

低温等离子体放电区长度对点火起爆的影响

郭晓晶¹, 郑殿峰¹, 于勇², 张会强³

- (1. 北京大学 工学院, 北京 100871;
2. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081;
3. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 为了研究低温等离子体放电区长度,即放电区间隙不变,体积大小对脉冲爆震发动机点火起爆的影响,以丙烷为燃料,空气和纯氧为氧化剂,充分考虑其详细的化学反应动力学机理,将低温等离子体放电区等效为高温高压火核,对放电区长度为20,40,60 mm三种结构,利用Fluent软件,对点火起爆过程进行数值模拟,并进行对比分析.结果表明:将低温等离子体放电区等效为高温高压火核是可行的,能够得到完整的点火起爆过程;不同放电区长度,对初始火焰形成、火焰传播速度和缓燃转爆震(DDT)时间有很大影响,对爆震波峰值压力影响不大.

关 键 词: 脉冲爆震发动机; 低温等离子体点火; 放电区长度; 爆震波; Fluent软件

中图分类号: V235

文献标志码: A

Influence of low temperature plasma discharge zone length on ignition initiating

GUO Xiao-jing¹, ZHENG Dian-feng¹, YU Yong², ZHANG Hui-qiang³

- (1. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;
2. School of Aerospace Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For the fixed length of low temperature plasma discharge zone with the same discharge zone gap, the volume size's influences on pulse detonation engine ignition initiating were studied. Propane was taken as fuel, air and pure oxygen as oxidant. The chemical reaction kinetics mechanism was fully considered in detail, and the low temperature plasma discharge zones were equivalent to high temperature and high pressure fire nucleus. Numerical simulations of the ignition initiating process were carried out by Fluent software. The lengths of the discharge zone of 20, 40, 60 mm was comparatively analyzed. Results show that the low temperature plasma discharge zone equivalent to high temperature and high pressure fire nucleus is feasible, and complete ignition initiating process can be got; different lengths of discharge zone have strong influences on the initial flame form, the flame propagation speed and deflagration to detonation transition (DDT) time, but little influence on the detonation wave peak pressure.

Key words: pulse detonation engine; low temperature plasma ignition;
discharge zone length; detonation wave; Fluent software

脉冲爆震发动机 PDE(pulse detonation engine)是一种利用间歇式爆震波产生的高温高压燃气来产生推力的一种概念发动机^[1]. 提高 PDE 性能的关键是缩短缓燃转爆震 DDT(deflagration to detonation transition)距离和时间,而点火方式是其关键技术之一. 目前 PDE 的主要点火方式有火花塞点火、预爆震点火、低温等离子体点火等^[2-4]. 火花塞属于小体积点火,能量利用率低,DDT 距离和时间较长,预爆震点火可缩短 DDT 距离和时间,但结构复杂,而低温等离子体点火越来越受到关注,其主要特点是瞬间将放电区内的可燃混气电离成各种活性基团,从而提高化学反应速率,实现大体积点火,比火花塞点火缩短了 DDT 距离和时间^[5-6].

在对火花塞点火起爆进行数值模拟时,文献[7-8]将火花塞点火区域简化为一个高温高压的区域进行模拟. 而对于低温等离子体点火的数值模拟,在对低温等离子体点火区域进行处理时,文献[9-11]利用 Fluent 软件或 CE/SE (conservation element and solution element)方法对计算域内的温度场、电磁场、速度场进行耦合求解,此计算方法科学性强,但计算程序复杂;文献[12]将低温等离子体点火区简化为高温区域,与火花塞点火起爆过程进行了二维数值模拟研究,可简化计算量,计算结果更容易收敛. 通过对等效点火区合理的参数设定,能够得到比较好的计算结果.

本文对低温等离子体不同放电区长度的点火起爆过程进行了数值模拟,采用简化模型,充分考虑丙烷/空气燃烧的详细化学反应动力学机理,对点火起爆过程进行了对比分析.

1 模型与计算方法

1.1 物理模型

爆震管模型长为 1500 mm,内径为 60 mm,在距爆震管头部 230 mm 处安装堵塞比为 44% 的环形扰流片,共 9 片,相邻两片间距为 60 mm. 爆震管头部的低温等离子体点火器采用同轴结构的介质阻挡放电形式,放电区长度分别为 20, 40, 60 mm,放电间隙(陶瓷外表面和低压电极内表面之间的距离)均为 4 mm. 图 1 为放电区长度为 40 mm 的低温等离子体点火器照片,低压电极内径为 33 mm,其上设置 24 个直径为 4 mm 的通气孔,每排各 8 个孔,共 3 排,高压电极外阻挡介质为刚玉管,刚玉管外径为 25 mm. 放电区长度为 20 mm

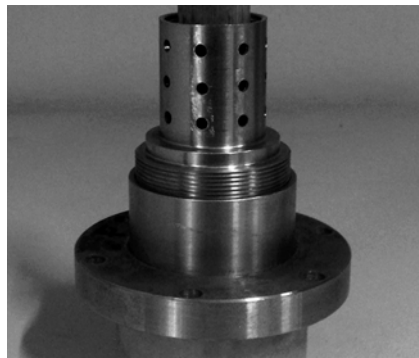


图1 低温等离子体点火器示意图

Fig.1 Schematic diagram of low temperature plasma igniter

和 60 mm 的点火器,低压电极上分别设置 1 排和 4 排直径为 4 mm 的通气孔,每排 8 个.

