

进气温度和当量比对脉冲爆轰发动机 工作过程影响

蒋 弢, 翁春生

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094)

摘 要: 为了研究进气温度和当量比对脉冲爆轰发动机工作过程的影响,建立了带简单化学反应的气液两相爆轰欧拉-拉格朗日模型,使用二维时空守恒元与求解元(CE/SE)方法和变步长4阶龙格-库塔法分别求解气液两相爆轰方程。计算结果表明:提高进气温度,能加速液滴雾化、蒸发,缩短燃烧转爆轰距离和时间,但是会降低爆轰波的峰值压力;当量比小于1.1时,增加当量比,能缩短燃烧转爆轰距离和时间,提高爆轰波的峰值压力,加快爆轰波传播速度;当量比大于等于1.1时,增加当量比,能小幅提高爆轰波速传播度和缩短燃烧转爆轰距离和时间,但对爆轰波的峰值压力影响很小。

关 键 词: 脉冲爆轰发动机; 欧拉-拉格朗日模型; 时空守恒元与求解元方法; 两相爆轰; 雾化; 蒸发

中图分类号: V235.22

文献标志码: A

Effect of inlet temperature and equivalence ratio on working process of pulse detonation engine

JIANG Tao, WENG Chun-sheng

(National Key Laboratory of Transient Physics,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To investigate the effect of inlet temperature and equivalence ratio on the working process of pulse detonation engine, the Euler-Lagrange model considering chemical reaction mechanism for gas-droplets two-phase detonation was built, while the gas-droplets two-phase detonation equations were calculated respectively by the two-dimensional space-time conservation element and solution element (CE/SE) method and variable-step fourth-order Runge-Kutta method. Numerical results show that increasing the inlet temperature can accelerate the droplets atomization and evaporation, shorten the deflagration to detonation transition distance and time, and reduce the peak pressure of detonation wave; when equivalence ratio is less than 1.1, increasing the equivalence ratio can shorten the deflagration to detonation transition distance and time and also increase the peak pressure and speed of detonation wave; when equivalence ratio is greater than or equal to 1.1, increasing the equivalence ratio can slightly shorten the deflagration to detonation transition distance and time and also increase the speed of detonation wave, but has a very small effect on the peak pressure of detonation wave.

Key words: pulse detonation engine; Euler-Lagrange model;
space-time conservation element and solution element method;
two-phase detonation; atomization; evaporation

收稿日期: 2013-08-26

基金项目: 预研基金(9140c300202120c30); 中央高校基本科研业务费专项资金(30920130112007)

作者简介: 蒋弢(1985—),男,江苏南通人,博士生,主要研究方向为新概念推进技术。

脉冲爆轰发动机(pulse detonation engine, PDE)是一种利用爆轰波来获得推力的新型发动机. 它推质比较大, 结构简单, 热循环效率高, 预期应用前景广.

Venkat^[1]对 JP10 作为燃料, 空气或者氧气作为氧化剂的 PDE 进行模拟, 分析了 JP10 初始温度和液滴粒径对爆轰性能的影响. Lasheras 等^[2]实验研究了来流速度等对 PDE 内液体燃油雾化的影响. 范育新等^[3]模拟了锥形和双旋流这两种气动阀对气液两相 PDE 的影响. 洪滔^[4]采用 total variation diminishing (TVD) 和 MacCormack 格式数值模拟气液两相爆轰, 对气液两相爆轰波的发展过程进行了分析. 王治武等^[5-6]数值和实验研究了射流压力、温度及速度和管壁废热加温燃油对爆轰波起爆特性的影响. 马丹花等^[7-11]使用 CE/SE 方法模拟汽油空气混合物点火起爆过程, 分析了扰流片、等离子体点火、雾化混合过程及尾喷管对气液两相爆轰参数的影响.

国内外的学者对气液两相 PDE 工作过程尤其是点火起爆过程做了大量的研究, 但是对点火起爆过程前的液体喷射、雾化、蒸发及气液两相混合过程和点火起爆过程同时研究的较少, 通常以给定的流场和液滴尺寸分布来作为点火起爆过程的初始条件. 本文建立了带简单化学反应的气液两相爆轰欧拉-拉格朗日模型, 使用二维时空 CE/SE 方法(以下简称 CE/SE 方法)和变步长 4 阶龙格-库塔法分别求解爆轰气液两相方程, 用 Fortran 语言编写程序分析了不同进气温度和当量比对 PDE 内雾化蒸发混合过程及点火起爆过程的影响.

1 物理模型及基本方程

1.1 物理模型

由于气液两相 PDE 工作过程非常复杂, 为此进行了简化并提出如下假设:

- 1) 气液两相 PDE 内部的气体流动为二维/轴对称流动.
- 2) 喷嘴喷入 PDE 内的液体汽油瞬间被雾化成球形液滴, 并分组考虑液滴.
- 3) 液滴在 PDE 内部运动时保持在各自液滴组内, 并且各液滴组之间不传递质量、动量和能量.
- 4) 在进气过程中, 部分液滴蒸发成气态汽油并与空气混合.
- 5) 爆轰波扫过后, 液滴不破碎并保持球形, 剥离蒸发后成为气态汽油, 气态汽油才与氧气发

生化学反应, 生成 CO_2 和 H_2 , 并释放出能量.

