

激光引爆炸药的实验研究

孙承緯 王作妮 賈保仁 李玉蓮 陈旦鳴

本文系统介绍了激光引爆炸药的实验结果,如临界点火光能密度测定、感应期与光能密度的关系、燃烧——爆轰转变和爆轰瞬时形成这两种过程的分析、激光脉宽和光束直径的影响、炸药密度的影响等。在这些实验的基础上研制了两种激光雷管,进行了多分支光导束传输激光同步引爆多发雷管的实验,引爆时间的分散度与通常瞬发电雷管相同。

一、引言

五十年代许多作者用闪光灯等强光源,进行了引爆重金属迭氮化物的实验,对于这种引爆机制,大部分人认为是热机理。由于当时光源不够强,单晶泰安(PETN)表面虽发生强烈的分解和碎裂,但未点火^[1]。六十年代中期, Lewis用红宝石激光点燃高氯酸锆之类烟火剂^[2]。Бриш 等用钽玻璃激光引爆了低密度 PETN,并得出了临界光能密度的一些实验关系^{[3][4]}。1972年 Yang以高功率激光照射镀铝膜窗口产生冲击波引爆了 PETN, RDX 甚至 tetryl, 0.5 μ s 之内达到了高速爆轰^[5]。国内也做了一定工作^{[6][7]}。

高功率激光作用于炸药,使其在 10^{-8} 秒内达到上千度高温,产生一定的压力。金属膜及掺入物作用的图象更为复杂。这种高速高温过程可用来探讨炸药的高温分解动力学,探讨有化学反应的电介质与激光的相互作用。激光引爆是爆轰理论的新课题,也是新的实验手段。

激光引爆又是一种防静电、防射频、不产生电磁干扰的安全技术,在航天事业中已有应用,引爆猛炸药的激光-光纤系统已进入工程研制阶段^{[2][8]}。研制强激光武器也要考虑激光点爆炸药的问题,国外也在研究^{[9][10]}。

二、实验装置

Q 开关激光器的工作物质是 $\phi 20 \times 500$ (mm)钽玻璃棒,输出能量 10 J,变动腔长及充电参数可得到几种脉宽(60, 80, 200 ns)。用一台 GSJ 型高速扫描相机记录炸药点火及爆轰过程。激光光束分出若干支用以显示激光零时讯号,并监测激光能量及波形等。用一台经适当改装的 JJS 型测角仪监视炸药样品位置。由于钽玻璃激光是红外光,所以普通底片对它不能感光。把分出的一支激光束聚焦,然后照射在一靶上,它发出的强烈可见光表示零时讯号(汽化弛豫时间计算值为 10^{-9} 秒量级)。引爆炸药的激光能量用衰减片调节,由碳头量热计测量。自制的灵敏量热计可测 3×10^{-4} J 的激光脉冲能量。本文所指光能密度和功率密度均指

其平均数。

炸药样品壳体侧面有一条宽 2 mm 左右的缝，其上镶以透明有机玻璃片，用以光测爆轰建立过程。样品的进光窗口可用有机玻璃或光学玻璃制作。大部分实验用这种透明窗口。有些实验则使用在接触炸药的面上镀以金属膜的窗口，或使用专门设计的直管形和锥型光导窗口。

三、炸药临界点火参数

临界点火是指实验中全部炸药样品点火的临界状况，根据有限实验得到的几种炸药临界点火的光能密度 I_{cr} 及感应期 $t_{i,cr}$ 的数据列于表 1。实验时的激光功率为 10^4 MW 级。掺铅 PETN 是掺有 0.5% (重量比) 细铅粉的 PETN，导电药是掺有 3% 细石墨粉的 PbN_6 。掺杂混药采用超声振荡工艺。除注明外，装药压力均为 500 kg/cm^2 ，激光束不聚焦。

表 1 炸药临界点火参数

炸药名称	PbN_6	导电药	D-S共晶药	斯蒂芬酸铅	DDNP	酸性乙炔银
I_{cr} (J/cm^2)	0.11	0.06	0.03	~0.4	~0.8	0.03
$t_{i,cr}$ (μs)	0.39	0.47	0.75	-	-	-

