

球形点火腔对脉冲爆震 DDT 过程影响的数值研究

李志平^{1,2}, 桑济昌^{1,2}, 彭木言^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 为了减小脉冲爆震发动机 PDE(pulse detonation engine) 单次循环时间, 缩短爆燃向爆震转变 DDT(deflagration to detonation transition) 距离是关键。为此, 提出了一种在头部添加球形点火腔的新型爆震管道结构设计方案, 并采用丙烷和空气为可燃混合物, 通过对新型爆震管 DDT 过程的二维数值模拟, 研究其对 DDT 距离以及 DDT 时间的影响。数值模拟结果表明, 头部采用球形点火腔后, 点火腔中的压缩波经过多次反射后, 能够在爆震管中更快地促使爆震波形成, DDT 距离大大缩短; 当球形点火腔直径为 1.5 倍等直爆震管直径时, 相对于常规等直管爆震管结构, 其 DDT 距离和过程时间分别减少了 14% 和 16.26%。

关键词: 球形点火腔; 脉冲爆震发动机; 爆燃向爆震转变 (DDT); 工作频率; 爆震波

中图分类号: V235.22

文献标志码: A

Numerical investigation of the impact of spherical ignition chamber on pulse detonation DDT process

LI Zhiping^{1,2}, SANG Jichang^{1,2}, PENG Muyan^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: The length of deflagration to detonation transition (DDT) is the key influential parameter to the single cycle time of pulse detonation engines (PDE). In order to reduce PDE's single cycle time, a new type detonation tube was designed by adding a spherical ignition chamber at the head of traditional detonation tube, meanwhile propane and air were used as fuel to study the effect of spherical ignition chamber on DDT process by 2-D numerical simulation. The numerical simulation results show that, the compression wave were frequently reflected in the ignition chamber, and then the detonation wave was formed quickly in the straight detonation tube, the length of DDT was significantly shortened. Compared with the conventional straight detonation tube, the length and time of DDT process reduced about 14% and 16.26% respectively, when the spherical ignition chamber's diameter was 1.5 times of the straight pipe's diameter.

收稿日期: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51676006)

作者简介: 李志平 (1976—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为非定常流动机理及控制、Micro-Engine、失速/喘振适航审定。

引用格式: 李志平, 桑济昌, 彭木言. 球形点火腔对脉冲爆震 DDT 过程影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1313-1320.
LI Zhiping, SANG Jichang, PENG Muyan. Numerical investigation of the impact of spherical ignition chamber about pulse detonation DDT process[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1313-1320.

Key words: spherical ignition chamber; pulse detonation engines;
deflagration to detonation transition (DDT); operation frequency;
detonation wave

脉冲爆震发动机 (pulse detonation engine, 简称 PDE) 是一种利用间歇性爆震波的方式产生高温高压燃气来产生推力的新型发动机, 它通过充分利用爆震波增压可实现高增压比, 摆脱了传统发动机对由转子和静子叶盘组成的传统高压供给系统的需要. 因此, PDE 具有结构简单、质量轻、制造成本低、热循环效率高、推质比大、比冲大等优势.

但是, 目前将 PDE 推广到实际应用中仍存在诸多难题需要解决. 其中, 如何提高工作频率就是制约 PDE 得以实际应用的关键问题之一. 为此, 国内外科研人员围绕如何提高 PDE 工作频率开展了大量研究工作, 归纳起来主要包括进气阀改进、PDE 管道优化、点火能量控制等几个方面^[1-5]. 众多研究工作表明: 爆燃向爆震转变 DDT (deflagration to detonation transition) 过程的距离和时间是限制 PDE 工作频率的关键因素之一^[6], 如果能缩短 DDT 距离和时间, 进而缩短 PDE 长度, 缩短爆震循环的填充燃料和排出废气的过程, 将会明显提高 PDE 工作频率.

