

文章编号: 1006-9941(2008)05-0487-03

Zr/KClO₄ 激光点火延迟时间与装药密度的关系

严楠, 曾雅琴, 傅宏

(北京理工大学宇航科学技术学院爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 采用光纤插入式激光点火器测定了 Zr/KClO₄ 点火药的装药密度和压药压力的关系及激光点火延迟时间和装药密度的关系, 得出在压药压力 5 ~ 130 MPa 范围, 对应的装药密度变化为 0.94 ~ 1.39 g · cm⁻³; 在密度 1.0 ~ 1.38 g · cm⁻³ 范围, 对应的点火延迟时间变化为 2.83 ~ 0.54 ms。在装药密度 ≤ 1.25 g · cm⁻³ 时, 点火延迟时间随密度变化较快, 装药密度 ≥ 1.30 g · cm⁻³ 时, 点火延迟时间随密度增加趋于稳定, 最短点火延迟时间约为 0.54 ms。在装药密度较低时, 如低于 1.07 g · cm⁻³, 对应压药压力低于 30 MPa, 实验数据散布较大。

关键词: 物理化学; Zr/KClO₄; 点火延迟时间; 装药密度

中图分类号: TJ55; O643; TQ560; TN241

文献标识码: A

1 引言

装药密度对药剂点火延迟时间的影响具有多样性。这是因为装药密度可改变药剂的导热、热容、孔隙率、反射率等物理性能, 同时也可改变感度、燃烧速度等化学性能, 因此很难从点火实验现象中得到适用任何场合下的影响规律。Annu^[1] 用激光二极管对封闭体系的 Zr/KClO₄ 和 Zr/PbCrO₄ 进行激光点火实验发现, 随药剂孔隙率增大, 点火能量和延迟时间均显著降低。张慧卿^[2] 和张沿杰^[3] 分别用激光二极管在一定压药压力下对封闭体系的 B/KNO₃ 进行了激光点火实验规律研究, 结果均表明, 在一定压力下延迟时间随压力增加而单调减少。安晓科^[4] 用激光二极管对开放体系的两种药剂在压药压力 20 ~ 110 MPa 下进行激光点火实验, 表明 B/KNO₃ 的延迟时间在 30 ~ 36 ms、Zr/KClO₄ 的延迟时间在 14 ~ 20 ms 量级随压力增加不规律波动。Holy and Girmann^[5] 用氩离子激光器对封闭体系的 TiHx/KClO₄ 进行激光点火实验, 结果认为点火延迟时间随压药压力增加而减小; 孙同举^[6] 对开放体系的 B/KNO₃ 进行了 Nd³⁺:YAG 激光器激光点火实验, 所得结论恰好与文献[5]相反。由于大多数人仅是分析压药压力与点火阈值能量、点火延迟时间的关系, 而没有分析装药密度与点火延迟时间的关系, 所以得出实验规律也不同。其主要原因是压药压力仅是外界施加的装药工艺条件, 不是药剂内在的性能参数, 药剂密度才是内在属性。而且压药压力和密度之间属

于非线性关系, 因而不能简单地通过装药密度随压药压力单调增加这一规律, 得出对点火延迟时间影响规律的一般认识。

激光点火延迟时间和点火阈值能量是激光火工品和激光敏感药剂设计的重要性能参数。影响激光点火延迟时间的因素有: 药剂的活化能、反应速率、反射率、配比、粒度、密度、导热系数、热容、反应热、掺杂等, 其中装药密度是影响点火延迟时间的重要因素之一, 常作为调整点火延迟时间性能的工艺参数进行优化设计参考。本实验研究了装药密度和压药压力的关系、装药密度对激光点火延迟时间的影响规律, 为激光火工品及其装药的设计提供科学依据。

2 实验方案及原理

2.1 密度-压药压力关系

为了测试装药密度和点火延迟时间的关系, 需要预先测定装药密度和压药压力的关系。本实验采取容积法测定装药密度。具体做法如下: 取外径 $\Phi 5.29$ mm × 7.35 mm 管壳, 用 0.01 mm 精度卡尺测量每件管壳的直径和高度, 用灵敏度 1 mg 天平称量药剂, 用手摇压力机压药, 保压时间 3 s, 测量装药高度, 按容积法计算装药密度。选定压药压力范围 5, 10, 30, 70, 90, 110, 130 MPa, 包含了点火药常用压药压力范围 (20 ~ 50 MPa), 每个压力下平行制作样品 3 发, 计算平均值, 通过密度-压药压力曲线拟合, 得出密度-压药压力关系。

2.2 激光点火器的制备

激光点火器的设计采用光纤插入式点火器(见图 1)。光纤芯径 100 μ m, 光纤材料为石英玻璃, 阶跃折射率, 数值孔径 0.22, 光纤外有塑料防护层, 外径

