

高能点火药点燃性能的研究

北京航空航天大学 李 周福国 李宜敏

【摘要】 以 CO_2 激光为能源对 $\text{Al} + \text{KClO}_4$ 高能点火药的点火特性进行了研究。结果表明： Al 和 KClO_4 的质量比各为 50% 时，点火延迟时间最小。点火药中掺入少量硫粉能大大减少点火延迟时间。点火延迟时间随点火药的初温的升高而减小。点火延迟时间随点火热流密度的增大而减小。存在一个最小点火热流密度，小于此值点火药将不能被点着。在实验观察和理论分析的基础上，提出一个 $\text{Al} + \text{KClO}_4$ 高能点火药的点火模型，并对由此模型而导出的控制方程进行了数值求解，计算结果与实验值相符。

一、 CO_2 激光点火试验设备及试验条件

1. 试验设备 CO_2 激光点火试验设备由 CO_2 激光器、光路控制系统，延迟时间测试系统，环境条件控制系统、试验数据处理系统，试验容器和试验件等组成。

本试验利用 CO_2 激光器作为辐射热源加热器，对点火药试件施加可控的激光能量。能量的供给和切断是利用双直列插式 C-MOS 数字集成电路组成的光控系统来执行。由数码管显示系统、高速摄影机、测温系统组成的测试混合系统记录试验的能量施加时间、点火延迟时间、燃烧时间、燃烧温度、燃烧现象。环境条件控制系统可改变点火药试件点燃的初始压强，初始温度和环境气体成份。

本试验设备的主要特点是 CO_2 激光输出功率大—百瓦级，可控；功率稳定度高；激光器体积小，工作寿命长；光控系统准确、灵敏；测时系统精度高（ms）；调节功能多；数据处理方便^[4]。试验设备系统如图 1 所示。

2. 试验条件 点火热流密度根据本试验设备的激光输出有效功率大小确定，在小于 150 瓦范围内可调。

环境气体为空气，环境压强为 1 大气压，点火药试件初温在 45 ~ 45 范围。点火药试件尺寸为直径 10mm，长度 5mm。

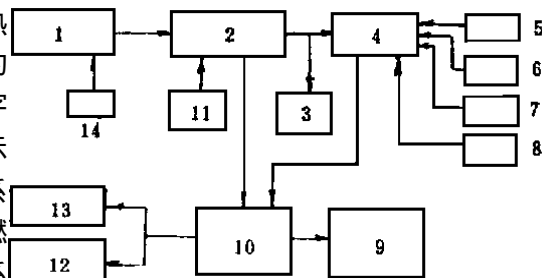


图1 试验设备系统图 (1. CO_2 激光能源系统

2. 光路控制系统；3. 功率监测系统
4. 试验容器；5. 温度调节系统；6. 压强控制系统
7. 环境气体成份调节系统；8. 高速摄影系统
9. 燃烧温度显示系统；10. 放大系统
11. 操作控制系统；12. 计算机数据处理系统
13. 数码管显示系统；14. 输出功率调节系统)

点火药试件采用不同比例的六种配比: 10% Al, 90% KClO_4 ; 30% Al, 70% KClO_4 ; 50% Al, 50% KClO_4 ; 70% Al, 30% KClO_4 ; 90% Al, 10% KClO_4 ; 69% Al, 29% KClO_4 , 2% S。

二、理论点火模型

本模型主要针对 $\text{Al} + \text{KClO}_4$ 高能点火药。试验中点火能源是单纯辐射热源。试件径向尺寸较小。 $\text{Al} + \text{KClO}_4$ 点火药在点火过程中最重要的控制过程是气态氧化剂与熔融态铝在界面上的复相放热反应。点火的实现是外加点火热流与界面复相放热的结果 (图 2)。

