

文章编号: 1006-9941(2014)02-0155-06

# HAN 基液体推进剂单滴无弧点火过程的数值模拟

刘焜<sup>1</sup>, 余永刚<sup>1</sup>, 倪彬<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 北京信息控制集团有限公司, 江苏 南京 211153)

**摘要:** 为研究硝酸羟胺(HAN)基单元液体推进剂 LP1846 单滴无弧电点火的机理, 基于两步不可逆化学反应机理, 同时考虑物性参数随温度的变化关系, 结合相关实验, 对 HAN 基液体推进剂 LP1846 液滴在大气环境下的无弧电点火过程进行了数值模拟。结果表明: 根据化学反应速率和温度分布变化, 将最大加载电压 80 V 的无弧电点火过程分为预热(0~695 ms)、热分解(695~805 ms)及燃烧(805~1000 ms)三个特征阶段。预热阶段, 液滴保持球形, 中心温度缓慢上升; 热分解阶段, 反应在液滴中心产生向外发展, 液滴膨胀变大, 内部出现伞形温度梯度分布; 燃烧阶段, 火焰在液滴内部生成, LP1846 剧烈燃烧生成大量产物, 流场温度先升后降。液滴着火延迟期随着最大加载电压的增大而减小, 模拟结果与实验数据变化趋势一致, 最大误差为 2.9%。

**关键词:** 工程热物理; 液体推进剂; 无弧点火; 传热; 多相流; 数值模拟

**中图分类号:** TJ55; V511<sup>+.3</sup>

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.006

## 1 引言

硝酸羟胺(HAN)基液体推进剂是以 HAN 为氧化剂, 脂肪族胺的硝酸盐为燃料, 再加上水以及微量添加剂组成的单元液体推进剂。它具有高比冲、高密度、低毒性及良好的稳定性等优点, 被认为是最有可能代替肼的新一代绿色液体推进剂<sup>[1-3]</sup>。从 20 世纪 80 年代以来, 国内外学者在 HAN 基液体推进剂液滴点火方面进行了大量的研究工作<sup>[4-7]</sup>, 采用的点火方式主要为电火花点火或间接点火, 这些点火方式都存在着损耗能量大、重复性差的缺点。针对 HAN 基液体推进剂具有较高导电率的特性, Despirito<sup>[8]</sup> 提出了利用在加载电压下电流的热效应点燃推进剂, 并给出了点火装置的优化方案, 指出无弧点火方式可以减少点火能量, 提高点火装置的重复利用率。对此, 余永刚<sup>[9-10]</sup> 进行了 HAN 基液体推进剂 LP1846(60.8% 硝酸羟胺+19.2% 三乙醇胺硝酸盐+20% 水)液滴无弧点火实验, 分析了着火延迟时间和点火能量的定性关系, 证明了无弧点火的可行性。

目前, 国内外针对 HAN 基液体推进剂液滴无弧点火的理论研究还未见报道, 对于无弧点火的机理研究较少。本研究以 HAN 基单元液体推进剂 LP1846 单滴为例, 采用简化的化学反应动力学模型, 基于体系的守恒方程, 模拟了推进剂液滴在静止大气环境中无弧点火过程, 并与相关实验结果进行比较。研究结果对于深入了解 LP1846 燃烧机理, 掌握无弧点火方式, 具有一定的参考价值。

## 2 物理模型

计算基于以下基本假设: (1) 将 LP1846 液滴电点火过程作二维轴对称处理; (2) 流场压力以环境压力参与计算; (3) 将电极加热液滴过程简化为极间距直径的均匀热源加热区域处理, 当热解产物充满热源区域时, 放电停止; (4) 将 LP1846 作为均匀物质处理, 且分解和燃烧的产物不溶解于液滴; (5) 不考虑热辐射、粘性耗散及由压力和温度引起的分子扩散; (6) 忽略体积力和自然对流的影响; (7) 热物性参数随温度、组分变化, 以多项式拟合方法来简化计算。

## 3 数学模型

### 3.1 控制方程

连续方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

动量方程为

收稿日期: 2013-11-25; 修回日期: 2012-12-15

基金项目: 教育部博士点基金资助(20113219110024)

