

文章编号: 0258-7025(2010)02-0418-06

边界条件对激光点火性能的影响

徐 姣 吴立志 沈瑞琪 叶迎华 胡 艳

(南京理工大学应用化学系, 江苏 南京 210094)

摘要 激光点火性能与边界条件具有密切关系,影响到激光点火的感度和点火延迟时间,对激光点火元件的设计具有关键作用。针对空气介质, K9 玻璃透窗介质和在 K9 玻璃上真空磁控溅射镀制的 Cu 膜介质等 3 种边界条件,对 B/KNO₃ 和 B/KNO₃/酚醛树脂的 1.06 μm 脉冲激光点火性能进行了实验测试。结果表明, K9 透窗对约束药剂表面烧蚀、气化产生的蒸气有显著作用,可以明显增加药剂点火感度并减少药剂点火延滞期;镀膜透窗增强了点火过程中药剂表面的等离子体,减少了点火延滞期,但却由于铜膜对激光的反射以及产生等离子体所消耗的能量,降低了点火感度。

关键词 激光物理;边界条件;激光点火感度;激光点火延迟时间;B/KNO₃

中图分类号 O436;TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0418

Effect of Confinement on the Capability of Laser Ignition

Xu Jiao Wu Lizhi Shen Ruiqi Ye Yinghua Hu Yan

(Department of Applied Chemistry, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The confinement has important effects on the capability of laser ignition. It can affect the delay time and the ignition threshold of energetic materials. So it is of key importance in the design of laser ignition element. Experiments were done to research the effects of confinement on the ignition capability of B/KNO₃ and B/KNO₃/phenolic resin by the laser whose wavelength is 1.06 μm. Three kinds of confinement were used. They were air, K9 glass, and K9 glass deposited with copper film. The results show that when reactions occur near to the surface, gaseous products are confined by K9 glass, and the high external pressure will augment the ignition threshold of energetic materials and reduce the delay time. The effect of the K9 glass deposited with copper film is to enhance the plasma near the surface of energetic materials, which reduces the delay time but lowers the ignition threshold, because the copper film reflects a part of the laser and a big part energy of the laser is used to generate the copper plasma.

Key words laser physics; confinement; ignition threshold of laser ignition; delay time of laser ignition; B/KNO₃

1 引 言

激光点火特性的两个重要参数是激光点火感度和激光点火延迟时间。激光点火感度是指激光点燃含能材料的 50% 发火能量或能量密度值,而激光点火延迟时间被定义为从激光开始作用到含能材料表面到含能材料发生自持燃烧开始的时间。含能材料的激光点火感度和点火延迟时间受到很多因素的影响,主要因素包括含能材料的热传导率、热容、光吸收系数、药剂组分、密度、粒径、掺杂物和混合物的均匀性,以及激光束的参数等。这些参数对激光点火

过程的影响已经有较多的研究^[1~4]。

而关于边界条件对激光点火性能影响的研究开始较早。20 世纪 70 年代, Menichelli 等^[5,6]在用激光起爆低密度季戊四醇四硝酸酯(PETN)时,发现相对于透明透窗,镀膜透窗对起爆有增强作用,即镀膜透窗可以降低起爆所需的激光能量,但他们未达到镀膜透窗条件下 PETN 的最小点火能量。他们还研究了薄膜厚度对点火阈值的影响,发现较薄的金属膜容易产生等离子体,使得等离子体直接作用于药剂,有利于点火的发生,这种情况下认为点火属

收稿日期:2009-03-30;收到修改稿日期:2009-05-11

作者简介:徐 姣(1982—),女,博士研究生,主要从事激光与含能材料的相互作用机理方面的研究。

E-mail: cannaicy@163.com

导师简介:沈瑞琪(1963—),男,博士,教授,主要从事激光物理和化学、化学芯片技术、复杂化学系统仿真技术、含能材料的燃烧和爆炸控制技术等方面的教学和研究。E-mail: rqshen@mail.njust.edu.cn (通信联系人)

