

文章编号: 0258-7025(2004)11-1323-04

激光等离子体和烧蚀对含能材料的 激光点火过程的影响

沈瑞琪, 叶迎华, 涂 建

(南京理工大学应用化学系, 江苏 南京 210094)

摘要 通过测试激光点火的延迟时间、等离子体电荷通量和等离子体对激光的吸收能力,研究了激光等离子体和烧蚀对激光点火过程的影响。实验采用的含能材料为 B/KNO₃ ($m(\text{B}) : m(\text{KNO}_3) = 40 : 60$),外加 5% 的酚醛树脂,激光器为脉冲宽度为 680 μs 的 Nd:YAG 固体激光器。实验结果表明等离子体密度随激光能量的提高而增大,而且激光等离子体的电荷通量大于燃烧流的电荷通量。当激光能量密度低于某一临界值时,点火延迟时间随激光能量密度的提高而线性变短,然而激光能量密度超过该临界值后,激光点火延迟时间保持恒定。在实验条件下,激光等离子体几乎不吸收入射的激光能量,但是点火延迟时间的变化规律表明了烧蚀会阻碍激光能量向含能材料注入。

关键词 激光物理;激光点火;等离子体;烧蚀;硼/硝酸钾

中图分类号 TN 241;O 64 **文献标识码** A

Effects of Plasma and Ablation on Ignition Processes of Energetic Materials under Pulsed Laser

SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, TU Jian

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

Abstract The charge flux of plasma, the delay time of laser ignition and the absorbability of laser by plasma were tested to study the effects of plasma and ablation on laser ignition processes of energetic materials. Tested energetic material is B/KNO₃ ($m(\text{B}) : m(\text{KNO}_3) = 40 : 60$) + additional 5% phenolic resin, 20 mg, under 37.92 MPa pressure. Laser set is a Nd:YAG laser with 680 μs pulsed width. The density of plasma rises with increase of laser energy, and the charge flux of plasma is larger than that of combustion flow. The delay time of ignition is shorted with the rise of the energy density of laser linearly, but when the energy density increases over a critical value, the delay time keeps constant. The plasma do not almost absorb incident laser beam in the testing conditions, but experimental results of the delay time of ignition show that the ablation of laser prevents laser energy from depositing in energetic materials.

Key words laser physics; laser ignition; plasma; ablation; B/KNO₃

1 引 言

激光经常应用于研究含能材料的点火和燃烧机理及点火与引爆装置。对基于热机理的激光点火过程进行的数值模拟^[1,2]和实验研究^[3~5]表明激光点火过程由三个阶段组成。第一阶段为激光热化学反应过程。在激光作用区域,激光对含能材料加热,并

且导致含能材料发生热化学反应;第二阶段为热化学反应和热积累过程。当激光能量撤出后,加热层内的热化学反应仍然继续进行,但是热传导将导致加热层中的能量损耗。随着加热层的厚度增加,热传导导致的能量损耗速率也在降低。当损耗的能量小于热化学反应放出的热量后,加热层中的能量呈现正增长;第三个阶段为自持化学反应过程,或燃烧

收稿日期:2003-06-20;收到修改稿日期:2003-11-24

作者简介:沈瑞琪(1963—),男,南京理工大学应用化学系教授,博士,系主任,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

过程。当加热层中的温度达到含能材料的点火温度时,含能材料发生自持的燃烧现象。

在激光功率密度超过 10^3 W/cm^2 时,含能材料的蒸发、气化和等离子体化的作用变得显著。由于这些过程的机理十分复杂,大多数研究者在研究激光点火机理时都回避这些过程对激光点火的作用,但是一些实验结果表明了这些过程对激光点火有影响^[6,7],高功率的脉冲激光并不利于激光点火。从含能材料表面溅射出的烧蚀产物将带走一部分激光注入的能量和热化学反应放出的热量,并且烧蚀产物和与烧蚀表面接触的等离子体层有可能形成阻止激光入射的屏蔽层。一些研究者采用 CO_2 激光研究推进剂和炸药的燃烧机理,也证实了含能材料的蒸发和气化对激光点火和燃烧有影响^[8]。本文将通过实验途径分析烧蚀和等离子体对激光点火带来的影响。