作者简介: 刘焜(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事含能液体喷雾与燃烧方面的研究。e-mail: liukun\_012@163.com

通信联系人: 余永刚(1963-), 男, 教授, 主要从事含能材料的燃烧理论与控制技术方面的研究。e-mail: yonggangy@21cn.com

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla \rho + \nabla \cdot \mu_m (\nabla \cdot \vec{v}_m) + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n Y_k \rho_k \vec{v}_{d,i} \vec{v}_{d,i} \right) \quad (2)$$

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (Y_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [ (Y_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) ] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \Phi \quad (3)$$

组分方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (Y_i \rho_i) + \nabla \cdot (Y_i \rho_i \vec{v}_i) = -\nabla \cdot (Y_i \rho_i \vec{v}_{d,i}) \quad (4)$$

式中,  $\rho_m$  是混合密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\vec{v}_m$  是混合速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\vec{v}_i$  是组分  $i$  速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\mu_m$  是混合粘度,  $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ; 组分  $i$  的相对速度  $\vec{v}_{d,i} = \vec{v}_i - \vec{v}_m$ ,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Y_i$  为组分分数;  $\rho_i$  为  $i$  相密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $p$  为压力, Pa;  $\lambda$  为导热系数,  $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $T$  为温度, K;  $\Phi$  为能量源项,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 相平均能量  $E_i = h_i - p/\rho + v_i^2/2$ ,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $h_i$  为显焓,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

### 3.2 化学反应模型

LP1846 液体推进剂中除溶剂水外, 其他都是不挥发的硝酸盐。实验<sup>[11]</sup>表明在燃烧前 LP1846 的失重主要集中在温度达到 120.8 °C 后出现的剧烈的自加速分解反应。本研究认为 LP1846 液滴燃点过程分为热分解反应和燃烧, 反应均不可逆。其化学反应方程式如下:  $\text{LP1846}(X) \rightarrow \text{中间产物}(Y) (\text{NO}_x, \text{HNO}_3, \text{NH}_2\text{OH} \text{ 等}) + Q_1$  ( $R_1$ )  $\text{中间产物}(Y) \rightarrow \text{燃烧产物}(Z) (\text{N}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}) + Q_2$  ( $R_2$ ) 其中, 反应  $R_1$  代表热分解反应, 反应物为 LP1846, 生成物为中间产物( $Y$ ),  $Q_1$  为分解热; 反应  $R_2$  代表中间产物( $Y$ ) 燃烧生成最终产物( $Z$ ),  $Q_2$  为燃烧热。根据 Arrhenius 定律及化学反应动力学原理<sup>[14]</sup>, 化学反应速率为:

$$\omega_1 = A_1 T^{n_1} [X] \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \quad (5)$$

$$\omega_2 = A_2 T^{n_2} [Y] \cdot \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \quad (6)$$

式中,  $A_1, A_2$  为指前因子,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $n_1, n_2$  为温度指数;  $E_1, E_2$  为化学反应活化能,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $R$  为普适气体常数,  $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

### 3.3 物性参数拟合

气相组分密度由不可压理想气体公式<sup>[14]</sup>计算

$$\rho_g = \frac{p}{(R/M_g) T} \quad (7)$$

气相组分粘度和导热率由理想气体混合定律<sup>[14]</sup>计算

$$G_g = \frac{\sum_i Y_i G_i}{\sum_j Y_j \Phi_{ij}} \quad (8)$$

$$\Phi_{ij} = \left[ 1 + \left( \frac{G_i}{G_j} \right) \frac{1}{2} \left( \frac{M_j}{M_i} \right) \frac{1}{4} \right]^2 / \left[ 8 \left( 1 + \frac{M_j}{M_i} \right) \right] \frac{1}{2} \quad (9)$$