1.2 数值模型

采用二维轴对称数值模型,如图 2,爆震管、扰流片均与实际物理尺寸一致. 对于 3 种低温等离子体点火器,在二维轴对称模型中将其简化为长度分别是 20, 40, 60 mm,内径为 25 mm,外径为 33 mm 环形点火区域的二维剖面,与其物理尺寸保持一致;低压电极上的通气孔处按等效面积原理,将每排孔等效为 1 mm 的通气缝.

1.3 计算方法

根据 Chapman-Jouguet(C-J)理论可知,爆震波可看做是带有化学反应的强激波. 在火焰由缓燃向爆震转捩的过程中会发生复杂的过程,燃气的质量、动量、能量等参数与化学反应高度耦合,计算时需要较高精度才能对这一系列变化进行准确的模拟. 本文应用 Fluent 软件,选用非稳态二维轴对称 Navier-Stokes(N-S)方程,湍流模型选用 $k-\epsilon$ 模型,空间离散格式选用 2 阶迎风格式. 在算法上采用对瞬态问题有着明显优势的 pressure-implicit with splitting of operators(PISO)算法.

化学反应和能量释放过程的处理也是模拟的关键,如采用 Fluent 软件自带的丙烷/空气单步或三步反应机理,燃烧温度在 4000 K 以上,偏高于理论燃烧温度. 为得到更精确的模拟结果,采用 chemkin 格式的丙烷/空气燃烧的详细化学反应动力学机制^[13]. 计算燃烧时选用 laminar finite-rate 化学反应模型,燃烧速率由 Arrhenius 速度方程^[14]计算得出,反应物中共包含 25 种气体组份、34 步化学反应方程. 计算时假设爆震管内的丙烷/空气均匀混合,各组分的扩散系数相同,温度为常温,不考虑热辐射的影响.

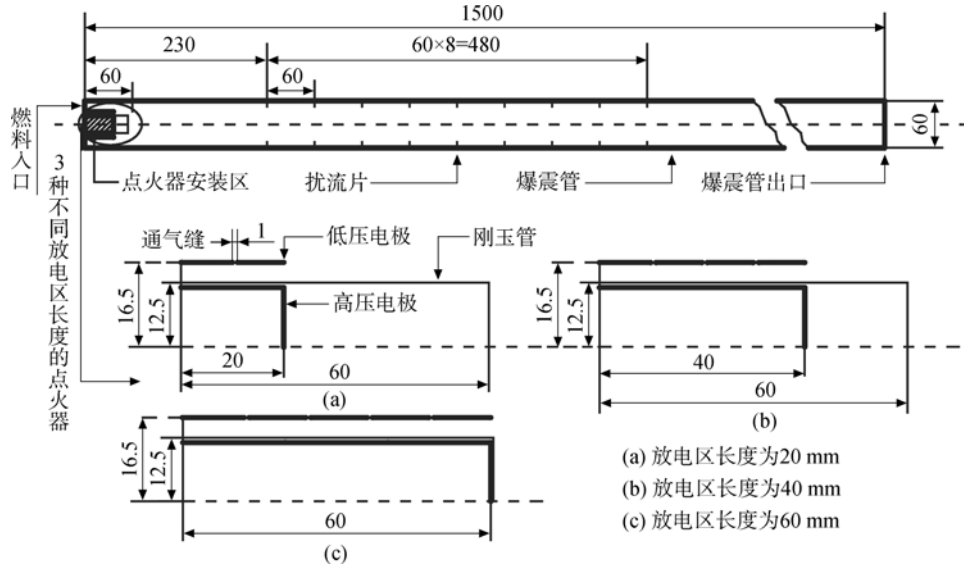


图2 低温等离子点火器和爆震管示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of detonation tube and low temperature plasma igniter (unit:mm)

1.4 控制方程

将低温等离子体点火起爆模型简化为二维非定常的化学反应模型,气体燃烧控制方程为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial r} + \frac{1}{r} \mathbf{S}_g = \mathbf{S}_c \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho_i \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho_i u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E + p)u \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho_i v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E + p)v \end{bmatrix}, \mathbf{S}_g = \begin{bmatrix} \rho_i v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (E + p)v \end{bmatrix}, \mathbf{S}_c = \begin{bmatrix} \omega_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 ρ_i 为第 i 组分气体的密度,混合气体的密度可表示为 $\rho = \sum \rho_i$,其中 u, v 为 x, r 方向上的速度, E 为单位体积气体的总能量, $\mathbf{S}_g$ 表示轴对称坐标系产生的源项, $\mathbf{S}_c$ 表示燃烧源项, ω_i 为 i 组分的单位体积的质量生成率。