炸药名称	PETN*	掺铅 PETN** ($\rho = 0.76 \text{ g/cm}^3$)	RDX	tetryl	662	二号炸药
I_{cr} (J/cm^2)	8-11	5.0-5.5	8-26	30-70	10-20	20-35
$t_{i,cr}$ (μs)	40	1.12	-	-	-	28

* 光束聚焦时 $I_{cr} = 4-5 \text{ J/cm}^2$ ** 装药压力 108 kg/cm^2

Sztankay 测得 $PVAPbN_6$ 的 $I_{cr} \sim 0.1 \text{ J/cm}^2$ [11]，Mavis 和 Wright 测得密度为 1.0, 1.2, 1.4 和 1.6 g/cm^3 的 PETN 的阈值分别为 5, 7, 13 和 15 J/cm^2 [8]。Barbarisi 测出 PETN 样品的引爆阈值能量为 $0.02-0.03 \text{ J}$ [8]，我们曾在类似条件下用 300 MW 钹玻璃激光实验， 0.03 J 时十发 PETN 样品全部点火， 0.02 J 时四发样品有三发点火。

感应期 t_i 是指激光作用至炸药发生闪光的时间。光能密度 I 增高， t_i 变短，它们的关系基本上符合热爆炸的对数律(图 1, 2)。这对起爆药是十分明显的。至于掺铅 PETN，因铅粒比 PETN 晶粒小得多，其点火过程类似于热点对均质炸药的作用，所以也可用热爆炸描述。

根据热爆炸理论，图 1, 2 中直线的斜率是 $\frac{\alpha E}{\rho C R T_{cr}^2}$ ，其中 α 、 E 、 ρ 、 C 、 R 、 T_{cr} 分别是炸药的激光吸收系数、活化能、装药密度、比热、气体常数及临界点火时炸药表面的加热温度 [6]。 PbN_6 的 $\alpha \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ [11]，由此算出 $T_{cr} \sim 1145^\circ \text{ K}$ 。对于掺铅 PETN，初步测定， $\alpha \sim 30 \text{ cm}^{-1}$ ，再用纯 PETN 的参数算出 $T_{cr} \sim 2624^\circ \text{ K}$ ，(铅粒本身强烈气化，其沸点是