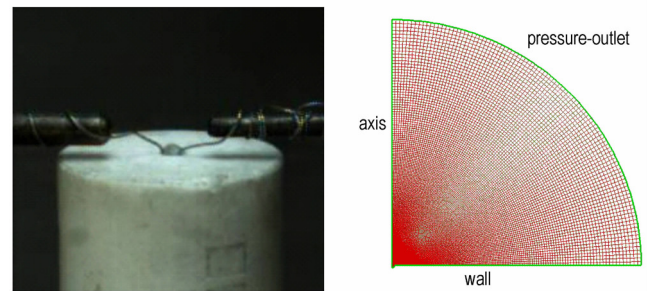
气相组分比热容取各组分比热容的质量平均值。液相组分粘度、导热率与温度的关系参照文献[12-14], 采用多项式拟合方法参与计算。

$$G_i = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 \quad (10)$$

式中,  $\rho_g$  为气相组分密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $M_i, M_j$  分别为  $i$  相和  $j$  相的分子量,  $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $T$  为温度, K。  $a, b, c, d, e$  为多项式系数。

### 3.4 计算模型及网格划分

图 1a 所示为推进剂液滴在静止大气中电点火的实验装置<sup>[10]</sup>。底部为绝热实验平台, 中心有一个半径 1.85 mm 的半球形凹槽, 其中置入间距 1 mm 的电极供加热点火。向凹槽中注入 LP1846, 在表面张力作用下推进剂形成半径 1.85 mm 的球状液滴。加载电压在 1 秒的时间内从 0 V 开始按线性递增加载到液滴上, 最大加载电压为 80 V。



a. experiment device

b. calculation region

图 1 LP1846 液滴无弧电点火实验装置和计算区域

Fig. 1 Experiment device and calculation region of arcless electrical ignition of LP1846 droplet

图 1b 为含网格划分的计算区域, 包括凹槽内的液滴以及实验台上方的空间区域。上部计算区域取半径 40 mm 的半球形区域, 边界为压力出口, 外部为大气环境。底部为绝热壁面, 由实验台的凹槽与平面部分构成。由于液滴周围流场参数变化较为剧烈, 因此网格采用等比分布, 计算区域网格数为 60760。流场初始压强为大气压强, 初始温度为 300 K。

### 4 计算结果与分析

结合实验工况<sup>[10]</sup>, 运用 Fluent 软件对液体推进剂单滴在大气环境中电点火过程进行了数值模拟, 采用 Mixture 混合模型, 求解器选用基于压力的耦合求解器, 压力-速度耦合采用 PISO 格式, 压力的离散使用二阶

格式,动量方程、能量方程以及组分方程均采用二阶迎风格式离散,体积分数方程采用 QUICK 格式参与计算。计算时间取 1000 ms,电极的加载电压变化参照文献 [9],与 LP1846 电点火特性相关的部分参数见表 1。

表 1 LP1846 相关参数

Table 1 Parameters of LP1846

parameter	value
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1430
$c_p/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	4180
$M/\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	54.49
$A_1/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$9.32 \times 10^6$
$A_2/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$2.54 \times 10^{10}$
$E_1/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$1.82 \times 10^5$
$E_2/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$7.56 \times 10^5$
$\gamma/\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	0.0844

#### 4.1 点火过程特征阶段

综合不同时刻的温度分布(图 2)、热分解反应速率(图 3)、燃烧反应速率(图 4)及温度最大值曲线变化(图 5),可以将整个点火过程主要分为 3 个特征段:

(1) 预热阶段(0 ~ 695 ms)。当  $t \leq 695$  ms 时,从图 2 中可以发现,温度场变化主要表现在液滴中心区域出现直径约 1 mm 的球形热源区,这是因为 LP1846 是极性介质,电极通电后在极间产生电流,在电流的热效应作用下,极间导电区域成为热源区。由图 5 可见,最大温度值在  $t < 300$  ms 时变化极小,在  $300 \text{ ms} \leq t \leq 695$  ms 阶段略微上升。

(2) 热分解阶段(695 ~ 805 ms)。由图 3 可见,当  $t > 695$  ms 时,液滴中心区热分解反应速率开始升高,LP1846 分解生成中间产物(Y)并放出热量,分解热一部分用于提升中间产物 Y 相温度,另一部分向周围液相传递,使更多的液相开始热分解,形成自加速反应。到  $t = 720$  ms 时,热分解反应扩展至整个球形热源区。当  $t = 760$  ms 时,反应区域继续扩大并逐渐脱离球状。当  $t = 790$  ms 时,分解反应呈现上下两部分不同发展趋势,处于凹槽中的下半区由于受实验台限制仍然能保持半球面,反应上半区的径向扩展速度大于轴向速度,逐渐转变为伞状,反应速率呈边缘大于中心的分布规律。当  $t = 800$  ms 时,热解反应高峰期集中在“伞盖”的两侧。