1.5 网格划分

计算时采用四边形结构化网格,分别在通气缝、扰流片、壁面处进行了加密处理,前 230 mm 处采用 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 网格,后段网格适当稀疏。三种结构网格总数分别为 25 万、27 万、30 万。

为了验证网格的无关性,另建立了两套放电区长度为 40 mm 的网格,网格总数分别为 14 万和 19 万。计算条件相同的情况下对其爆震波传播

至第 1 片扰流片的时间进行对比。如图 3 结果显示,14 万、19 万和 27 万网格到达时间分别为 0.517, 0.486, 0.480 ms。相比于 14 万网格,19 万和 27 万分别缩短 6.00% 和 7.16%,证明 19 万和 27 万网格数值模拟结果差别不大,但由于 27 万网格能够更好地捕捉火焰初始阶段发展情况和 DDT 过程中的压力和温度变化情况,故选用 27 万网格进行计算。

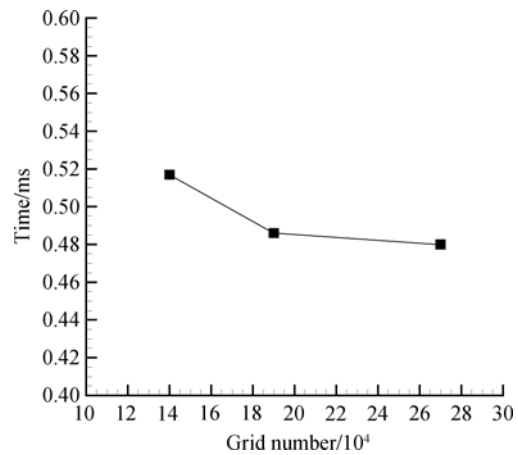


图3 不同网格数的时间对比

Fig. 3 Time comparison with different grid numbers

1.6 边界和初始条件

将壁面设置为常温,爆震管内初始压力为常压。由于丙烷和空气很难产生爆震,为便于快速成功点火起爆,模拟时提高了氧气质量分数。流场初始化后丙烷、氧气、氮气质量分数分别为 13.91%, 51.58%, 34.51%, 混气的初始压力为 101325 Pa,

温度为 300 K. 由于低温等离子体点火瞬间, 放电区内可燃混气迅速发生燃烧化学反应, 形成大体积火焰. 假定放电区燃气来不及膨胀, 可对放电区采用等效能量代替方法进行处理, 按文献[15]能量计算公式计算, 放电区等效为温度为 2500 K 和压力为 0.9 MPa 的高温高压火核.

2 结果和分析

2.1 不同放电区长度的点火起爆过程对比

低温等离子体点火后, 放电区内高温高压燃气向出口迅速膨胀推进. 由于已燃气体对未燃气体的离子效应和热传导双重作用, 使未燃混气迅速发生燃烧化学反应, 从而火焰前锋由爆震管封闭端向出口迅速推进, 经过缓燃转爆震(DDT), 最终发展成稳定的爆震波. 图 4~图 8 分别给出了 3 种不同放电区长度爆震管内压力场和温度场云图的对比情况, 从上到下依次为放电区长度(L)为 20, 40, 60 mm 的 3 种结构, 左侧为发展过程中的表面压力云图, 右侧为温度云图.

图 4 为火焰发展时间 $t=0.025$ ms 时刻, 放电区已燃气体向外膨胀推进的压力和温度云图. 由图可知: 放电区高温高压燃气通过高压电极和低压电极之间的所有出口向外膨胀, 局部点燃放电区外的燃气, 其中放电区轴向出口能量大, 喷出

的高温高压火核体积与表面积大, 与未燃混气的接触面积大, 点燃混气面积大; 此时, 爆震管头部局部未燃混气发生燃烧, 低压电极上小的火焰环向径向发展, 高压电极和低压电极出口的大火焰环向轴向和径向发展. 压力云图表明: 放电区火核压力下降迅速, 放电区长度小, 压力下降快, 对应放电区长度为 20, 40, 60 mm, 放电区火核最高压力分别降为初始压力 0.9 MPa 的 50.67%, 65.22%, 72.33%. 温度云图表明: 放电区火核最高温度变化相对平缓, 放电区火核最高温度分别降为初始温度 2500 K 的 92.48%, 93.84%, 95.08%.