激光束照射到点火药试件表面后, 表面温度升高, 并以传导方式向固相及气相传热, 同时, 点火药内部也吸收部分透射而入的辐射能。随着辐射能施加时间的延长, 表面温度逐渐升高, 试件表面的 KClO_4 开始分解、熔化。表面内层的氧化剂的温度也在升高, 也可能出现一定程度的分解。铝颗粒随着温度的升高而吸热发红、熔化。由于点火药热传导系数小, 内部温度不高, 所以点火药内部的氧化放热反应可以忽略。点火药表层界面上熔融态的铝与氧气发生氧化反应而生成 Al_2O_3 隔膜, 随着温度的升高, Al_2O_3 膜不断生成又不断破裂, 熔融态的铝不断地裸露出来与 KClO_4 分解释放出的氧气发生放热反应^[2,3]。复相放热反应产生的热量加速 KClO_4 的分解速度和铝颗粒的熔化, 反过来又促进了复相反应的进行。如此循环下去, 当复相放热大于总吸热量和总散热量后, 点火药自身的净热积累将导致氧化剂气态分解物的猛烈增加而发生喷发现象, 同时伴随有火焰产生。

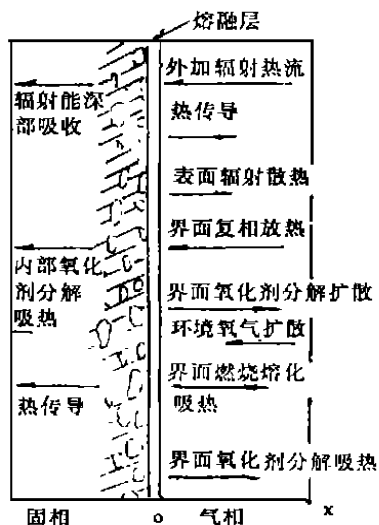


图 2 点火模型

点火药数学模型的假设条件: (1) 点火药试件为一维半无限大平面。(2) 由于铝难挥发, 点火期间, 气相中不存在燃料 (铝蒸气), 也不考虑固相内铝的氧化反应, 只存在界面上的复相反应。(3) 点火药组分掺混均匀, 有一定透明度, 辐射能深部吸收满足 Beer 定律。(4) 氧化剂分解遵循 Arrhenius 型分解定律。界面及固相内部都存在氧化剂的热分解, 不考虑光化学分解。(5) 界面复相反应符合质量作用定律。其反应速度常数由 Arrhenius 定律描述。界面反应对气相为 m 级, 对固相为零级。(6) 点火过程中忽略界面退缩, 环境气体是滞止气体, 不考虑对流换热。(7) 环境气体及气相产物均不吸收、也不辐射辐射能。表面的熔融层高温辐射不可忽略。(8) 考虑了铝的熔化吸热, 吸热率是一个常量。(9) 环境压强为 1 个大气压。点火过程中, 热物性参数、质量扩散系数、辐射能源部分吸收系数均为常数。

三、点火药数学模型的控制方程^[1]

气—凝相界面位于 $x = 0$ 处, 固相区 $x < 0$, 气相区 $x > 0$, 坐标如图 2 所示。

固相能量方程:
$$\frac{\rho_p c_p \partial T_p}{\partial t} = \frac{K_p \partial^2 T_p}{\partial x^2} + I_R \beta e^{-\beta I \times 1} - Q_{ox} \rho_{ox} Z_{ox} e^{-E_{ox}/RT_p}$$

式中: β 为辐射能深部吸收系数; I_R 为表面辐射热流密度; Z_{ox} 为氧化剂分解指前因子; E_{ox} 为氧化剂分解活化能; Q_{ox} 为氧化剂分解单位质量吸热量。

气相能量方程:

$$\rho_g c_g \partial T_g / \partial t = K_g \partial^2 T_g / \partial x^2$$

气相氧化剂扩散方程:

$$\partial C_{ox} / \partial t = D \partial^2 C_{ox} / \partial x^2$$

式中: D 为质量扩散系数。

边界条件: 由于考虑了界面上的反应, 不将界面看成理想的几何平面, 按 Guggenheim 界面模型视为 δ 厚度的薄层, 该薄层内各种参数不随坐标变化。

界面层能量平衡:

$$\begin{aligned} \frac{c_p \rho_p \partial T_f}{\partial t} = I_R \beta + Q_f \cdot C_{\alpha}^m \cdot Z_f e^{-E_f / RT_f} - Q_{\alpha} \cdot \rho_{\alpha} \cdot Z_{\alpha} e^{-E_{\alpha} / RT_f} + K_g \left. \frac{\partial T_f}{\partial x} \right|_{x=0^+} \\ - K_p \left. \frac{\partial T_f}{\partial x} \right|_{x=\delta^-} - \frac{\epsilon \sigma T_f^4}{\delta} - Q_m \frac{\rho_{Al}}{\tau} \Big|_{T_f=660 \text{ 时}} + Q_s \cdot \frac{\rho_s}{\tau} \Big|_{\text{若掺入硫且 } T_f=230 \text{ 时}} \end{aligned}$$

式中: Z_f 为界面反应指前因子; E_f 为界面反应活化能; Q_f 界面复相反应单位质量的氧化剂放热量; Q_m 为单位质量的铝熔化热; Q_s 为单位质量硫的燃烧热; δ 为界面反应层厚度; τ 为铝的熔化时间; τ 为硫的燃烧时间。

界面上氧化剂的分解:

$$- D \left. \frac{\partial C_{\alpha f}}{\partial x} \right|_{x=0^+} = K_o \cdot Z_{\alpha} \cdot \rho_{\alpha} e^{-E / RT_f} - C_{\alpha f}^m \cdot Z_f \cdot e^{-E_f / RT_f}$$

在 $x = -\infty$ 处

$$T_p(-\infty, t) = T_o$$

在 $x = +\infty$ 处

$$T_g(+\infty, t) = T_o \quad C_{\alpha}(+\infty, t) = C_{\alpha o}$$

在 $x = 0$ 处

$$T_p(o, t) = T_g(o, t) = T_f(t)$$

初始条件: $T_p(x, o) = T_g(x, o) = T_f(o) = T_o$, $C_{ox}(x, o) = C_{\alpha o}$ ($x > 0$)

点火准则 C_{ig} : 界面复相放热速率大于总吸热率及总散热率之和, 且 $T_f > c_1$, 认为点火成功。

$$\begin{aligned} C_{ig} = Q_f \cdot C_{\alpha f}^m \cdot Z_f \cdot e^{-E_f / RT_f} - Q_{ox} \cdot \rho_{ox} \cdot Z_{\alpha} \cdot e^{-E_{\alpha} / RT_f} + \frac{1}{K_g} \left. \frac{\partial T_f}{\partial x} \right|_{x=0^+} \\ - \frac{1}{K_g} \left. \frac{\partial T_f}{\partial x} \right|_{x=\delta^-} - \frac{\epsilon \sigma T_f^4}{\delta} - \frac{Q_m \rho_{Al}}{\tau} > 0 \end{aligned}$$

式中: τ 为铝的熔化时间; c 为比热, 分解生成的氧化剂浓度; K 为热传导系数。

四、实验和计算结果分析

点火延迟时间 t_{ID} 随点火热流密度 I_R 变化规律: 对含铝量为 70%、50% 的点火药在各种 I_R 下的结果表明, 计算结果与实验所得变化规律完全相同, 如图 3 所示 ($T_o = 298K$)。 t_{ID} 随 I_R 的增加而减小, I_R 增加到一定程度后, t_{ID} 的变化趋于平缓。在小 I_R 情况下, t_{ID} 增加得很快。

点火延迟时间 t_{ID} 由两部分构成: 一是惰性加热过程控制的 t_h 。一是由氧化剂 $KClO_4$ 的分解速度及凝聚态的铝与气态氧化物之间的复相反应速度所控制的 t_{ch} , 即 $t_{ID} = t_h + t_{ch}$ 。

当 I_R 小时, 辐射能所施加热量只能使点火药试件升温至某一值, 在此温度下, 外加的点火热量与向外散热、点火药试件的惰性升温吸热、氧化剂分解吸热相平衡。氧化剂的分解只维持在低速水平, 从而不能产生足够的氧化剂与熔融态的铝的猛烈燃烧。在小 I_R 下, t_h 起控制作用, I_R 很小时, 点火甚至不能进入 t_{ch} 控制的阶段。

