DOI: 10.11883/bzycj-2017-0284

增强型喷射器对爆轰波 DDT 过程的影响*

饶飞雄,雷知迪,丁 珏,翁培奋
(上海大学应用数学和力学研究所,上海 200072)

摘要: 在激波、火焰及射流同时存在的流场中,组织燃烧转爆轰过程是脉冲爆震发动机实现点火、起爆的关键问题。设计一类喷射器,采用 $C_2H_2/O_2/Ar$ 反应,数值验证了该喷射器能增强爆震室燃料燃烧转爆轰的可行性,并讨论了流场中热点的点火机制。结果显示:该装置在流场中可激发不稳定性,产生漩涡,加速能量、质量的交换。流场产生热点,促进火焰速度加快,追赶前导激波。喷射器位置影响前导激波的运动速度。在一定范围内,前导激波速度越大,碰撞产生的热点越容易激发燃烧转爆轰过程。

关键词: 脉冲爆震发动机;燃烧转爆轰;喷射器;热点;火焰速度
中图分类号: O381 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

脉冲爆震发动机(pulse detonation engine, PDE)因其设计简单、热效率高等优点,未来有望替代传统发动机,因此越来越受到研究者们的重视[1]。

爆轰波是一种前导激波与化学反应强耦合,同时可以自持传播并具有强间断的现象。前导激波将未反应气体压缩至较高的密度和温度,在化学反应尺度内快速发生化学反应,从而释放大量的化学能[2]。爆轰点燃方式属于定容燃烧,单位质量的同种燃料燃烧所产生的热量远高于普通燃烧。目前爆轰波的起爆主要有直接起爆[2-3]和间接起爆[4-5]。直接起爆主要是在可燃混合气体中爆炸引发爆轰波,此种方法对起爆器的材料性能和起爆能量要求较高。间接起爆是在混合气体中采用较弱的点火能量进行点燃,在一定距离内完成爆燃向爆轰转变(deflagration to detonation transition, DDT)。DDT 所需要的点火能量较小,因此该方法在 PDE 上得到更为广泛的运用。

DDT 混合增强技术是研究者们关注的焦点,是发展超声速飞行器推进系统的关键问题[6]。DDT 中非常重要的 2 个参数是 DDT 时间和距离。Johansen 等[7]通过研究激波与火焰相互作用产生压缩效应来加快 DDT 过程;Gamezo 等[8]通过分析障碍物对爆燃转爆轰的作用得出障碍物最佳间距;张宝亮等[9]基于有限体积法分析障碍物与爆轰波的相互作用规律;王治武等[10]研究点火对两相无阀脉冲爆震发动机性能的影响,分析点火起爆对爆燃转爆轰时间的影响;Khokhlov 等[11]分析出热点的形成可以促进火焰速度的加快,最终促进爆轰的形成;De Witt 等[12]采用孔板与圆盘的组合装置通过激波发射形成热点成功触发爆震。但此试验中孔板的堵塞比较大,所形成的阻力较大,不太适合工程应用;马丹花等[13]采用二维黏性 CE/SE 方法研究扰流片对燃烧转爆轰的影响,得出扰流片最佳片数和间距;朱雨建等[14]采用孔栅干涉方法发现激波压缩效应和外界扰动对 DDT 起着十分重要的作用;刘云峰等[15]通过研究激波-爆震波转捩发现良好的点火位置和反射激波方向可以促进 DDT 过程。相关文献设计的扰流片可以促进 DDT 过程,但需要多个扰流片方能达到相应的效果,这对设计和制造相应的装置有着较高的要求,同时延长了装置的长度。

为了能在脉冲爆震发动机内高效点火并实现稳定爆轰,本文中设计一种新的喷射器,并开展爆燃转爆轰过程的数值模拟。讨论热点引起 DDT 的机理,分析喷射器表面阻断率及放置位置对 DDT 的影响,以期为进一步优化喷射器结构提供理论依据。

* **收稿日期:** 2017-07-10; **修回日期:** 2017-10-18
基金项目: 国家自然科学基金(11472167)
第一作者: 饶飞雄(1989—),男,硕士研究生,1052115992@qq.com;
通信作者: 丁 珏(1973—),女,博士,副研究员,dingjue_lu@shu.edu.cn。

1　流场控制方程和数值方法

1.1　控制方程

对于爆震室可燃混合气体爆轰和爆轰波传播过程，采用 Euler 控制方程：

$$\frac{\partial \boldsymbol{W}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial y}=\boldsymbol{\omega} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho E\\ \rho_i\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}\rho u\\ \rho u^2+p\\ \rho uv\\ \rho Hu\\ \rho_i u\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho v^2+p\\ \rho Hv\\ \rho_i v\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{\omega}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\\ \omega_i\end{bmatrix}$。其中，$u$、$v$ 为流体速度在直角坐标系下的分量，ρ、p、E、H 分别为混合气体的密度、压力、质量总能和质量总焓，且总能和总焓之间的关系为 $H=E+\frac{p}{\rho}$。$\boldsymbol{\omega}$ 为化学反应源项，下标 i 代表第 i 个气体组分。气体的质量总内能写为：

$$E=\frac{1}{2}(u^2+v^2)+\frac{1}{\rho}\sum_{i=1}^{n}\rho_i e_i(T) \tag{2}$$

对于一个有 N 种组分和 L 个基元反应组成的系统，其反应机理可以表示为：

$$\sum_{i=1}^{N}v'_{ik}\chi_i \rightleftharpoons \sum_{i=1}^{N}v''_{ik}\chi_i \qquad i=1,2,\cdots,L \tag{3}$$

