

弯曲方管内爆燃向爆震转变特性

王 玮, 邱 华, 范 玮, 熊 蛇

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为缩短爆震管轴向尺寸,采用曲管爆震管替代直管爆震管.基于弯曲方管实验器,进行了二维数值仿真计算,研究了点火位置、点火能量及弯曲段曲率半径对爆震波形成及传播的影响规律.数值模拟结果表明:爆燃向爆震转变(DDT)时间随弯曲段曲率半径增大而减小,DDT 距离在弯曲段曲率半径最大时达到最小值;点火能量越大,爆震管内激波强度越大,DDT 时间越小;在距离爆震管进口 300 mm 处点火时,爆震管内爆震波压力峰值最大,DDT 时间最短.

关 键 词: 爆震; 爆燃; 爆燃向爆震转变; 弯曲方管; 脉冲爆震发动机

中图分类号: V233.1

文献标志码: A

Deflagration to detonation transition characteristic in U-bend square tube

WANG Wei, QIU Hua, FAN Wei, XIONG Cha

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To shorten the axial length of detonation tube, a practicable way was used by replacing straight detonation tube with a curve one. A series of two-dimensional numerical simulations were performed in U-bend square tubes, and the effect laws of ignition position, ignition energy, inner radius of bend-section on formation and diffusion of detonation wave were studied. The simulation results show that the deflagration to detonation transition (DDT) time reduces with the increase of inner radius of bend-section; when the inner radius of bend-section is the maximum, the DDT distance is the shortest; the increasing ignition energy means the increasing shock wave strength in detonation tube and the decreasing DDT time; when the ignition position is set at 300 mm after the inlet of the detonation tube, the peak pressure of detonation wave is the highest, and the DDT time is the shortest.

Key words: detonation; deflagration; deflagration to detonation transition;
U-bend square tube; pulse detonation engine

爆震波的发现最早可以追溯到 19 世纪末^[1-2],相比于缓燃波,爆震波的传播速度可以达到几千米每秒,同时产生极高的燃气压力和燃气温度,根据传统 Chapman 和 Jouguet(CJ)理论,沿 Hugoniot 曲线 CJ 爆震点是熵增的最小点^[3-4],这意味着以爆震波燃烧为基础的推进系统在热循环

效率上将非常具有优势,故早在 1940 年,德国 Hoffmann 等人就开始对以间歇爆震波燃烧驱动的脉冲爆震发动机(PDE)进行了实验研究^[5],随着国内外各个研究机构的加入,PDE 在燃料的喷射与混合、稳定点火、可靠起爆及爆震过程的精确控制等关键技术方面取得了很大突破.

收稿日期:2013-05-16

基金项目:国家自然科学基金(50906072,5117158);中央高校基本科研业务专项基金(3102014JCY01003)

作者简介:王玮(1985—),男,陕西宝鸡人,博士生,研究领域为燃烧与流动以及爆震机理.

为获得高性能 PDE, 当前仍有很多关键技术需要突破^[2], 其中最核心的是在最短距离获得充分发展的爆震波。目前, PDE 常用的起爆方式为间接起爆, 间接起爆主要是指采用较低点火能量利用爆燃向爆震转变的起爆方式, 这种方式的点火系统简单, 但是由于存在 DDT 过程, 故导致爆震管轴向长度较长。

在 DDT 距离限制的条件下, 为缩短爆震管轴向尺寸, 可以采用曲管爆震管(简称曲管)替代现有国内外普遍研究的直管爆震管(简称直管)。目前对曲管中 DDT 特性的研究仍处于起步阶段, 相比于直管中的 DDT 特性, 曲管中激波的碰撞、反射对 DDT 起到主导作用^[6-8]。相比于直管, 从目前实验结果来看, 曲管对爆震波快速形成是有利的, 但当前实验数据还很欠缺, 即曲管中 DDT 特性与曲率半径等因素之间的关系需要进一步的数值研究和实验研究。