于热机理。当薄膜较厚时,薄膜不能被烧穿,产生的等离子体与药剂不能接触,这种情况下点火发生属于冲击起爆^[7]。Renlund 等^[8]在研究激光起爆 PETN 时,比较了透明透窗与镀膜透窗对起爆感度的影响,结果表明,镀膜透窗增强了激光入射时产生的等离子体,这种方式可以降低起爆所需要的激光能量。

1994 年,Hasue 等^[9]研究了激光点火中边界条件对四亚甲基四硝胺(HMX)等炸药起爆的影响,发现无约束条件下,炸药只能发生燃烧;而加约束时,PETN,三亚甲基三硝基胺(RDX)和 HMX 均能发生爆炸。Östmark 等^[10,11]认为透明透窗的作用是限制了药剂表面反应产生的气体产物,使蒸气逃逸不掉,从而增大了药剂表面的气压,可以降低点火阈值。2001 年,日本九州大学 Nagayama 等^[12]得到了和文献[5,6]一致的结果,且在一定的膜厚内,随着膜厚的增加,点火所需的激光能量逐渐降低。但超过一定的膜厚,点火所需激光能量开始逐渐增大。这种趋势与 Kennedy 等^[13]在 2002 年得到的结果吻合。另外,Nagayama 等还发现将药剂侧的透窗表面打磨后也可以起到降低点火能量的作用。

Inou Kazunari 等^[14]采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为介质,用高速摄影技术拍摄了激光引爆 PETN 过程。2003 年,Frédéric Opdebeck 等^[15]提出了一个包含蓝宝石玻璃透窗相的一维点火模型,该模型考虑了透窗与药剂的非紧密接触,它们之间存在一个很薄的空气层,并由此引入新的参数热阻抗 R_c 。由于热阻抗的影响,透窗与药剂间温度是不连续的,模型与不考虑热阻抗的相比更能准确预测点火实际情况。

严楠等^[16]发现玻璃介质密封程度对点火有很大影响,提高密封性有利于点火发生。舒浪平等^[17]发现在药剂表面加薄膜后,其激光点火感度基本没有变化,指出提高密封强度,可以避免气体反应产物离开反应体系而带走热量,同时由于所生成气体产物能够达到很高的压力积累,而使其进入高能混合药中导致反应加速,从而可以大大缩短激光点火延迟时间。

介质对激光点火(起爆)的影响显而易见,目前这方面较多的研究都围绕着起爆高能炸药开展,而针对边界条件对能量较低的烟火剂点火的影响研究较少。本文分别研究了敞口状态,K9 玻璃透窗约束和镀膜透窗约束 3 种方式下 B/KNO₃ 的点火延滞期和点火感度。

2 实验条件和原理

实验采用 Nd:YAG 激光器,波长 1.06 μm,自由振荡模式下脉宽 106 μs,调 Q 模式下脉宽 34 ns。激光器最大输出能量 800 mJ。药剂采用 B/KNO₃ [质量比: $m(B):m(KNO_3) = 40:60$ (下同)] 和 B/KNO₃/酚醛树脂 [质量比: $m(B):m(KNO_3):m(\text{酚醛树脂}) = 40:60:5$ (下同)] 两种,压药压力为 80 MPa,密闭腔透窗材料分别为 K9 玻璃和药剂一侧镀 Cu 膜的 K9 玻璃。K9 玻璃厚度 2 mm,直径 5 mm,Cu 膜厚度 830 nm。实验分为 3 部分:敞口状态下测试 B/KNO₃ (40/60) 和 B/KNO₃/酚醛树脂 (40/60/5) 的感度和延滞期;密闭状态(K9)下测试 B/KNO₃ (40/60) 和 B/KNO₃/酚醛树脂 (40/60/5) 的感度和延滞期;密闭状态(Cu 膜透窗)下测试 B/KNO₃ (40/60) 在自由振荡激光和调 Q 激光作用下的感度和延滞期。

图 1 为激光点火实验装置简化示意图。激光器输出的激光经凸透镜聚焦入射到药剂表面,药剂燃烧后,光信号由光电二极管采集转换为电信号,传输给示波器。图 2 为激光点火密闭装置示意图。