1.2 二维/轴对称气相控制方程

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

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \varphi_g \rho_g \\ \varphi_g \rho_g u_g \\ \varphi_g \rho_g v_g \\ \varphi_g \rho_g E_g \\ \varphi_g \rho_g^1 \\ \varphi_g \rho_g^2 \\ \vdots \\ \varphi_g \rho_g^{N_i-1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \varphi_g \rho_g u_g \\ \varphi_g (\rho_g u_g^2 + p) \\ \varphi_g \rho_g u_g v_g \\ \varphi_g (\rho_g E_g + p) u_g \\ \varphi_g \rho_g^1 u_g \\ \varphi_g \rho_g^2 u_g \\ \vdots \\ \varphi_g \rho_g^{N_i-1} u_g \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \varphi_g \rho_g v_g \\ \varphi_g \rho_g u_g v_g \\ \varphi_g (\rho_g v_g^2 + p) \\ \varphi_g v_g (\rho_g E_g + p) \\ \varphi_g \rho_g^1 v_g \\ \varphi_g \rho_g^2 v_g \\ \vdots \\ \varphi_g \rho_g^{N_i-1} v_g \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \varphi_g \rho_g v_g \\ \varphi_g \rho_g u_g v_g \\ \varphi_g \rho_g^2 v_g \\ \varphi_g v_g (\rho_g E_g + p) \\ \varphi_g \rho_g^1 v_g \\ \varphi_g \rho_g^2 v_g \\ \vdots \\ \varphi_g \rho_g^{N_i-1} v_g \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sum I_{d_i} \\ \sum (I_{d_i} u_i - F_{x_i}) \\ \sum (I_{d_i} v_i - F_{y_i}) \\ \sum [-Q_{d_i} + Q_{e_i} - F_{x_i} u_i + I_{d_i} (E_i + p/\rho_i)] \\ \rho^1 + \sum I_{d_i} \delta^1 \\ \rho^2 + \sum I_{d_i} \delta^2 \\ \vdots \\ \rho^{N_i-1} + \sum I_{d_i} \delta^{N_i-1} \end{bmatrix}$$

式中 $\alpha=1$ 时为轴对称流动, $\alpha=0$ 时为二维流动; 其中下标 g, l 分别代表气液两相. φ 为体积分数, 满足 $\varphi_g + \varphi_l = 1$. p, u, ρ, T 分别为压力、速度、密度和温度. I_{d_i} 为单位体积内第 i 组液滴的质量变化率. 其他参数见文献[3].

本文将辛烷(C_8H_{18})作为汽油的分子式, 其化学反应方程式^[6]为 $\text{C}_8\text{H}_{18} + 12.5\text{O}_2 + 47\text{N}_2 = 8\text{CO}_2 + 9\text{H}_2\text{O} + 47\text{N}_2$, 采用 Westbrook 一步反应式来描述爆轰过程中的化学反应, 具体参数见参考文献[8].

1.3 液滴控制方程

1.3.1 液滴运动方程

液滴在 PDE 内的运动主要受气动力影响, 忽

略其他作用力的影响. 由于分组考虑液滴, 因此第 i 组液滴运动方程为^[8]

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{u_g - u_i}{\tau} \quad (2)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{v_g - v_i}{\tau} \quad (3)$$

式中 $\tau = \frac{2\rho_l R_i^2}{9\mu_g f}$, 其中阻力系数 $f = ReC_d/24$.

1.3.2 液滴位置方程

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i \quad (4)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = v_i \quad (5)$$

1.3.3 液滴能量方程

由于固壁绝热, 汽油升温所需的能量和汽油的蒸发潜热与液滴从气相中所吸收的总能量是相等的, 因此第 i 组液滴的能量方程为^[12]

$$\frac{dT_{l_i}}{dt} = \frac{2\pi R_i \lambda_g Nu (T_g - T_{l_i}) - 4\pi R_i^2 \rho_l L \frac{dR_i}{dt}}{\frac{4}{3}\pi R_i^3 \rho_l c_v} \quad (6)$$

1.3.4 液滴雾化模型

本文选用的是 Fipa 雾化模型^[13], 该模型的液滴半径变化率为

$$\frac{dR_i}{dt} = [6\sigma/(\rho_g |V_g - V_{l_i}|^2) - R_i]/\tau' \quad (7)$$

式中 $\tau' = C_1 T_b \epsilon^{-0.5} (2R_i/|V_g - V_{l_i}|)$, 其中 $\epsilon = \rho_g/\rho_l$, C_1 常取 1.

$$T_b =$$

$$\begin{cases} 6(We_{l_i} - 12)^{-0.25} & 12 < We_{l_i} \leq 18 \\ 2.45(We_{l_i} - 12)^{0.25} & 18 < We_{l_i} \leq 45 \\ 14.1(We_{l_i} - 12)^{-0.25} & 45 < We_{l_i} \leq 351 \\ 0.766(We_{l_i} - 12)^{0.25} & 351 < We_{l_i} \leq 2670 \\ 5.5 & We_{l_i} > 2670 \end{cases}$$

式中 We 表示韦伯数.