对于 PDE 点火能量控制而言, 主流的点火方式主要有两种: 直接起爆和间接起爆^[7]. 其中, 直接起爆需要巨大的点火能量, 在实际工程应用中难以实现; 因此, 目前大多数 PDE 均采用小能量点火, 即由爆燃向爆震转变的间接起爆方式. 而在 PDE 管道优化方面, 为了缩短间接起爆下的 DDT 距离, 最为常用而又行之有效的方法是在爆震室内增加障碍物, 例如在爆震室内增加孔板、Shchelkin 螺旋结构等^[8-11]. 但是, 这种方式只适用于 DDT 过程的中后段, 不能在 PDE 点火时就开始促进 DDT 过程. 1986 年, Helman 等^[1]为了提高 PDE 工作频率, 提出了一个新的概念, 首先在使用乙烯与氧气的小型前置起爆器中起爆, 然后爆震波传进主爆震室引爆乙烯空气混合物. 这种方法虽然有效, 但是增加了 PDE 结构和燃料供应系统的复杂性.

综上, 对于提高 PDE 工作频率, 虽然已经发展了诸多手段, 但离实际的工程应用仍存在很大距离. 结合前人在前置起爆以及爆震波强化结构方面的研究经验, 本文提出了一种在头部添加球形点火腔的新型爆震管道结构设计方案, 采用二

维数值模拟方法, 对比分析不同几何尺寸对爆震波形成、传播以及对 DDT 过程的影响规律; 通过对结构的优化, 探索缩短 DDT 距离和时间的最优方案, 从而有效提升 PDE 工作频率.

1 影响 PDE 工作频率的关键参数

PDE 工作频率由单次循环的时间决定, 而单次循环时间则由填充时间 t_{fill} 、爆震波形成及传播时间 $t_{\text{detonation}}$ 和排气时间 t_{purge} 组成. 因此, 不难得到如式(1)所示的 PDE 工作频率表达式^[12]

$$f = \frac{1}{t_{\text{fill}} + t_{\text{detonation}} + t_{\text{purge}}} \quad (1)$$

式中填充时间 t_{fill} 和排气时间 t_{purge} 与管道长度以及填充速度和排气速度相关, 分别定义如下:

$$t_{\text{fill}} = \frac{L}{V_{\text{fill}}} \quad (2)$$

$$t_{\text{purge}} = \frac{L}{V_{\text{purge}}} \quad (3)$$

式中 L 为爆震管道的长度; V_{fill} 为燃料填充速度, 对于特定的 PDE 系统是固定值; V_{purge} 为排气速度, 对于特定的 PDE 系统也是固定值.

由于在 PDE 循环中, 填充和排气过程相邻, 为简化分析, 假定 $V_{\text{fill}} = V_{\text{purge}} = V$, 则知

$$t_{\text{fill}} = t_{\text{purge}} = \frac{L}{V} \quad (4)$$

而对于爆震波形成及传播时间 $t_{\text{detonation}}$ 来说, 主要由点火至形成爆震波时间 t_{ddt} 和爆震波形成传播至管道出口的时间 t_{p} 两部分组成. 设 L_{ddt} 为爆燃到爆震的距离, 则有

$$t_{\text{detonation}} = t_{\text{ddt}} + t_{\text{p}} \quad (5)$$
$$t_{\text{p}} = \frac{L - L_{\text{ddt}}}{V_0}$$

式中 V_0 为爆震波传播速度.

将式(4)和式(5)代入式(1)中, 得到

$$f = \frac{1}{2 \frac{L}{V} + \left(t_{\text{ddt}} + \frac{L - L_{\text{ddt}}}{V_0} \right)} \quad (6)$$

对于式(1)中的 3 个时间变量, 通常 t_{fill} , t_{purge} 的大小在毫米量级, 而 $t_{\text{detonation}}$ 则处于微米量级. 由此可知, 对于 PDE 的工作频率来说, 填充和扫气时间是主要影响因素. 两者的大小主要由爆震管道长度 L 决定. 在 PDE 工作频率计算式(6)中, 虽然表面上看爆震波形成及传播时间 $t_{\text{detonation}}$

不是主要影响因素,但由于 DDT 长度 L_{ddt} 直接决定了爆震管道长度 L . 因此, PDE 频率直接与 DDT 距离相关, DDT 距离越长, PDE 频率越低; 反之, DDT 距离越短, PDE 频率则越高.

为此, 本文探讨一种新型的爆震管道结构, 通过对不同几何结构的对比分析, 寻求缩短 DDT 距离、提高 PDE 频率的优化方案.