日本驻波大学 Uchida, Nakayama 等人^[9-10]对曲管中爆震波的传播进行了相关的实验和计算, 其主要目的还是研究爆震波在曲管内稳定传播的条件。2012 年, Kudo 等人^[11]采用乙烯和氧气混合物对曲管中爆震波的传播条件进行了相关的实验和计算, 研究结果表明, 当曲管内壁曲率半径为 14~40 倍的爆震胞格尺寸时, 爆震波可以顺利通过弯曲段。以上研究虽未直接涉及曲管中 DDT 特性, 但有关结论仍可用于指导曲管的设计, 即弯曲段曲率半径、管径及工作参数的选择至少应使形成后的爆震波不熄灭。

目前关于 PDE 研究主要是在圆管中进行, 但在多个爆震管并联工作时圆管空间利用率低, 使整个系统体积庞大, 而矩形管在多管并联时空间利用率高、结构紧凑, 更具有实用意义。另外在研究过程中, 矩形管更适合采用光学测量的方法研究传播机理。由于矩形管的结构特点, 国内外多使用其进行爆震波机理的研究。

根据上述的国内外研究现状, 本文主要基于弯曲方管实验器, 建立了二维数值模型, 通过数值方法研究了弯曲方管爆震管(以下简称爆震管)内爆震波形成的条件, 以及不同曲率半径、点火能量以及点火位置等参数对 DDT 特性的影响。

1 控制方程和计算模型

在本次数值计算过程中, 采用单步化学反应机理模拟爆震波燃烧, 采用如下控制方程模拟爆震管内的流场^[12]:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} = \mathbf{H}$$

式中 $\mathbf{Q}$ 为守恒变量矢量; $\mathbf{E}, \mathbf{F}$ 分别为 x 和 y 方向的对流通量矢量; $\mathbf{H}$ 为源项矢量。定义如下:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_{ns} \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e_t \end{bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho_1 u \\ \rho_2 u \\ \vdots \\ \rho_{ns} u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u v \\ u(\rho e_t + p) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho_1 v \\ \rho_2 v \\ \vdots \\ \rho_{ns} v \\ \rho v^2 + p \\ \rho u v \\ v(\rho e_t + p) \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_{ns} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中 u, v 分别表示轴向速度和径向速度, e_t 是气体单位质量的总能, ρ_i 表示不同化学组分的密度, 整个气体的密度为 $\rho = \sum \rho_i$, ω_i 为组分的质量生成速率。各个参数的意义和具体定义可参考文献^[12]。所有数值方法均经过实验验证, 可以准确模拟爆震波。

图 1 是本研究中数值模型示意图, 其主要由直段、弯曲段和延长段组成。如图所示, 整个爆震管截面为 60 mm × 60 mm 的矩形; 爆震管直段长度为 1915 mm, 在距离其进口 550 mm 处开始布置 10 mm × 10 mm 方形障碍物, 相邻障碍物之间的间距为 50 mm, 障碍物的作用主要是加速 DDT 过程; 弯曲段为 180° 圆弧, 其内壁面直径根据计算需求调整; 延长段长度为 750 mm。数值计算过程中, 在距离爆震管入口 150, 300 mm 和 450 mm 处设置不同截面, 即 line_150, line_300 和 line_450, 并监测弯曲段入口和出口截面上的压力变化。