1.3.5 液滴蒸发模型

本文选用的是混合蒸发模型, 进气过程基本上是个定常过程, 可以使用 Spalding 蒸发模型^[14]; 而点火起爆过程明显是个非定常过程, 在这个过程中, 爆轰波的速度很快, 爆轰波扫过时液滴蒸发速度远大于 Spalding 蒸发模型的蒸发速度, 此时适用的是剥离蒸发模型.

$$\frac{dR_i}{dt} =$$

$$\begin{cases} -\frac{k}{2\rho_l R_i} \frac{\omega_1^* - \omega_1}{1 - \omega_1^*} Sh_d & p \leq 0.2 \text{ MPa} \\ -\frac{1}{2} \sqrt{3\pi} \left(\frac{\rho_g \mu_g}{\rho_l \mu_l} \right)^{1/6} \left(\frac{\mu_l}{\rho_l} \right)^{0.5} |V_g - V_{l_i}|^{0.5} \cdot \\ R_i^{-0.5} - \frac{3\lambda_g Nu (T_g - T_{l_i})}{\pi R_i \rho_l L} & p > 0.2 \text{ MPa} \end{cases} \quad (8)$$

式中 R_i 为液滴的半径; λ_g 为气体的热导率; μ_g, μ_l 分别为气液两相的动力黏度; L 为液体燃料的蒸发热; c_v 为液相的比定容热容; Nu 为努塞尔数; k 为汽油在气相中的扩散系数; ω_1^*, ω_1 分别为液相表面和当地单元中汽油蒸气的质量分数; Sh_d 为舍伍德数.

1.3.6 液滴碰壁模型

根据 PDE 的工作特点, 本文采用的是 Tabakoff 碰壁模型^[15].

2 计算方法

2.1 气相方程求解方法

本文使用 CE/SE 方法来求解气相方程, 该方法最早由美国的 Chang 提出^[7], 是近年来一种新的数值计算方法. CE/SE 方法计算精度高, 适合捕捉爆轰波等强间断. CE/SE 方法的具体推导见文献^[7].

2.2 液滴方程求解方法

液滴方程式(2)~式(6)都为常微分方程, 而常微分方程常用积分公式法、牛顿迭代法、4 阶 Runge-Kutta 法等方法求解. 考虑到计算精度、效率以及稳定性, 本文采用变步长的 4 阶 Runge-Kutta 法来求解液滴方程.

2.3 源项处理

CE/SE 方法的计算格式中存在刚性源项 R . 本文采用变步长 4 阶 Runge-Kutta 法来求解刚性源项. 求解刚性源项 R 的思路见文献^[7].

2.4 边界条件

PDE 固壁边界上使用镜面反射边界条件, 出口自由边界上使用 CE/SE 方法非反射边界条件, 中心轴上使用轴对称边界条件. 进气阀门关闭时, 进气端面上使用镜面反射边界条件; 进气阀门打开时, 进气端面上使用入口边界条件.

3 计算结果及讨论

本文数值模拟的 PDE^[16] 管长为 1200 mm, 内

径为 80 mm, 由于 PDE 管内流场是轴对称的, 所以计算区域只需取一半, 网格划分为 1200×40 . 进气方式为轴向进气, 管内初始轴向速度为 100 m/s, 径向速度为 0 m/s; 液滴被分为多个液滴组, 离开喷嘴后液滴组的尺寸按照 Rosin-Rammler 分布^[17], 索太尔平均半径为 $100 \mu\text{m}$, 液滴初始温度为 298 K. 点火时设一温度为 600 K 的高温区, 其距推力壁为 180~220 mm, 距壁面为 0~20 mm.

3.1 进气温度对 PDE 工作过程的影响

文献[18]在 PDE 多循环研究中得出, 在填充了隔离气体后, 第 1 次循环结束后 PDE 管内平均温度为 327.5 K, 第 6 次循环结束后为 367.8 K. 本节选取了进气压力 $p_{\text{inlet}} = 0.19 \text{ MPa}$, 进气温度 $T_{\text{inlet}} = 308, 338, 377 \text{ K}$ 的 3 种进气条件来研究其对 PDE 工作过程的影响. 以上述 3 种进气来流填充 PDE 管后, 与之相对应的管内平均温度分别为 298, 328 和 368 K.

从图 1 可以看出: 在 PDE 管头部, 进气温度为 308 K 时液滴聚集区稍大于进气温度为 338 K 时液滴聚集区, 但是进气温度为 377 K 时液滴聚集区只有上述两种进气温度的 70%. 进口管壁中心处为 x 轴和 y 轴的起点, y 轴为管径方向, x 轴为管长方向. 从图 2 和图 3 可以看出: 从喷嘴出口到距离推力壁 0.1 m 处, 由于气液两相之间较大的速度差, 液滴在轴向气流的冲击下迅速雾化, 此

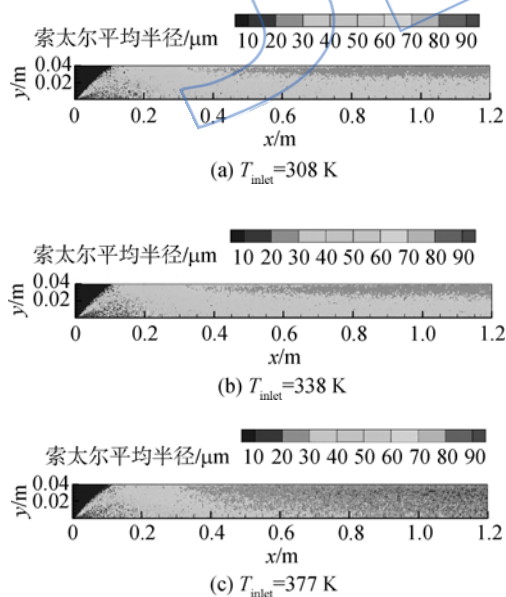


图 1 不同进气温度下 PDE 管内汽油索太尔平均半径分布

Fig. 1 Distribution of gasoline Sauter mean radius in PDE tube with different inlet temperatures

