

文章编号:1006-9941(2021)01-0013-07

当量比及氧化剂含氧量对凝胶汽油爆轰过程的影响

杨建鲁¹,翁春生²,李娟¹,申清芳¹

(1. 中国航天科工集团六院 210 所, 陕西 西安 710065; 2. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了研究化学当量比和氧化剂含氧量对凝胶汽油/气相氧化剂两相爆轰过程的影响,建立了考虑组分的凝胶汽油/空气三维两相爆轰模型,并采用守恒元与求解元方法对脉冲爆轰发动机管内爆轰过程进行了数值仿真,分析了当量比和氧化剂含氧量对爆轰波形成时间、形成距离、爆轰波压力峰值和爆轰波传播速度的影响。数值研究表明,当量比 α 小于1.15时,随着当量比的增大,脉冲爆轰发动机管内形成爆轰波所需的距离和时间缩短,爆轰波的压力峰值和传播速度增大,当量比 $\alpha=1.15$ 时形成爆轰波所需的距离和时间分别为0.288 m和278.0 μs ,爆轰波压力峰值和传播速度分别为1.85 MPa和1437 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;随着氧化剂含氧量 β 的增大,爆轰波的压力峰值和传播速度增大,当氧化剂含氧量 β 由23%增大至48%时,爆轰波的压力峰值由1.85 MPa增大至2.85 MPa,传播速度则由1437 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大至1868 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

关键词: 凝胶汽油;脉冲爆轰发动机;当量比;爆轰波;守恒元与求解元方法

中图分类号: V231.22

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019182

1 引言

凝胶推进剂是一种介于固体推进剂和液体推进剂之间的新型推进剂,不仅具有固体推进剂不易泄露、使用安全、可长期储存的优点,而且具有液体推进剂比冲大、易于实现流量调节及发动机多次点火的优点,在航天和兵器领域有着广阔的应用前景。脉冲爆轰发动机(pluse detonation engine, PDE)作为一种新型动力系统,具有热循环效率高、结构简单、质量轻、推重比大、比冲大、工作范围宽等优点^[1-2]。正是由于凝胶推进剂和PDE都具有众多的优点,受到了国内外专家学者的广泛关注。

凝胶推进剂的研究始于20世纪三、四十年代,到目前为止国内外专家学者在凝胶推进剂的特性研究方面做了大量的工作,取得了一系列的研究成果。Solomon^[3]和Nie^[4-5]等对非金属凝胶燃料的液滴燃烧特性进行研究时发现,液滴燃烧过程中表面会逐步形

成一层凝胶剂膜,该凝胶剂膜阻碍了燃料蒸气向燃烧区域扩散,并导致燃料蒸气在液滴内部不断积聚,当液滴内部燃料蒸气积聚到一定压强后液滴发生爆裂。凝胶燃料液滴在气相氧化剂中燃烧时,凝胶剂膜的形成、破碎以及液滴持续燃烧的时间随着氧化剂速度的增大而缩短。在对含铝凝胶燃料的燃烧特性进行研究时,Negri^[6]发现含有微米铝粉颗粒的凝胶燃料比含有纳米铝粉的凝胶燃料具有更高的特征速度。Dennis^[7]等对凝胶推进剂的点火延迟特性研究表明,推进剂的点火延迟时间对推进剂的表现粘度和凝胶剂的含量具有较强的依赖性。Palaszewski^[8]等成功的实现了含铝凝胶推进剂在PDE上的稳定起爆,发现随着铝粉含量的增加爆轰波的传播速度增大。陈永康^[9]等研究发现,以硝酸羟胺为基础的凝胶推进剂具有比双基推进剂更好的热安定性。张云华^[10]和杨大力^[11]等研究表明,凝胶推进剂燃烧过程具有周期性膨胀、破裂、喷射及凝胶剂燃烧等四个过程,随着凝胶剂含量的增加,液滴稳定燃烧时间增加,但微爆过程更加剧烈。张蒙正等^[12-13]对凝胶燃料在燃烧室内的燃烧效率进行了实验和数值研究,结果表明凝胶推进剂的热力特征主要取决于凝胶剂的化学成分和含量,同时增大燃烧室特征长

收稿日期:2019-06-14;修回日期:2019-09-16

网络出版日期:2020-12-15

作者简介:杨建鲁(1987-),男,博士,工程师。

e-mail: yang.jianlu@163.com

引用本文:杨建鲁,翁春生,李娟,等.当量比及氧化剂含氧量对凝胶汽油爆轰过程的影响[J].含能材料,2021,29(1):13-19.

YANG Jian-lu, WENG Chun-sheng, LI Juan, et al. Effects of stoichiometric ratio and oxygen content of oxidizer on detonation process of gel gasoline[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(1):13-19.