从图 2 中发现,当  $t \geq 760$  ms 时,温度出现明显的梯度分布,温度等值线由球形转为伞形,并且向上方扩展明显。对应地在图 5 中  $760 \text{ ms} \leq t < 805$  ms 范围内,最大温度值增长较大,这是因为此时热分解反应速率较大,生成热大于液滴向外界传递的热量,Y 相温度快速上升。

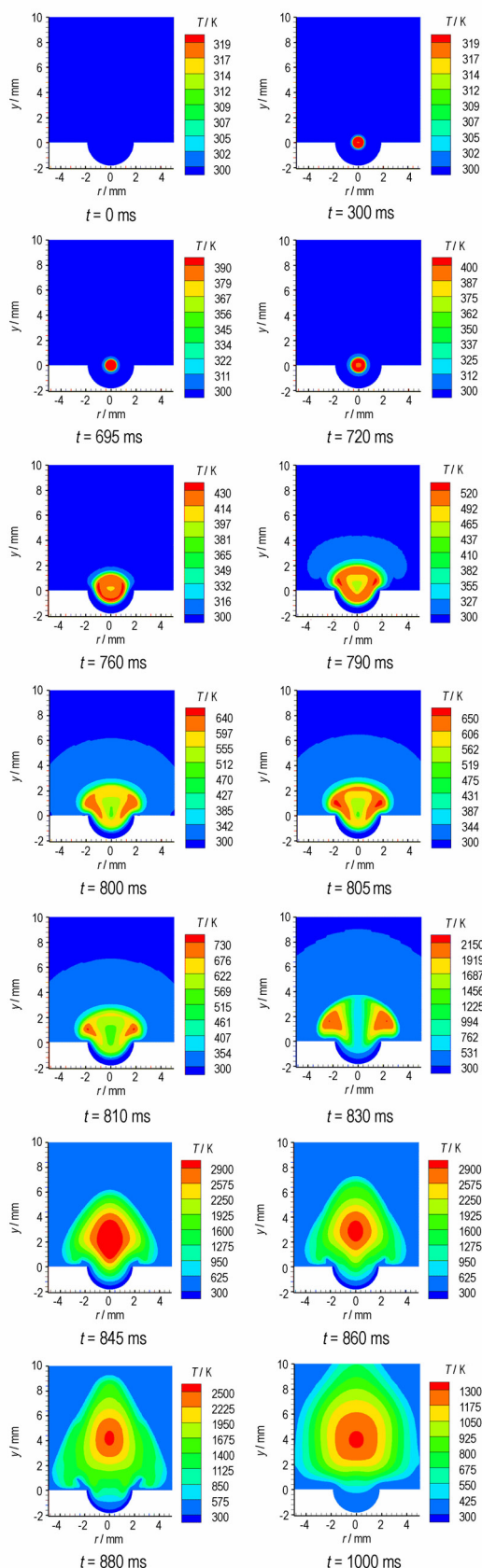


图 2 不同时刻 LP1846 温度分布图

Fig. 2 Temperature profiles of LP1846 at different time

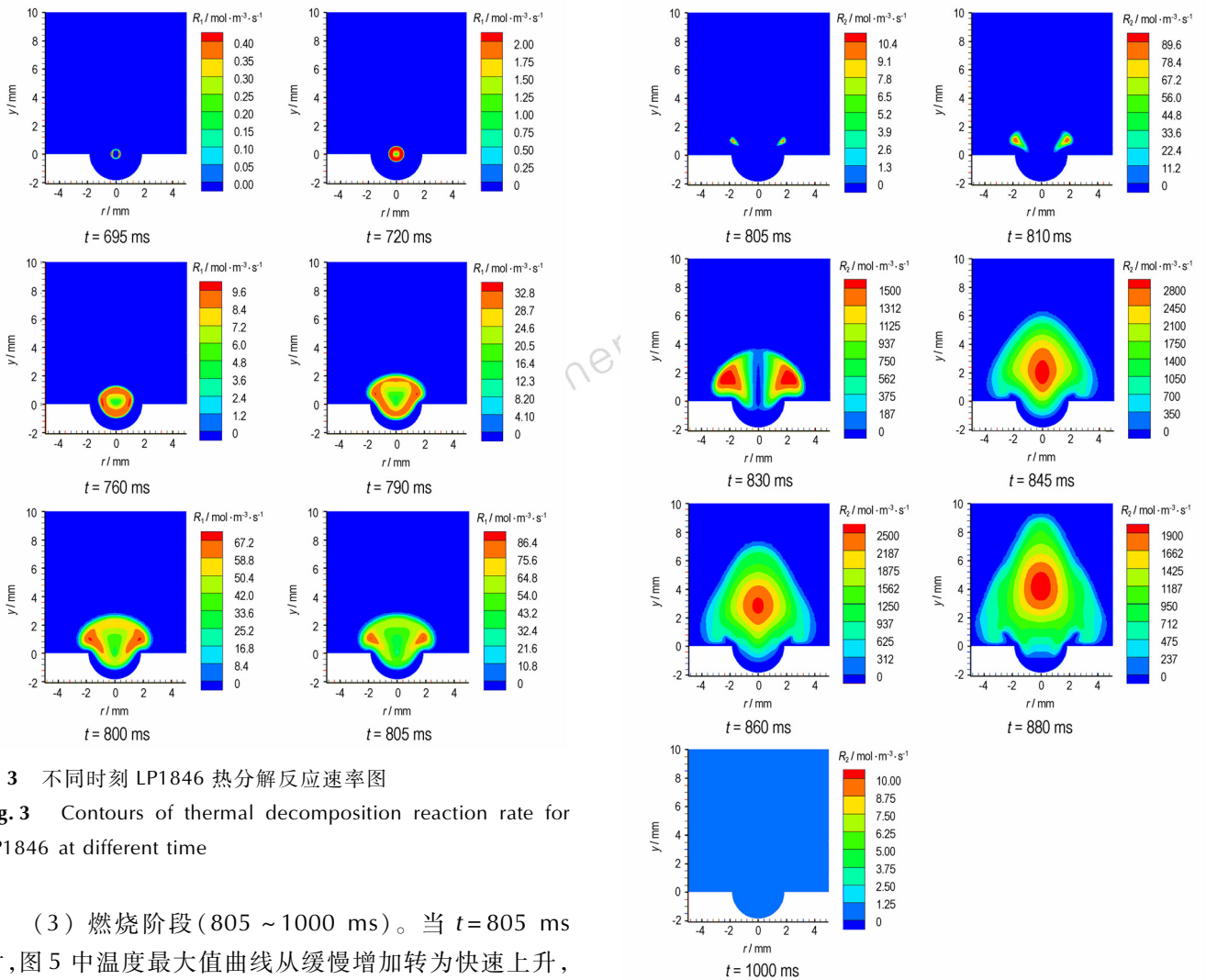


图3 不同时刻 LP1846 热分解反应速率图  
Fig. 3 Contours of thermal decomposition reaction rate for LP1846 at different time