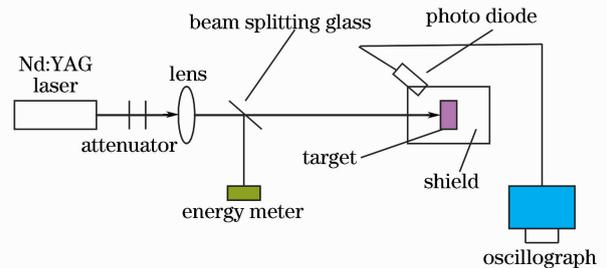


图 1 激光点火装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of laser ignition

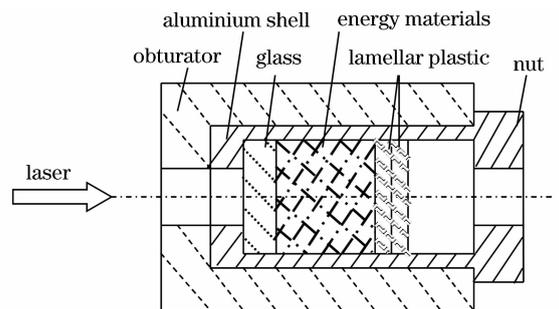


图 2 激光点火密闭装置示意图

Fig. 2 An illustration of obturator in laser ignition

图 3 为测得的电信号。第 1 个峰为脉冲激光峰,第 2 个峰为燃烧峰,中间有一段时间间隔。从图中可知点火分为 3 个阶段^[17]:第 1 阶段为光致热化学反应阶段,此时激光直接对药剂进行加热,并导致药剂自身局部发生热化学反应;第 2 阶段为热化学

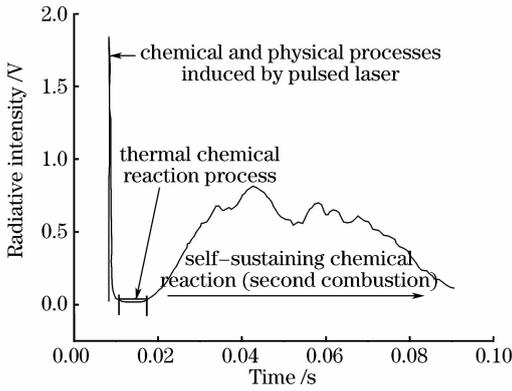


图3 激光点火光电信号图

Fig. 3 Photoelectricity signal of laser ignition

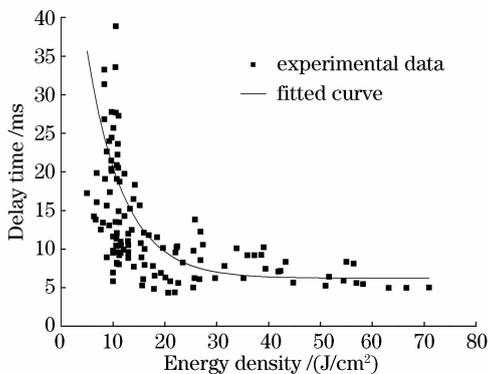
反应阶段,此时脉冲激光能量已撤走,药剂自身以热传导的方式进行径向和轴向的热能传递,逐步扩大热反应区,进行热量的积累;第3阶段是自持化学反应阶段,当药剂吸收的激光能量能够使药剂通过热量积累而达到自持反应时,药剂就发生自持化学反应,即燃烧。第2阶段即为点火延滞期。