2 等离子体的形成及其作用

在金属表面上形成激光等离子体一般需要比较高的激光功率密度,约为 10^6 W/cm^2 。并且伴随着激光支持的燃烧波和冲击波,形成的等离子体层对激光有屏蔽作用^[9]。含能材料的激光等离子体的形成机理与金属的等离子体形成有很大的区别。对于金属,需要比较高的能量激发出自由电子和带电离子,但是对于含能材料,则不需要很高的能量密度就能够形成等离子体,这是因为含能材料在化学反应和烧蚀过程中产生大量的带电分子碎片和自由基,这些物质构成了激光等离子体的主要成分。激光在含能材料表面形成等离子体的功率密度大约为 10^3 W/cm^2 。等离子体发生时从表面溅射出物质流,伴随着强烈的蓝色光辐射。

2.1 等离子体电荷通量

实验中采用平行电极板法测定等离子体和燃烧流的电荷通量。实验系统如图 1 所示,其中电极板的宽度(离子流方向)、长度和电极板之间的间隙分别为 4, 6 和 0.5 cm。含能材料实验样品为 $\text{B/KNO}_3 (m(\text{B}) : m(\text{KNO}_3) = 40 : 60) + 5\%$ 酚醛树脂,在 37.92 MPa 的压药压力下压入 $\phi 4.5 \text{ mm}$ 的铝孟中。激光采用最大输出能量为 2 J,脉冲宽度为 $680 \mu\text{s}$ 的 Nd:YAG 脉冲激光器。激光作用到样品表面上的光斑直径约为 1.2 mm。激光能量通过设置在光路上的一组光能衰减镜片来调整。

图 2 是实测的来自光探测器和采自电阻的信号

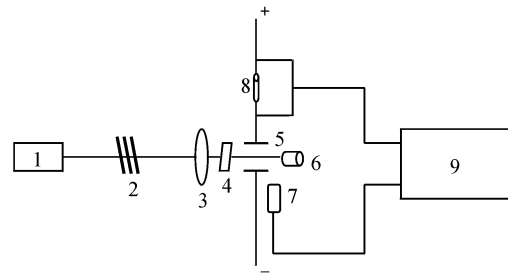


图 1 用于测试等离子体电荷通量的实验系统示意图
1: Nd:YAG 激光器; 2: 光衰减片; 3: 聚焦透镜; 4: 平板波片;
5: 电极板; 6: 样品; 7: 光探测器; 8: 采用电阻; 9: 数据采集仪
Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement
to test plasma flux

1: Nd:YAG laser; 2: optic attenuator; 3: focus lens; 4:
protecting glass plate; 5: electrodes; 6: sample; 7: optic detector;
8: sampling resistance (10 kΩ); 9: data analysis system

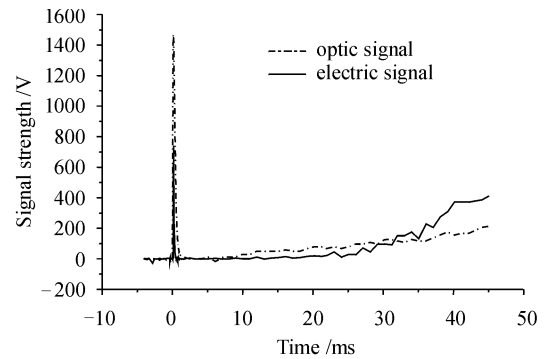


图 2 样品的光信号和采用电阻的电信号
Fig. 2 Optic signal from sample and electric signal
from sampling resistance

波形。实验结果表明激光点火过程由三个阶段构成。第一阶段为激光作用阶段,其中等离子体的产生时间略滞后激光开始作用的时间;第二阶段为热化学反应和热积累阶段。当激光撤出后,光信号和等离子体信号也随其消失;第三阶段为自持化学反应阶段。热积累的温度达到含能材料的点火温度后,含能材料发生燃烧,并且辐射出光和产生带电荷的燃烧离子流。比较电信号波谱的分布,等离子体的电荷通量大于燃烧阶段的离子流电荷通量。