收稿日期: 2008-08-27; 修回日期: 2008-09-22

作者简介: 严楠(1960-), 教授, 主要从事火工烟火技术、爆炸力学、失效分析等方面的研究。e-mail: yn@bit.edu.cn

1 mm。用环氧树脂粘接剂将光纤与光纤插塞、管壳端面进行封接,光纤插塞组件先入管壳,然后装药、压药、加垫片、收口、涂胶密封。

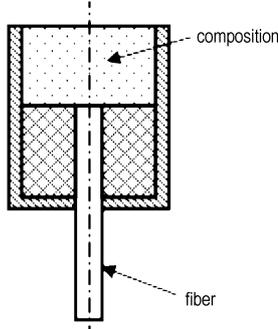


图1 光纤插入式激光点火器示意图

Fig.1 Sketch of fiber inserted laser igniter

2.3 点火延迟时间测试

实验系统由驱动电源、二极管激光器组件、光纤及光纤连接器、激光点火器,光电探测器、示波器组成,如图2所示。驱动电源给激光器提供电能的同时,输出I靶信号给示波器,激光器输出激光通过光纤传递给激光点火器,点火器被引燃后输出火焰,光电探测器接收火焰信号输出II靶信号给示波器,两靶信号时间差即为激光点火延迟时间。每个压力下平行制作样品10发,计算平均值和标准偏差,通过曲线拟合,得出密度-点火延迟时间关系。由于对于封闭装药体系要准确地测试点火延迟时间有困难,为了减少从药剂点燃到点火器输出火焰的时间差,本文通过尽量减小装药高度来获得点火延迟时间测试的近似值,本实验选择装药高度约1 mm。

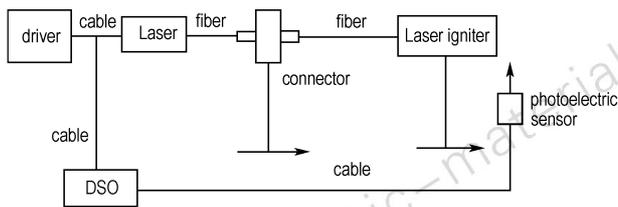


图2 激光点火延迟时间测试的实验系统示意图

Fig.2 Sketch of test system for measuring laser ignition delay time

3 实验结果与讨论

3.1 装药密度和压药压力的关系

装药密度和压药压力关系的测试结果见图3。拟合曲线的公式为指数函数: $\rho = 1.39 - 0.53 \times 0.97^p$, 相关系数为0.993。式中, p 为压药压力, MPa; ρ 为装药密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。由图3可见, 压药压力在5~130 MPa范围改变时, 对应的装药密度变化为0.94~1.39 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

压药压力低于60 MPa时, 装药密度随压药压力增加而显著增大, 压力超过90 MPa时装药密度随压药压力增加趋于稳定, 最大装药密度约为1.39 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

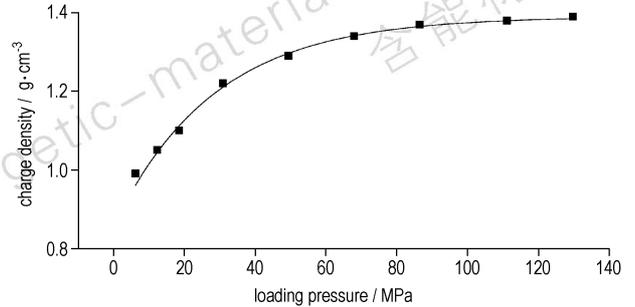


图3 Zr/KClO₄ 压药压力和密度的关系

Fig.3 Relationship between loading pressure and charge density of Zr/KClO₄

3.2 激光点火延迟时间和装药密度的关系

装药密度和点火延迟时间关系的测试结果见图4、图5。拟合曲线的公式为负指数函数: $t_i = 0.47 + 44917 \exp(-\rho/0.10288)$, 相关系数0.994。式中, t_i 为点火延迟时间, ms。由图4可见, Zr/KClO₄ 的激光点火延迟时间随密度增加而呈负指数函数规律减小。在密度1.0~1.38 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 范围, 对应的延迟时间变化为2.83~0.54 ms; 在装药密度 $\leq 1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 点火延迟时间随密度变化较快, 装药密度 $\geq 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时点火延迟时间随密度增加趋于稳定, 最短点火延迟时间约为0.54 ms。由图5点火延迟时间误差带的分布可见, 密度较高时, 如1.20 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 实验数据散布较小; 密度较低时, 如低于1.07 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 实验数据散布很大。