度有利于推进剂的充分雾化和燃烧。曲艳斌等^[14]对硝酸羟胺水凝胶的燃烧特性研究表明随着水含量的增加其能量和燃烧速度降低。

在PDE的研究方面, Gwak等^[15]研究表明初始压力越高, 爆轰波的压力和传播速度越快。Bello等^[16]研究表明, 与满填充工况相比, 填充系数小于1时PDE推力壁处的压强出现了两个压强平台, 这两个压力平台分别由爆轰波和爆轰波退化成的激波引起。严传俊等^[17-18]研究表明, 通过增大PDE的点火能量可缩短点火起爆时间, 进而提高PDE工作频率和平均推力。赵炜等^[19]对热射流点火的研究表明, 当热射流位于PDE头部回流区时, 对PDE管内火焰传播速度影响较小。刘建文等^[20]采用守恒元与求解元方法(The Method of Conservation Element and Solution Element, CE/SE方法)对多管爆轰流场进行了数值分析, 结果表明单管产生的爆轰波对旁通爆轰管流场结构具有很大影响, 可引爆其中可燃气体。

目前, 国内外专家对凝胶推进剂和PDE的工作性能均做了大量研究工作, 然而对以凝胶推进剂为基础的PDE研究相对较少, 在凝胶推进剂的爆轰特性研究方面尚需进一步探索。本研究对以凝胶汽油为燃料的PDE进行了数值仿真研究, 分析了当量比和氧化剂含氧量对爆轰过程的影响。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U} &= [\varphi_g \rho_g, \varphi_l \rho_l, \varphi_g \rho_g u_g, \varphi_l \rho_l u_l, \varphi_g \rho_g v_g, \varphi_l \rho_l v_l, \varphi_g \rho_g w_g, \varphi_l \rho_l w_l, \varphi_g \rho_g E_g, \varphi_l \rho_l E_l, \dots, \varphi_g \rho_g Y_5, N]^T \\
 \mathbf{F} &= \left[\begin{array}{c} \varphi_g \rho_g u_g, \varphi_l \rho_l u_l, \varphi_g (\rho_g u_g^2 + p), \varphi_l (\rho_l u_l^2 + p), \varphi_g \rho_g u_g v_g, \varphi_l \rho_l u_l v_l, \varphi_g \rho_g u_g w_g, \varphi_l \rho_l u_l w_l, \varphi_g (\rho_g E_g + p) u_g, \\ \varphi_l (\rho_l E_l + p) u_l, \varphi_g \rho_g u_g Y_1, \dots, \varphi_g \rho_g u_g Y_5, N u_l \end{array} \right]^T \\
 \mathbf{G} &= \left[\begin{array}{c} \varphi_g \rho_g v_g, \varphi_l \rho_l v_l, \varphi_g \rho_g u_g v_g, \varphi_l \rho_l u_l v_l, \varphi_g (\rho_g v_g^2 + p), \varphi_l (\rho_l v_l^2 + p), \varphi_g \rho_g v_g w_g, \varphi_l \rho_l v_l w_l, \varphi_g (\rho_g E_g + p) v_g, \\ \varphi_l (\rho_l E_l + p) v_l, \varphi_g \rho_g v_g Y_1, \dots, \varphi_g \rho_g v_g Y_5, N v_l \end{array} \right]^T \\
 \mathbf{H} &= \left[\begin{array}{c} \varphi_g \rho_g w_g, \varphi_l \rho_l w_l, \varphi_g \rho_g u_g w_g, \varphi_l \rho_l u_l w_l, \varphi_g \rho_g v_g w_g, \varphi_l \rho_l v_l w_l, \varphi_g (\rho_g w_g^2 + p), \varphi_l (\rho_l w_l^2 + p), \varphi_g (\rho_g E_g + p) w_g, \\ \varphi_l (\rho_l E_l + p) w_l, \varphi_g \rho_g w_g Y_1, \dots, \varphi_g \rho_g w_g Y_5, N w_l \end{array} \right]^T \\
 \mathbf{R} &= \left[\begin{array}{c} I_d, -I_d, I_d u_l - F_r + \varphi_g (p + \rho_g v_g^2)/r, -I_d u_l + F_r + \varphi_l (p + \rho_l v_l^2)/r, I_d v_l - F_\theta + \varphi_g \rho_g u_g v_g/r, -I_d v_l + F_\theta + \varphi_l \rho_l u_l v_l/r, \\ I_d w_l - F_z, -I_d w_l + F_z, -Q_d + Q_c - (F_r u_g + F_\theta v_g + F_z w_g) + I_d E_l, Q_d + (F_r u_g + F_\theta v_g + F_z w_g) - I_d E_l, \omega_1, \dots, \omega_5, 0 \end{array} \right]^T
 \end{aligned}$$

式中, 下标 g 和 l 表示气相和液相; φ 为质量分数; ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; u, v, w 分别为径向、周向和轴向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; E 为总能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; p 为气相压力, Pa; $Y_1 \sim Y_5$ 分别为氧气、二氧化碳、气相水、气相汽油和气相二氧化硅的质量分数, 氮气质量分数经归一化计算获得; N 为单位体积内的液滴颗粒数; I_d 为气相质量的增加速率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; F_r, F_θ, F_z 分别为气相与液滴之间的径向、周向和轴向作用力, N; Q_c 为化学反应放热量, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, Q_d 为气相与液相之间的对流换