图 5 为 $t=0.230$ ms 时刻, 爆震管头部的压力和温度云图. 由图可知, 放电区长, 压力波和火焰传播距离远, 压力值高. 压力云图表明: 放电区长度为 20 mm, 爆震管内最高表面压力为 0.054 MPa. 放电区长度为 40 mm, 由于压力波在轴线处发生碰撞, 压力提升, 局部形成高压, 爆震管内最高表面压力为 0.110 MPa, 压力波以平面形状向前传播. 放电区长度为 60 mm, 压力波在轴线处碰撞后, 形成大面积的高压区, 爆震管内最高表面压力为 0.16 MPa. 温度云图表明: 放电区长度为 20 mm, 火焰体积小, 传播距离短, 爆震管内最高温度为 1961.0 K. 放电区长度为 40 mm, 火焰发展比较迅速, 体积较大, 传播距离较远, 爆震管内最高

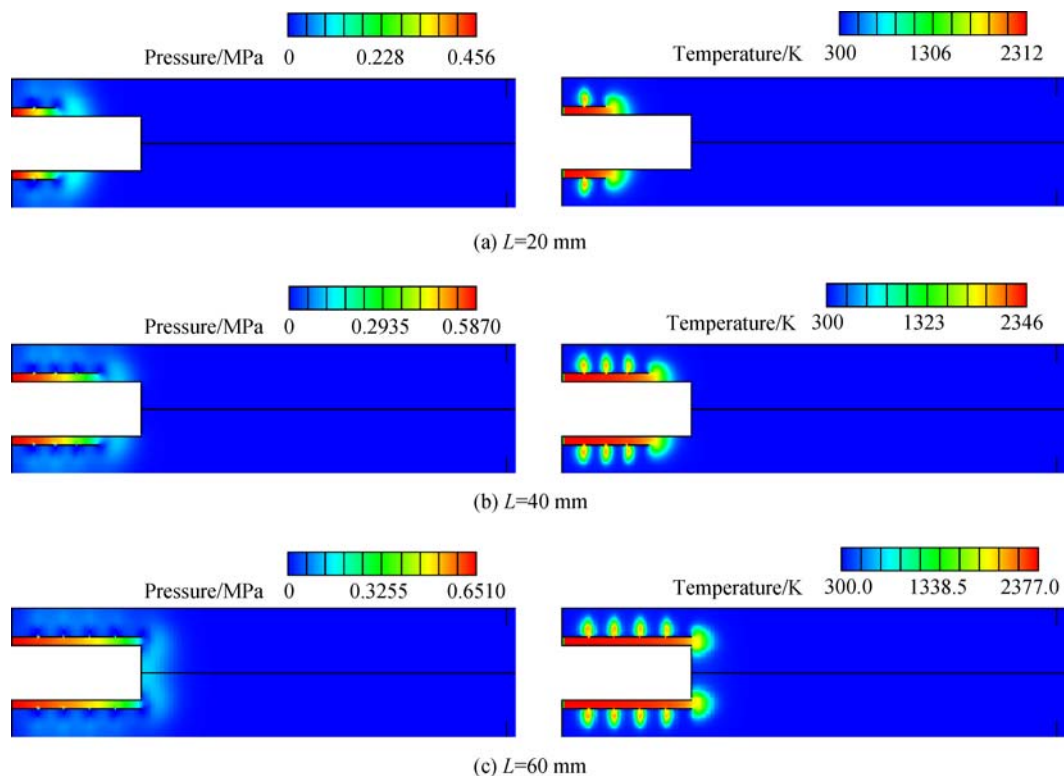


图 4 DDT 压力和温度云图($t=0.025$ ms)

Fig. 4 DDT contours of pressure and temperature ($t=0.025$ ms)

温度为 1971.0 K. 放电区长度为 60 mm, 火焰体积更大, 传播距离更远, 爆震管内最高温度达到 2120 K.