激光点火感度的测试采用布鲁西登法(升降法)。

3 结果与分析

3.1 边界条件对药剂延滞期的影响

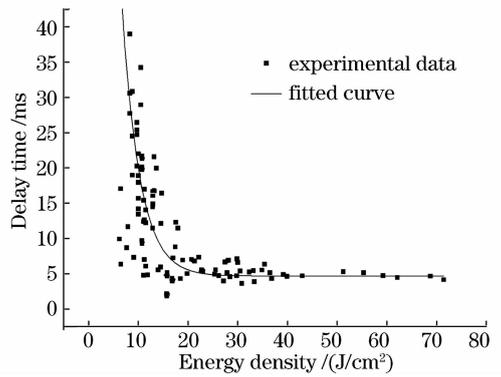
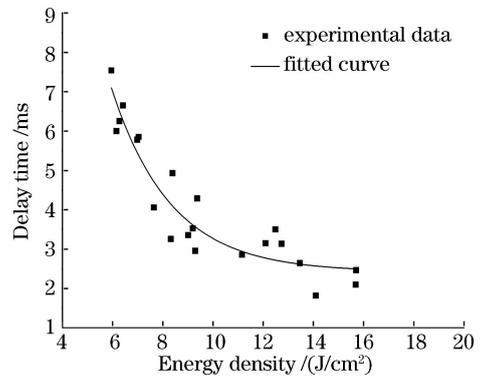
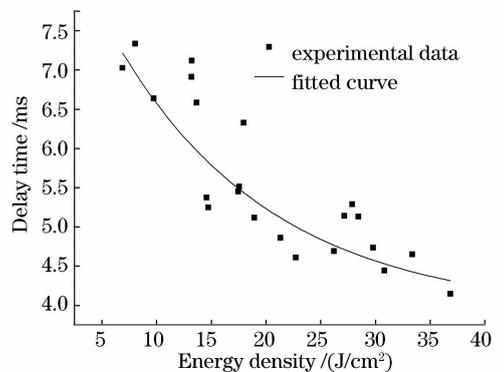
实验中分别在敞口状态下和密闭状态下对 B/KNO₃(40/60), B/KNO₃/酚醛树脂(40/60/5) 的点火延滞期进行测量。图4~9为实验得到的点火延滞期与激光能量密度的对应关系和相应的拟合曲线。

图4 B/KNO₃(40/60)在敞口状态下的延迟时间
Fig. 4 Delay time of B/KNO₃(40/60) in the air

对于所有实验数据,均拟合为

$$y = A_0 \times \exp\left(-\frac{x-x_0}{t_0}\right) + y_0. \quad (1)$$

由表1可看出,当入射激光能量密度增大时,在敞口状态下, B/KNO₃(40/60)的延滞期趋近于6.2 ms, B/KNO₃/酚醛树脂(40/60/5)的延滞期趋近于4.7 ms;在密闭状态(K9)下, B/KNO₃(40/60)

图5 B/KNO₃/酚醛树脂(40/60/5)在敞口状态下的延迟时间Fig. 5 Delay time of B/KNO₃/phenolic resin (40/60/5) in the air图6 B/KNO₃(40/60)在密闭状态(K9)下的延迟时间Fig. 6 Delay time of B/KNO₃(40/60) in the obturator (K9)图7 B/KNO₃/酚醛树脂(40/60/5)在密闭状态(K9)下的延迟时间Fig. 7 Delay time of B/KNO₃/phenolic resin (40/60/5) in the obturator (K9)

的延滞期趋近于2.4 ms, B/KNO₃/酚醛树脂(40/60/5)的延滞期趋近于3.9 ms;在密闭状态(Cu透窗)下, B/KNO₃(40/60)在自由振荡激光的作用下,延滞期趋近于1.5 ms,在调Q激光作用下的延滞期趋近于0.8 ms。

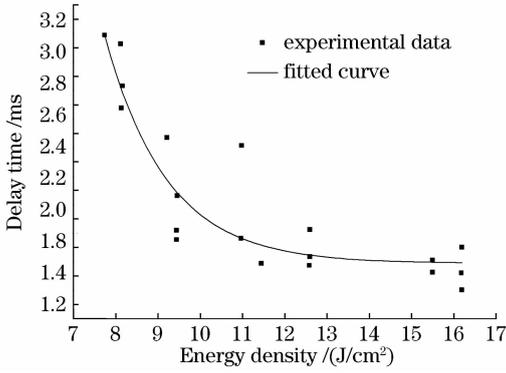


图 8 自由振荡激光作用下 B/KNO₃ (40/60) 密闭状态 (铜透窗) 的延迟时间

Fig. 8 Delay time of B/KNO₃ (40/60) in the obturator (Cu film) with free-running pulsed lasers