2 计算模型

2.1 物理模型

图1为PDE管内凝胶汽油/气相氧化剂的三维两相爆轰过程数值模拟的物理模型。PDE燃烧室为圆柱形, 直径 $\Phi=80 \text{ mm}$, 长度 $l=600 \text{ mm}$ 。点火区域径向和轴向长度均为 20 mm , 周向角度为 60° 。

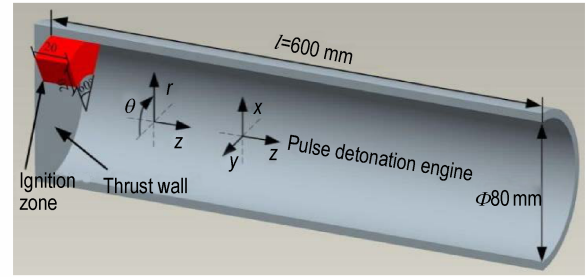


图1 脉冲爆轰发动机计算物理模型图

Fig.1 Computational physical model of pulse detonation engine

2.2 控制方程

本研究根据爆轰燃烧特点建立了凝胶汽油/气相氧化剂三维两相爆轰模型, 如下所示^[21]。通过数值仿真对PDE管内爆轰波压力、传播速度以及爆轰波内各组分的变化规律等爆轰特性进行分析。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} = \mathbf{R} \quad (1)$$

热量, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; $\omega_1 \sim \omega_5$ 分别为氧气、二氧化碳、气相水、气相汽油和气相二氧化硅的质量变化率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3 计算条件及参数

3.1 初始条件与边界条件

初始时刻, PDE内充满了均匀混合的凝胶汽油液滴和气相氧化剂, 速度为0。PDE内流场分为非点火区和点火区: 非点火区气、液相温度 T_0 均为 300 K , 压

力 p_0 为 101325 Pa; 图 1 中红色点火区域内为给定的高温、高压区, 压强和温度分别为 $5p_0$ 和 $5T_0$ 。

爆轰管壁面和推力壁处采用壁面反射滑移边界条件, 爆轰管中心轴线处采用轴对称边界条件, 爆轰管出口位置采用第三类型非反射边界条件^[21]。

3.2 计算参数

由液滴气化导致的气相质量增加速率 I_d 包括两部分: 液滴蒸发和剥离^[23], 其表达式如下所示:

$$I_d = N\rho_l 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dr}{dt} = \left(\frac{dr}{dt}\right)_1 + \left(\frac{dr}{dt}\right)_2 \quad (3)$$

式中, $\frac{dr}{dt}$ 为液滴半径变化速率, $m \cdot s^{-1}$; $\left(\frac{dr}{dt}\right)_1$ 为蒸发导

致的液滴半径变化速率, $m \cdot s^{-1}$; $\left(\frac{dr}{dt}\right)_2$ 为剥离导致的液

滴半径变化速率, $m \cdot s^{-1}$; r 为凝胶汽油液滴半径, m 。

在对 PDE 的爆轰过程进行数值模拟之前, 对凝胶汽油的流变特性进行了测量, 并采用幂律模型 (the power-law model)^[22] 对表观粘度随剪切速率的变化进行了拟合。幂律模型如式 (4) 所示:

$$\eta = \kappa \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

式中, κ 为粘度系数, n 为流动指数。拟合后的粘度系数 $\kappa = 5.329$, 流动指数 $n = 0.381$ 。

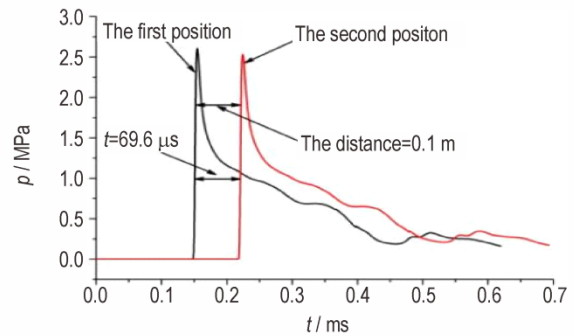
本研究采用守恒元与求解元方法 (CE/SE 方法) 对当量比 α 分别为 0.90、0.95、1.00、1.05、1.10、1.15 和 1.20, 气相氧化剂含氧量 (质量含量) β 分别为 23%、28%、33%、38%、43% 和 48%, 凝胶汽油液滴粒径 D_0 为 80.3 μm 时, 凝胶汽油/气相氧化剂在 PDE 管内的爆轰过程进行了数值模拟。

4 计算结果与分析

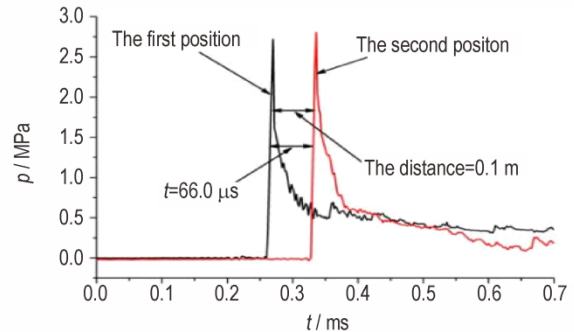
4.1 计算结果可靠性分析

为了验证数值计算结果的可靠性, 对同等工况条件下凝胶汽油/气相氧化剂在 PDE 燃烧室内的爆轰波压力与传播特性进行了数值计算和实验测试, 并对数值计算结果与实验结果进行了对比分析。图 2 为氧化剂含氧量 $\beta=38\%$ 、当量比 $\alpha=1.15$ 时, 数值计算与实验条件下爆轰波压力随时间的变化曲线。由图 2 可知, 通过计算和实验得到的爆轰波压力曲线变化一致。通过数据对比可知, 在 $\beta=38\%$ 、 $\alpha=1.15$ 条件下, 数值计算和实验测量得到的爆轰波平均压力峰值分别为 2.60 MPa