式中：χ_i 为第 i 种组分的摩尔浓度。v'_{ik} 和 v''_{ik} 分别表示第 i 种组分在第 k 个反应中的正向和逆向的化学计量数。第 i 种组分的净生成速率为：

$$\omega_i=\sum_{k}^{L}v_{ik}q_k \qquad i=1,2,\cdots,N \tag{4}$$

式中：$v_{ik}=v''_{ik}-v'_{ik}$。$q_k=K_{\mathrm{f},k}\prod_{i=1}^{N}(\chi_i)^{v'_{ik}}-K_{\mathrm{b},k}\prod_{i=1}^{N}(\chi_i)^{v''_{ik}}$，为第 k 个反应的进程率，其中 K_f 为正向化学反应速率，遵循 Arrhenius 定律：$K_\mathrm{f}=AT^{\beta}\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$；$K_\mathrm{b}$ 为逆向化学反应速率，由正向化学反应速率与平衡常数求出：$K_\mathrm{b}=\frac{K_\mathrm{f}}{K_\mathrm{c}}$，其中 K_c、E、β、A 分别表示平衡常数、活化能、温度指数和指前因子。

1.2　数值方法

在计算对流通量时采用 Roe 格式：

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{RL}}=\frac{1}{2}(\boldsymbol{H}_\mathrm{R}+\boldsymbol{H}_\mathrm{L})-\frac{1}{2}\boldsymbol{A}\delta\boldsymbol{W} \tag{6}$$

式中：下标 R、L 代表单元面右、左的状态量。$\boldsymbol{H}$ 为通量矢量，$\boldsymbol{W}$ 为解向量，$\delta\boldsymbol{W}$ 表示变量在单元面右左两侧值的差。$\boldsymbol{A}$ 称为 Roe 平均矩阵。为了提高数值精度，对参量在单元面左右两侧的值通过 Muscl 插值得到。时间推进采取稳定性好、计算效率高的 LU-SGS 方法，时间步长采用 10^{-8} s 来保证数值计算收敛与稳定性。

1.3　网格尺寸、初始条件和边界条件

爆轰波的化学反应速率是普通燃烧的 $10^3\sim10^8$ 倍[16]。考虑二维爆震室中的 H_2、O_2 当量比为 1[17]，采用二维直管模型，初始压力和初始温度分别为 10^5 Pa 和 300 K。采用二十步基元反应，并基于 0.1 mm 网格尺寸数值模拟爆轰波形成和发展过程。图 1 所示为 41.7 μs 时刻计算所得的爆轰波结构。表 1 给出了数值计算所得的爆轰参数与实验结果[18]、C-J 理论值[18]的比较。结果显示：与 C-J 理论值相比，计算所得的爆速、温度、压力值与实验结果更接近，其与实验值的相对误差分别为0.20%、2.78%和2.69%，符合精度要求，说明采用的模型和数值方法是合理的。

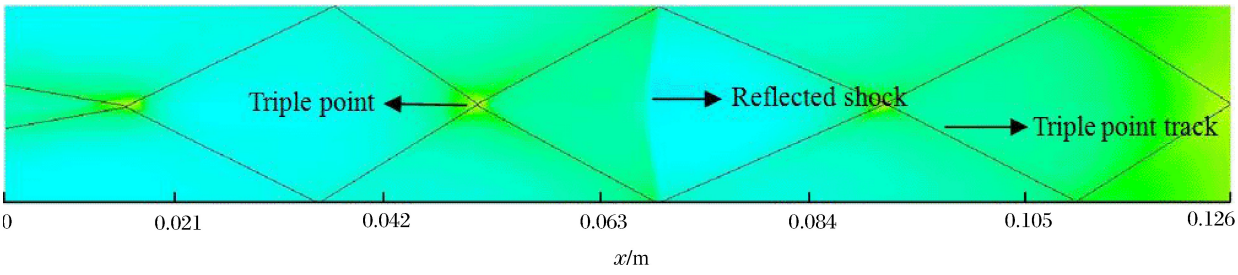


图 1 爆轰波结构

Fig. 1 Single detonation cell pattern

表 1 验证算例中爆轰参数

Table 1 Detonation parameters in verification example

爆速/(m·s^{-1})			温度/K			压力/MPa		
实验	C-J 理论	计算	实验	C-J 理论	计算	实验	C-J 理论	计算
2 825	2 853	2 819.36	3 583	—	3 682.75	1.86	1.86	1.91

2　喷射器增强燃烧转爆轰过程的数值研究

2.1　喷射器基本构型

在喷射器表面布置半径相同的孔。定义：表面阻断率 ϕ 为半球形喷射器表面上阻碍流体流动的面积与喷射器总面积之比。经过计算，喷射器各孔对应的表面阻断率分别为 0.400、0.444、0.462 和 0.471。坐标原点位于左端壁面的中心，爆震室中喷射器沿着中轴线 x 方向放置。

