

文章编号: 0258-7025(2009)01-0125-04

激光烧蚀硼-硝酸钾的等离子体特性

沈瑞琪 叶迎华 胡 艳 苏浪平

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要 为了掌握激光点火中烧蚀和等离子体的特性, 采用平行电极板法研究了脉冲 Nd:YAG 激光对硼-硝酸钾点火时的激光烧蚀等离子体导电特性和特征参数值。实验获得了 B-KNO₃ ($m(\text{B}) : m(\text{KNO}_3) = 40:60$) 和 B-KNO₃-酚醛树脂 ($m(\text{B}) : m(\text{KNO}_3) : m(\text{phenolic resin}) = 40:60:0.5$) 的等离子体形成的临界能量密度值分别为 $34.07 \pm 8.06 \text{ J/cm}^2$ 和 $28.56 \pm 2.62 \text{ J/cm}^2$, 电荷通量值和平均动能值分别为 $1.82 \times 10^{-5} \text{ C}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, $10.85 \times 10^3 \text{ eV}$ (62.05 J/cm^2) 和 $2.29 \times 10^{-5} \text{ C}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, $13.61 \times 10^3 \text{ eV}$ (60.80 J/cm^2)。激光形成等离子体的点火延迟时间随着激光能量密度的增大而呈指数衰减, 在较低能量密度下掺杂酚醛树脂的 B-KNO₃ 的点火延迟时间比无酚醛树脂的 B-KNO₃ 长, 但是当能量密度达到 35 J/cm^2 时两者相同。研究表明, 酚醛树脂有助于 B-KNO₃ 的烧蚀, 并且形成的可反应性烧蚀产物具有较高离子浓度和动能。

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 TN241; O64

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20093601.0125

Plasma Performance for Laser Ablation of Boron-Potassium Nitrate

Shen Ruiqi Ye Yinghua Hu Yan Su Langping

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Electric conductivity of laser plasma and its characteristic parameters were studied by parallel-plate electrode method for pulsed Nd:YAG laser ignition of boron-potassium nitrate. The ignition threshold values of laser plasma of B-KNO₃ (40/60 mass fraction) and B-KNO₃-phenolic resin (40/60/0.5 mass fraction) are $34.07 \pm 8.06 \text{ J/cm}^2$ and $28.56 \pm 2.62 \text{ J/cm}^2$, and their ionic charge flux and average kinetic energy are $1.82 \times 10^{-5} \text{ C}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, $10.85 \times 10^3 \text{ eV}$ (at 62.05 J/cm^2) and $2.29 \times 10^{-5} \text{ C}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, $13.61 \times 10^3 \text{ eV}$ (at 60.80 J/cm^2) respectively. The ignition delay time of plasma depends on laser energy density in exponential decay, and the delay time of B-KNO₃ doped phenolic resin is larger than that of B-KNO₃ under a relatively low laser energy density, but same over 35 J/cm^2 . The results shown that phenolic resin accelerates the ablation of B-KNO₃, and plays an important role to produce higher ionic concentration and kinetic energy of reactivity ablation products.

Key words laser physics; laser ignition; plasma; ablation; boron-potassium nitrate

1 引 言

采用脉冲激光对含能材料进行点火会导致含能材料发生凝聚相化学反应、气相化学反应、烧蚀和形成等离子体, 在机制上可以归纳为激光支持的化学反应和烧蚀、无激光支持的凝聚相化学反应和自持燃烧等基本阶段^[1], 其中激光与含能材料相互作用过程对激光点火起到重要作用。较高能量的激光对含能材料作用时会发生烧蚀和等离子体现象^[2], 其中激光等离子体中包含大量的正负离子和团簇^[3],

等离子体点火所需的能量(功率)密度较低和形成的等离子体几乎不对入射激光进行屏蔽^[4], 但是对激光烧蚀含能材料的点火特性和机制并不清楚, 导致在建立激光点火模型时忽略了重要的烧蚀效应和等离子体效应。由于缺乏对高能激光点火和起爆机制的深入认识, 尤其是烧蚀和等离子体对激光点火的作用机制认识, 阻碍了激光点火和起爆技术的应用。本文针对激光点火过程中的烧蚀和等离子体化现象, 采用平行电极板法对 B-KNO₃ 的激光烧蚀和激

收稿日期: 2008-02-19; 收到修改稿日期: 2008-05-10

基金项目: 973 计划重大专项(61339010301)资助项目。

作者简介: 沈瑞琪(1963—), 男, 教授, 博士, 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科研。E-mail: riqshen@mail.njust.edu.cn