和 2.75 MPa, 二者相差 5.77%; 压力上升沿所需时间分别为 6.07 μs 和 6.00 μs , 二者相差 1.17%; 爆轰波传播速度分别为 1437 $m \cdot s^{-1}$ 和 1515 $m \cdot s^{-1}$, 二者相差 5.43%。通过计算结果和实验结果的对比分析可知, 数值计算结果能够较准确模拟凝胶汽油/气相氧化剂的爆轰过程, 建立的爆轰模型合理, 计算结果可靠。



a. simulated results



b. experimental results

图 2 数值模拟结果与实验结果对比

Fig.2 Comparison of numerical simulation results and experimental results

4.2 当量比对凝胶汽油爆轰特性的影响

图 3 为 $\beta=23\%$ 时, 不同当量比条件下 PDE 管内形成稳定传播爆轰波所需的距离和时间。由图 3 可知, 当量比 $\alpha \leq 1.15$ 时, 随着当量比的增大, PDE 管内形成爆轰波所需的距离和时间均不断减小; α 由 1.15 增大到 1.20 时, 形成爆轰波所需的距离和时间略有增大, $\alpha=1.15$ 时形成爆轰波的位置距离发动机推力壁 0.288 m, 时间为 278.0 μs 。由气液两相爆轰燃烧特点可知^[23], 液态燃料与气相氧化剂完成化学反应的过程中, 燃料液滴首先气化为气态燃料, 而后气态燃料与气相氧化剂发生化学反应。液滴气化为吸热过程, 而汽油蒸气与氧气的化学反应过程为放热过程。凝胶汽油的气化吸热与化学反应放热对 PDE 管内爆轰波的形成具有重要影响。当 α 由 0.90 增大到 1.15 时, 单位体积内凝胶汽油液滴的数量不断增大, 液滴的蒸发面

积和汽油的气化速率也不断增大,因此汽油和氧气的化学反应放热速率不断加快,PDE管内形成爆轰波所需的距离和时间越来越短。但是,当 α 过大时引起富油率过大,一方面导致液滴气化吸热量不断增大,另一方面由于氧化剂不足导致化学反应放热量减少,不利于PDE管内爆轰波的形成,因此当量比由1.15增大到1.20时,爆轰波形成所需的距离和时间略有增大。

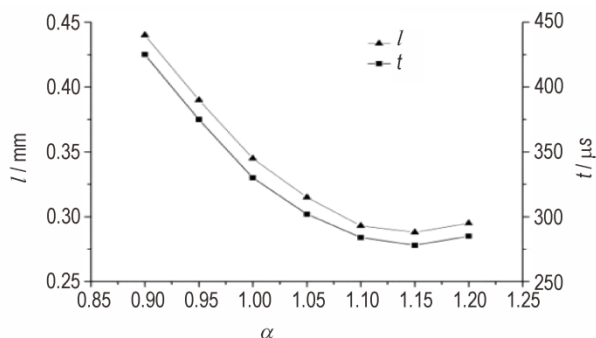


图3 爆轰波形成位置和时间随化学当量比的变化曲线

Fig.3 The variation curves of detonation wave formation position and time with stoichiometric ratio

由图3可知,当 $0.90 \leq \alpha \leq 1.20$ 时,距离PDE推力壁0.500 m处均已形成稳定传播的爆轰波。为了研究当量比对爆轰波传播特性的影响,对该处爆轰波传播参数进行分析。图4为不同当量比条件下,距离PDE推力壁0.500 m处爆轰波的压力随时间的变化曲线。由图4可知,当 α 由0.90增大到1.15时,爆轰波的压力峰值 p_c 由1.45 MPa增大到1.85 MPa;当 α 由1.15继续增大到1.20时,爆轰波压力峰值略有减小,此时爆轰波压力峰值 $p_c=1.82$ MPa。图5为爆轰波的平均传播速度 v_c 随当量比 α 的变化曲线。由图5可知,爆轰波波速 v_c 随当量比 α 的变化趋势与爆轰波压力峰值 p_c 的变化趋势一致。当 α 由0.90增大到1.15时,爆轰波传播速度由 $1327 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $1437 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;当 α 由1.15增大到1.20时,爆轰波波速减小为 $1424 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