爆震室模型的直径为 2 cm，点火直径为 1.6 cm，如图 2 所示[19]。划分网格时，在喷射器附近区域进行加密处理，最小网格尺寸为 5×10^{-3} mm。计算时，右端壁面为压力出口，其余为壁面边界条件。流场初始压力为 10^5 Pa，初始温度为 300 K。

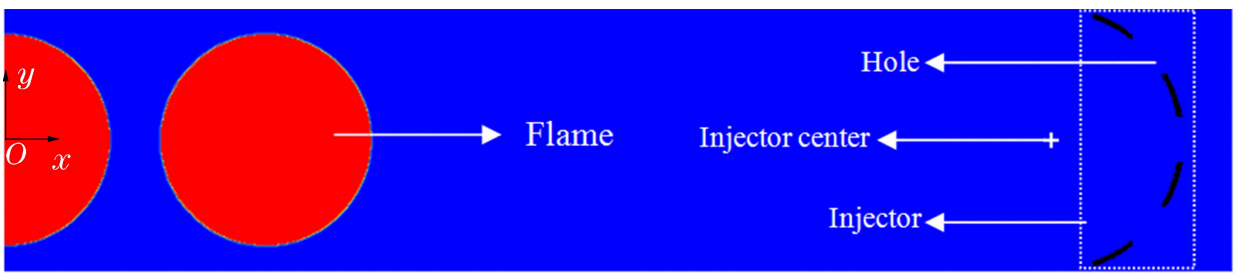


图 2 计算区域和喷射器示意图

Fig. 2 Sketch of computation field and injector

充满气体 C_2H_2、O_2、Ar(初始化学当量比 $\varphi(C_2H_2):\varphi(O_2):\varphi(Ar)=1:2.5:31.5$ 的爆震室流场开展数值讨论。其中：单步反应的指前因子取 3.66×10^{10} kmol/(m^3·s)，温度影响因子取 0，活化能取 1.26×10^8 J/kmol[20]。

2.2　喷射器触发爆震波的形成

缩短燃烧转爆轰所需时间和转化的距离是优化喷射器的关键指标。表 2 给出了爆震室未安装喷射器以及喷射器安装在 $x=9.0$ cm 位置流场的参数值。可以看出：安装喷射器情况下，218 μs 时刻爆震室形成了稳定爆轰波。由此可知，爆震管中安装喷射器可以快速发生燃烧转爆轰过程。

表 2 有/无喷射器时爆轰波状态对比

Table 2 Comparison of detonation wave state with or without injector

状态	时间/μs	前导激波位置/cm	是否形成稳定爆轰波
无喷射器	350	28.22	否
带喷射器	218	28.23	是

2.3　燃烧转爆轰 DDT 过程

图 3 所示为经过喷射器时火焰的发展历程。前导激波作用于装置的壁面并发生反射，大量燃料聚集在壁面附近，浓度升高，反应速率增大，喷射器附近流场的温度也随即升高，形成热点。

