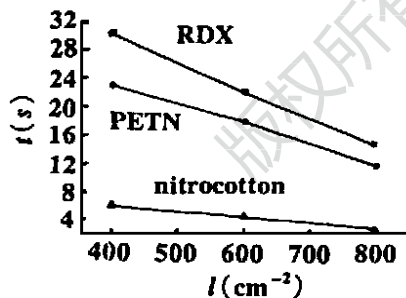


Fig. 4 Ignition time-laser intensity curve of energetic material

如图 4 所示, 在激光尺寸约 9~ 10mm, 钢金属片厚度 1mm 情况下, RDX 点火的阈值高于 PETN 的点火阈值, 而 PETN 的点火阈值又高于硝化棉混合物的点火阈值。其中 RDX, PETN 的点火是在密封金属壳内进行的。

### 3.2 点火与金属种类的关系

如图 5 所示, 激光光斑尺寸  $\varphi = 9 \sim 10\text{mm}$ , 金属层厚度  $h = 0.3\text{mm}$ , 金属材料表面的光洁度相同, 含能材料为硝化棉混合物。激光辐照不同金属材料, 对其背面含能材料的点火阈值不

同。这是由于不同金属材料,其热物理性质不同,对激光的热耦合效率也不同,在相同激光参数作用下,金属背面达到的温度不一样,或者是金属背面达到相同的温度,所要求的激光强度或激光辐照时间不一样。由图可看出,激光辐照涂漆面使含能材料点火的阈值最低,而钢面的阈值大于钛面的阈值。

### 3.3 点火与激光光斑尺寸及入射角的关系

我们分别用光斑尺寸  $\varphi_1 = 10\text{mm}$  的 YAG 激光和

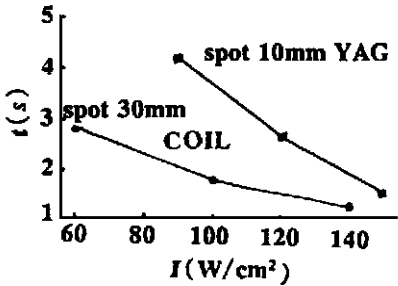


Fig. 6 Influence of spot size on ignition

光斑尺寸  $\varphi_2 = 35\text{mm}$  的氧碘化学激光(COIL)辐照样品的钛金属面(厚0.3mm),如图6所示,在相同激光强度(功率密度)下,前者的点火时间大于后者的点火时间(约为2倍),但从点火所需的总能量来看,后者远大于前者,这意味着,光斑太大则浪费能量。

图7示出了激光点火阈值与入射激光角度的关系,激光出光总时间控制在小于或等于6s,光斑尺寸设为  $\varphi 10\text{mm}$ ,改变入射角度,观察能使样品(涂漆硝化棉混合物)点火的最低激光强度。由图可见,在入射角度小于  $30^\circ$  时,入射角对点火阈值基本上没有影响;入射角在  $30^\circ \sim 45^\circ$  之间,有明显影响;入射角大于  $45^\circ$ ,有较大影响。影响原因可解释为:(1)入射角度  $\theta$  增大,光斑面积增加到  $1/\cos\theta$  倍,光强减小到  $\cos\theta$  倍,此时,必须增大入射激光强度,才能保证样品在一定时间内点火。(2)入射角度增大,材料表面对激光的反射率也增大,导致吸收率下降,增大了点火阈值。

## 4 总 结

实验研究了 Nd:YAG 激光束通过辐照薄金属片(钢、钛合金),而对其后紧贴的含能材料点火的阈值和规律。分析了激光辐照下金属/含能材料层状结构的温度变化以及含能材料点火的机理。实验得到了含能材料点火与激光光斑尺寸、激光入射角度、金属片种类、含能材料种类等的关系。

### 参 考 文 献

- 1 王伟平,张可星,刘绪发 *et al.* 强激光与粒子束,1998; 10(4):547
- 2 谭福利,刘绪发,孙承纬 *et al.* 激光热引爆金属/炸药密封装置数值模拟,1999年度激光的热和力学效应学术会议文集(卷A),合肥:中国科技大学,1999:32
- 3 沈瑞琪,叶迎花,戴实之 *et al.* 激光技术,1997; 21(4):193
- 4 Prokhov A M, Korov V I, Ursu I *et al.* Laser Heating of Metals. New York, 1990: 71

\* \* \*

作者简介:王伟平,男,1970年11月生。助理研究员。现从事激光技术与应用研究。

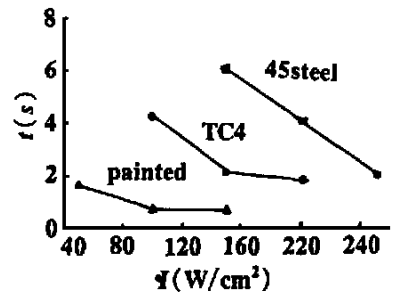


Fig. 5 Ignition time-laser intensity curve for different metal materials

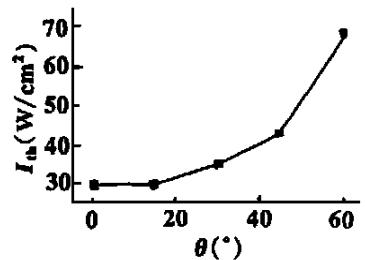


Fig. 7 Influence of incident angle on ignition