等离子体形成的电流峰值与电极间的电场强度为线性关系,见图 3,而且电流峰值与激光能量的关系为递增关系,见图 4。由于等离子体的电荷通量是被测电流的函数,等离子体的密度随激光能量密度的增加而上升。

根据电场强度和电极板之间的电流的线性关系, $I = -a + bE$, 可以容易计算通过电极板间的电

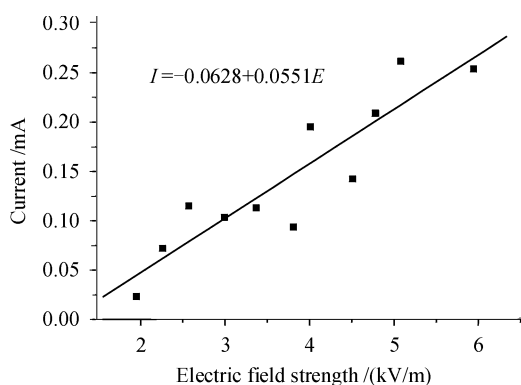


图3 在激光功率密度为 $3.32 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 时等离子体导致的电流值与电场强度的关系

Fig.3 Dependence of current induced by plasma on electric field strength at $3.32 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ power density of laser

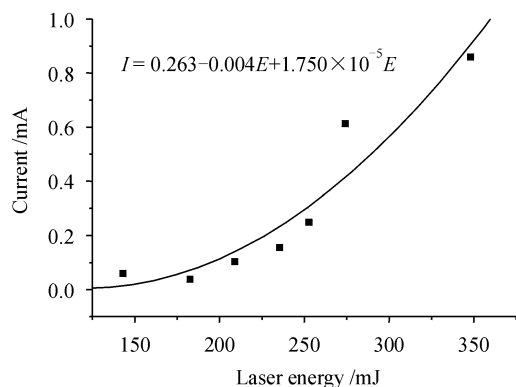


图4 在电场强度为 $5.49 \times 10^3 \text{ V/m}$ 时等离子体导致的电流与激光能量的关系

Fig.4 Dependence of current induced by plasma on laser energy at $5.49 \times 10^3 \text{ V/m}$ electric field strength

荷通量值^[10]

$$\Phi = \sum q_i n_i V_i = \frac{a}{(d/2 - R)R} \quad (1)$$

或

$$\Phi = \frac{b}{l^2 R/k} \quad (2)$$

式中 d , l 和 R 分别为电极板间距、电极板宽度和等离子体流半径。 k 为等离子体动能。

B/KNO_3 在 $3.32 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 激光功率密度下测定到的等离子体的电极板电流和电极板间电场强度的关系为

$$I = -0.063 + 0.055E \quad (3)$$

式中各参量的单位为 I —mA, E —kV/m。此外电极板间距为 5 mm, 等离子体流半径约为 1 mm。由式(1)计算得等离子体的电荷通量为 $\Phi = 42 \text{ Q}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。

2.2 等离子体的作用

在某些条件下等离子体对光有很好的吸收作用。图5为测试激光点火过程中等离子体吸收效率的实验系统原理图。实验条件为：样品 B/KNO_3 ($m(\text{B}) : m(\text{KNO}_3) = 40 : 60$) + 5% 酚醛树脂, 20 mg, 37.92 MPa 压药压力, 聚焦的激光光束直径约为 1.2 mm, 检测光束直径约为 2 mm。来自激光器的光束通过分光镜分成用于与含能材料作用的主入射光束和用于检测的检测光束。主入射光通过衰减片和透镜聚焦到样品的表面上。检测光通过光纤等光学元件整形成平行光束, 与作用光束垂直交叉, 通过只允许 $1.06 \mu\text{m}$ 通过的干涉滤光片滤光后由激光能量计测定流场区域的透射效率。