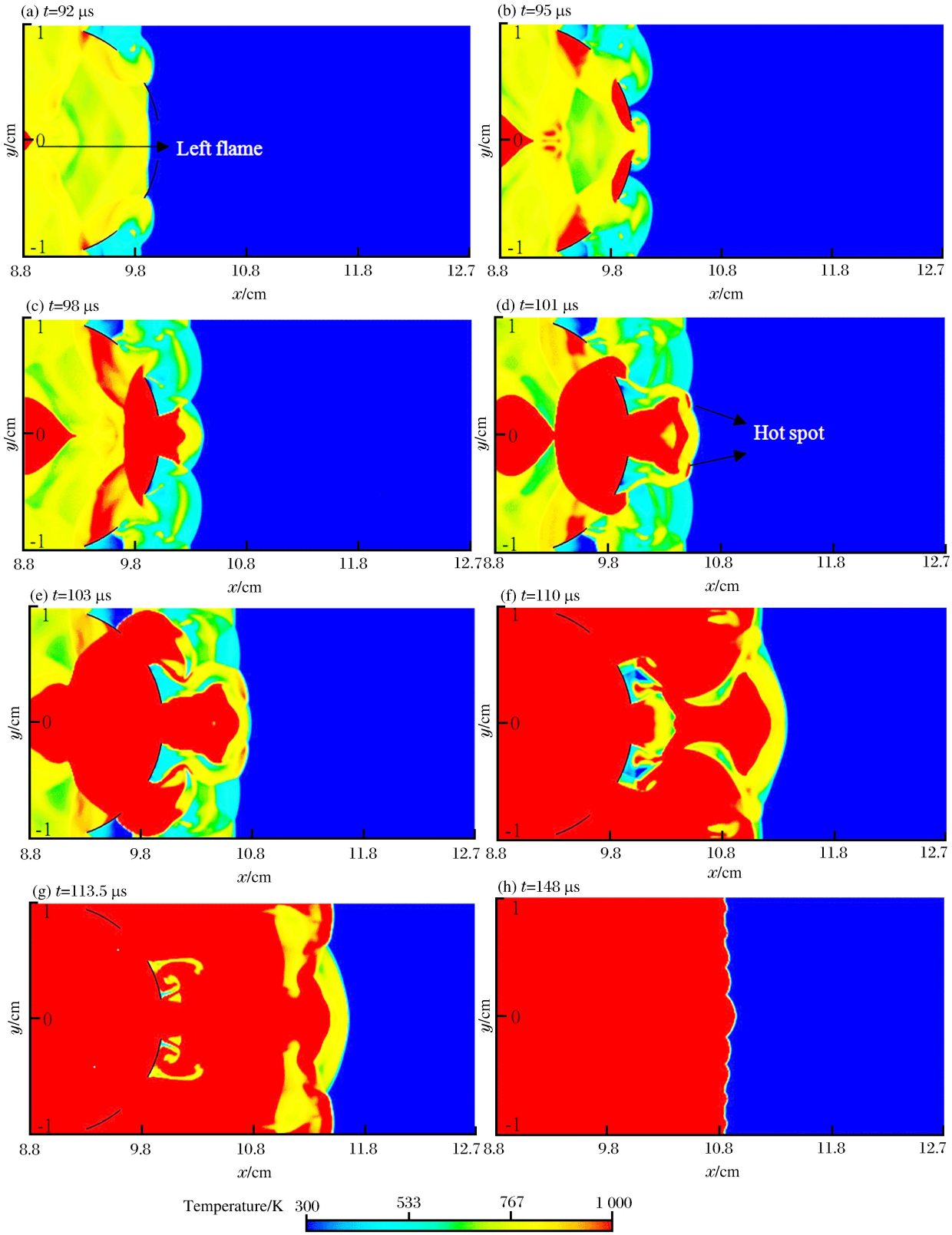


图 3　喷射器影响下燃烧转爆轰的 DDT 过程

Fig. 3　DDT process affected by the injector

为了清晰显示喷射器附近流场密度、压力和温度的分布，对计算结果进行无量纲处理（选取未受扰动处流场参数作为无量纲基准尺度）。图 4 所示为 101 μs 时刻，无量纲化流场的压力、密度、压力和温度沿中轴线的分布。可以看出，101 μs 时刻气体压力急剧升高。分析原因，主要是经过喷射器之后的火焰发生汇聚，发展的火焰与前导激波耦合在一起，使得气体的混合和燃烧得到增强，流场的压力快速升高。图 5 给出火焰沿 x 正方向传播速度随时间的发展历程。可以看到：经过喷射器之后，火焰速度在较短时间内升高至 781.375 m/s，该值接近稳定爆轰速度的 1/2，表明此时刻燃烧已受到喷射器的激励作用[21]，这符合文献[21]给出的流场 DDT 过程的触发机制。

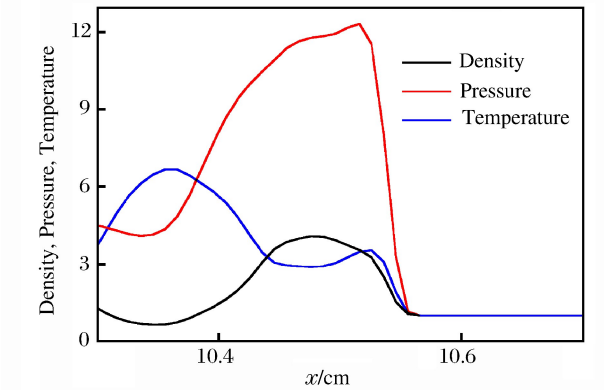


图 4　流场参数的分布

Fig. 4　Distribution of flow parameters

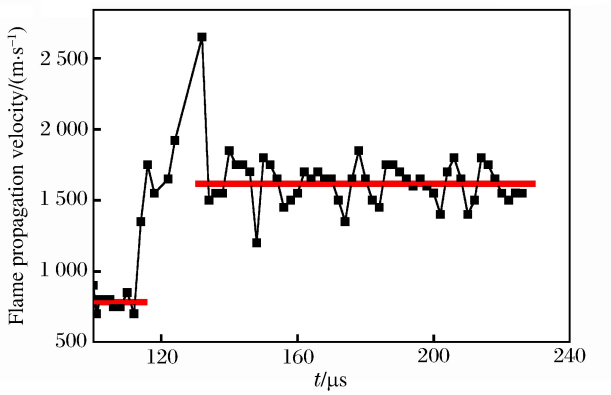


图 5　沿 x 正方向的火焰速度

Fig. 5　Flame propagation velocity along x positive direction

2.4　燃烧转爆轰过程的影响因素

爆震波阵面是由前沿激波和紧跟其后的化学反应区构成。当前导激波和有限速率化学反应满足强耦合，爆轰波稳定传播。本文中将着重基于前导激波速度和反应区热量释放率 2 个重要因素，讨论喷射器放置位置和表面阻断率对爆震室燃烧转爆轰 DDT 的影响机制。