I_R 逐渐增大时, 加速了点火药表面层及附近的温升, 缩短了惰性加热时间 t_h , t_{ID} 随之减小。再增大 I_R 时, t_{ID} 的减小将不明显, 在 $t_{ID} \sim I_R$ 曲线上变化较为平缓。这是由于 I_R 很大时, t_h 较

小, 此时 t_{ID} 主要受 t_{ch} 控制而 t_{ch} 是由氧化剂分解速度, 界面上复相反应速度所决定, 反应一旦进入 t_{ch} 控制的阶段, 其速度都是很快的, 故其变化的范围是很有限的。

点火延迟时间 t_{ID} 随初温的变化规律: 对含铝 70%, 过氯酸钾 30% 的点火药, 在两种热流密度 I_R 值, 改变初温 T_o , 计算 t_{ID} 的变化规律与实验结果一样, 近似线性变化。计算和实验都一致表明 T_o 对 t_{ID} 的影响远不如 I_R 的影响显著。如图 4 所示。

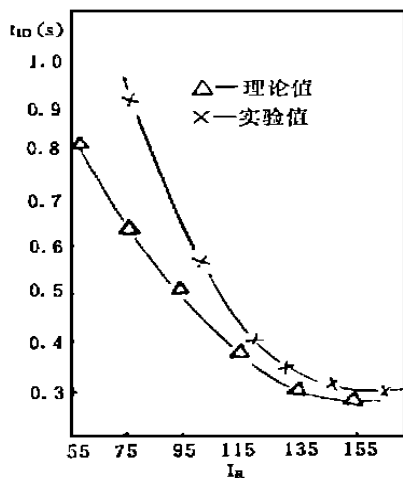


图 3 $t_{ID} \sim I_R$ 曲线 ($Al : KClO_4 = 70\% : 30\%$)

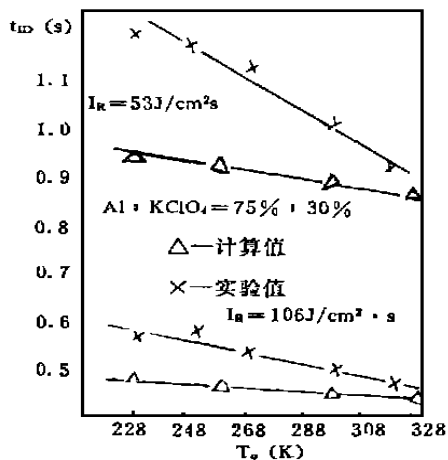


图 4 $t_{ID} \sim T_o$ 曲线

点火药初温提高实质上是点火药升温的起始温度到氧化剂开始大量分解和铝颗粒开始融化之间温差缩小。初温越高, 所需惰性加热时间 t_h 相应也越小, 故点火延迟时间 t_{ID} 也越小。

当点火热流密度较小时, 初温不同的点火药的 t_{ID} 的差别是比较显著的, 表现为 $t_{ID} \sim T_o$ 直线斜率大。这是因为小 I_R 加热而使 t_h 增大的缘故。相反, 在大 I_R 加热时, t_h 也较小, 因而 $t_{ID} \sim T_o$ 曲线的斜率也就小多了。

掺入硫后 t_{ID} 随 I_R 变化规律: 针对 69% Al , 29% $KClO_4$, 2% S 配比的点火药, 在同样的 I_R 下, 加硫的 t_{ID} 比未加硫的值小了很多, 但 $t_{ID} \sim I_R$ 总规律还是相似的。说明加硫能改善点火药的点燃性能, 计算和实验结果吻合。如图 5a、b 所示。

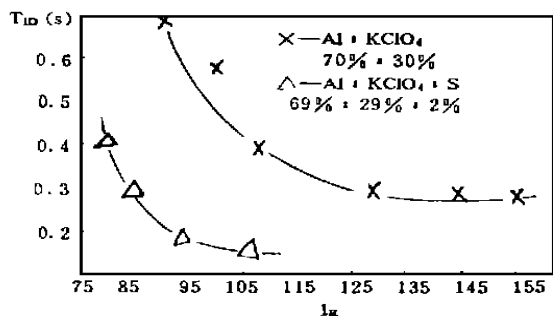


图 5a 加硫 $t_{ID} \sim I_R$ 实验曲线 ($T_o = 298K$)