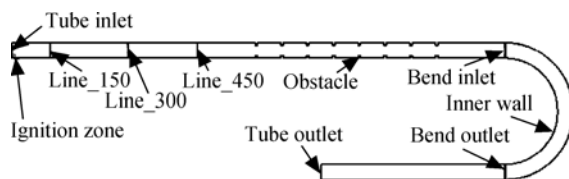


图 1 数值模型示意图

Fig. 1 Schematic of simulation model

在数值模拟过程中,为减少计算量,忽略燃油的喷射和雾化过程,采用燃油和氧化剂预混模型,假设爆震管内预充满温度和压力分别为 300 K 和 0.1 MPa 的汽油和空气的混合物,并假定混合物当量比为 1.0. 为采集到 DDT 过程,采用能量可控的电火花点火模型起爆,并假设点火区域是半径为 4 mm 的圆面. 计算模型初始网格尺度均为 $\Delta x = \Delta y = 0.5$ mm,在计算过程中采用温度自适应方法局部加密网格,以适应计算过程中局部参数梯度变化的需求. 在算例中 $\Delta x_{\min} = \Delta y_{\min} = 0.125$ mm.

2 计算结果和分析

2.1 不同 DDT 加速段的影响

为研究不同 DDT 加速段对爆震管中 DDT 特性的影响,进行了 case 1 和 case 2 数值计算. Case 2 中数值模型如图 2 所示,通过去除图 1 中障碍物,上下壁面交错等距布置障碍物,改变 DDT 加速段的形式以及阻塞比,并保持数值计算边界条件和计算方法不变,模拟爆震波的形成以及传播过程. Case 1 数值模型如图 1 所示. 在数值计算过程中,弯曲段内壁面半径均为 205 mm,且点火能量均为 4.5 J.

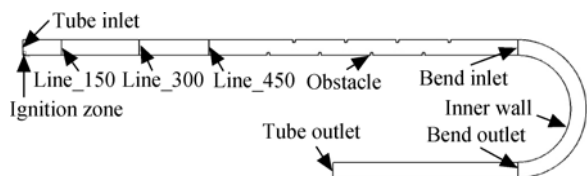
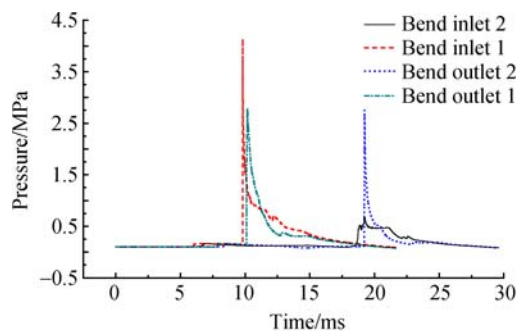


图 2 Case 2 中数值模型示意图

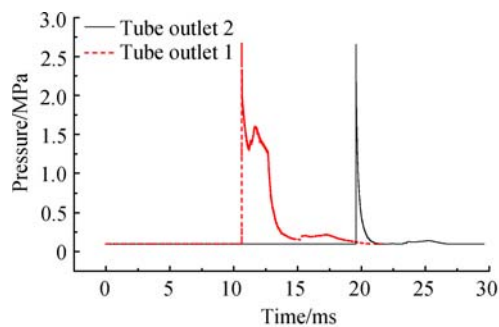
Fig. 2 Schematic of simulation model of case 2

图 3 是不同障碍物数量下爆震管内不同位置压力随时间的变化曲线,图中 bend inlet 2 代表 case 2 中弯曲段入口位置压力曲线, bend inlet 1 代表 case 1 中弯曲段入口位置压力曲线,其余曲线意义类似. 由图 3(a)可知,在 case 2 中弯曲段入口位置压力曲线虽然有明显的阶跃,但是压力峰值较低,约为 0.7 MPa,而在弯曲段出口位置,压力峰值升高至 2.75 MPa 左右;观察 case 1 中弯曲段进口位置的曲线,压力阶跃相对 case 2 中的曲线更加明显,峰值较高,约为 4.0 MPa,即在 case 1 中爆震波在弯曲段进口位置已经形成,且成功向弯曲段出口位置传播. 另外,由图 3(b)可知,在爆震管出口位置,爆震波压力波形相似,峰值相近,即爆震波已经充分发展,且成功传播出

爆震管,唯一不同的就在于在 case 2 中爆震波在弯曲段内形成,而在 case 1 中爆震波在直段内形成. 可见,为缩短爆震管轴向长度,采用弯曲方管代替直管时,有效的 DDT 增强装置也是 PDE 设计过程中需要考虑的因素.