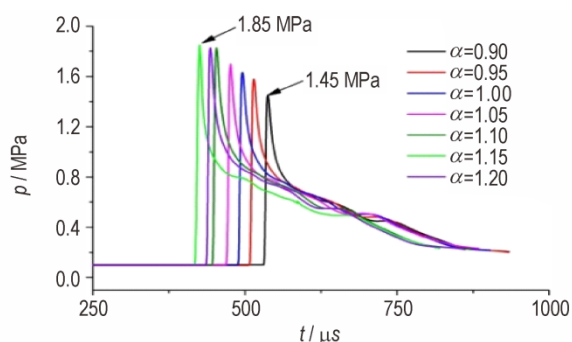


图4 不同化学当量比时压力随时间的变化曲线($z=0.500 \text{ mm}$)

Fig.4 Pressure vs. time curves with different stoichiometric ratios($z=0.500 \text{ mm}$)

这主要是由于当量比在0.90~1.15范围内时,随着当量比的不断增大,凝胶汽油的气化速率不断加快,化学反应放热速率不断加快,导致爆轰波压力峰值和传播速度不断增大;当 α 由1.15增大到1.20时,由于富油率过大,凝胶汽油液滴气化吸热量增大、氧气含量不足导致爆轰波压力峰值和爆轰波波速降低。

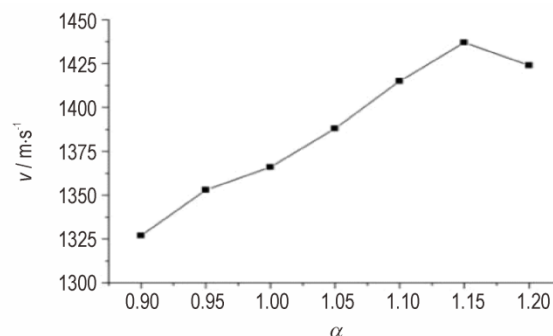
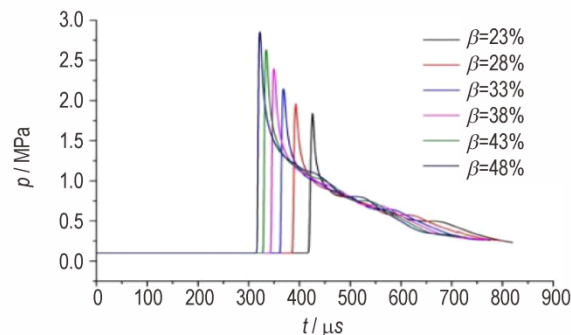


图5 爆轰波平均波速随化学当量比的变化曲线

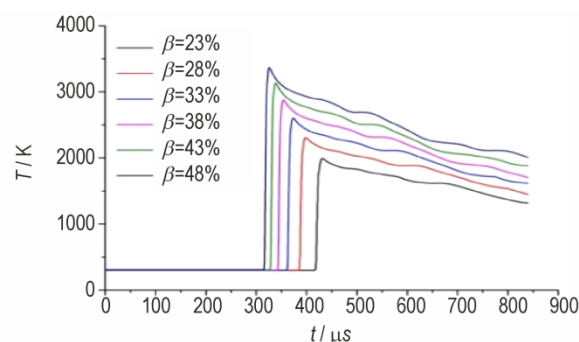
Fig.5 Curves of average velocity of detonation wave with stoichiometric ratio

4.3 氧化剂含氧量对凝胶汽油爆轰特性的影响

图6为不同氧化剂含氧量条件下,爆轰波的压力和温度随时间的变化曲线。由图6可知, β 由23%增大到48%时,爆轰波的压力峰值由1.82 MPa增大到



a. p - t curves



b. T - t curves

图6 不同氧化剂含氧量时压力与温度随时间的变化曲线($z=0.500 \text{ m}$)

Fig.6 Pressure and temperature vs. time curves of oxygen content of different oxidants($z=0.500 \text{ m}$)

2.85 MPa, 温度峰值则由 1990.5 K 增大到 3366.3 K, 爆轰波压力峰值和温度峰值均随着氧气含量的增大而增大。图 7 给出了 PDE 管内爆轰波的平均波速随氧化剂含氧量的变化曲线。由图 7 可知, β 由 23% 增大到 48% 时, 爆轰波平均波速由 $1437 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $1868 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 爆轰波平均波速随着氧气含量的增大而增大。由以上数据可知, 气相氧化剂中氧气含量越高, 爆轰波的压力峰值、温度峰值以及爆轰波传播速度越大, 凝胶汽油的爆轰效果越好。