图 6 为 $t=0.300$ ms 时刻, 压力和温度的变化云图. 由图可知, 放电区长, 压力波和火焰传播距离远, 峰值压力和温度高. 压力云图表明: 放电

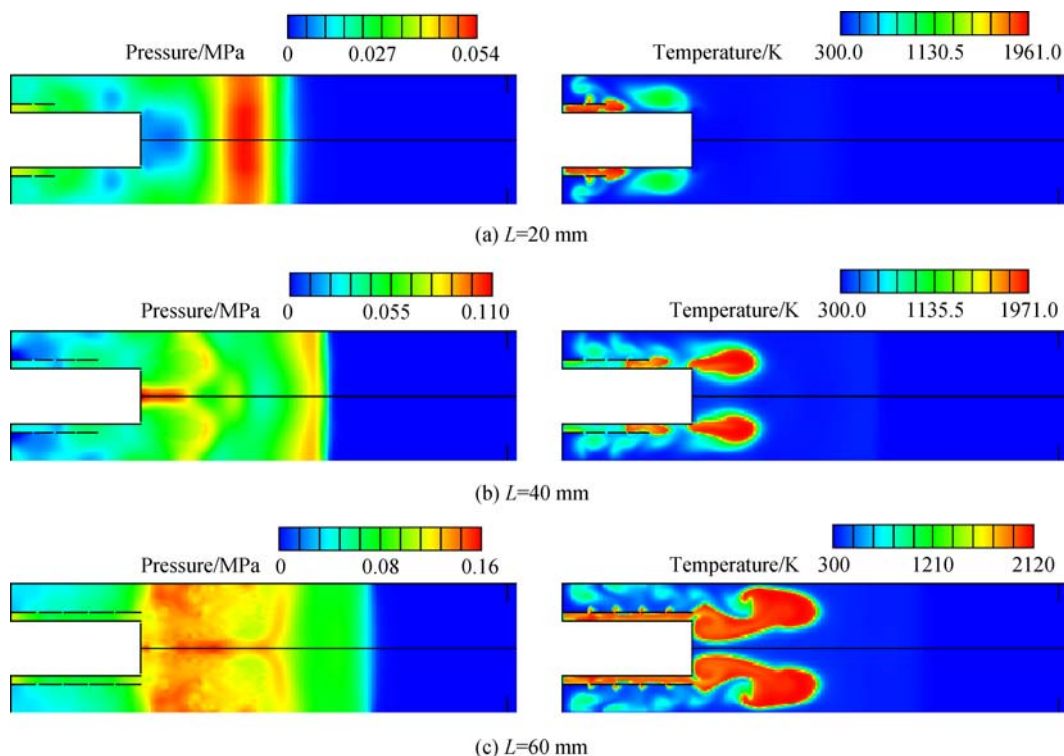


图 5 DDT 压力和温度云图 ($t=0.230$ ms)

Fig. 5 DDT contours of pressure and temperature ($t=0.230$ ms)

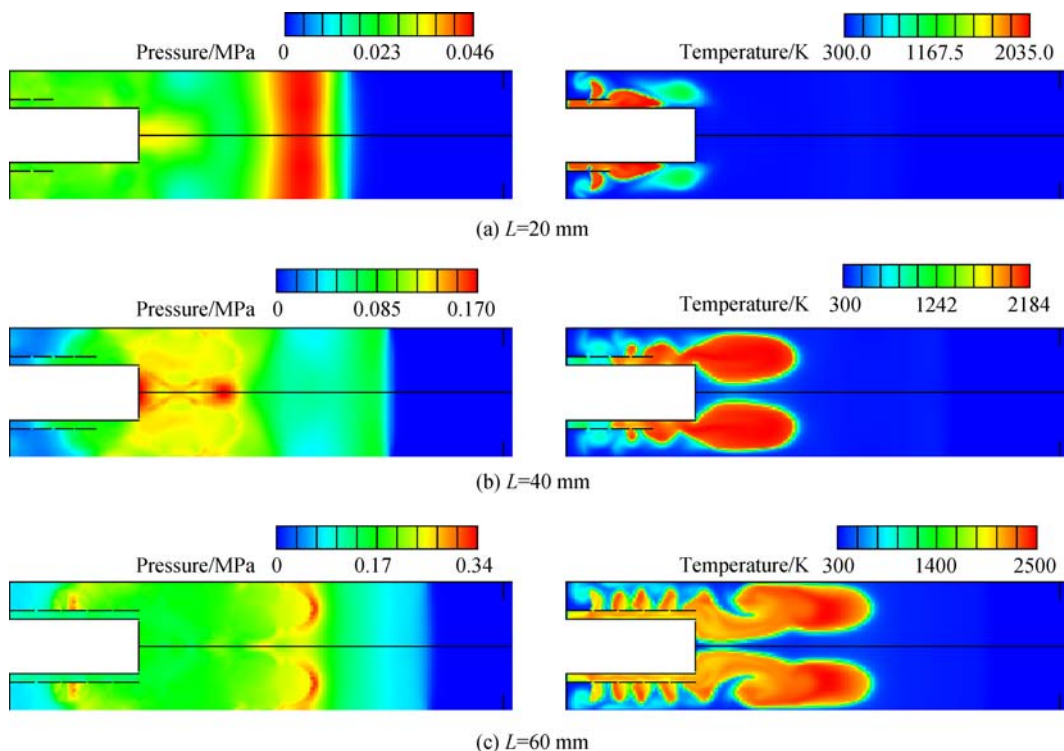


图 6 DDT 压力和温度云图 ($t=0.300$ ms)

Fig. 6 DDT contours of pressure and temperature ($t=0.300$ ms)

区长度为 20 mm, 爆震管内最高表面压力为 0.046 MPa, 主要由于高压火核体积小, 初始火焰发展缓慢; 放电区长度为 40 mm, 压力波在轴线碰撞后高压区范围扩大, 爆震管内最高表面压力升至 0.170 MPa; 放电区长度为 60 mm, 压力波与燃烧波接近耦合, 局部出现月牙状高压区, 爆震管内最高表面压力升至 0.34 MPa. 温度云图表明: 放电区长度为 20 mm, 火焰范围扩大, 爆震管内最高温度上升为 2035 K; 放电区长度为 40 mm, 火焰迅速扩大, 快速沿轴向发展, 径向扩展接近壁面, 爆震管内最高温度上升为 2184 K; 放电区长度为 60 mm, 火焰最为迅速, 火焰面积最大, 传播距离最远, 火焰呈现弯曲状, 火焰扩展至壁面, 爆震管内最高温度上升为 2500 K.