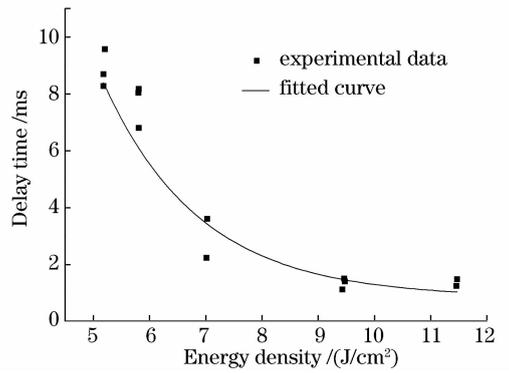


图 9 调 Q 激光作用下 B/KNO₃ (40/60) 密闭状态 (铜透窗) 的延迟时间

Fig. 9 Delay time of B/KNO₃ (40/60) in the obturator (Cu film) with Q-switched pulsed lasers

表 1 激光能量密度与延迟时间关系拟合结果

Table 1 Fitting results of relationship between laser energy densities and delay time

Energy materials and the mode of laser	Curve equation of ExpDec fit	Range of laser energy density and the fit error
B/KNO ₃ (40/60) in the air with free-running pulsed lasers	$y = 256.22458 \times \exp\left(-\frac{x+10.14915}{7.00286}\right) + 6.19476$	$x \geq 30 \text{ J/cm}^2$, relative fit error $\leq 16.97\%$
B/KNO ₃ /phenolic resin (40/60/5) in the air with free-running pulsed lasers	$y = 610.4856 \times \exp\left(-\frac{x+3.08427}{3.54433}\right) + 4.65197$	$x \geq 30 \text{ J/cm}^2$, relative fit error $\leq 12.75\%$
B/KNO ₃ (40/60) in the obturator (K9) with free-running pulsed lasers	$y = 94.3736 \times \exp\left(-\frac{x+1.17903}{2.37323}\right) + 2.42364$	$x \geq 10 \text{ J/cm}^2$, relative fit error $\leq 13.25\%$
B/KNO ₃ /phenolic resin (40/60/5) in the obturator (K9) with free-running pulsed lasers	$y = 20.40526 \times \exp\left(-\frac{x+19.15208}{14.33307}\right) + 3.90548$	$x \geq 30 \text{ J/cm}^2$, relative fit error $\leq 3.57\%$
B/KNO ₃ (40/60) in the obturator (Cu film) with free-running pulsed lasers	$y = 727.87982 \times \exp\left(-\frac{x+1.26184}{1.47035}\right) + 1.48721$	$x \geq 12 \text{ J/cm}^2$, relative fit error $\leq 5.93\%$
B/KNO ₃ (40/60) in the obturator (Cu film) with Q-switched pulsed lasers	$y = 515.4664 \times \exp\left(-\frac{x+2.06329}{1.71629}\right) + 0.83912$	$x \geq 9 \text{ J/cm}^2$, relative fit error $\leq 18.96\%$

将 6 条拟合曲线放在一起 (如图 10 所示), 可以看出, 当激光能量密度不小于 30 J/cm^2 时, 密闭状态 (K9) 下 B/KNO₃/酚醛树脂 (40/60/5) 的延滞期稍微小于敞口状态下 B/KNO₃/酚醛树脂 (40/60/5) 的延滞期, 差值在 1 ms 之内, 密闭状态 (K9) 下 B/KNO₃ (40/60) 的延滞期比敞口状态下该药剂的延滞期约小 3.8 ms; 镀 Cu 透窗密闭状态时无论调 Q 还是自由振荡激光作用下 B/KNO₃ (40/60) 的延滞期均比敞口状态下要短 2~3 ms; 镀 Cu 透窗比单纯 K9 玻璃透窗下药剂的延滞期要短。敞口状态下, 激光作用到药剂表面后, 发生烧蚀、气化等现象, 并伴随着少量的物质喷溅, 这些都会造成点火能量的损失, 使化学反应阶段进行的时间相对较长, 表现出延滞期较长; 而在约束条件下, 烧蚀、气化等消耗