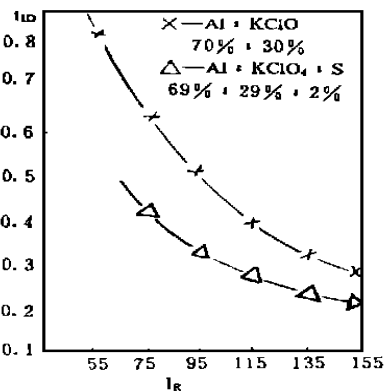


图 5b 加硫 $t_{ID} \sim I_R$ 理论曲线 ($T_o = 298K$)

加硫点火药的 t_{ID} 小了许多, 且所需的最小点火热流密度也小了。可以从下面两方面作定性

解释。一是硫的燃烧放热。硫是一种低燃点的燃料，在空气中的着火点约为 230℃，硫粉可在铝熔化和过氯酸钾分解之前，就能在界面上与环境气体中的氧气燃烧而放出热量，加速 KClO_4 的分解和加快铝颗粒熔化，缩短惰性加热时间 t_h 。二是点火药密度的影响。试件成型时，压制力越大，试件的密实程度就越高，即试件的密度越大。显然，密度 ρ_p 增大，点火药升温所需能量 $\rho_p c_p$ 也增大，当 I_R 一定时， t_h 将增加，于是 t_{ID} 也将变大。还有试件表面状况的原因，当试件压制得较为疏松时，其表面较为粗糙，凸凹不平，从而增大了反应面积，能够加速化学反应，缩短了点火延迟时间。硫粉的粘结性能很好，在点火药配方中加入少量硫粉后，能够在较小的压强下压制成密度小、表面疏松的试件^[5]。

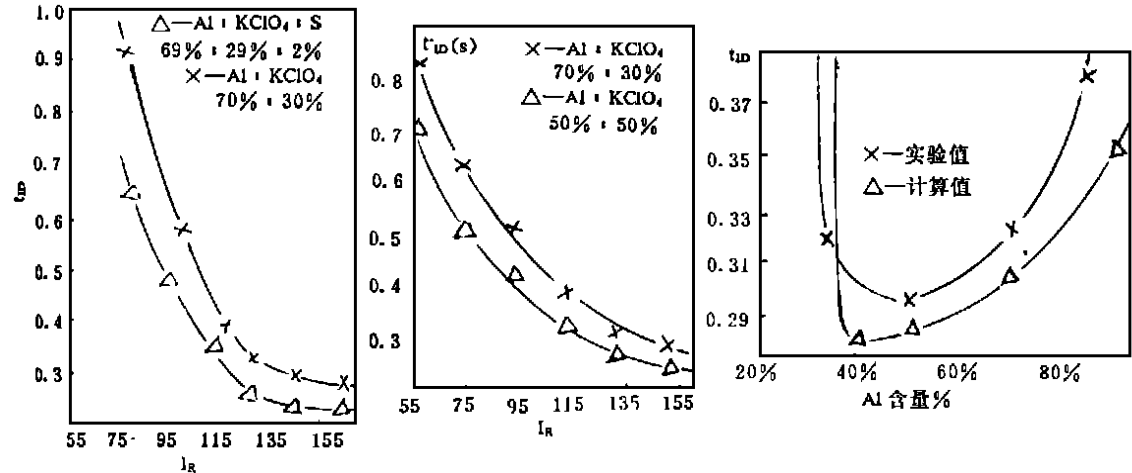


图 6a 不同配比实验曲线 图 6b 不同配比理论曲线 图 6c 不同配比实验理论比较曲线

含铝量的变化对 t_{ID} 的影响: 固定 I_R 和 T_0 , 改变点火药组分中的含铝量 30%, 50%, 70%, 90% 研究对 t_{ID} 的影响, 实验和计算结果如图 6a、b、c 所示 (a、b、c 的 T_0 各为 298K, c. $I_R=143.4\text{J}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$)。含 Al 量在化学计量比附近时, t_{ID} 最小。含 Al 量很小时, 点火药不能被点燃。含 Al 量越偏离化学计量比, 则 t_{ID} 越大。