4650°K)。根据 Grüneisen 状态方程, 这时的热压强约 9.4 kbar。

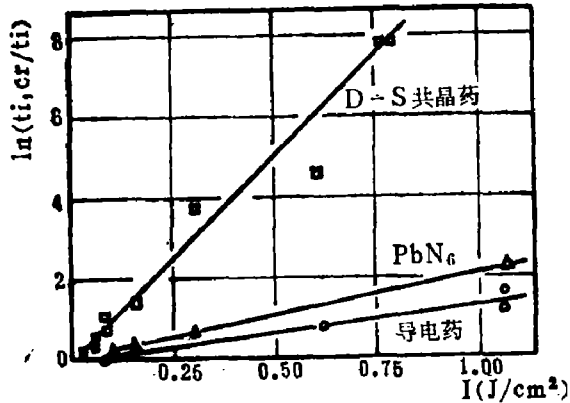


图1 三种起爆药的 $t_i \sim I$ 关系

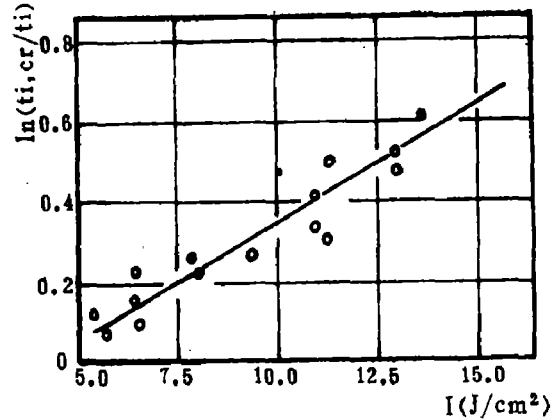


图2 掺铅 PETN $t_i \sim I$ 关系

四、PETN 装药中爆轰建立过程

实验观察到的爆轰建立过程, 有两种基本类型。一种是爆燃——爆轰转变 (DDT) 过程, 感应期后炸药开始层流燃烧, 几微秒后发展为对流燃烧, 然后转入低速爆轰 ($D_l = 2-3 \text{ mm}/\mu\text{s}$)。如果壳体保障产物压力持续增长, 低速爆轰就突然跃变为稳态高速爆轰 ($D_h = 7-8 \text{ mm}/\mu\text{s}$)。在图3照片上可看到从这转变点朝产物中传播的波。一般认为这是回爆波, 但 Дреман 认为是弯曲波阵面侧面照相造成的假象^[12]。图3与电热丝引起 PETN 的 DDT 过程类似^[13], 只是因激光加热温度较高, 过程发展要快得多。高密度装药多易出现这类过程, 典型的结果见表2和3, 其装药压力 $1000 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 直径 6 mm 。

表2 低速爆轰实验 (光能密度 $\sim 100 \text{ J}/\text{cm}^2$, 壁厚 5 mm 黄铜壳体, 未发展为高速爆轰)

序号	1	2	3	4	5	平均值
$t_i (\mu\text{s})$	7.6	25.6	16.6	14.8	15.5	16.0
$D_l (\text{mm}/\mu\text{s})$	2.00	2.64	2.11	2.95	2.75	2.49

表3 DDT 过程实验 (光能密度 $24 \text{ J}/\text{cm}^2$ 壁厚 15 mm 钢壳体)

序号	1	2	3	4	平均值
$t_i (\mu\text{s})$	39.8	32	30	28	32.5
$D_l (\text{mm}/\mu\text{s})$	2.61	2.00	2.50	2.20	2.33
$D_h (\text{mm}/\mu\text{s})$	7.71	7.60	7.40	7.90	7.60
转变距离 (mm)	15.5	20.0	12.5	18.7	16.8

另一种是爆轰瞬时形成过程，炸药经数微秒感应期和不长的爆燃或低速爆轰段后突变为高速爆轰。例如有一发参数与表 2 相同的样品，实验结果却是 $t_i = 2.94\mu s$, $D_i = 2.64 \text{ mm}/\mu s$, $D_k = 7.34 \text{ mm}/\mu s$, 转变距离约 2.8mm。总的说来，激光功率密度高、装药密度低时易出现这种过程。这时激光作用于炸药产生的压力以及装药的不均匀性有重要作用，不再是单纯热爆炸了。

实现爆轰的快速建立，还有两个方法。其一是 Yang 的镀膜窗口实验^[5]，其铅膜厚 1000 Å。在激光作用下产生冲击波的峰值压力为 14kbar，膜本身又有一定透明性，因而这是一种热和冲击的联合作用。Yang 使用这种窗口使 PETN、RDX (装药压力小于 350kg/cm²) 在 0.5μs 左右转变为高速爆轰。但他也发现用透明窗口，PETN 样品同样有这种结果^[14]。我们用镀膜窗口及低密度 PETN 样品实验，临界点火能量比透明窗口下降了一半。可以设想，若能在炸药颗粒上镀金属膜，激光加热及产生压力将更为有效。其二是在表层炸药中掺入少量的锆、铂黑之类微粒，它们在激光作用下迅速强烈气化，有效地提高了炸药的温度和压力。实验表明，锆粒直径为 1-2μ 时，对引炸最有利。各种方法的比较列于表 4，还没有最优的技术途径。



图 3 PETN 的 DDT 过程



图 4 掺锆 PETN 的爆轰建立过程

表 4 几种样品爆轰建立过程的比较

炸 药 样 品	镀膜窗口 (Yang ^{[5][14]})	透明窗口 掺锆PETN	镀膜窗口 掺锆PETN	透明窗口 DDT 过程 (表 3 平均值)
表层装药密度 (g/cm ³)	1.64	0.76	0.76	1.68
激光能密度 (J/cm ²)	12	7	4.8	24
激光能量 (J)	1.0	0.117	0.085	3
爆轰建立时间(μs)	0.43	2.60	2.60	39.7
转变距离(mm)	2.75	6.70	6.70	16.8