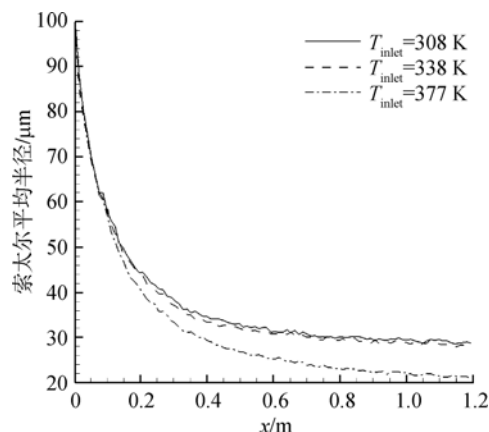


图 2 不同进气温度下 PDE 管内汽油索太尔平均半径沿轴线的分布

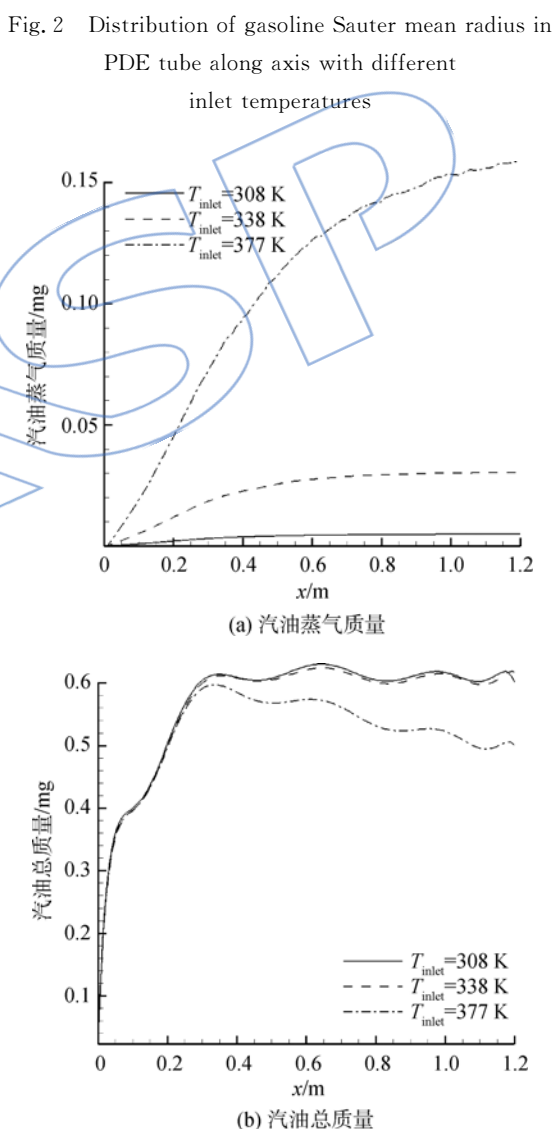


图 3 不同进气温度下 PDE 管内汽油质量沿轴线的分布

Fig. 3 Distribution of gasoline mass in PDE tube along axis with different inlet temperatures

时索太尔平均半径减小的主要因素为二次雾化, 且汽油蒸气质量占汽油总质量之比较小, 蒸发对

液滴半径变化影响较小,索太尔平均半径之间的差值很小.从距离推力壁 0.1 m 开始,液滴碰壁造成了动能损失,速度变小,气液两相间的速度差减小,二次雾化作用开始减缓,但是此时由于液滴充满了整个横截面,气液两相间可以充分接触,汽油更容易吸收气相热量,蒸发速度也更快,同时液滴碰壁产生了大量的较小尺寸的液滴,也利于蒸发,所以蒸发对液滴半径减小的影响开始加大.而进气温度为 377 K 时汽油蒸发速度远大于其他两种进气温度时汽油蒸发速度,索太尔平均半径和其他两种进气温度下的差值显著加大.通过管内前半段的气液两相混合,气液两相间的速度差和温差变小,管内的索太尔平均半径变化趋势大大减缓,直至出口时索太尔平均半径分别为 28.9, 28.3 和 21.2 μm .

从图 1~图 3 可以看出:进气温度为 377 K 时气液两相温差最大,汽油蒸发速度最快,在出口时其汽油蒸气质量分别为进气温度为 338 K 的 4 倍和 308 K 的 80 倍.但是由于汽油蒸气扩散速度快于液滴运动速度,当管内填充满液滴时,部分汽油蒸气已经溢出管口,损失较大,而其他两种进气温度时汽油蒸气质量所占比例较小,管内汽油总质量损失很小.并且由于小尺寸液滴蒸发速度快于大尺寸液滴,部分小尺寸液滴完全气化,造成进气温度为 377 K 时 PDE 后半段液滴分布远不如其他两种进气温度时的液滴分布均匀.