光等离子体进行实验研究,获得烧蚀产物和等离子体的特性和规律,以及产生等离子体的临界条件。

2 实 验

2.1 原理

采用平行电极板测定激光等离子体的导电性,根据导电电流与极板间电场强度的线性关系可以计算得到解离离子的平均电荷通量和动能。实验装置原理图如图 1 所示,其中电极板为 $2.2\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的纯铜板,两电极板之间的间距为 4 mm ,串联的采样电阻为 $1\sim 36\text{ k}\Omega$ 可调,极板间外加电压为 $0\sim 150\text{ V}$ 可调,即电极板间的电场强度的变化范围在 $0\sim 37500\text{ V/m}$ 之间。激光采用自由振荡的 Nd:YAG 脉冲激光器,脉冲宽度为 $680\text{ }\mu\text{s}$ 。

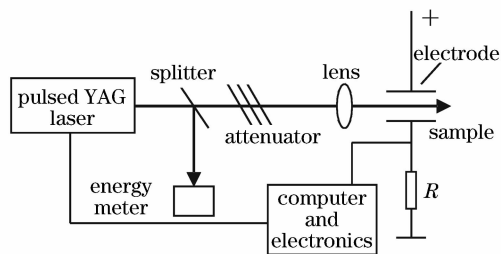


图 1 等离子体导电性实验装置原理图

Fig. 1 Experimental setup of electric conductivity of plasma

等离子体的带电离子在电场驱动下部分到达电极板,导电电流与极板间的电场强度具有线性关系

$$I = aE - b, \quad (1)$$

式中 a 和 b 分别为电极板间导电电流 (I) 和电场强度 (E) 关系的线性系数,与电极板尺寸参数、离子流宽度和速度、离子带电荷量和质量等有关。

根据等离子体导电电流与外加电场的关系,推导出等离子体流的宏观电荷通量 Φ 和导电粒子的平均动能 E_k [5] 的关系为

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

$$E_k = \frac{1}{2N} \sum m_i V_i^2 \approx \frac{\Phi l^2 \bar{R}}{2b} q, \quad (3)$$

式中 N 为气流中粒子总数, q 为粒子的平均电量, \bar{R} 为等离子体流半径, d 为电极板间距, l 为电极板宽度。

2.2 样品准备

采用不含酚醛树脂和含质量分数为 0.5% 酚醛树脂的硼-硝酸钾点火药,其质量比分别为 B-KNO₃ ($m(\text{B}) : m(\text{KNO}_3) = 40:60$) 和 B-KNO₃-酚醛树脂 ($m(\text{B}) : m(\text{KNO}_3) : m(\text{phenolic resin}) = 40$

: $60:0.5$)。B 粉取 100 目 (粒度为 0.154 mm) 的筛下物;KNO₃ 取 200 目 (粒度为 0.076 mm) 的筛下物,酚醛树脂为 100 目筛下物。将处理过的 B 粉与 KNO₃ 以 $40:60$ 的质量比充分混合均匀,准确称量 20 mg 混合物,在 50 MPa 压力下压入 $\phi 4.5\text{ mm}$ 的铝制壳中,得到无酚醛树脂的 B-KNO₃ 实验样品;按 B-KNO₃-酚醛树脂 ($40:60:0.5$) 的比例称取处理好的酚醛树脂,将其完全溶解于分析纯乙醇中,待溶剂适度蒸发后,加入事先混匀的 B-KNO₃ ($40:60$),搅拌均匀后用 100 目筛造粒和烘干。准确称量 20 mg 药剂在 50 MPa 压力下压入 $\phi 4.5\text{ mm}$ 的铝制壳中,得到含酚醛树脂的 B-KNO₃ 实验样品。

3 结果与讨论

通过实验装置测得 B-KNO₃ 和 B-KNO₃-酚醛树脂的在不同激光能量密度和不同电极板电场强度等条件下的等离子体导电特性分别如图 2 和 3 所示。

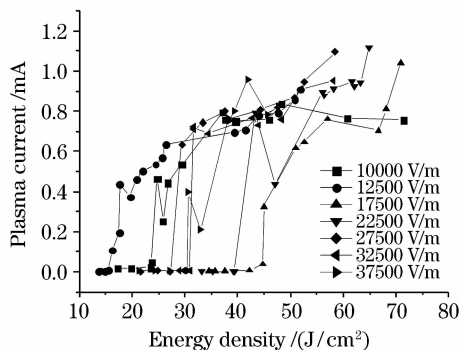


图 2 B-KNO₃ 的等离子体导电性与激光能量密度的关系
Fig. 2 Dependence of plasma conductivity of B-KNO₃ on laser energy density