(a) 弯曲段入口和出口



(b) 爆震管出口

图 3 不同位置压力曲线图

Fig. 3 Pressure profiles at different positions

在计算爆震波速度时,可以通过爆震波经过不同位置的时间差计算其传播的平均速度. 由图 3 压力不同位置压力波形可知, case 1 中爆震波在弯曲段之前形成,其在弯曲段内传播的速度为 1789 m/s,在延长段内传播的速度为 1459 m/s; case 2 中爆震波在弯曲段内形成,其在延长段内传播的速度为 2072 m/s;相比较而言,爆震波在采用间歇障碍物的爆震管内的传播速度高于采用全部障碍物的爆震管.

另外,由于采用 case 2 所示的数值模型,爆震波在弯曲段内形成,爆震波锋面为曲线形式,在确定其 DDT 距离时容易造成测量上的误差,为了减小由于数值监测所带来的误差,采用图 1 所示的 DDT 增强装置进行计算,研究爆震管中 DDT 特性.

2.2 弯曲段曲率的影响

在研究不同曲率弯曲段对爆震管内 DDT 特性影响的过程中,如图 1 所示,保持直段结构以及

点火位置和点火能量不变,改变爆震管弯曲段曲率半径,对曲率半径 R 为 60, 120, 180, 205 mm 的爆震管进行了数值计算,模拟爆燃的形成,以及 DDT 过程. 在数值计算过程中设置点火能量为 0.75 J. 其他数值条件均保持一致.

图 4 是弯曲段曲率半径为 205 mm 时不同时刻爆震管内部的压力云图. 图 5 是爆震管内部的温度云图,其与图 4 中部分时刻相对应,其温度锋面代表了燃烧波锋面,亦即爆震波锋面. 图 4 和图 5 中 t 代表时间, $t=0$ ms 代表点火时刻. 由图 4、图 5 可见,在 $t=12.375$ ms,爆震管内压力峰值为 1.53 MPa,即已经在爆震管内形成激波;在 $t=12.655$ ms 激波传播至弯曲段入口位置,其压力峰值上升到 3.30 MPa,并继续向弯曲段出口位置传播;由于激波壁面发射和叠加,当激波传至爆震管弯曲段内时,在弯曲段外壁面位置形成一个高压区域,压力约为 5.14 MPa;在 $t=12.980$ ms 时,爆震管内激波移动到弯曲段出口位置,其压力峰值相对于在爆震管弯曲段内有所降低,约为 4.68 MPa,并持续向爆震管出口位置传播;在 $t=$