五、激光参数和装药参数的影响

1. 激光器运行方式

自由振荡方式的激光是一系列的小脉冲，总持续时间为 10⁻⁴-10⁻³秒。这种激光引爆

炸药的 I_{cr} 值比前述 Q 开关方式大得多。例如 PbN_6 的 I_{cr} 变为 $2.2-4.6 J/cm^2$, $\rho = 1.0$ 及 $1.71 g/cm^3$ 的 PETN 的 I_{cr} 分别变为 $336 J/cm^2$ 以上及 $15-30 J/cm^2$ 。这些都比热爆炸理论估算大很多。事实上炸药是在 100 多微秒后爆炸的, 绝大部分光能对引爆没有贡献。上面所述的是全部光能, 修正后没这么大。用长脉冲光引炸 PbN_6 的实验数据较多, 如北京工业学院 ($200\mu s$ 激光, $I_{cr} \sim 1.07 J/cm^2$)^[15], McAuslan ($1\mu s$ 放电闪光, $I_{cr} \sim 0.334 J/cm^2$)^[16], Eggert ($1.6ms$ 闪光灯 $I_{cr} \sim 2.0 J/cm^2$)^[17], Menichelli ($0.45-1.50 ms$ 激光, $I_{cr} \sim 3.26-4.42 J/cm^2$)^[18]。本文所述实验是使用 $1.1-2.0ms$ 的钹玻璃激光。从对比可知, 闪光时间越长; 光能的无效部分越多, 总光能则显得越大。在自由振荡激光作用下, 高密度的 PETN 比低密度的易于点火, 这同它们在高功率激光作用下的性态恰恰相反。Barbarisi 用 $0.9ms$ 红宝石激光引爆 PETN 样品 (装药压力 $525 kg/cm^2$)。在 $I_{cr} \sim 25-31 J/cm^2$ 时, 他也有类似的想法^[19]。

对于不同脉宽的 Q 开关激光 ($35-200ns$), 理论和实验都表明 PbN_6 的 I_{cr} 值没有多大变化, 这主要由于实验误差较大, 没有反映出它的变化。虽然上面讨论的临界点火参数只是指光能密度, 实际上存在功率密度的限制, 要使 PbN_6 和 PETN 点火, 光功率密度不能低于 $0.2 MW/cm^2$ ^[20]。红宝石和钹玻璃激光的波长分别为 6943 \AA 和 1.06μ , 在这范围中炸药的反射系数或吸收系数都变化不大^[21], 引爆实验的 I_{cr} 等参数也基本相同^{[18][19]}。

2. 激光束直径 ϕ

炸药中激光加热过程比热传导、化学反应和力学运动快得多, 被加热部分可看作为初始热核, 其直径与温度 (即同光能密度) 必有一定的临界关系。 PbN_6 的这种实验曲线 (图 5) 形状同 Бриш 的相对单位曲线相仿^[4]。 ϕ 小于 $0.5 mm$ (Бриш 认为自 $0.1mm$) 后 I_{cr} 急剧上升, 这不仅是热传导损失, 更重要是稀疏波导致降温的结果。图中表明, $\phi \sim 0.65 mm$ 处引爆能量为最小。

激光束聚焦时, 焦面上呈远场图案, 光强分布不均匀, 中间部分比平均光能密度高得多, 因此实验中聚焦光束得到的 I_{cr} 值比不聚焦时低, 如表 1 中泰安之例。