(3) 燃烧阶段(805 ~ 1000 ms)。当  $t = 805$  ms 时,图 5 中温度最大值曲线从缓慢增加转为快速上升,表明燃烧开始,图 4 中燃烧速率增大,形成环形火焰。火焰生成后迅速传播扩大(805 ~ 810 ms),逐渐发展成中空的半球形并且向中心聚拢(810 ~ 845 ms)。当  $t = 845$  ms 时,图 5 中最大温度达到峰值,图 4 中火焰完全合拢,由半球形变为圆锥形,燃烧速率达到最大值。随后(845 ~ 1000 ms),火焰外形继续扩大,但燃烧速率逐渐降低,燃烧趋于结束。

根据温度分布图(图 2),可以将燃烧阶段的流场分为燃烧区、未燃区和外部区域。以  $t = 805$  ms 图为例,液滴两侧温度高于 650 K 以上区域为燃烧区,液滴内部和液滴边缘温度较低的区域为未燃区,液滴外部接近初始温度 300 K 的区域为外部区域。燃烧初期(805 ~ 845 ms),燃烧区反应放出的热量使高温燃烧产物均匀向外膨胀,从而把能量传递给附近区域,使燃烧区的温度继续升高,加热外部区域,同时点燃未燃区中的反应物。随着燃烧的进行(845 ~ 1000 ms),未燃区逐渐减小,燃烧区向外扩展,外部区域温度进一步提升。