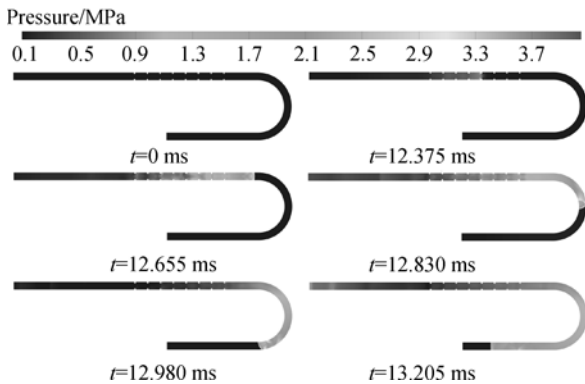


图 4 爆震管内部的压力云图

Fig. 4 Pressure contours of detonation tube

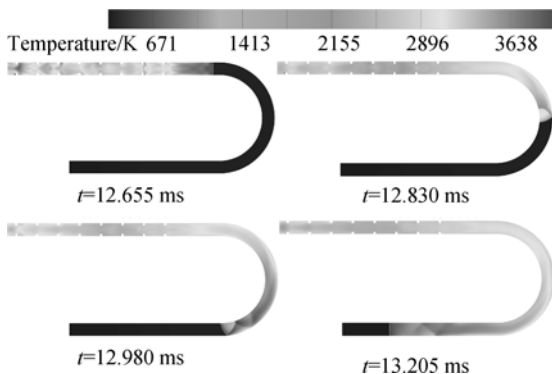


图 5 爆震管内部的温度云图

Fig. 5 Temperature contours of detonation tube

13.205 ms 时,激波已经移动至爆震管延长段出口附近,其压力峰值相对于在爆震管弯曲段内有所降低,约为 2.67 MPa.

图 6 是爆震管直段内不同时刻的压力分布曲线以及汽油和空气混合物化学反应动力学速率分布曲线(x 为爆震管轴线方向,入口处取为零点). 其中压力峰值代表了爆震管内激波所处位置,化学反应动力学速率代表了燃烧波锋面所处的位置. 由图 6 可知,在 $t=12.450$ ms 压力峰值和化学反应动力学速率峰值在轴线位置上存在一定的间隔,即激波仍然在加速向爆震管出口位置推进,还没有完全和燃烧波耦合. 在 $t=12.455$ ms 压力峰值和化学反应动力学速率峰值在轴线上同一位置重合,根据爆震波定义^[13],爆震波是带有化学反应的激波,即燃烧波和激波耦合后的波系,可知在爆震管直段形成爆震波,爆震波形成时间为 12.455 ms,位置为 1420.1 mm.

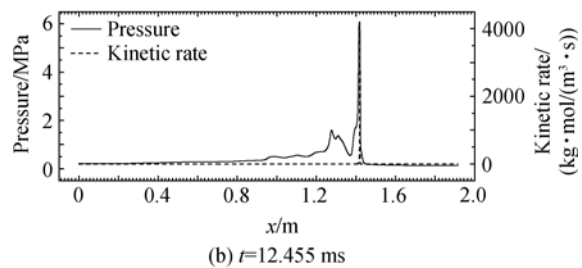
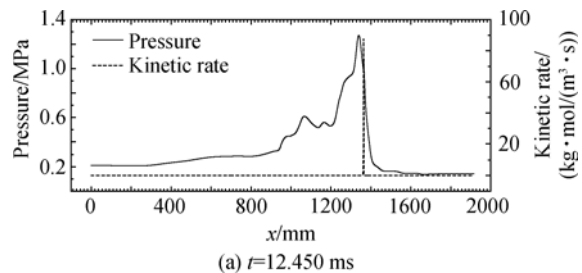


图 6 爆震管直段的压力和化学反应动力学速率曲线

Fig. 6 Pressure and kinetic rate of reaction profiles of straight section of detonation tube

采用类似图 6 的数据处理方法,可以得到不同曲率半径弯曲段的 DDT 时间和 DDT 距离. 图 7 显示了弯曲段内壁面曲率半径与 DDT 特性之间的关系. 由图 7 可见,不同曲率半径的弯曲段所对应的 DDT 时间和 DDT 距离不同,DDT 时间随弯曲段曲率半径的增加而减小,DDT 距离在曲率半径为 205 mm 时最小,在曲率半径为 180 mm 时最大. 这可能是由于不同曲率半径的弯曲段造成爆震管的流阻不同,影响了爆震管内部的流场,从而导致 DDT 过程存在一定的差别. 另外,管内激