图 4 为进气温度为 308 K 时,不同时刻 PDE 管内压力分布(p 为压力).点火使点火区的汽油蒸气被点燃,与氧气快速反应,放出能量来提高该区域的温度和压力并加快液滴剥离蒸发速度,同时高温高压区域不断扩大,以圆形燃烧波的形式向周围传播,41.8 μs 时该燃烧波到达轴线(图 4(a)).在轴向上传播的燃烧波强度逐渐衰减,而在径向上传播的燃烧波,由于其受到 PDE 管壁的挤压和约束而产生碰撞反射,在距推力壁 0.39 m 且靠近轴线处形成局部高压($p=0.78\text{ MPa}$,图 4(c)).当燃烧波在中轴线处发生反复碰撞,形成一个爆轰中心($p=3.4\text{ MPa}$,图 4(d))和向壁面运动的反射波.其与爆轰中心一起向壁面运动,途经区域的已有液滴瞬间蒸发,未反应的汽油蒸气化学反应速率迅速加快,高压区域不断增大.此后在 PDE 管壁面的约束下,反射波和爆轰中心的上下运动持续增强前导激波的强度,最终在 673.5 μs 时距推力壁 0.86 m 处发展成横向充满整个爆轰管的爆轰波(图 4(e), $p=3.0\text{ MPa}$).爆轰波传播

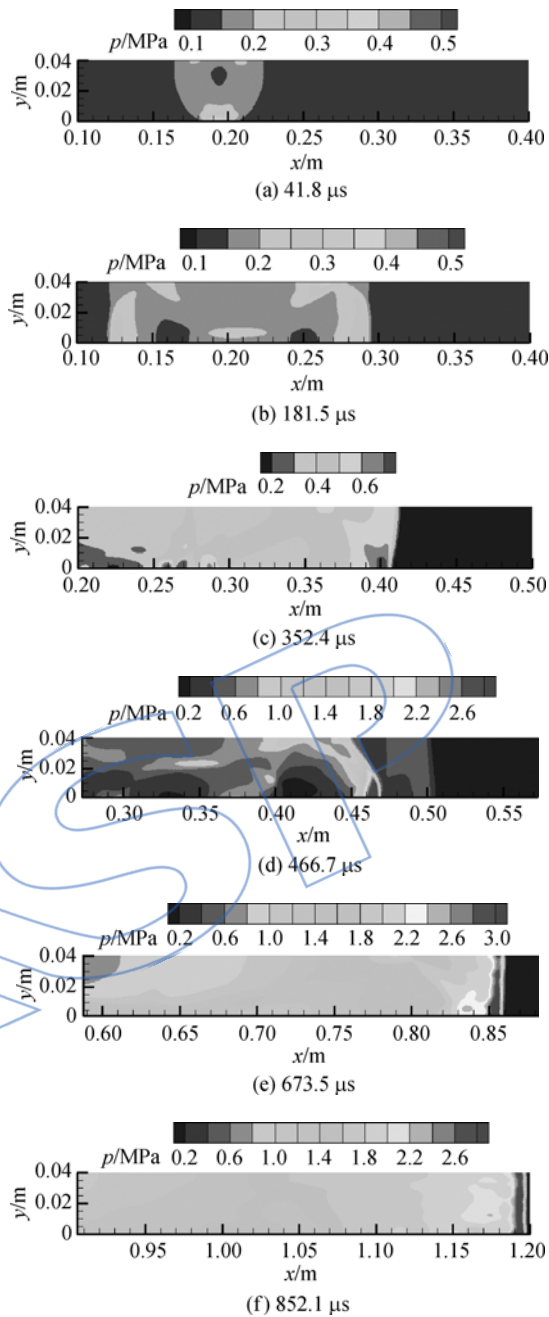


图 4 进气温度为 308 K,不同时刻 PDE 管内压力分布
Fig. 4 Pressure distribution at different times in PDE tube with inlet temperature of 308 K

至 PDE 管出口时峰值压力为 2.9 MPa(图 4(f)).

进气温度为 338 K 时,管内的点火起爆过程与进气温度为 308 K 时比较相似(见图 5).点火后,由于汽油蒸气质量是进气温度为 308 K 时的 20 倍,化学反应速率相比 308 K 时更快,36.3 μs 时燃烧波就到达轴线(图 5(a)).最终在 447.1 μs 时距推力壁 0.69 m 处发展成横向充满整个爆轰管的爆轰波(图 5(f), $p=2.6\text{ MPa}$),相比进气温度为 308 K 时位置提前了 0.15 m,时间减少了 226.4 μs .由于汽油蒸气质量约为汽油总质量的

5%,部分汽油蒸气溢出管外导致汽油总质量减小,峰值压力相应降为2.4 MPa.但是由于管内温度较高和汽油蒸气质量较大,化学反应速率更快,出口时爆轰波速度为2 048 m/s,比进气温度为308 K时大196 m/s.

进气温度为377 K时(见图6),由于汽油蒸气质量占汽油总质量的20%,点火后汽油蒸气反应速度更快和短时间放热量更大,圆形燃烧波以更

快的速度向周围传播,在27.4 μs 时该燃烧波就到达轴线(图6(a)),最终在309.3 μs 时距推力壁0.57 m的位置形成横向充满整个PDE管的爆轰波(图6(e), $p=2.2$ MPa),相比进气温度为338 K时位置提前了0.12 m,时间减少了137.8 μs .通过图3可以看出,由于距PDE管口越近,汽油质量越小,可反映物质的量减少带来爆轰波峰值压力在出口时降为2.1 MPa,相应的爆轰波速度虽然也从2350 m/s降为2215 m/s,但是比其他两种进