随着时间的推移, 大量压缩波迭加形成激波间断, 激波和燃烧波迅速耦合, 压力陡增、温度升高、反应变得剧烈, 最终形成爆震波. 为了进一步比较放电区长度对爆震特性的影响, 根据计算结果, 选取压力波压力达到 1.7 MPa 的云图作为比较, 如图 7 所示. 由图可知: 3 种放电区长度的压力波和燃烧波形状和位置基本一致, 但发展时间完全不同, 放电区长度, 火焰发展所用的时间短; 对放电区长度为 20, 40, 60 mm, 火焰发展时间分别为 0.645, 0.442, 0.325 ms. 压力云图表明, 在爆

震管下游均出现激波和燃烧波的耦合, 形成月牙状的高压区, 这与火焰尖端的形状吻合; 放电区长度为 60 mm, 在爆震管头部出现高压区, 主要是由于一部分膨胀波回传, 与爆震管头部发生了耦合, 造成局部高压. 温度云图表明, 火焰尖端区域与压力云图高压区域对应. 到达此状态, 放电区长度为 40 mm 比放电区长度为 20 mm 时间缩短 31.47%, 放电区长度为 60 mm 比放电区长度为 20 mm 时间缩短 49.61%.

激波和燃烧波最终完全耦合, 燃烧进入爆震状态. 为了进一步比较放电区长度对爆震特性的影响, 根据计算结果, 选取爆震波传播至第 1 片扰流片时的压力和温度云图作为比较, 如图 8 所示. 压力云图表明: 爆震波达到第 1 片扰流片时, 放电区长度不同, 爆震波峰值压力不同, 放电区长度增加, 爆震波峰值压力略有提高; 此处爆震波峰值压力不考虑壁面效应及热点效应, 对应放电区长度为 20, 40, 60 mm, 爆震波峰值压力分别为 2.77, 2.84, 2.90 MPa. 温度云图表明: 放电区长度为 20, 40, 60 mm, 对应爆震管内最高温度分别为 3154, 3092, 3126 K, 基本一致. 放电区长度增加, 爆震波传播至第 1 片扰流片所用时间大幅度缩短, 放电区长度为 20, 40, 60 mm, 对应时间分别为 0.683, 0.480, 0.357 ms, 后者比前者时间依次缩