图 8 为不同氧化剂含氧量条件下, 爆轰波扫过可燃预混气时气相各组分及液滴直径随时间的变化曲线

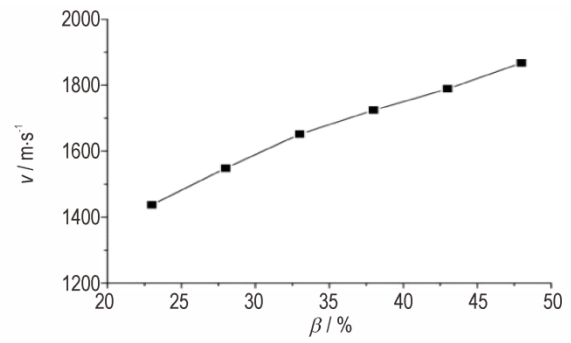


图 7 爆轰波速度随氧化剂含氧量的变化曲线

Fig.7 Velocity of detonation wave vs. oxygen content of oxidant

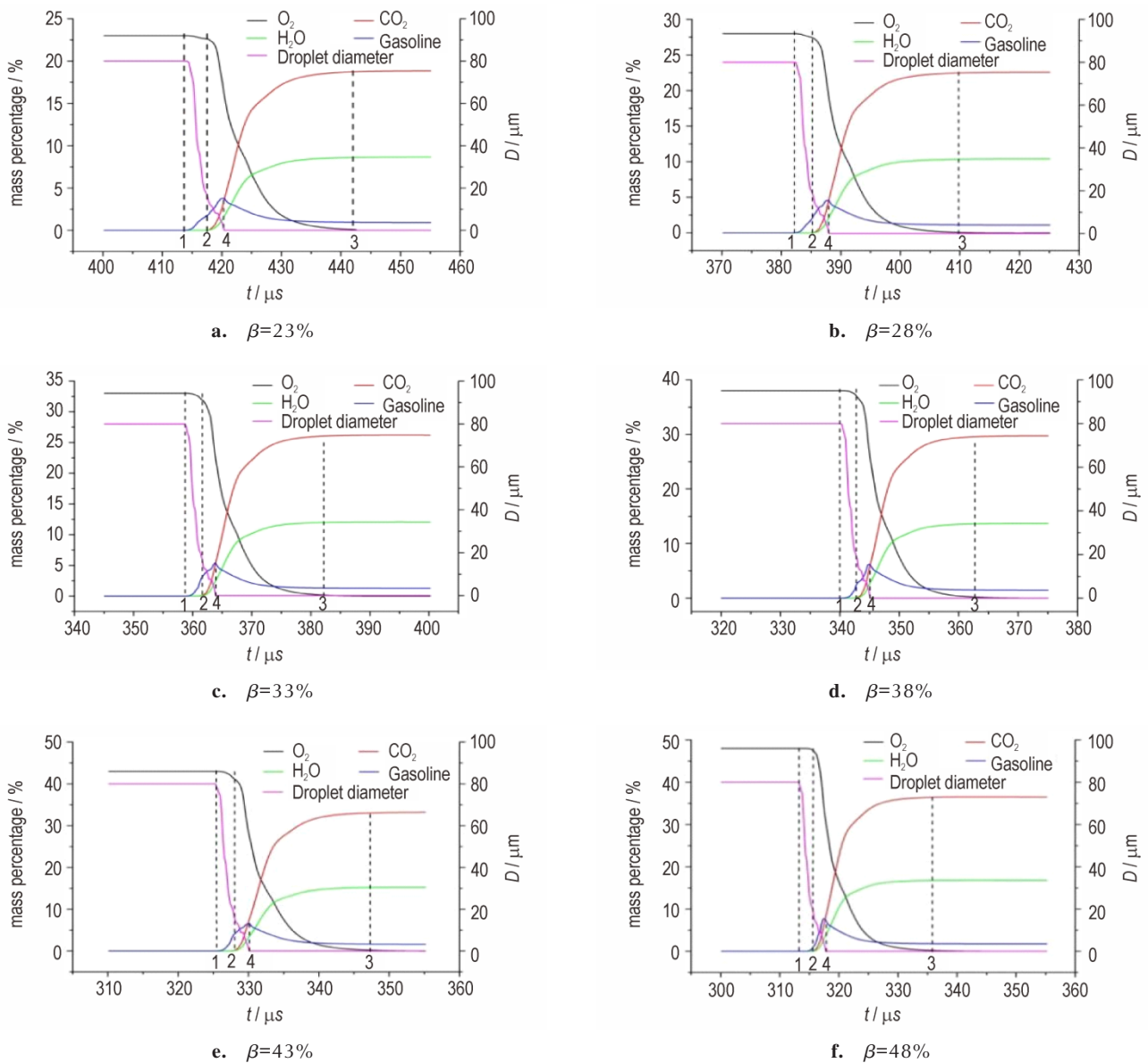


图 8 不同氧化剂含氧量气相中各组分及凝胶汽油液滴粒径随时间的变化曲线 ($z=0.500 \text{ m}$)

Fig.8 The gas components and the gel droplet diameter vs. time curves in gas phase of different oxidant oxygen contents ($z=0.500 \text{ m}$)

线。表1则对应的给出了不同氧化剂含氧量条件下爆轰波的感应区时间 t_p 、反应区时间 t_r 以及液滴的蒸发剥离时间 t_d 。由图8可知,爆轰波扫过时,氧气、气态汽油含量以及液滴直径率先发生变化,而此时二氧化碳和气态水的含量并未发生改变,该时间段为爆轰波的感应区时间 t_p ,对应图8中时刻1到时刻2,该时间段内未发生化学反应;时刻2之后二氧化碳和气态水含量开始增加,直到时刻3时各组分不再发生变化,表明汽油和氧气的化学反应在时刻2到时刻3之间完成,此时间段为爆轰波的反应区时间 t_r 。在感应区内可燃混合物被前导激波绝热压缩、加热到 von Neumann 状态,此后液滴开始气化;进入反应区后,由于气态混合物中的氧气和气态汽油开始发生化学反应,初期化学反应速率较慢,随着化学反应的进行,反应物分子发生热解并产生大量活性离子,当活性离子浓度达到一定浓度后,反应物发生快速连锁反应,而后反应物不断被消耗,反应物浓度降低,导致化学反应速率不断降低。