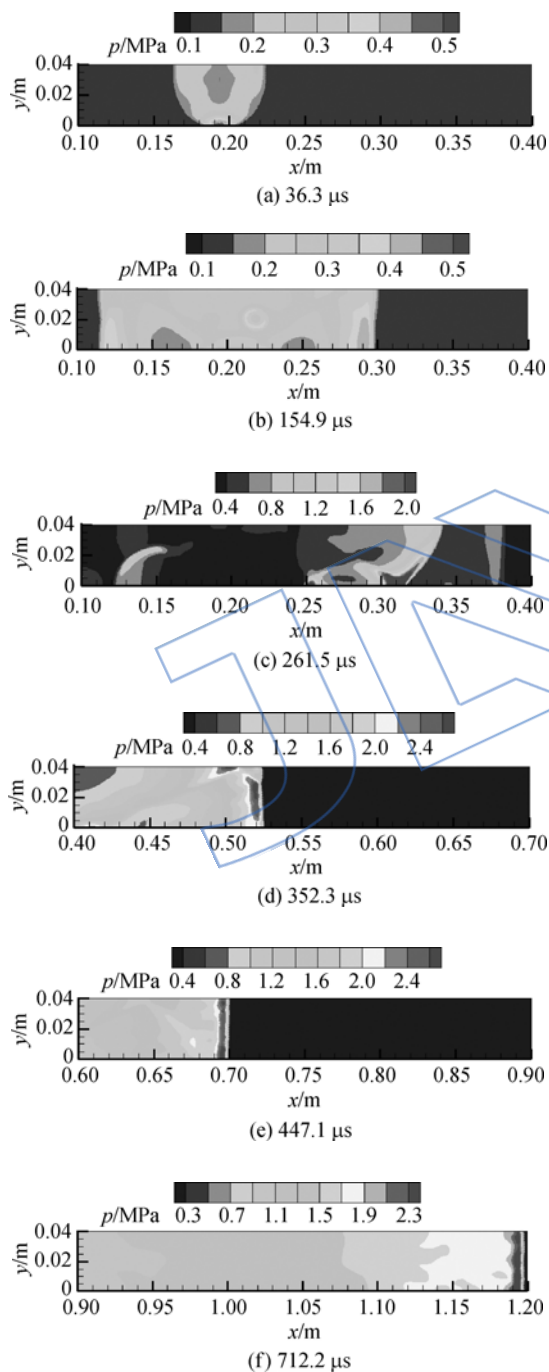


图5 进气温度为338 K,不同时刻PDE管内压力分布
Fig. 5 Pressure distribution at different times in PDE tube with inlet temperature of 338 K

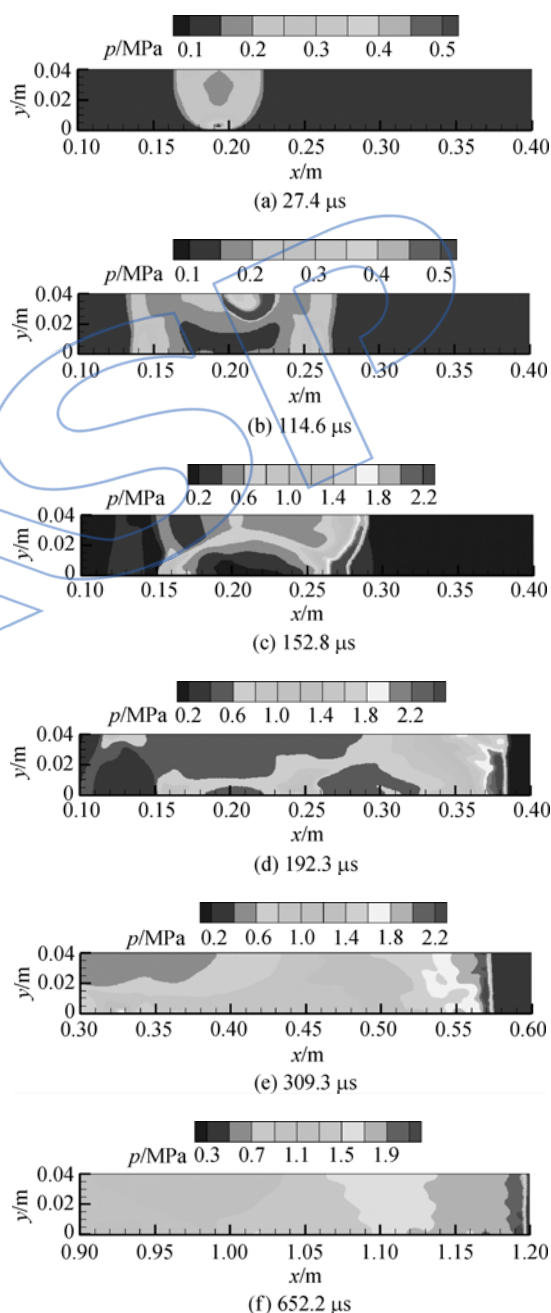


图6 进气温度为377 K,不同时刻PDE管内压力分布

Fig. 6 Pressure distribution at different times in PDE tube with inlet temperature of 377 K

气温度时的爆轰波速度要快。

由以上分析可知,增加进气温度可以加速化学反应过程,减少燃烧转爆轰距离和时间,但是也会降低爆轰波的峰值压力。

3.2 当量比对 PDE 工作过程的影响

从图 7 可以看出,随着当量比增大,索太尔平均半径沿轴线减小得越快,在 PDE 管出口处索太尔平均半径就越小。当量比为 0.9,1.0,1.1 和 1.2 下 PDE 管出口处索太尔平均半径分别为 30.1,28.9,27.4,26.5 μm 。这是由于当量比越大,在进气量不变的情况下,必然会增加进油量。而要增加进油量就要提高油压,就会带来喷嘴的喷雾锥角增大,这会导致气液两相间的速度差增大,汽油的韦伯数也会跟着增大,更易形成突变式分裂,索太尔平均半径就减小得越快。从图 8 可以看出,随着当量比增大,汽油蒸气质量会随之增大,PDE 管内汽油蒸气质量分数也会增大,但是占汽油总质量的比例基本不变。