以上分析表明, 欲获得较短的点火延迟时间或提高延迟时间精度, 则需要提高装药密度; 在低装药密度下实验数据散布较大。

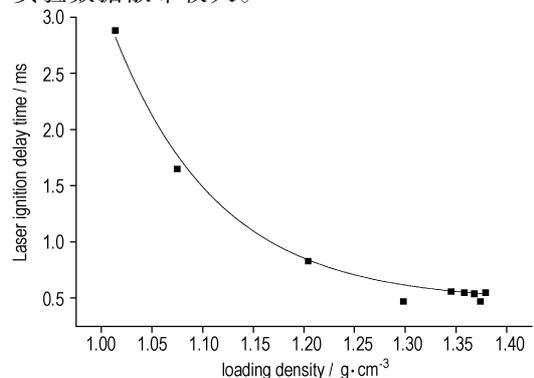


图4 Zr/KClO₄ 密度和点火延迟时间的关系

Fig.4 Relationship between charge density and ignition delay time of Zr/KClO₄

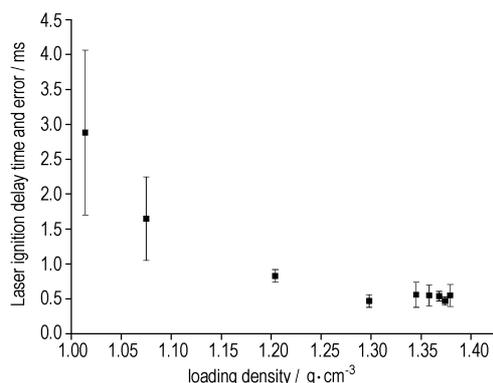


图5 Zr/KClO₄ 密度和点火延迟时间误差的关系

Fig.5 Relationship between charge density and ignition delay time error of Zr/KClO₄

4 结论

(1) 用体积法测定了 Zr/KClO₄ 点火药的装药密度和压药压力的关系,经数据分析表明两者关系呈指数关系,得到拟合公式为 $\rho = 1.39 - 0.53 \times 0.97^p$, 相关系数为 0.993。

(2) 用光纤插入式激光点火器测定了 Zr/KClO₄ 点火药的激光点火延迟时间和装药密度的关系,经数据分析表明两者关系呈负指数关系,得到拟合公式为 $t_i = 0.47 + 44917 \exp(-\rho/0.10288)$, 相关系数为 0.994,压药压力包含了实际可能遇到的范围(5 ~ 130 MPa)。

(3) 装药密度或装药压力既是激光点火药的激光感度和点火延迟时间的重要影响因素,也是激光点火

器性能设计时必需的工艺参数。依据所获得的装药密度和压药压力的关系、激光点火延迟时间和装药密度(压药压力)的关系,可指导激光点火器性能参数的优化设计。

参考文献:

- [1] Int Annu. Laser diode ignition of the combustion of pyrotechnic mixtures [C] // Conf ICT 1998, 29, 40.1 - 40.12.
- [2] 张慧卿. 二极管激光激励含能材料点火特性研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2002.
ZHANG Hui-qing. Studies on the laser diode ignition characteristics of energetic materials [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2002.
- [3] 张沿杰. 降低激光诱导快速反应阈值的方法研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2006.
ZHANG Yan-jie. Studies on the reduction of laser induced fast reaction threshold [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006.
- [4] 安晓科. 半导体激光点火能量转换原理的探讨 [D]. 北京: 北京理工大学, 2006.
AN Xiao-ke. Research on mechanism of semiconductor laser ignition energy transform [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007.
- [5] Holy J A, Girmann T C. The effects of pressure on the laser initiation of TiHx/KClO₄ and other pyrotechnics [C] // Proceedings of the 13th International Pyrotechnic Seminar, Grand Junction, Co, 1988: 449 - 469.
- [6] 孙同举. 激光与火工药剂相互作用特性及机理的实验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 1996.
SUN Tong-ju. Experimental study on the interaction features and mechanism of laser and pyrotechnic composition [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 1996.

Relationship between Laser Ignition Delay Time and Charge Density of Zr/KClO₄

YAN Nan, ZENG Ya-qin, FU Hong

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, School of Aerospace Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The relationship between charge density and loading pressure, and between laser ignition delay time and charge density of Zr/KClO₄ were studied by fiber inserted laser igniter. The density ranges of 0.94 - 1.39 g · cm⁻³ corresponding to the loading pressure ranges of 5 - 130 MPa and the delay time ranges of 2.83 - 0.54 ms corresponding to the density ranges of 1.0 - 1.38 g · cm⁻³ were obtained. With the density below 1.25 g · cm⁻³, the ignition delay time changes faster with density, and tends to be stable when the density overpasses 1.30 g · cm⁻³, with the shortest delay time in 0.54 ms. When the density is lower, such as below 1.07 g · cm⁻³ and the corresponding loading pressure is less than 30 MPa, scattering of experimental data is bigger.

Key words: physical chemistry; Zr/KClO₄; ignition delay time; charge density