表1 不同氧化剂含氧量条件下, $z=0.500$ m 位置处的爆轰参数

Table 1 Detonation parameters at $z=0.500$ m with different oxygen content of oxidant

$\beta/\%$	$t_p/\mu s$	$t_r/\mu s$	$t_d/\mu s$
23	4.1	25.1	6.7
28	3.5	23.9	5.8
33	3.2	22.7	5.3
38	2.9	21.5	5.0
43	2.7	20.4	4.8
48	2.5	19.3	4.6

Note: β , oxygen content; t_p , shock induction time; t_r , reaction time; t_d , evaporation and stripping time.

由表1可知,随着 β 的增加,爆轰波的感应区时间、反应区时间和液滴的蒸发剥离时间均不断减小。这是由于爆轰波的感应过程、反应过程和液滴的蒸发剥离过程三者紧密相关:由 Westbrook C K 等^[24]对碳氢燃料化学反应速率的研究可知,反应物含量越高,化学反应速率越大,因此,随着 β 的增加,氧气含量增加,反应区化学反应速率不断增大,导致爆轰波的温度、压力越高,如图6所示。爆轰波温度和压力越高导致爆轰波波速(图7)和爆轰波强度越大,爆轰波的前导激波波速和强度越高,感应区时间和液滴蒸发剥离时间越小;另一方面前导激波越强,反应物因热解产生活性离子的速率和含量越高,活性离子的增加进一步加快了化学反应速率,导致反应区时间减小。

5 结论

通过数值仿真开展了当量比和氧化剂含氧量对PDE爆轰过程的影响,得出以下研究结论:

(1) 在一定的范围内增大当量比,可缩短爆轰波形成所需的距离和时间,增大爆轰波的压力峰值和传播速度。在本研究条件下,当量比为1.15时PDE形成爆轰波所需的距离和时间最短,分别为0.288 m和278.0 μs ,爆轰波的压力峰值和传播速度最大,分别为1.85 MPa和1437 $m \cdot s^{-1}$ 。

(2) 增大氧化剂含氧量可加快爆轰波内的物理和化学反应过程。随着氧化剂含氧量的增大,爆轰波的感应区时间、反应区时间以及凝胶汽油液滴的气化时间不断缩短,爆轰波压力峰值和传播速度不断增大。

参考文献:

- [1] 严传俊, 范玮. 脉冲爆震发动机原理及关键技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
YAN Chuan-jun, FAN Wei. Principle and key technologies of pulse detonation engine[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005.
- [2] Dean A J. A review of PDE development for propulsion applications[R]. AIAA: 2007-985.
- [3] Solomon Y, Natan B, Cohen Y. Combustion of gel fuels based on organic gellants [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156 (1): 261-268.
- [4] Nie W, He B, Zhuang F. Effects of NTO oxidizer convection velocity and pressure on the combustion characteristics of UD-MH nonmetalized organic gel droplet: experimental studies [C]// AIAA: 2013-3714, 2013.
- [5] He B, Nie W, Zhuang F. Effects of NTO oxidizer convection velocity and pressure on the combustion characteristics of UD-MH nonmetalized organic gel droplet: numerical studies [C]// AIAA: 2013-3774, 2013.
- [6] Negri M, Ciezki H. Combustion of gelled propellants containing aluminum particles [C]// AIAA: 2013-3713, 2013.
- [7] Dennis J D, Pourpoint T L, Son S F. Ignition of gelled monomethylhydrazine and red fuming nitric acid in an impinging jet apparatus [C]// AIAA: 2011-5706, 2011.
- [8] Palaszewski B, Jurns J, Breisacher K, et al. Metallized gelled propellants combustion experiments in a pulse detonation engine [C]// AIAA: 2004-4191, 2014.
- [9] 陈永康, 陈也弘, 安振涛, 等. HAN-基凝胶推进剂的热分解反应动力学[J]. 火炸药学报, 2016, 39(4): 77-81.
CHEN Yong-kang, CHEN Ye-hong, AN Zhen-tao, et al. Thermal decomposition reaction kinetics of a HAN-base gel propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39 (4): 77-81.
- [10] 张云华, 王飞俊, 聂中原, 等. 含能纤维素凝胶推进剂体系燃烧特征与稳定性[J]. 含能材料, 2015, 23(7): 613-618.
ZHANG Yun-hua, WANG Fei-jun, NIE Zhong-yuan, et al. Combustion characteristics and stability of energetic cellulose