2.4.1　基于前导激波速度分析喷射器放置位置的影响

对于喷射器表面阻断率为 0.444，数值分析爆震室喷射器放置位置对爆轰流场的影响。表 3 所示为 228 μs 时刻，喷射器在不同位置下爆轰波形成情况。可以看到，喷射器位置为 3.9 cm 时，正好能成功触发爆轰波的形成，因此该处为触发的临界位置。同时，与其余情况相比，喷射器放置位置为4.0 cm时，爆轰波传播距离最大，达到 35.74 cm。图 6所示喷射器不同放置位置下，到达喷射器处前导激波的速度值。对于喷射器位置为 3.9、4.0、5.0 cm 情况，前导激波传播速度急剧增加，分别达到 649.25、799.7、907.5 m/s。喷射器位置引起前导激波速度的变化，进而影响流场的热点强度。因此，喷射器位置为3.9～9.0 cm时，燃烧转爆轰 DDT 过程所需时间较短，形成了稳定传播的爆轰波。

表 3　喷射器位置对爆轰波的影响

Table 3　Influence of injector positions on detonation

喷射器位置/cm	爆轰波波面位置/cm	是否形成稳定爆轰波
3.8	—	否
3.9	35.72	是
4.0	35.74	是
5.0	34.63	是
7.0	32.65	是
9.0	29.84	是
11.0	26.02	否

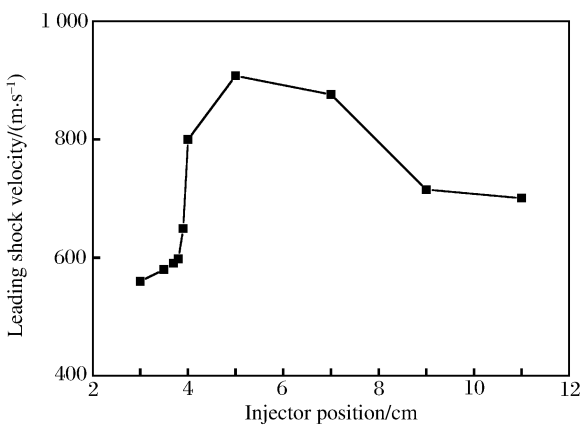


图 6　前导激波速度与喷射器位置关系

Fig. 6　Relation between leading shock velocity and injector position

2.4.2　基于波后反应区热量释放率分析喷射器表面阻断率的影响

在距离原点 7.0 cm 位置处，放置表面阻断率分别为 0.400、0.444、0.462 和 0.471 的喷射器，研究爆震室内燃烧转爆轰的过程。

表 4 给出表面阻断率为 0.400、0.444、0.462 和 0.471 喷射器流场的计算结果。得到：表面阻断率从 0.444 到 0.471(增大 6.08%)，对应 228 μs 时间内，爆轰波传播距离增大 0.62%。

表 4 喷射器表面阻断率对爆轰波形成和发展的影响

Table 4 Influence of the blocking rate of injector on detonation

表面阻断率	时间/μs	爆轰波波面位置/cm	是否形成稳定爆轰波
0.400	228	—	否
0.444	228	32.45	是
0.462	228	32.52	是
0.471	228	32.65	是

图 7 所示为 74 μs 时喷射器不同表面阻断率下流场的温度分布情况。可以看到：火焰经过喷射器后，火焰出现折曲、拉伸等变形现象。即燃料与氧化剂发生强烈的化学反应，燃烧速率急剧增大。热点附近无量纲化的流场的密度、压力和温度分布见图 8 所示。