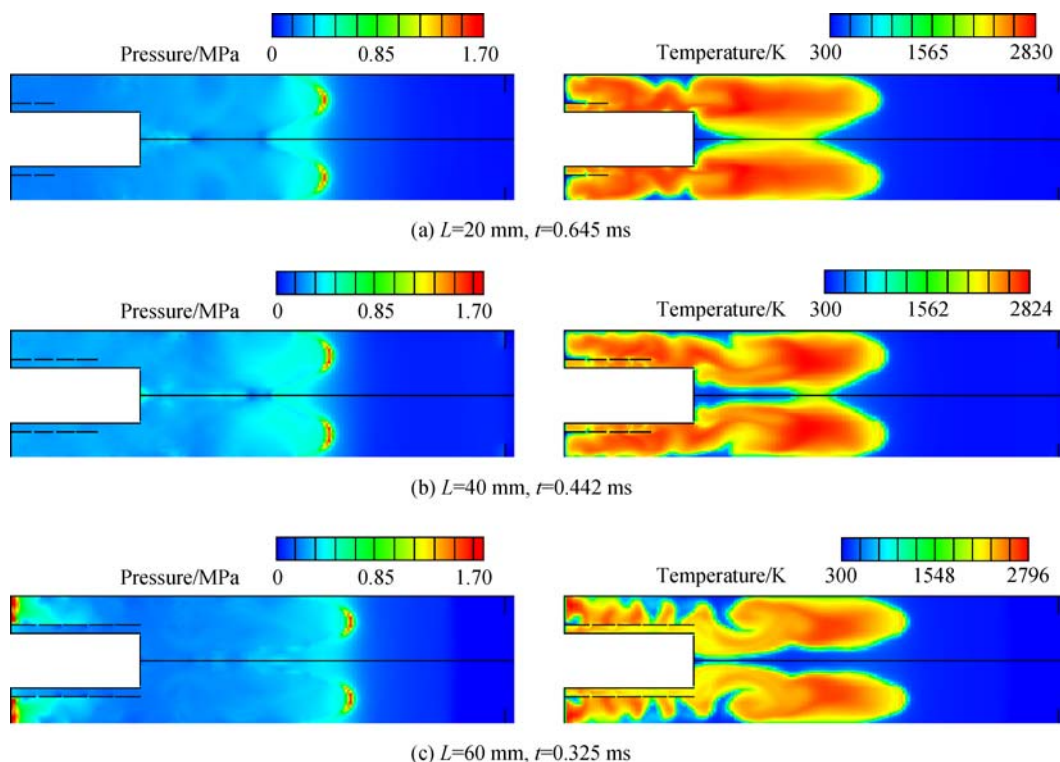


图 7 发展至 1.7 MPa 时 DDT 压力和温度云图

Fig. 7 DDT contours of pressure and temperature at 1.7 MPa

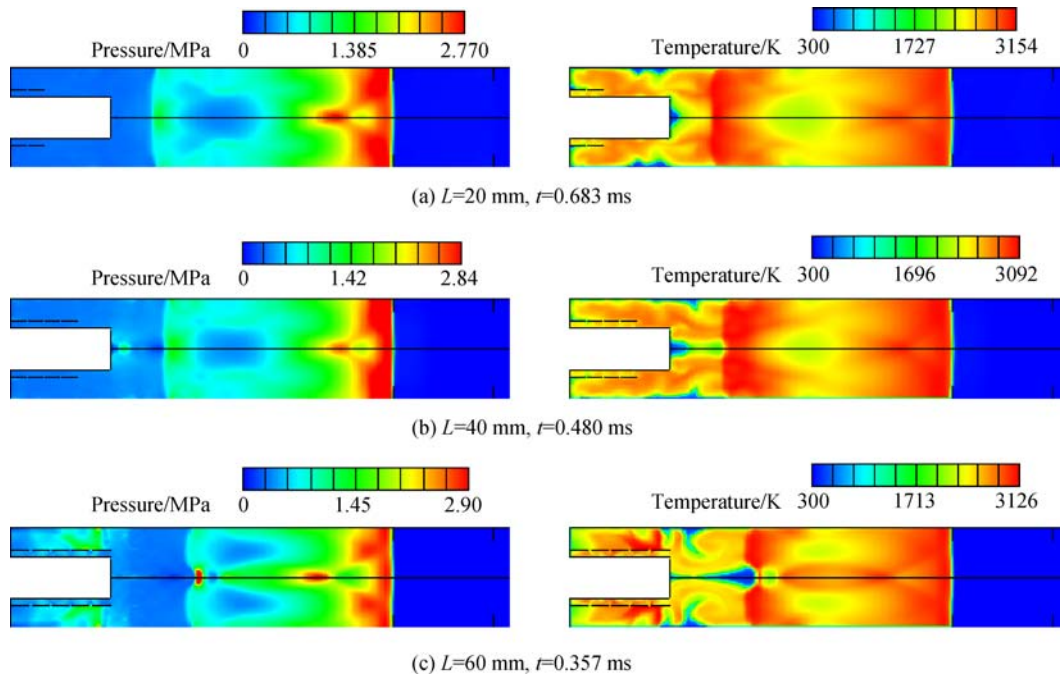


图 8 发展至第 1 片扰流片时 DDT 压力和温度云图
Fig. 8 DDT contours of pressure and temperature at the first spoiler

短 29.72% 和 25.63%。爆震波峰值压力和温度差别较小,而爆震波传播时间差别大,这主要是由于初始火焰传播速度不同。放电区长度,火核体积大,初始火焰传播速度大,DDT 时间短,反之亦然,这说明放电区火核大小对初始火焰的发展有很大影响,而爆震波的形成主要由爆震管内的混气决定。

2.2 DDT 距离和时间

由 Gaseq 软件计算出模拟条件下爆震波峰值压力 $p = 3.05 \text{ MPa}$,爆震波波速 $V_{C-J} = 2277.51 \text{ m/s}$ 。模拟中将达到爆震波峰值压力为 3.05 MPa 时的距离和时间作为 DDT 距离和时间,通过爆震波传播至图 8 位置时间间隔和距离可计算出爆震波波速,计算结果如表 1。可以看出与 Gaseq 波速值误差均低于 4.03%,证明计算方法和模拟结果可靠。

表 1 DDT 距离和时间
Table 1 DDT distance and time

参数	放电区长度 L/mm		
	20	40	60
DDT 距离 x_{ddt}/m	0.149	0.150	0.161
DDT 时间 t_{ddt}/ms	0.646	0.444	0.326
爆震波波速 $V_{C-J}/(\text{m/s})$	2189.19	2222.22	2225.80

如表 1,放电区长度为 20,40,60 mm 的 DDT 时间后者比前者分别缩短 31.27%,26.58%,DDT 距离随放电区长度增加略微增加,爆震波波速基本一致。说明低温等离子体放电区越长,DDT 时间越短,但由于实际试验受到低温等离子体点火器结构和机械电源放电水平等的限制,放电区不宜过长,一般为 20~80 mm。