- based gel peopellant system [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(7):613-618.
- [11] 杨大力, 夏智勋, 胡建新, 等. 煤油凝胶单液滴燃烧特性试验[J]. *航空学报*, 2016, 37(3):847-853.
YANG Da-li, XIA Zhi-xun, HU Jian-xin, et al. Experimental study on ignition and combustion characteristics of single kerosene gel droplet [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(3):847-853.
- [12] 张蒙正, 仲伟聪. 非金属凝胶推进剂热力特性计算及分析[J]. *火箭推进*, 2008, 34(2):55-58.
ZHANG Meng-zheng, ZHONG Wei-cong. Calculation and analysis of gel propellants thermodynamic characteristics [J]. *Journal of Rocket propulsion*, 2008, 34(2):55-58.
- [13] 张蒙正, 李军, 陈炜, 等. 互击式喷嘴燃烧室燃烧效率实验[J]. *推进技术*, 2012, 33(1):54-57.
ZHANG Meng-zheng, LI Jun, CHEN Wei, et al. Experiments on combustion efficiency for impinging injector chamber [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(1):54-57.
- [14] 曲艳斌, 肖忠良. 硝酸羟胺(HAN)水凝胶性能研究[J]. *含能材料*, 2004, 12(3):168-170.
QU Yan-bin, XIAO Zhong-liang. Study on property of HAN hydrogel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(3):168-170.
- [15] Gwak M, Lee Y, Yoh J J. Numerical investigation of kerosene-based pulse-detonation loading on the metal tubes [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2016, 32(5): 1146-1152.
- [16] Bello R T, Lu F K. Performance model for fully and partially filled pulse detonation engine [C]//AIAA: 2015-1352, 2015.
- [17] 王治武, 严传俊, 范玮, 等. 点火能量对脉冲爆震发动机性能的影响[J]. *推进技术*, 2009, 30(2):224-228.
WANG Zhi-wu, YAN Chuan-jun, FAN Wei, et al. Experiment on the effect of ignition energy in pulse detonation engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(2):224-228.
- [18] 黄希桥, 严传俊, 王治武, 等. 爆震频率对脉冲爆震发动机性能影响的试验研究[J]. *西北工业大学学报*, 2007, 25(1):22-26.
HUANG Xi-qiao, YAN Chuan-jun, WANG Zhi-wu, et al. Effect of operation frequency on pulse detonation engine performance [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2007, 25(1):22-26.
- [19] 赵伟, 韩启祥, 王家骅, 等. 热射流点火对多循环爆震管内火焰传播特性的影响[J]. *推进技术*, 2015, 36(12):1846-1851.
ZHAO Wei, HAN Qi-xiang, WANG Jia-hua, et al. Effects of hot jet ignition on flame propagation characteristics in multi-cycle detonation tube [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(12):1846-1851.
- [20] 刘建文, 赵书苗, 钟诚文, 等. CE/SE方法在多管爆轰流场并行计算中的应用[J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(3):229-235.
LIU Jian-wen, ZHAO Shu-miao, ZHONG Cheng-wen, et al. CE/SE scheme applied in parallel computation of PDE flow field [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(3):229-235.
- [21] 翁春生, 王浩. 计算内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
WENG Chun-sheng, WANG Hao. Computational interior ballistics [M]. Beijing: National defense industry press, 2006.
- [22] Von K J, Alberio F, Ciezki H K. Spray and combustion characteristics of aluminized gelled fuels with an impinging jet injector [J]. *Aerospace science and technology*, 2007, 11 (1) : 77-83.
- [23] Eidelmann S, Burca A. Evolution of a detonation wave in a cloud of fuel droplets; part I. influence of igniting explosion [J]. *AIAA Journal*, 1980, 18(9): 1103-1109.
- [24] Westbrook C K, Dryer F L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 1981, 27(1-2): 31-43.

Effects of stoichiometric ratio and oxygen content of oxidizer on detonation process of gel gasoline

YANG Jian-lu¹, WENG Chun-sheng², LI Juan¹, SHEN Qing-fang¹

(1. The 210th Institute of the Sixth Academy of CASIC, Xi'an 710065, China; 2. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the influence of stoichiometric ratio and oxygen content of oxidant on detonation process of gelled gasoline/gas-phase oxidant, a three-dimensional two-phase detonation model of gelled gasoline and gas-phase oxidant was established, and the internal detonation process of pulse detonation engine was simulated numerically using conservation element and solving element method. The effect of stoichiometric ratio and oxygen content of oxidant on the formation time, formation distance, peak pressure and propagation velocity of detonation wave were analyzed. The numerical results indicated that when the stoichiometric ratio is lower than 1.15, the formation distance and time of detonation wave decrease with increasing of stoichiometric ratio, and the pressure peak and propagation velocity of detonation wave increase at the same time. When the stoichiometric ratio is of 1.15, the formation distance and time of detonation wave are 0.288 m and 278 μs , and the pressure peak and propagation velocity of detonation wave are 1.85 MPa and 1437 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. The pressure peak and propagation velocity of detonation wave increase with increasing oxygen content of oxidant, and when the oxygen content increases from 23% to 48%, the pressure peak and propagation velocity of detonation wave increase from 1.85MPa, 1437 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ to 2.85MPa, 1868 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively.

Key words: gelled gasoline; PDE; stoichiometric ratio; detonation wave; CE/SE method

CLC number: V231.22

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019182

(责编:高毅)