波碰撞、反射也可能对其造成一定的影响,其具体影响因素和影响机理还需要进一步的研究。

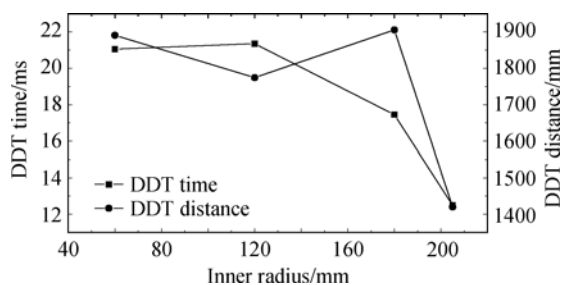


图 7 DDT 特性与弯曲段曲率半径之间的关系

Fig. 7 Relation of DDT characteristic and inner radius of bend-section

2.3 点火位置的影响

为模拟点火位置对爆震管内 DDT 特性的影响,改变点火位置,进行了 case 3, case 4 和 case 5 数值计算,其计算模型如图 1 所示。其中 case 5 的点火位置设置在图 1 所示的 ignition zone 位置; case 3 中的点火位置设置在 line_150 截面,点火区域圆心距爆震管直段上壁面为 4 mm; case 4 中的点火位置设置在 line_300 截面,点火区域圆心距爆震管直段上壁面为 4 mm,点火能量均为 0.75 J。

采用与图 6 相同的方法可以确定爆震波在爆震管内形成的位置和时间。不同点火位置与 DDT 特性之间的关系如图 8 所示。

如图 8 所示,在不同位置点火,爆震管内爆震波形成距离和时间均不同,随着点火位置远离爆震管进口,DDT 时间和 DDT 距离减小。在爆震管进口位置点火时,DDT 时间和 DDT 距离最大,在距离进口位置 300 mm 处点火时,DDT 时间和 DDT 距离最小。需要注意的是,虽然在 300 mm 处点火时 DDT 距离最小,但其爆震波形成位置为

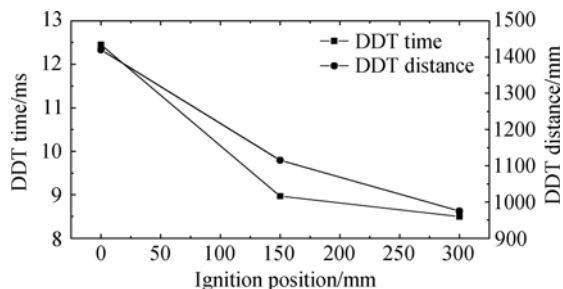


图 8 DDT 特性与点火位置之间的关系

Fig. 8 Relation of DDT characteristic and ignition position

1275.2 mm, 比在 150 mm 处点火时稍大,如果要考虑缩短爆震管轴线长度,可以考虑在 150 mm 位置点火。

2.4 点火能量的影响

采用相同的点火模型,将点火位置均设置在爆震管进口位置,设置不同点火能量,进行了 case 1 和 case 5 数值计算,模拟了不同点火能量对 DDT 特性的影响,其计算模型如图 1 所示。Case 1 中点火能量为 4.5 J, case 5 中点火能量为 0.75 J,其他边界条件和初始条件均保持一致。

图 9 是点火能量与 DDT 特性之间的关系曲线。由图 9 可见,点火能量不同,爆震管内 DDT 特性不同,而且初始点火能量越高,DDT 时间和 DDT 距离越小,此结果与文献[14]的数值结果相似,与文献[15]中所得的实验结果一致。分析 DDT 特性变化的原因,主要是由于点火能量较大时,点火区域温升较快,导致点火区域混合物的化学反应速率相对较大,而且随着点火区域温度升高,点火区域的压力会有所增大,一旦点火开始,就会产生一道更强的前导激波,使混合物更容易被点燃,进一步缩短了 DDT 时间和 DDT 距离。