2 物理模型

2.1 模型设计方案

通常, 传统的 PDE 采用直管结构, 管道左端封闭, 右端为开口. 自左向右分别由低速区、点火源、加速段(爆震强化装置)和爆震段组成. 低速区是指点火源至左端封闭端的区域, 低速区的轴向长度可根据点火能量的不同进行调整, 调整范围确定为 0.25 倍管径和 1.5 倍管径之间; 点火源位置至爆震管道出口的距离通常取为管道直径的 20~40 倍, 本文取为管道直径的 25 倍; 在距离点火源 2 倍管道直径处开始布置爆震强化装置, 爆震强化装置区域长度是管道直径的 10 倍, 如图 1 所示.

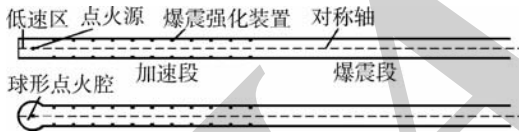


图 1 脉冲爆震发动机数值模拟计算模型

Fig. 1 Numerical simulation model of PDE

从前文所介绍的 Helman 等的工作可知, 采用前置起爆器起爆虽然结构复杂, 但却能够有效地提升 PDE 工作频率. 为此, 本文借鉴前置起爆器对爆燃过程的强化思想, 提出了一种在等直爆震管前端增加球形点火腔的新型爆震管设计方案. 其结构特点主要是在封闭端增加了一个球形点火腔, 其余结构与常规等直爆震管相同, 如图 1 所示. 将点火位置设置在球形点火腔球心处, 点火源至爆震管道出口的距离与等直爆震管道相同, 为管道直径的 25 倍, 爆震强化装置的尺寸和位置与等直爆震管保持一致.

两种类型爆震管直管道直径均为 $D = 0.04\text{ m}$, 固定点火源至爆震管道出口长度 $L' = 25D$, 爆震管道总长度为 L . DDT 加速区域的爆震强化装置使用 Shchelkin 螺旋结构, 本文采用尺寸为 $0.1D \times 0.1D$ 方形截面螺旋线, 总长度为 $10D$, 螺距为 0.04 m , 堵塞比为 0.36 .

为了探索球形点火腔几何尺寸对 DDT 距离以及 PDE 单循环时间的影响, 在 0.5 倍管径至 1.5 倍管径范围内调整球形点火腔的大小, 通过二维数值模拟方法研究其对爆震波形成及传播的影响.

2.2 模型参数定义

针对直管模型(见图 2(a)), 为描述点火源的位置, 引入无量纲参数 X' , 表示低速区轴向长度 X_0 与爆震管道管径之比, 见式(7)所示

$$X' = \frac{X_0}{D} \quad (7)$$

同理, 引入无量纲参数 D' 描述球形点火腔尺寸的相对大小, 表示球形点火腔直径 D_0 与爆震管道管径 D 之比(见图 2(b)), 见式(8)所示

$$D' = \frac{D_0}{D} \quad (8)$$

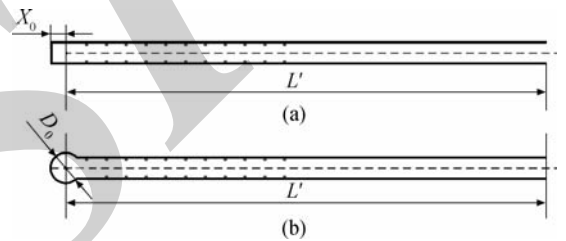


图 2 不同结构爆震管几何结构示意图

Fig. 2 Geometric structure of the different detonation tubes

3 计算方法及校验

3.1 计算方法

数值模拟采用 Fluent 商业软件, 计算域包括整个爆震管道内部区域, 由于研究对象为 DDT 距离和时间, 所以可以忽略出口外场的影响, 如图 3 所示.

计算网格采用 H 形结构化网格, 平均尺寸为 $5 \times 10^{-4}\text{ m}$. 由于两种模型均为轴对称结构, 实际二维计算中, 只选取如图 4 所示的计算区域.