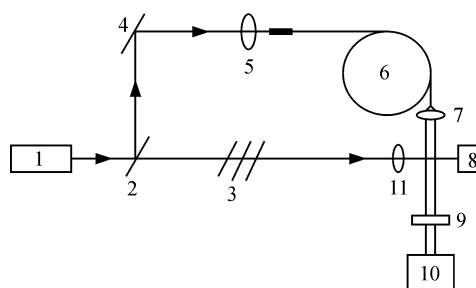


图5 等离子体的激光吸收能力实验装置示意图

1: Nd:YAG 脉冲激光器; 2: 分光镜; 3: 衰减片; 4: 反射镜; 5, 7 和 11: 透镜; 6: 光纤; 8: 样品; 9: 干涉滤光片; 10: 激光能量计
Fig.5 Schematic diagram of experimental arrangement to test absorbability of plasma to laser beam
1: Nd:YAG pulsed laser; 2: beam splitter; 3: attenuator; 4: mirror; 5, 7 and 11: lens; 6: optical fiber; 8: sample; 9: interference filter; 10: laser energy meter

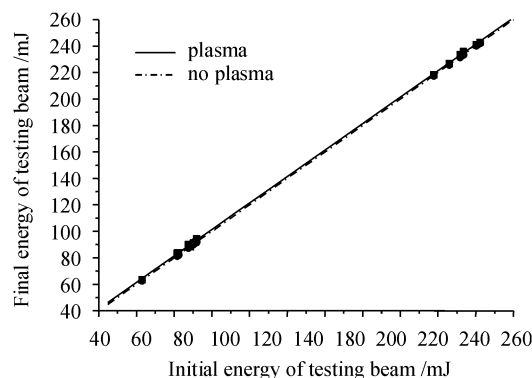


图6 激光能量计检测到的检测光束初始能量与穿过等离子体区域后检测光束能量的比较

Fig.6 Comparison of incident energy of testing beam and the energy of testing beam passed plasma

实验中, 检测光束与样品表面的距离为 7 mm, 该光束横穿等离子体流, 实验结果见图 6。图中每

一点的数据为重复测试 5 次的平均值。比较检测光束的入射能量和通过激光等离子体的检测光束的能量没有看到预期的含能材料的激光等离子体对激光的屏蔽效应。

2.3 烧蚀作用

烧蚀是导致含能材料凝聚相的能量损失的重要因素。激光点火的延迟时间与激光能量密度的关系(见图 7)反映了激光烧蚀的作用。

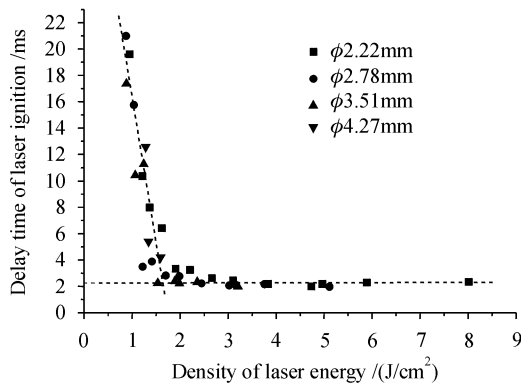


图 7 激光点火延迟时间与激光能量密度的关系

图中标注了聚焦光斑的直径 ϕ

Fig. 7 Dependences of delay time of laser ignition on density of laser energy

where the diameters of focal point are labeled

激光点火延迟时间的定义为从激光开始作用到含能材料表面到含能材料发生支持化学反应(燃烧)的时间。激光脉冲宽度(680 μ s)远小于激光点火的延迟时间(>2 ms),说明激光点火的热积累阶段对激光点火具有显著作用。因为激光热效应,注入到含能材料凝聚相中的能量越多,越有利于提高热积累阶段中的热化学的反应速率,点火延迟时间也越短。实验表明在激光能量密度未达到某一临界值(B/KNO₃: 1.64 J/cm² 和 2.27 ms)时,点火延迟时间随激光作用的能量密度的提高呈线性减小,但是超过该临界值后,点火延迟时间几乎保持不变。这种规律清楚地反映了在激光能量密度超过临界值后,含能材料的凝聚相获得的激光能量仅与临界点处激光注入的能量值相等,其他能量通过烧蚀产物带离含能材料凝聚相的表面。