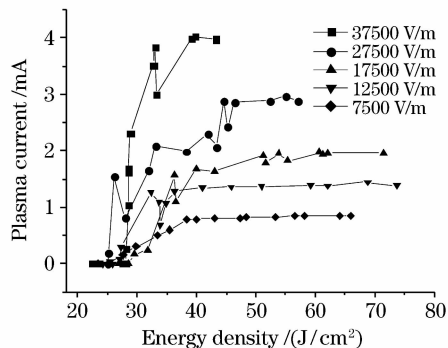


图 3 B-KNO₃-酚醛树脂的等离子体导电性与激光能量密度的关系

Fig. 3 Dependence of plasma conductivity of B-KNO₃-phenolic resin on laser energy density

激光对 B-KNO₃ 点火时会导致 B-KNO₃ 烧蚀,并且产生等离子体和形成大量导电的离子流。离子

流的形成和浓度大小与作用到药剂上的激光能量密度有密切关系,存在产生烧蚀离子流的最小激光能量密度,称为激光等离子体的点火阈值。将从激光

作用到材料再到探测到等离子体电流的时间定义为点火延迟时间,其中 B-KNO₃ 药剂的激光等离子体点火阈值如表 1 所示。

表 1 B-KNO₃ 的激光等离子体点火阈值

Table 1 Ignition threshold value of laser plasma of B-KNO₃

Composites	B-KNO ₃						B-KNO ₃ -phenolic resin				
Electric field / (kV/m)	10.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	7.5	12.5	17.5	27.5	37.5
Ignition threshold / (J/cm ²)	24.79	44.74	43.29	29.41	31.63	30.56	27.61	32.33	29.51	25.21	28.15
Average / (J/cm ²)	34.07 ± 8.06						28.56 ± 2.62				

表 2 B-KNO₃ 药剂的激光等离子体特征参数

Table 2 Laser plasma characteristic parameters of B-KNO₃ composites

Composite	Energy density / (J/cm ²)	Plasma current / mA	R	Charge flux / (C/(mm ² · s))	Average / (10 ³ eV)
B-KNO ₃	62.05	-0.03238+0.11218E	0.9994	1.817 × 10 ⁻⁵	10.852
	42.03	-0.01724+0.1076E	0.9970	1.022 × 10 ⁻⁵	6.170
B-KNO ₃ -phenolic resin	60.80	-0.04073+0.11259E	0.9993	2.286 × 10 ⁻⁵	13.612
	29.97	-0.01949+0.08788E	0.9829	1.160 × 10 ⁻⁵	7.920

激光等离子体点火阈值与烧蚀的材料和激光特性有关,如果不存在外电场诱导作用,应与电极板之间的电场强度无关。B-KNO₃ 和 B-KNO₃-酚醛树脂的激光等离子体点火阈值分别为 34.07 ± 8.06 J/cm² 和 28.56 ± 2.62 J/cm²,掺杂了酚醛树脂后,B-KNO₃ 的激光等离子体点火阈值明显降低和数据散布明显减小。这种特点在激光点火感度上有所体现,酚醛树脂的加入提高了 B-KNO₃ 的激光点火感度值^[6,7],说明了醛树脂有助于 B-KNO₃-酚醛树脂形成激光等离子体。

激光等离子体点火延迟时间随着激光能量密度的增大而指数衰减(见图 4)。在较低的激光能量密度下掺杂酚醛树脂的 B-KNO₃ 药剂的等离子体点火延迟时间稍大于无酚醛树脂的 B-KNO₃,当能量密度较高时(≥35 J/cm²),两者趋于相同。B-KNO₃ 和 B-KNO₃-酚醛树脂的等离子体点火延迟时间可以拟合为

$$t = 409.32 \exp(-E_0/21.75) \quad \mu\text{s}, \quad (4)$$

B-KNO₃-phenolic resin

$$t = 13.3 + 1542.81 \exp(-E_0/11.56) \quad \mu\text{s}, \quad (5)$$

式中 E_0 单位为 J/cm²。

电极板法能够利用极板间的电流和电场强度的线性关系简便地测定等离子体的电荷通量和离子通过电极板时的动能值。两种 B-KNO₃ 药剂的导电电流和电场强度的关系如图 5 所示。计算得到的掺杂酚醛树脂的 B-KNO₃ 和未掺杂酚醛树脂的 B-KNO₃ 离子流电荷通量和平均动能值如表 2 所示。