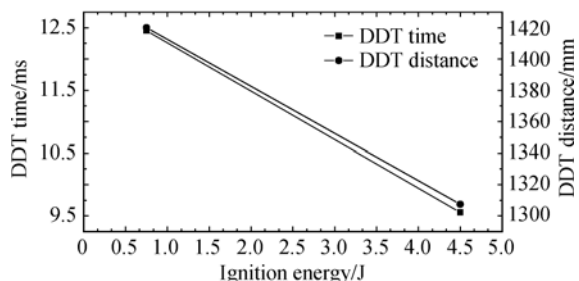


图 9 DDT 特性与点火能量之间的关系

Fig. 9 Relation of DDT characteristic and ignition energy

另外,在数值模拟过程中还发现,当点火能量设置为 0.75 J,采用图 2 所示 DDT 加速装置,在爆震管内并不能形成爆震波,这也是采用图 1 所示爆震管研究 DDT 特性影响因素的原因之一。

3 结 论

对弯曲方管爆震管进行数值建模,并进行了数值计算,得出的结论如下:

1) 曲率半径为 60~205 mm 的爆震管中 DDT 时间随曲率半径增大而减小,DDT 距离在曲率半径最大时达到最小值。

2) 点火能量对爆震的形成有很大影响,点火

能量越大,爆震管内激波强度越大,DDT 时间越小;在距离爆震管进口 300 mm 处点火时,爆震管内爆震波压力峰值最大,DDT 时间最短。

参考文献:

- [1] Bussing T, Pappas G. An introduction to pulse detonation engine[R]. AIAA 94-0263, 1994.
- [2] Roy G D, Frolov S M, Borisov A A, et al. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(6): 545-672.
- [3] Mawid M A, Park T W. Application of pulse detonation combustion to turbofan engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(1): 270-283.
- [4] Petters D P, Felder J L. Engine system performance of pulse detonation concepts using the NPSS program[R]. AIAA-2002-3910, 2002.
- [5] Paxson D E, Perkins H D. Thermal load considerations for detonative combustion based gas turbine engines [R]. AIAA-2004-3396, 2004.
- [6] Frolov S M. Liquid-fueled air-breathing pulse detonation engines demonstrator: operation principles and performance[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(6): 1162-1169.
- [7] Frolov S M. Fast deflagration-to-detonation transition[J]. Russian Journal of Physical Chemistry: B, 2008, 2(3): 442-455.
- [8] Frolov S M, Aksenov V S, Shamshin I O. Shock wave and detonation propagation through U-bend tubes[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2421-2428.
- [9] Uchida M, Suda T, Fujimori T, et al. Pressure loading of detonation waves through 90-degree bend in high pressure $H_2-O_2-N_2$ mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2327-2333.
- [10] Nakayama H, Moriya T, Kasahara J, et al. Stable detonation wave propagation in rectangular-cross-section curved channels[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(2): 859-869.
- [11] Kudo Y, Nagura Y, Kasahara J, et al. Oblique detonation waves stabilized in rectangular-cross-section bent tubes [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2319-2326.
- [12] 王玮, 范玮, 严传俊, 等. 小能量点火脉冲爆震发动机工作过程数值模拟[J]. 航空工程进展, 2011, 2(4): 465-469.
- WANG Wei, FAN Wei, YAN Chuanjun, et al. A better numerical simulation of DDT (deflagration to detonation transition) process of pulse detonation engine (PDE) initiated by small energy[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(4): 465-469. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 张群, 蒋建军, 严传俊, 等. 点火能量对两相爆震形成影响的数值研究[J]. 导弹与制导学报, 2008, 28(5): 131-134.
- ZHANG Qun, JIANG Jianjun, YAN Chuanjun, et al. Numerical investigation on effects of ignition energy oil two-phase detonation wave formation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(5): 131-134. (in Chinese)
- [15] 范玮, 严传俊, 张群, 等. 点火能量等因素对脉冲爆震室压的影响实验[J]. 推进技术, 2002, 23(2): 198-201.
- FAN Wei, YAN Chuanjun, ZHANG Qun, et al. Experimental investigation of the effects of ignition energy on pressures in a pulse detonation combustor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(2): 198-201. (in Chinese)