3 结 论

激光与含能材料相互作用过程由激光热化学反应阶段、热化学反应和热积累阶段,以及自持的化学反应(或燃烧)阶段等三个阶段构成。由于存在激光

烧蚀效应,烧蚀产物将带走含能材料凝聚相中的热量,导致激光点火的延迟时间大于激光脉冲持续时间,并且当激光能量密度超过某一临界值后,延迟时间保持不变,实验中使用的 B/KNO₃ 样品为 1.64 J/cm²,最短的延迟时间为 2.27 ms。在低于激光能量密度临界值时,点火延迟时间随激光能量密度的增加而线性减小。实验没有得到预期的激光等离子体屏蔽效应的证据,但是目前还不能得出等离子体对激光点火无影响的结论,需要进行进一步的相关实验。一般认为在激光点火过程中,高功率短脉冲激光对含能材料的点火能力不如长脉冲低功率激光。

参 考 文 献

- Sun Tongju, Shen Ruiqi, Dai Shizhi. Numerical simulation about the process of laser ignition [J]. *Applied Laser*, 1996, **16**(3):110~112
孙同举,沈瑞琪,戴实之. 激光点火过程的数值模拟[J]. *应用激光*, 1996, **16**(3):110~112
- Hu Yan, Ye Yinghua, Shen Ruiqi. One dimension finite difference simulation of laser ignition [J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(5):331~334
胡艳,叶迎华,沈瑞琪. 激光点火过程的一维有限差分模拟[J]. *激光技术*, 2001, **25**(5):331~334
- Shen Ruiqi, Ye Yinghua, Dai Shizhi et al.. Chemical reaction process of interaction of laser and energetic materials [J]. *Laser Technology*, 1997, **21**(4):193~195
沈瑞琪,叶迎华,戴实之等. 激光与含能材料相互作用的化学反应过程[J]. *激光技术*, 1997, **21**(4):193~195
- Sun Tongju, Shen Ruiqi, Ye Yinghua et al.. The phenomenon of two-stage initiations in laser ignition pyrotechnics [J]. *Acta Armamentarii (the Fascicule of Explosives and Propellants)*, 1996, **18**(1):12~14
孙同举,沈瑞琪,叶迎华等. 激光点燃烟火药过程中的二次发火现象[J]. *兵工学报(火化工分册)*, 1996, **18**(1):12~14
- Ye Yinghua, Shen Ruiqi, Dai Shizhi. Effect of phenolic resin on laser ignition of B/KNO₃ [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(11):1007~1010
叶迎华,沈瑞琪,戴实之. 酚醛树脂对 B/KNO₃ 点火药的激光点火特性的影响[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(11):1007~1010
- Sun Tongju. The experimental studies on the interaction characteristics of laser-pyrotechnic mixture and its mechanism [D]. Ph. D. Dissertation. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1995
孙同举. 激光与火工药剂互作用特性及机理的实验研究[D]. 博士学位论文. 南京:南京理工大学,1995
- Ye Yinghua, Shen Ruiqi, Dai Shizhi. The laser ignition characteristics influenced by graphite doping into B/KNO₃ [J]. *Applied Laser*, 1988, **18**(3):99~100
叶迎华,沈瑞琪,戴实之. 石墨掺杂对 B/KNO₃ 点火药的点火特性的影响[J]. *应用激光*, 1988, **18**(3):99~100
- B. N. Kondrikov, S. Cristoforetti, I. V. Grebenyuk et al.. Gasification of solid propellants and propellant ingredients under influence of thermal radiation [C]. Proc. 32nd International Annual Conference of ICT, Karlsruhe 2001, V6-1~V6-15
- Lu Jian, Ne Xiaowu, He Anzhi. Physics on Interaction of Laser and Materials [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1996. 69
陆建,倪晓武,贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京:机械工业出版社,1996. 69
- Ye Yinghua, Shen Ruiqi, Dai Shizhi. Study on the electrical conductivity of combustion flame [C]. Proc. 26th International Pyrotechnics Seminar, Nanjing 1999. 568~572