2.3 监测点的压力和时间对比分析

图 9 为爆震波经历第 1 片扰流片发展到距爆震管头部封闭端 0.27m 处,监测到的爆震波峰值压力和时间关系曲线。从图可知,放电区长度,爆震波峰值压力大,爆震波传播时间短。对应放电区

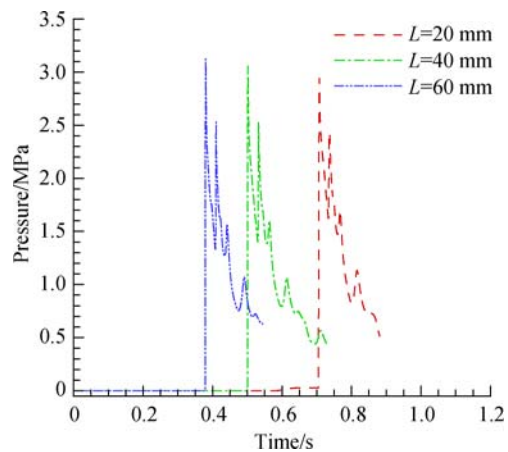


图 9 监控点压力曲线
Fig. 9 Pressure curves of monitor points

长度为 20, 40, 60 mm, 监测点的爆震波峰值压力分别为 2.94, 3.05, 3.12 MPa, 爆震波到达监测点的时间分别为 0.71, 0.51, 0.38 ms, 后者比前者时间依次缩短 28.2% 和 25.5%。进一步说明放电区长爆震波峰值压力大、DDT 时间短, 这说明放电区长引起的爆震波时间差别会一直延续。

3 结 论

本文对丙烷/空气低温等离子体单次点火起爆进行了数值模拟。在考虑详细的化学反应动力学原理的基础上采用 Fluent 软件, 模拟了不同放电区火核长度对点火起爆过程的影响。研究结果表明

- 1) 将低温等离子体放电区等效为高温高压火核是可行的, 能够得到完整的点火起爆过程。
- 2) 放电区长对初始火焰形成、火焰传播速度影响大, 放电区长, 火焰传播速度快。
- 3) 爆震波峰值压力随放电区长增加略微增加, 而 DDT 时间大幅度缩短。

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.
- [2] Helfrich T M, Schauer F R, Bradley R P, et al. Ignition and detonation-initiation characteristics of hydrogen and hydrocarbon fuels in a PDE[R]. AIAA-2007-234, 2007.
- [3] Hoke J L, Bradley R P, Gallia J R, et al. The impact of detonation initiation techniques on thrust in a pulsed detonation engine[R]. AIAA-2006-1023, 2006.
- [4] Cathey C, Wang F, Tang T, et al. Transient plasma ignition for delay reduction in pulse detonation engines[R]. AIAA-2007-443, 2007.
- [5] Wang F, Kuthi A, Gundersen M A. Technology for transient plasma ignition[R]. AIAA-2005-951, 2005.
- [6] Wang F, Jiang C, Kuthi A, et al. Transient plasma ignition of hydrocarbon-air mixtures in pulse detonation engines[R]. AIAA-2004-834, 2004.
- [7] Yungster S. Analysis of nozzle and ejector effects on pulse detonation engine performance [R]. AIAA-2003-1316, 2003.
- [8] MA Fuhua, Choi J Y, Yang V. Thrust chamber dynamics and propulsive performance of airbreathing pulse detonation engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(3): 514-515.
- [9] Chang S C. The method of space-time conservation element and solution element: a new approach for solving the Navier-Stokes and Euler equations[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 119(2): 295-323.
- [10] Weng C, Gore J P. A numerical study of two-and three-dimensional detonation dynamics of pulse detonation engine by the CE/SE method[J]. Acta Mechanica Sinica, 2005, 21(1): 32-39.
- [11] Wang G, Zhang D, Liu K, et al. An improved CE/SE scheme for numerical simulation of gaseous and two-phase detonations[J]. Computers and Fluids, 2010, 39(1): 168-177.
- [12] 于锦禄, 何立明, 丁未, 等. 瞬态等离子体点火和火花塞点火起爆过程的对比研究[J]. 推进技术, 2013, 34(11): 1575-1579.
- [13] YU Jinlu, HE Liming, DING Wei, et al. Comparative investigation on detonation initiation process of transient plasma ignition and spark ignition[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(11): 1575-1579. (in Chinese)
- [14] Petrova M V, Varatharjan B, Williams F A. Theory of propane autoignition[R]. AIAA-2004-1325, 2004.
- [15] Gamezo V N, Ogawa T, Oran E S. Deflagration-to-detonation transition in premixed H_2 -air in channels with obstacles[R]. AIAA-2007-1172, 2007.
- [16] Wang B, John S T. Direct calculation of spherical detonation initiation of H_2/O_2 /air mixtures by the CE/SE method[R]. AIAA-2004-793, 2004.

(编辑: 王碧琚)