3. 装药密度或压力

在光强的不同范围内, 装药密度 ρ (或压力 p) 与 I_{cr} 的关系有不同的性态:

i 低功率密度激光束 ($10 MW/cm^2$ 量级以下, 如自由振荡或多脉冲的 Q 开关激光), ρ 增大则 I_{cr} 变小。如本节第一部分叙述的结果, $\rho = 1g/cm^3$ 的 PETN 样品在 $I = 336 J/cm^2$ 自由振荡激光作用下, 25 发只有 4 发点火。对于 $\rho = 1.71g/cm^3$ 的 PETN, I 降为 $15-30 J/cm^2$, 7 发样品全部点火。Barbarisi 根据自由振荡红宝石激光的实验, 发现“装药压力增大, 大

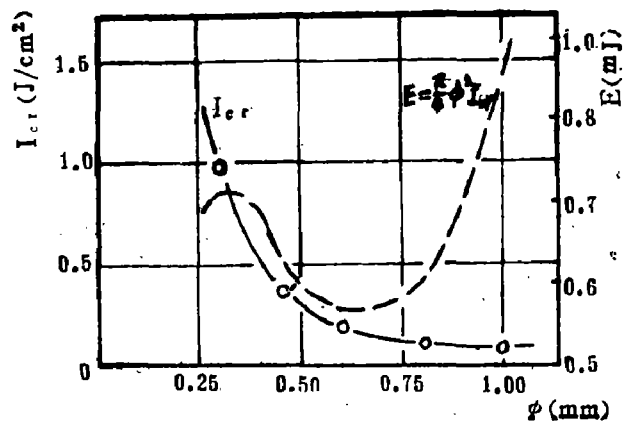


图 5 氮化铅 (PbN_6) 的 $I_{cr} \sim \phi$ 关系

大提高了炸药的感度。”^[19]

ii 高功率密度激光束 (10^2 MW/cm^2 量级以上, 如聚焦的 Q 开关激光束), ρ 增大则 I_{cr} 变大。PETN 样品的装药压力由 108 kg/cm^2 增大为 1161 kg/cm^2 , 则临界引爆光能由 0.38 J 增大为 3.8 J 。掺铝 PETN 装药压力和 I_{cr} 的关系见图 6, 这里装药密度 ρ 的刻度是根据实验换算的。Mavis 和 Wright^[8], Yang^[14] 的数据也在同一图上。Бриш 在装药压力 $10 - 50 \text{ kg/cm}^2$ 范围发现 I_{cr} 线性增长^[4]。由于测量激光参数的困难, 所以实验数据很难完全一致, 但趋势是相仿的。Yang 还发现装药压力在 350 kg/cm^2 以上的样品只发生 DDT 过程, 在这压力以下的样品才有爆轰瞬时形成的可能^[14]。我们的实验, 仅在样品的装药压力为 108 kg/cm^2 时才是直接爆轰的, 压力在 500 kg/cm^2 以上的样品都出现感应期 $40 \mu\text{s}$ 左右的 DDT 过程。