图4 不同时刻 LP1846 燃烧速率图  
Fig. 4 Contours of burning rate for LP1846 at different time

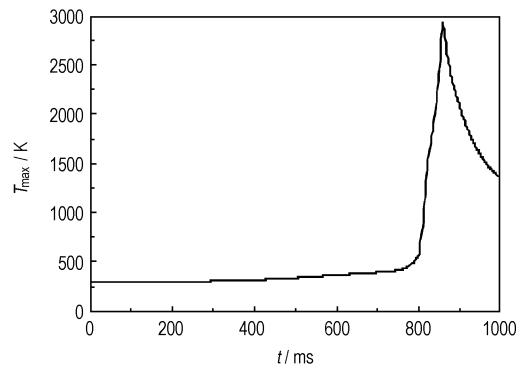


图5 LP1846 温度最大值变化曲线  
Fig. 5 Maximum temperature changing with time for LP1846

#### 4.2 液相体积分数

图 6 反映了点火过程中液相体积分数变化。当  $t = 400$  ms 时,点火过程处于预热阶段,液相还没有发生

明显变化。当  $t=720$  ms 时,此时热分解已经发生,生成的 Y 相与液相混合,液滴中心区域液相体积分数变化。对比  $t=760$  ms 和  $t=790$  ms 可见,随着热分解加剧,Y 相增加,不断向外膨胀。凹槽内部液相逐渐变少。凹槽外部的液相受 Y 相推动,向外部区域位移,液滴轮廓变化发生明显变化。当  $t=810$  ms 时,燃烧已经开始,凹槽外部的液相体积分数明显减少。从  $t=845$  ms 可见,凹槽外部空间由燃烧产物所充斥,液相基本消耗完毕,凹槽内的液相随着燃烧进行逐渐减少,最终完全消失。

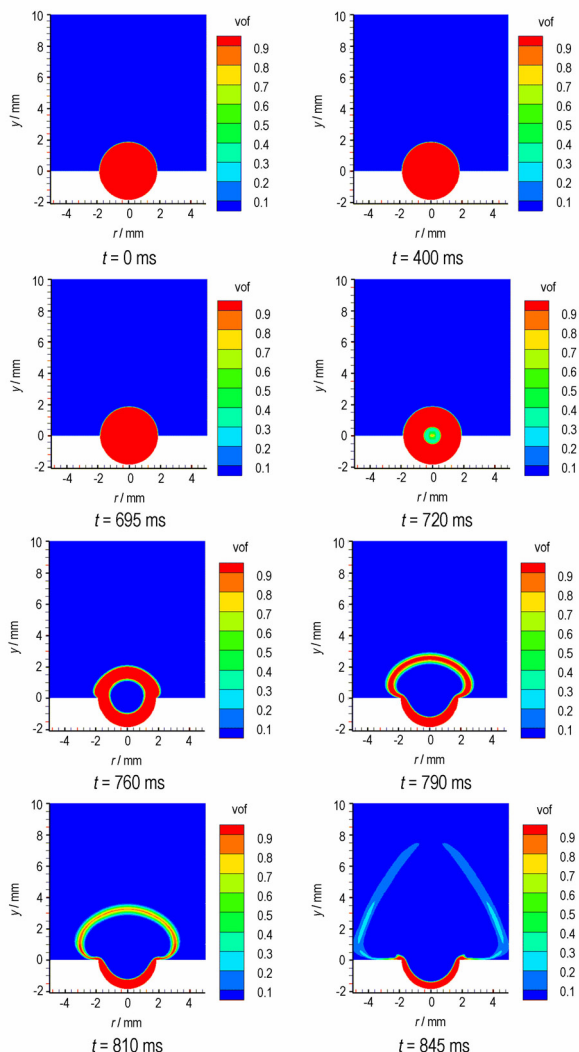


图6 不同时刻 LP1846 液相体积分布图

Fig.6 Contour of volume of fluid for LP1846 at different time

### 4.3 组分质量分数

图7为组分质量分数随时间变化曲线。可以发现,在 805 ms 之前,LP1846 质量分数呈缓慢减小的变化趋势,说明燃烧还未开始,处于热分解反应阶段; 805 ~ 900 ms, 各组分质量分数明显变化,表明已经着火,反应快速进