结论: 利用 CO_2 激光点火试验设备, 对 $\text{Al}+\text{KClO}_4$ 高能点火药进行了点火试验研究, 获得了大量有用数据。针对该点火药, 结合辐射点火及设备的实际情况, 提出一个适用于该点火药的点火模型, 计算结果与试验结果相吻合。试验和计算结果都表明, 点火热流密度对点火延迟时间影响很大, I_R 越大, t_{ID} 越小。存在着能够点燃点火药的最小热流密度。当点火热流密度增大到一定值以后, I_R 对 t_{ID} 的影响减小。点火药试验表明氧化剂和燃料主要组分的恰当比对改善点燃性能是十分重要的。在接近化学计量比附近的配比, t_{ID} 会最小, 如果在主组分中加入少量固态硫作为固体粘合剂, 会使点燃性能得到更满意的改善。点火药初温对点火延迟时间的影响也是不可忽视, 随着初温增加, t_{ID} 将减小, 呈线性变化规律。

参 考 文 献

[1] Kulkarni A. K., Kumar M., Kuo K. K., "Review of Solid Propellant Ignition Studies", AIAA 80-1210.
[2] F. A. 威廉斯等著, 京国群译, "固体推进剂火箭发动机的基本问题 (下册)", 国防工业出版社, 1977 年。
[3] 董万译, "无机固态反应", 日本化学会编, 科学出版社, 1985 年。
[4] 范道生, "用 CO_2 激光器点燃固体推进剂的试验技术研究", 1986 年北航硕士论文。
[5] 纪秋颖, " CO_2 激光点燃丁羟推进剂及点火剂的初步研究", 1987 年北航硕士论文。

RESEARCH ON IGNITION CHARACTERISTICS OF HIGH-ENERGY IGNITERS

Li Lu (*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

The experimental research on the ignition characteristics of aluminum-potassium perchlorate ignition charge were carried out with CO₂ laser as heat source. The effects of the weight percentage of aluminum in the ignition charge, the radiation intensity, the additive of sulphur powder and the initial temperature of the test sample on ignition delay were investigated experimentally. The experimental results show that under the conditions of a fixed radiant heat flux, the ignition delay is the shortest, as the weight ratio of aluminum to potassium perchlorate approaches 50%. The ignition delay decreases sharply by adding 2% (weight) of sulphur into the ignition charge. The ignition delay decreases as the radiant heat flux and the initial temperature increase. There seems to exist a minimum of the radiant heat flux in the case of a fixed weight percentage of aluminum and a given initial temperature. It is impossible to ignite the sample successfully if the heat flux is inferior the minimum. The external energy for ignition is the smallest at the optimal heat flux. An ignition model for aluminum-potassium perchlorate ignition charge is established on the basis of experimental observations and theoretical analyses. The heterogeneous reaction is regarded as the most important process in the model. The governing equations of the model can be solved numerically. The analytical results correspond to the experimental data satisfactorily.

IMPLICIT SCHEME IN ONE-DIMENSIONAL TIME-DEPENDENT TWO-PHASE TRANSONIC FLOW FIELD COMPUTATION

Pei Ming, Zhang Zhongqin, Zhang Zhenpeng

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

A computational model with an implicit numerical integration scheme is successfully applied to computation of the one-dimensional time-dependent two-phase transonic flow field in nozzleless solid propellant rocket motors. In addition, this achievement provides the basis of integrative performance calculation for all kinds of solid rocket motors. We introduce a concept of equivalent ignition channel, which simplified the treatment of headstream boundary conditions. When deducing the expressions of the elements in the coefficient matrix, we get derivatives before we replace the differential with finite difference. This approach not only makes the expressions succinct, but also saves the time of computation. In the inverse operation of the matrix in two-phase flow computation, the characteristics of the matrix are taken into account, and therefore the computation time is further shortened. Two numerical examples are given. Comparison of the calculations with the motor tests shows a good agreement between the calculated and the measured values.