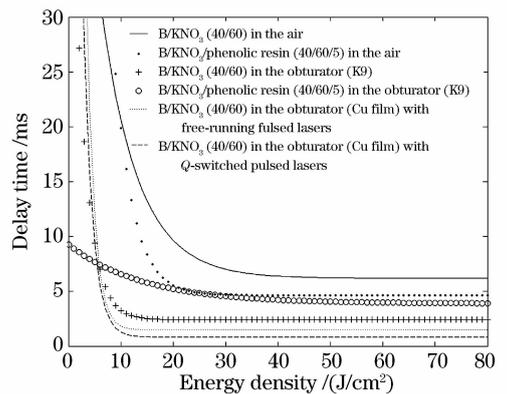


图 10 拟合曲线

Fig. 10 Fit lines

的能量短时间内并不会散失, 这就增强了药剂表面的温度和压强, 尤其是镀膜透窗所产生的较强的等

离子体,更加速了药剂的化学反应阶段,从而使点火延滞期变短。根据实验得到的拟合规律表明,约束条件可以减少药剂的点火延迟时间。

3.2 边界条件对药剂感度的影响

表 2 为不同边界条件下药剂的点火感度。由表 2 可见,K9 透窗约束下,B/KNO₃(40/60)药剂 50% 发火能量要比敞口状态低 2.35 mJ,B/KNO₃/酚醛树脂(40/60/5)的 50% 发火能量比敞口状态降低了

表 2 不同边界条件下药剂的点火感度

Table 2 Ignition threshold of different confinement

Energetic material	Laser mode and confinement	Ignition threshold /mJ
B/KNO ₃ (40/60)	Free-running/in the air	7.70
B/KNO ₃ (40/60)	Free-running/K9 glass	5.35
B/KNO ₃ /phenolic resin (40/60/5)	Free-running/in the air	4.05
B/KNO ₃ (40/60)	Free-running/K9 glass deposited with copper film	174.3
B/KNO ₃ /phenolic resin (40/60/5)	Free-running/K9 glass	2.53
B/KNO ₃ (40/60)	Q-switched/K9 glass deposited with copper film	100.9

4 结 论

研究了不同边界条件下 B/KNO₃(40/60)和 B/KNO₃/酚醛树脂(40/60/5)的激光点火延滞期与感度,结果表明,当激光能量密度不小于 30 J/cm² 时,K9 透窗约束下 B/KNO₃/酚醛树脂(40/60/5)的延滞期稍微小于敞口状态下 B/KNO₃/酚醛树脂(40/60/5)的延滞期,密闭状态(K9)下 B/KNO₃(40/60)的延滞期比敞口状态下该药剂的延滞期约小 3.8 ms;镀膜透窗约束状态时无论调 Q 还是自由振荡激光作用,B/KNO₃(40/60)的延滞期均比敞口状态下要短。K9 透窗约束下,药剂点火感度要比敞口状态的有所升高,镀膜透窗约束下,自由振荡和调 Q 激光作用时 B/KNO₃(40/60)的感度反而比敞口状态下降低许多。说明 K9 透窗对约束药剂表面烧蚀、气化产生的蒸气有显著作用,可以明显提高药剂点火感度,并对减少点火延滞期有一定的效果;镀膜透窗增强了点火过程中药剂表面的等离子体,减少了点火延滞期,但却由于铜膜的反射以及产生等离子体所消耗的能量,降低了点火感度。

参 考 文 献

- 1 L. de Yong, T. Nguyen, J. Waschl. Laser ignition of explosives, pyrotechnics and propellants: a review [R]. 1995. AD-A299465
- 2 Shen Ruiqi, Ye Yinghua, Hu Yan *et al.*. Plasma performance for laser ablation of boron-potassium nitrate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1):125~128
沈瑞琪,叶迎华,胡 艳等. 激光烧蚀硼-硝酸钾的等离子体特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1):125~128