行,燃烧剧烈; 900 ms 以后,曲线趋于平缓,LP1846 质量分数逐渐降为零,燃烧接近结束,燃烧产物占主要组分,存在少量热解中间产物散逸到外部区域未参与反应。

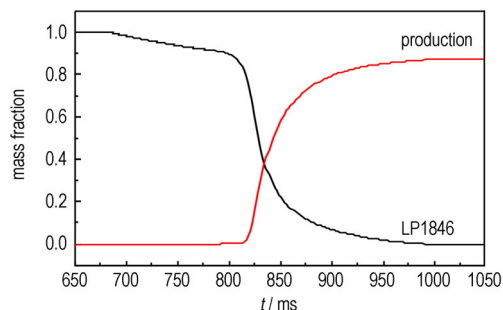


图7 LP1846 质量分数变化曲线

Fig.7 Curve of mass fraction changing with time for LP1846

### 4.4 着火延迟期

图8反映的是采用不同最大加载电压(80, 100, 120, 140 V)时液滴着火延迟期的模拟结果与实验结果<sup>[9]</sup>的对比。从图中可以看出,着火延迟时间的数值模拟结果小于实验结果,两者变化趋势一致,最大误差为 2.9%,这主要是因为将化学反应简化为两步反应带来的。LP1846 液滴的着火延迟期随着最大加载电压数值的增大而减小。这说明可以通过控制加载电压的大小,可以有效地改变点火时间,从而实现可靠点火。

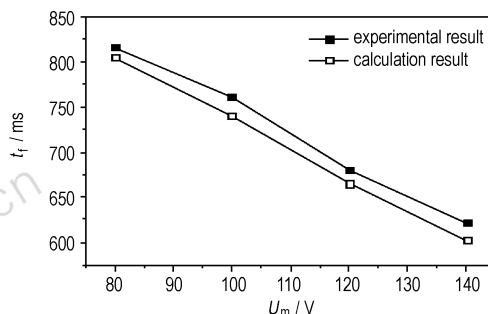


图8 LP1846 着火延迟期随加载电压变化曲线

Fig.8 Curves of ignition delay time changing with voltage for LP1846

## 5 结论

(1) 根据化学反应速率与温度分布变化,在最大加载电压为 80 V 的工况下,将无弧点火过程分为预热(0 ~ 695 ms)、热分解(695 ~ 805 ms)及燃烧(805 ~ 1000 ms)三个特征段: 预热阶段,在电流作用下液滴中心区域出现球形热源区,温度缓慢上升,液滴基本保持球状; 热分解反应最初在液滴中心区域发生,分解反应速率呈边缘大于中心的分布规律,液滴内部出现

温度梯度分布,随着反应发展温度等值线由球形转为伞形,液滴外轮廓明显扩大;燃烧阶段,流场分为燃烧区、未燃区和外部区域,火焰从液滴内部生成并向外扩展,由初始的环形发展为半球形最终形成圆锥形,液滴燃烧剧烈生成大量燃烧产物。

(2) 在不同最大加载电压(80,100,120,140 V)下液滴着火延迟期的模拟结果与实验结果吻合较好。LP1846液滴的着火延迟期随着最大加载电压数值的增大而减小,说明针对具有高导电率的HAN基液体推进剂可以采用无弧点火方式实现可靠点火。