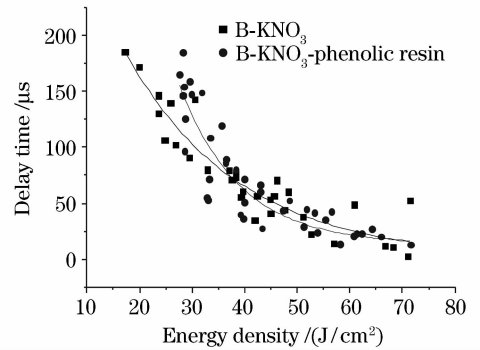


图 4 B-KNO₃ 的等离子体点火延迟时间

Fig. 4 Ignition delay time of plasma of B-KNO₃

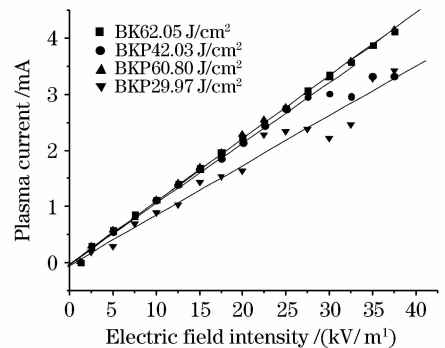


图 5 等离子体导电性与电场强度的关系

Fig. 5 Dependence of plasma conductivity on electric field intensity

激光烧蚀 B-KNO₃ 时能够产生大量带有电荷的团簇和分子碎片,主要成分为:BO⁺, O₂⁺, B₂O⁺, K⁺, KBO₂⁺ 等正离子和 N⁻, O⁻, NO⁻, NO₂⁻, O₂⁻, NO₂⁻, KNO₂⁻, B₂O₃⁻ 等负离子^[2]。这些离子或自由基是药剂烧蚀产物和等离子体的重要组成,它们之

间会发生气相化学反应,对激光点火具有重要作用。激光烧蚀产物和等离子体的导电性表明了酚醛树脂的加入增加了烧蚀产物的导电性、离子电荷通量和离子平均动能,说明酚醛树脂会导致在烧蚀产物中生成更多的活性中间产物,增强烧蚀产物的气相化学反应强度。此外,激光烧蚀 B-KNO₃ 的电荷通量和平均动能数据表明,激光作用的能量密度越大,生成的离子流电荷通量和平均动能也越大。

4 结 论

通过 B-KNO₃ 的激光点火的烧蚀离子流和等离子体导电特性的研究,发现当激光点火过程中,达到激光等离子体点火能量阈值后,激光等离子体点火延迟时间随着激光能量密度的增大而呈指数衰减。在较低的激光能量密度下掺杂酚醛树脂的 B-KNO₃ 药剂的等离子体点火延迟时间稍大于无酚醛树脂的 B-KNO₃,当能量密度较高时(≥ 35 J/cm²),两者趋于相同。同时,激光作用的能量密度越大,生成的离子流电荷通量和平均动能也越大;掺杂了酚醛树脂后,B-KNO₃ 的激光等离子体点火阈值明显降低,烧蚀形成的离子电荷通量和离子平均动能有所增大。低的离子化阈值和高的离子浓度有利于激光点火。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Shu Langping, Shen Mei, Shen Ruiqi *et al.*. Study on the effect of ablation in the surface of powder in laser ignition [J]. *Initiator and Pyrotechnics*, 2005, **1**:22~24
苏浪平,沈美,沈瑞琪等. 激光对 KNO₃ 药剂作用现象的研究[J]. 火工品, 2005, **1**:22~24
- 3 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
- 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 Ye Yinghua, Shen Ruiqi, Dai Shizhi. Study on the electrical conductivity of combustion flame [C]. Proc. 26th International Pyrotechnics Seminar, Nanjing 1999. 568~572
- 6 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
- 7 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):33~35
叶迎华,苏浪平,沈瑞琪. 酚醛树脂对 B/KNO₃ 点火药激光烧蚀特性的影响[J]. 含能材料, 2007, **15**(1):33~35