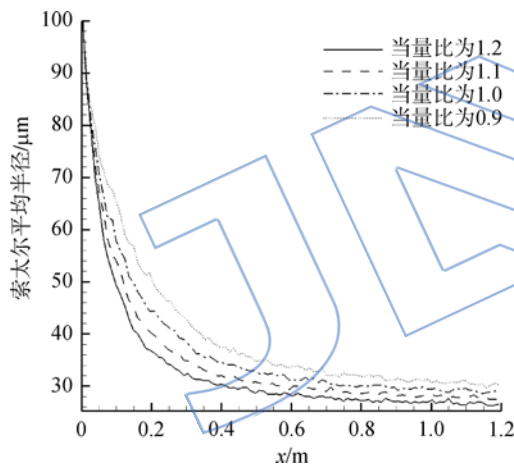


图 7 不同当量比下 PDE 管内汽油索太尔平均半径沿轴线的分布
Fig. 7 Distribution of gasoline Sauter mean radius in PDE tube along axis with different equivalence ratios

从表 1 可以看出:当量比为 0.9 时,PDE 管内处于贫油状况,液滴半径最大,汽油蒸气质量分数最小,化学反应速率最慢,爆轰波扫过后还剩大量的氧气,爆轰波的峰值压力和传播速度最小,燃烧转爆轰距离和时间最大;当量比为 1.0 时,PDE 管内汽油分布不均匀,处于部分贫油状况,爆轰波扫过后未能完全反应,爆轰波的峰值压力和传播速度比当量比为 1.1 时的低,燃烧转爆轰距离和时间比当量比为 1.1 时的高;当量比大于

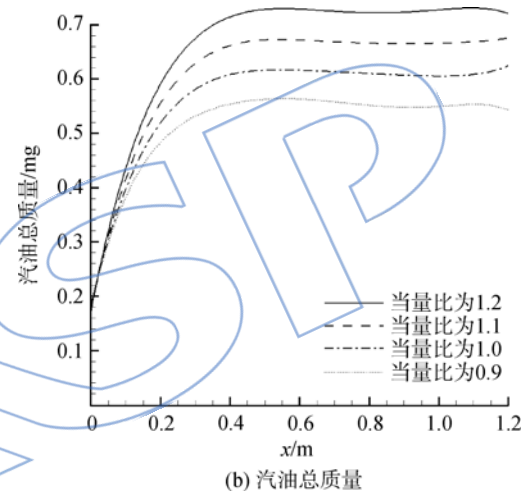
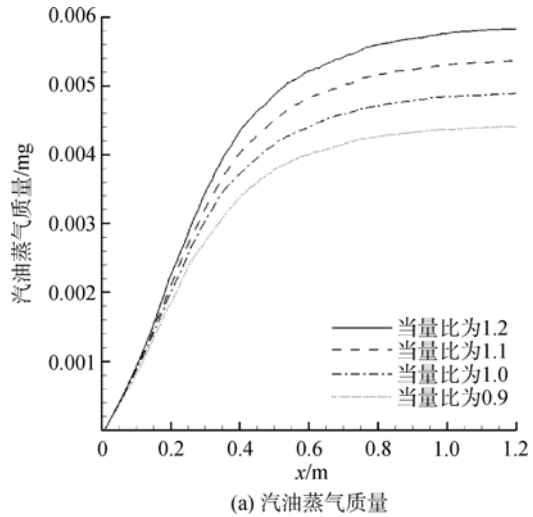


图 8 不同当量比下 PDE 管内汽油质量沿轴线的分布
Fig. 8 Distribution of gasoline mass in PDE tube along axis with different equivalence ratios

等于 1.1 时,PDE 管内处于富油状况,由于氧气质量是一定的,当量比越大,只是反应后剩下的汽油蒸气越多,对爆轰波的峰值压力影响不大,但是增大当量比会提高汽油蒸气的质量分数,加快化学反应速率,小幅减小燃烧转爆轰距离和时间,提高爆轰波传播速度。

表 1 不同当量比对爆轰参数的影响
Table 1 Effect of different equivalence ratios on detonation parameters

当量比	爆轰波的 峰值压力/ MPa	爆轰波传 播速度/ (m/s)	燃烧转 爆轰 距离/m	燃烧转 爆轰 时间/ms
0.9	2.71	1398	0.98	0.781
1.0	2.92	1852	0.86	0.674
1.1	3.09	1972	0.75	0.556
1.2	3.10	2034	0.70	0.539

计算结果表明:当量比小于 1.1 时,随着当量比的增加,爆轰波传播速度和峰值压力迅速增加,燃烧转爆轰距离和时间快速减小;当量比大于等于 1.1 时,随着当量比的增加,爆轰波的峰值压力基本保持不变,燃烧转爆轰距离和时间减小幅度和爆轰波传播速度增加幅度都有所减缓。

4 结 论

本文通过对不同进气温度和当量比对 PDE 工作过程影响的模拟分析,计算结果表明:

1) 增加进气温度可以加快汽油的蒸发,减少液滴尺寸,同时也会减少反应物总质量。

2) 增加进气温度可以加速化学反应过程,减少燃烧转爆轰距离和时间,但是也会降低爆轰波的峰值压力。

3) 当量比小于 1.1 时,随着当量比的增加,爆轰波传播速度和峰值压力迅速增加,燃烧转爆轰距离和时间快速减小;当量比大于等于 1.1 时,随着当量比的增加,爆轰波的峰值压力基本保持不变,燃烧转爆轰距离和时间减小幅度和爆轰波传播速度增加幅度都有所减缓。

计算结果对 PDE 的实验与设计有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Venkat E. Investigations of two-phase detonations for performance estimations of a pulse detonation engine[R]. AIAA-2007-1173, 2007.
- [2] Lasheras J, Varatharajan B, Varga C, et al. Studies of fuel distribution and detonation chemistry for pulse detonation engines[R]. ISABE 2001-1174, 2001.
- [3] 范育新,王家骅,李建中,等. 脉冲爆震发动机气动阀性能分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 142-149.
FAN Yuxin, WANG Jiahua, LI Jianzhong, et al. Performance analysis of aero-valve in pulse detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 142-149. (in Chinese)
- [4] 洪滔. 两相爆轰的理论和数值研究[D]. 四川 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004.
HONG Tao. Theoretical and numerical study of detonation in two-phase systems[D]. Mianyang, Sichuan: China Academy of Engineering Physics, 2004. (in Chinese)
- [5] 王治武,陈星谷,郑龙席,等. 横向射流起爆爆轰波数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(3): 422-427.
WANG Zhiwu, CHEN Xinggu, ZHENG Longxi, et al. Numerical investigation of the transverse jet effects on detonation initiation characteristics[J]. Journal of Propulsion, 2013, 34(3): 422-427. (in Chinese)
- [6] 黄希桥,陈乐,严传俊,等. 脉冲爆震发动机管壁废热加温燃油实验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1702-1707.
HUANG Xiqiao, CHEN Le, YAN Chuanjun, et al. Experiment on heating kerosene with useless heat on the wall of pulse detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1702-1707. (in Chinese)
- [7] 马丹花,翁春生. 爆震管内扰流片对爆轰波影响的数值分析[J]. 推进技术, 2011, 32(3): 425-430.
MA Danhua, WENG Chunsheng. Numerical investigation of two-phase detonation with the obstacles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(3): 425-430. (in Chinese)
- [8] 彭振,翁春生. 等离子体点火对燃烧转爆轰影响的数值计算[J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(1): 84-89.
PENG Zhen, WENG Chunsheng. Numerical calculation of the influence of plasma ignition on DDT[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2011, 17(1): 84-89. (in Chinese)
- [9] 蒋弢,翁春生. 雾化混合对气液两相脉冲爆轰发动机工作过程的影响[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(5): 692-698.
JIANG Tao, WENG Chunsheng. Effect of atomization and mixture on detonation process of gas-droplet two-phase pulse detonation engine[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(5): 692-698. (in Chinese)
- [10] 彭振,翁春生,白桥栋,等. 供气方式对脉冲爆轰火箭发动机工作频率影响的试验研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(5): 584-588.
PENG Zhen, WENG Chunsheng, BAI Qiaodong, et al. Experimental research on the effect of air inlet on detonation process and operating frequency of pulse detonation rocket engine[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(5): 584-588. (in Chinese)
- [11] 王研艳,翁春生. 尾喷管构型对多循环两相脉冲爆轰发动机流场及性能影响[J]. 航空动力学报, 2013, 28(10): 2256-2266.
WANG Yanyan, WENG Chunsheng. Effects of nozzle on flow field and performance of multi-cycle two-phase pulse detonation engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(10): 2256-2266. (in Chinese)
- [12] 刘宁,张相炎. 再生式液体发射药火炮喷雾燃烧理论及数值仿真[J]. 工程力学, 2009, 26(3): 224-228.
LIU Ning, ZHANG Xiangyan. Theory and numerical simulation of spray combustion process in regenerative liquid propellant guns[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3): 224-228. (in Chinese)
- [13] Habchi C, Verhoeven D, Huu C H, et al. Modeling atomization and breakup in high-pressure diesel fuel sprays[R]. SAE Paper 1997-0881, 1997.
- [14] 文华,刘永长,魏明锐,等. 二甲醚和柴油喷雾特性的数值模拟分析[J]. 内燃机学报, 2003, 21(4): 199-204.
WEN Hua, LIU Yongchang, WEI Mingrui, et al. Analysis of the spray characteristics of DME and diesel by numerical simulation [J]. Transactions of Chinese Society for

- Internal Combustion Engines, 2003, 21(4): 199-204. (in Chinese)
- [15] 聂万胜, 丰松江. 液体火箭发动机燃烧动力学模型与数值计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [16] 翁春生, 王杰, 白桥栋, 等. 脉冲爆轰发动机进气压力对爆轰影响的实验研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(3): 1-4.
WENG Chunsheng, WANG Jie, BAI Qiaodong, et al. Experimental study on effect of inlet pressure on detonation in pulse detonation engine[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(3): 1-4. (in Chinese)
- [17] Delagerammatikas G, Tina S. Grinding process simulation based on rosin-rammler equation[J]. Chemical Engineering Communication, 2004, 191(10): 1362-1378.
- [18] 姜日红. 脉冲爆震发动机工作过程研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
JIANG Rihong. Research on working process of PDE[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)

JALSP