#### 参考文献:

- [1] Frisbee R H. Advanced space propulsion for the 21st century[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(6): 1129-1154.
- [2] Palaszewski B, Iwanowski L S, Carrick P. Propellant technologies: far-reaching benefits for aeronautical and space-vehicle propulsion[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, 14(5): 641-648.
- [3] Katsumi T, Inoue T, Nakatsuka J, et al. HAN-based green propellant, application, and its combustion mechanism[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2012, 48(5): 536-543.
- [4] Farshchi M, Vaezi V, Shaw B D. Studies of HAN-based monopropellant droplet combustion[J]. *Combustion Science and Technology*, 2002, 174(7): 71-97.
- [5] Zhu D L, Law C K. Aerochemical studies of energetic liquid materials: 1. combustion of HAN-based liquid gun propellants under atmospheric pressure[J]. *Combustion and Flame*, 1987, 70(3): 333-342.
- [6] Law C K. Droplets combustion and thermal decomposition behavior of liquid propellants[C] // Wojciechowski, Josephine Q. The Fourth Annual Conference of HAN-Based Liquid Propellants. Maryland, USA: BRL, 1988: 55-82.
- [7] Wei J B, Shaw B D. Influences of pressure on reduced-gravity combustion of HAN-methanol-water droplets in air[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 146(3): 484-492.
- [8] Despirito J, Reeves G P, Knaption J D. Two-stage igniter test results: electrical ignition of LGP 1846[R]. Maryland: BRL, 1991.
- [9] YU Yong-gang, LI Ming, ZHOU Yan-huang, et al. Study on electrical ignition and micro-explosion properties of HAN-based monopropellant droplet[J]. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2010, 4(3): 430-435.
- [10] 余永刚,李明,周彦煌,等. 液体推进剂液滴电点火特性的实验研究[J]. *含能材料*, 2008, 16(5): 625-628.
- [11] YU Yong-gang, LI Ming, ZHOU Yan-huang, et al. Experiment for liquid propellant droplet of electrical ignition[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 625-628.
- [12] Meng H, Khare P, Risha G A, et al. Decomposition and ignition of HAN-based monopropellants by electrolysis[C] // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, USA: AIAA, 2009.
- [13] Sazhin S S, Kristyadi T, Abdelghaffar W A, et al. Models for fuel droplet heating and evaporation: Comparative analysis[J]. *Fuel*, 2006, 85: 1613-1630.
- [14] 潘玉竹,余永刚,周彦煌,等. HAN基液体发射药高压热物理性质的估算[J]. *火炸药学报*, 2012, 35(4): 73-78.
- [15] PAN Yu-zhu, YU Yong-gang, ZHOU Yan-huang, et al. Calculation of thermophysical property of HAN-based liquid propellant at high pressures[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(4): 73-78.
- [16] 张续柱,萧忠良. 液体发射药[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1993.
- [17] ZHANG Xu-zhu, XIAO Zhong-liang. *Liquid Gun Propellant* [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1993.

## Numerical Simulation for Arcless Electrical Ignition Process of Single Droplet of HAN-based Liquid Propellant

LIU Kun<sup>1</sup>, YU Yong-gang<sup>1</sup>, NI Bin<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. North Information Control Group, Nanjing 211153, China)

**Abstract:** To study the arcless electrical ignition mechanism of hydroxylammonium nitrate (HAN)-based liquid monopropellant LP1846 droplet, based on the two step irreversible chemical reaction mechanism, at the same time, considering the changes of physical parameters with temperature, the numerical simulation for the arcless electrical ignition process of single HAN-based liquid monopropellant LP1846 droplet was performed in the atmospheric environment combined with the related experiments. Results indicate that, according to the variation of reaction rate and temperature distribution, when maximum load voltage is 80 V, the arcless electrical ignition process can be divided into three feature stages: preheating (0 ~ 695 ms), thermal decomposition (695 ~ 805 ms) and combustion (805 ~ 1000 ms). At the preheating stage, the droplet is spherical and the center temperature rises slowly. At the thermal decomposition stage, the reaction occurs in the center of the droplet and develops outwards, the droplet expands and the umbrella distribution of temperature gradient appears inside the droplet. At the combustion stage, the flame is spawned inside the droplet. LP1846 burns vigorously, forming a large amount of products. The temperature of the flow field first increases and then decreases. Ignition delay time decreases with the increase of maximum load voltage. The simulated results has the same trendline of change with the experiment data, and the maximum error is 2.9%.

**Key words:** engineering thermophysics; liquid propellant; arcless electrical ignition; heat transfer; multiphase flow; numerical simulation

**CLC number:** TJ55; V511+.3

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.006