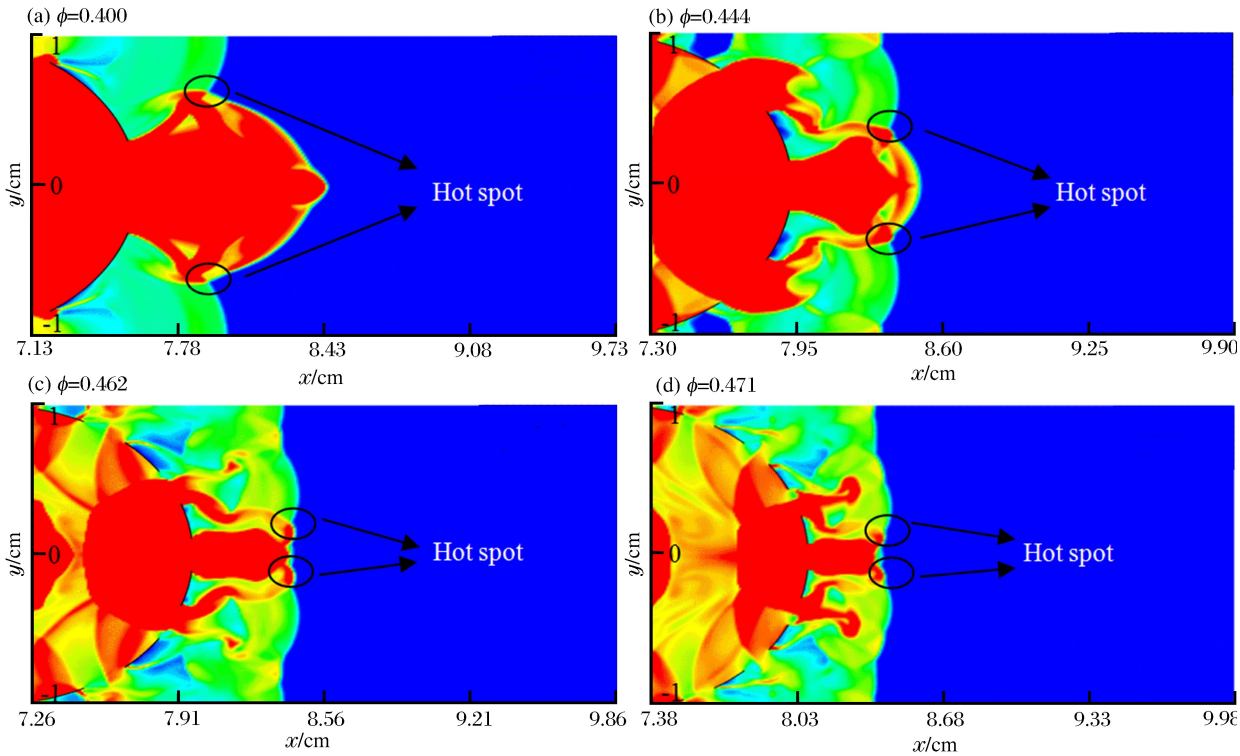


图 7 通过喷射器流场的火焰分布

Fig. 7 Distribution of the flame through the injector

结合表 4，图 7、8 可以看出：较其他情况，对于阻断率为 0.400 的喷射器，前导激波经过后流场压力和温度峰值较低，因此在文中讨论的时间段内未形成稳定的爆轰过程。此外，随着喷射器表面阻断率越大，经过该装置后燃料混合更加充分，因此热点附近燃烧加剧、导致流场压力峰值急剧增大。如，对于表面阻断率为 0.471 的喷射器，74 μs 时刻，压力峰值达到 20.26 MPa。

图 9 所示为化学反应热释放率与时间之间的关系。得到：对于喷射器表面阻断率分别为 0.444、0.462和 0.471，燃烧热释放率随时间的历程具有相似的变化规律，且热释放率峰值均远大于喷射器阻断率 0.400 时的情况。如，对于表面阻断率为 0.471 的喷射器，85.5 μs 时刻，燃料单位时间内反应释放的热量达到最大，为爆轰波的稳定传播提供能量。