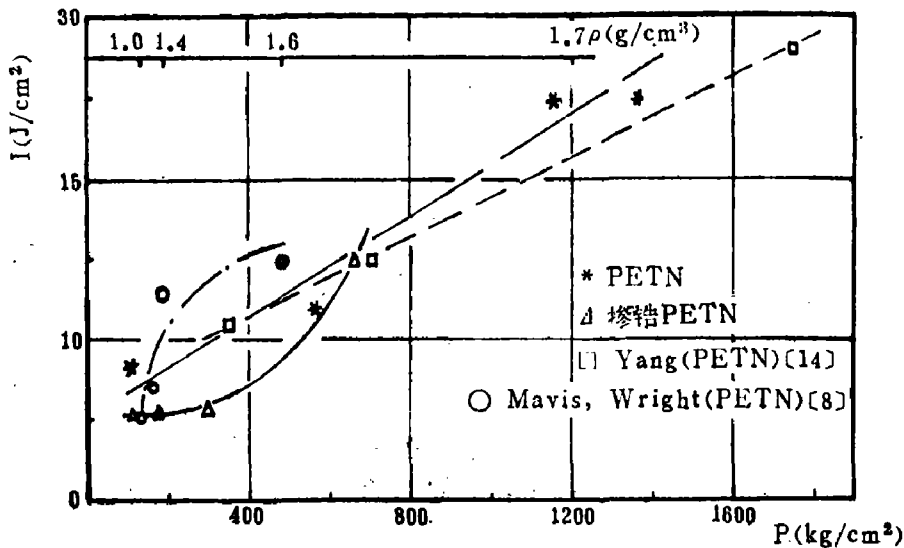


图 6 高功率激光作用下 I_{cr} 与装药压力 P 的关系

上述不同光强范围内, 激光引爆的机理可能有所不同。低功率激光作用于炸药, 基本上只是加热, 高功率激光则可能是热和冲击的联合作用。本文前面估算 PETN 中热压强为 9.4 kbar (Бриш 估计为 10^4 kg/cm^2 量级^[4]), 已达到其冲击引爆阈值^[5]。若假设不同光强下炸药的激光吸收系数与其密度有不同的关系 (如发生相变的情形), 由热爆炸理论可得到 $I_{cr} \sim \rho$ 关系的另一种解释^[20]。

参加实验工作的有刘绪发、张可星、唐贤忠、宋海法、廉义德等同志。工作中得到张寿齐同志指导帮助, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] F. P. Bowden, A. D. Yoffe, Fast Reactions in Solids, Butterworths Scientific Publications, London (1958)
- [2] R. Pay, Technology Week, vol. 19, No. 20, 33-38 (1966)

- [3] А.А.Бриш, И.А.Галеев, Б.Н.Зайцев, ФГВ, том.2, вып.3, 132-33 (1966)
- [4] А.А.Бриш и др, ФГВ том.5, вып.4, 475-80(1969)
- [5] L. C. Yang, V. J. Menichelli, Appl. Phys. Lett. vol. 19, №11, 473-75 (1971)
- [6] “激光引爆炸药的机理和实验”, 刊于北京工业学院编印《激光引爆》文集1-12 (1978)
- [7] 贾保仁, 陈旦鸣, 李玉莲, 《激光》1978年5-6期合刊 P.163
- [8] L. C. Yang, V. J. Menichelli, Proc. of the 6 th Symp. on Detonation, 612-21 (1976)
- [9] R. J. Harrach, J. Appl. Phys. vol. 47, №6, 2473-82 (1976)
- [10] В.Т.Кузнецов, А.И. Скорик, ФГВ том.13, вып.2, 271-4 (1977)
- [11] Z. G. Sztankay, R. J. Holland, AD-731780 (1971)
- [12] A. N. Dremin, S. D. Savrov, V. S. Trofimov, K. K. Shvedov, Detonation waves in condensed media, 英译本见 AD-751417 (1972) 242P.
- [13] А. И. Коротков и др ФГВ том.5, вып.3, 315-25 (1969)
- [14] V. T. Menichelli, L. C. Yang, Proc. of the 7 th Symp on Explosives and Pyrotechnics, (1971) 同文见 JPL TR 32-1557 (June, 1972)
- [15] “炸药对激光能量的感度试验小结” 刊于北京工业学院编印《激光引爆》文集37-43 (1978)
- [16] J. McAuslan, Proc. Roy. Soc, A, 246, 248 (1958)
- [17] J. Berchtold, J. Eggert, Naturwiss, vol. 40, 55 (1953)
- [18] V. J. Menichelli, L. C. Yang, NASA TR-32-1474, (1970)
- [19] M. J. Barbarisi, E. G. Kessler, AD-688585 (1970)
- [20] И. А. Галеев, Б. Н. Зайцев, ФГВ том.5, вып.3, 447 (1969)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON INITIATION OF EXPLOSIVES BY LASER RADIATION

Sun Cheng-wei Wang Zuo-ni Jia Bao-ren
Li Yu-lian Chen Dan-ming

The experimental results such as the critical ignition laser energy density, the relations between the induction times of explosives and the laser energy densities, etc. are described in this paper. On the basis of experimental investigations, two types of laser detonators were developed. The synchronous initiation tests of multiple initiators were succeeded by using multiple branch optical fiber bundles to transmit laser beams. The initiation time divergence of these tests was about the same as that for the general electrical initiators.