1.52 mJ.这说明透明透窗起到了降低点火阈值的作用。而在镀膜透窗约束下,自由振荡和调 Q 激光作用时 B/KNO₃(40/60)的 50% 发火能量反而比敞口状态下大了 2 个数量级,推测原因为激光入射到 830 nm 厚的铜膜上时反射掉部分能量,在与铜膜作用时又消耗了部分能量,导致该状态下 B/KNO₃(40/60)的点火感度降低。

- 3 Ye Yinghua, Shu Langping, Shen Ruiqi. Effect of phenolic resin on laser ablation of B/KNO₃ [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007, **15**(1):33~38
叶迎华,舒浪平,沈瑞琪. 酚醛树脂对 B/KNO₃ 点火药的激光烧蚀特性的影响[J]. *含能材料*, 2007, **15**(1):33~38
- 4 Shen Ruiqi, Ye Yinghua, Tu Jian. Effects of plasma and ablation on ignition processes of energetic materials under pulsed laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1323~1326
沈瑞琪,叶迎华,涂 建. 激光等离子体和烧蚀对含能材料的激光点火过程的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11):1323~1326
- 5 V. J. Menichelli, L. C. Yang. Initiation of insensitive explosives by laser energy [C]. *JPLTR*, 1972. 32-1557
- 6 L. C. Yang, V. J. Menichelli. Laser initiation of insensitive explosives [C]. *Sixth Symposium (Intl.) on Detonation*, 1976, ACR-221, ONR, 612~621
- 7 L. C. Yang, V. J. Menichelli. Laser initiation of insensitive high explosives [C]. *Proceedings of the 6th Symposium on Detonation*, 1976. 612
- 8 A. M. Renlund, P. L. Stanton, W. M. Trott. Laser initiation of secondary explosives [C]. *9th International Symposium on Detonation*, 1989
- 9 K. Hasue, A. Iwama. Direct initiation of some secondary explosives by means of CO₂ laser irradiation [C]. *20th International Pyrotechnics Seminar*, 1994. 367~380
- 10 H. Östmark, R. Gräns. Laser ignition of explosives: Effects of gas pressure on the threshold ignition energy [J]. *J. Energ. Mater.*, 1990, **8**(4):308~322
- 11 H. Östmark, M. Carlson, K. Ekvall. Laser ignition of explosives: effects of laser wavelength on the threshold ignition energy [J]. *J. Energ. Mater.*, 1994, **12**(1):63~83
- 12 K. Nagayama, K. Inou, M. Nakahara. Initiation of PETN powder by laser ablation [J]. *Shock Compression of Condensed Matter*, 2002, **620**:995~998
- 13 J. E. Kennedy, K. A. Thomas, J. W. Early *et al.*. Mechanisms of exploding bridgewire and direct laser initiation of low-density PETN [C]. *Proceedings of 29th Intl. Pyrotechnics Seminar*, IPSUSA, Inc., July, 2002. 781~785
- 14 Inou Kazunari, Nakahara Motonao, Kubota Shiro. Pulse laser ignition of a small amount of secondary explosive powder [J].

- Japan Explosive Society*, 2002, **63**(5):275~278
- 15 Frédéric Opdebeck , Philippe Gillard, d' Erwann Radenac. Influence of interface conditions on laser diode ignition of pyrotechnic mixtures: application to the design of an ignition device [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2003, **42**:47~56
- 16 Yan Nan, Zhang Huiqing, Hua Guang *et al.*. The effect of pressing pressure and hermetic intensity on the laser diode ignition characteristic of B/KNO₃[J]. *Applied Laser*, 2001, **21**(6):389~391
- 严 楠,张慧卿,华 光 等. 压药压力及密封性对 B/KNO₃ 激光点火特性的影响[J]. *应用激光*, 2001, **21**(6):389~391
- 17 Shu Langping, Shen Mei, Shen Ruiqi *et al.*. Study on the effect of ablation in the surface of powder in laser ignition [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2005, (1):22~24
- 舒浪平,沈 美,沈瑞琪 等. 激光对 B/KNO₃ 药剂作用现象的研究[J]. *火工品*, 2005, (1):22~24