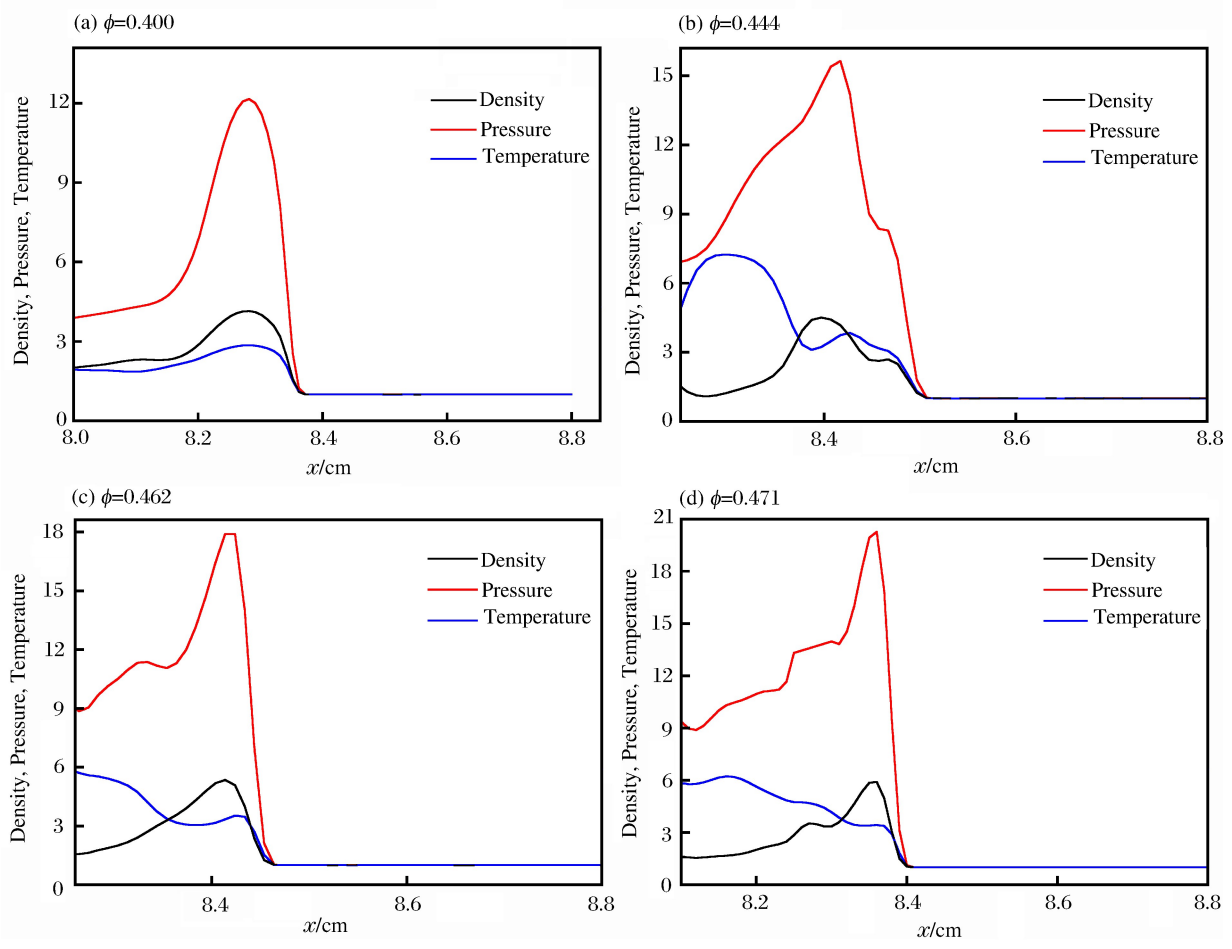


图 8 喷射器不同表面阻断率下热点位置附近流场的参数

Fig. 8 Flow parameters near the hot spots formed at different blocking rates

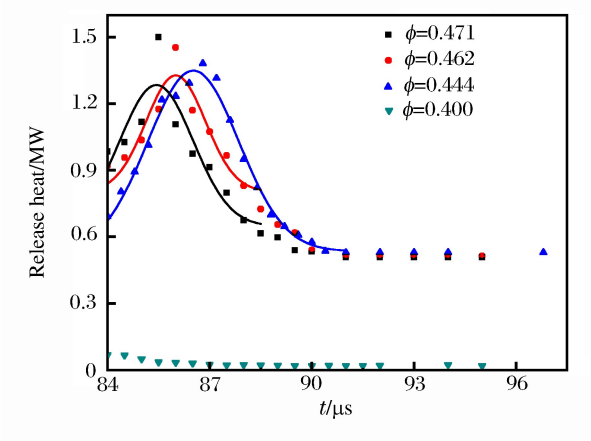


图 9 反应阵面的热释放率时程曲线

Fig. 9 Histories of release heat rate at the reaction front

3 结　论

针对爆震室涉及的复杂流动、火焰和激波之间的相互作用，本文中基于二维反应欧拉方程，对具有喷射器的二维爆震室流场开展燃烧转爆轰过程及爆轰性质的数值研究，得到如下结论：

(1)喷射器放置于爆震室中，上游燃料在喷射器附近滞留时间增加，加速与周围流体介质的质量和热量交换，因此喷射器附近流场出现多个热点，为燃料燃烧提供活性反应中心，加快燃烧转爆轰的过程。

(2)基于前导激波速度数值分析喷射器位置对 DDT 的作用机制发现，喷射器位置为 3.9 、4.0 、5.0 cm时，前导激波传播速度急剧增大，分别为 649.25、799.7、907.5 m/s，均形成稳定传播的爆轰波。因此在一定范围内，前导激波速度增大，流场的热点较容易触发流场发生燃烧转爆轰现象。

(3)基于波后反应区热量释放率数值分析喷射器表面阻断率对 DDT 的作用机制发现，随着喷射器表面阻断率的增大，燃料混合充分，反应速率增大，燃烧热释放率也越大。对于表面阻断率为 0.471 的喷射器，85.5 μs 时刻，燃料单位时间内反应释放的热量达到最大，为爆轰波的稳定传播提供能量。

参考文献：

[1] 张群，范玮，徐华胜. 中国脉冲爆震发动机技术研究现状及分析[J]. 航空发动机，2013，39(3)：18-22. DOI：10.3969/j. issn. 1672-3147. 2013. 03. 004.
ZHANG Qun，FAN Wei，XU Huasheng. A review on research status of pulse detonation engine in China[J]. Aeroengine，2013，39(3)：18-22. DOI：10. 3969/j. issn. 1672-3147. 2013. 03. 004.

[2] ZHANG B，NG H D，MÉVEL R，et al. Critical energy for direct initiation of spherical detonations in H2/N2O/Ar mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2011，36(9)：5707-5716. DOI：10. 1016/j. ijhydene. 2011. 01. 175.

[3] 张博，白春华. C_2H_2-O_2-Ar 和 C_2H_2-N_2O-Ar 直接起爆形成爆轰的临界能量[J]. 爆炸与冲击，2012，32(6)：592-598. DOI：1001-1455(2012)06-0592-07.
ZHANG Bo，BAI Chunhua. Critical energy for direct initiation of spherical detonations in C_2H_2-O_2-Ar and C_2H_2-N_2O-Ar mixtures[J]. Explosion and Shock Waves，2012，32(6)：592-598. DOI：1001-1455(2012)06-0592-07.

[4] VALIEV D，BYCHKOV V，AKKERMAN V，et al. Flame acceleration in channels with obstacles in the deflagration-to-detonation transition[J]. Combustion and Flame，2010，157(5)：1012-1021. DOI：10. 1016/j. combustflame. 2009. 12. 021.

[5] 张彭岗，朱跃进，潘振华，等. 初始压力和狭缝宽度对毫米量级狭缝内爆轰起爆距离的影响[J]. 爆炸与冲击，2016，36(4)：441-448. DOI：10. 11883/1001-1455(2016)04-0441-08.
ZHANG Penggang，ZHU Yuejin，PAN Zhenhua，et al. Effects of initial pressure and gap width on detonation initiation distance in a narrow gap with millimeter-scale width[J]. Explosion and Shock Waves，2016，36(4)：441-448. DOI：10. 11883/1001-1455(2016)04-0441-08.

[6] LIBERMAN M A，IVANOV M F，KIVERIN A D，et al. Deflagration-to-detonation transition in highly reactive combustible mixtures[J]. Acta Astronaut，2010，67(7/8)：688-701. DOI：10. 1016/j. actaastro. 2010. 05. 024.

[7] JOHANSEN C，CICCARELLI G. Modeling the initial flame acceleration in an obstructed channel using large eddy simulation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2013，26(4)：571-585. DOI：10. 1016/j. jlp. 2012. 12. 005.

[8] GAMEZO V N，OGAWA T，ORAN E S. Flame acceleration and DDT in channels with obstacles：effect of obstacle spacing[J]. Combustion and Flame，2008，155(1/2)：302-315. DOI：10. 1016/j. combustflame. 2008. 06. 004.

[9] 张宝亮，丁珏，王庆涛，等. 约束空间可燃气体燃烧爆轰特性的数值研究[J]. 中国安全生产科学技术，2012，8(8)：23-27.
ZHANG Baoliang，DING Jue，WANG Qingtao，et al. Numerical study on the combustion and detonation characteristics of combustible gas in constraint space[J]. Journal of Safety Science and Technology，2012，8(8)：23-27.

[10] 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. DOI：10. 13675/j. cnki. tjjs. 2009. 02. 018.
WANG Zhiwu，YAN Chuanjun，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. DOI：10. 13675/j. cnki. tjjs. 2009. 02. 018.

[11] KHOKHLOV A M，ORAN E S. Numerical simulation of detonation initiation in a flame brush：the role of hot spots[J]. Combustion and Flame，1999，119(4)：400-416. DOI：10. 1016/S0010-2180(99)00058-9.

[12] DEWITT B，CICCARELLI G，ZHANG F，et al. Shock reflection detonation initiation studies for pulse detonation engines[J]. Journal of Propulsion and Power，2005，21(6)：1117-1125. DOI：10. 2514/1. 14398.

[13] 马丹花，翁春生. 爆震管内扰流片对爆震波影响的数值分析[J]. 推进技术，2011，32(3)：425-430. DOI：10. 13675/j. cnki. tjjs. 2011. 03. 023.
MA Danhua，WENG Chunsheng. Numerical investigation of two-phase detonation with the obstacles[J]. Journal of Propulsion Technology，2011，32(3)：425-430. DOI：10. 13675/j. cnki. tjjs. 2011. 03. 023.

[14] 朱雨建，杨基明，LEE J H S. 两种不同气体中的高速爆燃波及其向爆轰的转变[J]. 实验力学，2008，23(2)：110-117.
ZHU Yujian，YANG Jiming，LEE J H S. High-speed deflagration and its transition to detonation in two different

gaseous mixtures[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008,23(2):110-117.

[15] 刘云峰，余荣国，王健平. 脉冲爆震发动机快起爆的二维数值模拟[J]. 推进技术，2004，25(5)：454-457. DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.2004.05.016.
LIU Yunfeng, YU Rongguo, WANG Jianping. Two-dimensional numerical simulation for ignition of pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004,25(5):454-457. DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.2004.05.016.

[16] FICKETT W, DAVIS W C. Detonation theory and experiment[M]. 2ed. New York: Dover Publications, 2000: 1-12.

[17] BHATTACHARJEE B, SCHWER D A, BARTON P I, et al. Optimally-reduced kinetic models: reaction elimination in large-scale kinetic mechanisms[J]. Combustion and Flame, 2003, 135(3): 191-208. DOI: 10.1016/S0010-2180(03)00159-7.

[18] NETTLETON M A. Gaseous detonations: their nature, effects and control[M]. New York: Chap Man and Hall, 1987:30-31.

[19] YAO S, WANG J. Multiple ignitions and the stability of rotating detonation waves[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,108:927-936. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.07.166.

[20] GÖTTGENS J, MAUSS F, PETERS N. Analytic approximations of burning velocities and flame thicknesses of lean hydrogen, methane, ethylene, ethane, acetylene, and propane flames[J]. Symposium on Combustion, 1992, 24(1):129-135. DOI:10.1016/S0082-0784(06)80020-2.

[21] LEE J H S. The detonation phenomenon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008:1-16.

Influence of an enhanced injector on DDT process

RAO Feixiong, LEI Zhidi, DING Jue, WENG Peifen

(*Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai* 200072, *China*)

Abstract: In the flow where the shock wave, the flame and the jet exist simultaneously, the successful process of deflagration to detonation transition (DDT) is the key to the pulse detonation engine (PDE). One kind of injector was designed, and the feasibility of enhancing deflagration to detonation transition in detonation chamber was validated by numerical simulation based on $C_2H_2/O_2/Ar$ reaction. The mechanism analysis of the hot spot initiating detonation was made. The device can excite instability in the flow field, generate eddies, and accelerate the exchange of energy and mass. The flow field generates hot spots, which accelerate the flame speed and catch up with the leading shock wave. The position of the ejector affects the velocity of the leading shock wave. Within a certain range, the higher the velocity of the leading shock wave is, the easier the hot spot generated by the collision will trigger the combustion-to-detonation transition process.

Keywords: pulse detonation engine; deflagration to detonation transition; injector; hot spot; flame speed

(责任编辑　王易难)