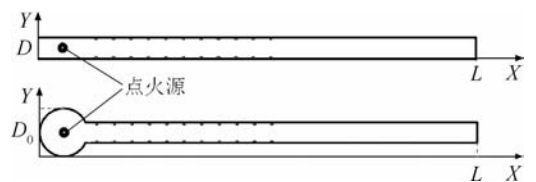


图 3 等直爆震管和球形点火腔爆震管的计算域

Fig. 3 Calculation domain of the straight detonation tube and spherical ignition chamber detonation tube

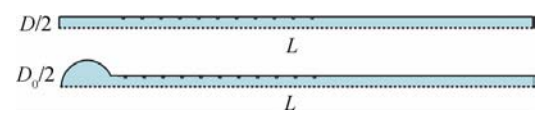


图 4 等直爆震管和球形点火腔爆震管的网格

Fig. 4 Mesh of the straight detonation tube and spherical ignition chamber

定解方程采用二维轴对称 N-S (Navier-Stokes) 方程, 湍流模型则选用 $k-\epsilon$ 双方程模型, 近壁面选择标准壁面函数处理. 假设混合气体是理想气体, 并忽略扩散、黏性和热传导等输运过程. 燃烧模型采用丙烷-空气单步反应模型. 方程的离散格式均采用 2 阶迎风格式, 时间推进采用 2 阶隐式格式. 算法则选用对瞬态问题有着明显优势的 PISO (pressure implicit with splitting of operator) 算法, 时间步长选为 $1 \times 10^{-7} \text{ s}$ ^[13].

爆震室采用当量比为 1.0 的丙烷-空气 ($\text{C}_3\text{H}_8/\text{Air}$) 的混合物填充. 由于本文所采用的初始网格密度较大, 在数值起爆的过程中不得不考虑能量耗散的问题, 模拟过程采用了小能量点火 (3 J) 起爆的方法, 点火区域是半径为 4 mm 的圆形^[14]. 初始温度和压力分别为 300 K, 101 325 Pa, 壁面按绝热、无滑移处理.

3.2 计算方法校验

为了验证计算方法的可靠性和准确性, 分别进行和网格无关性验证和计算结果校验. 在网格无关性验证中, 分别对平均尺寸为 10^{-3} , 5×10^{-4} , $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 和 10^{-4} m 的网格进行了对比, 计算结果表明 5×10^{-4} , $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 和 10^{-4} m 三种网格基本相同. 为了节约计算资源, 本文采用的平均尺寸均为 $5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 的网格进行计算.

根据上述计算方法, 对 $X'=0.5$ 的等直管爆震管进行数值模拟, 得到形成稳定爆震波后的压力和温度分布结果如图 5 所示. 结果表明, 在该时刻 ($t=8 \times 10^{-4} \text{ s}$), 管道内火焰面上的峰值压力为 $p_{\text{C-J}}=19 \times 10^5 \text{ Pa}$, 对应位置的温度为 $T_{\text{C-J}}=2900 \text{ K}$. 通过比较管内压力峰值位置和时间差, 计算得出爆震传播速度为 $V_{\text{C-J}}=1927.21 \text{ m/s}$.

同时, 采用 NASA 的 CEA (chemical equilibrium and applications) 程序对该模型进行计算, 获得爆震波 C-J (Chapman-Jouguet) 点的爆震特征参数如下: $p_{\text{C-J}}=18.1 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_{\text{C-J}}=2821.4 \text{ K}$, $V_{\text{C-J}}=1796.6 \text{ m/s}$ ^[14]. 对比两种计算方法得到

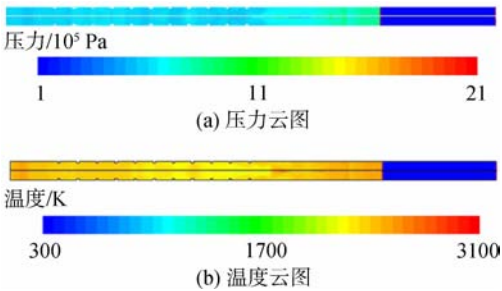


图 5 等直爆震管形成稳定爆震波后压力与温度分布

Fig. 5 Pressure and temperature distribution of the steady detonation wave in straight detonation tube

接结果可知, 本文采用的计算方法与 CEA 方法计算结果基本一致, 误差均控制在 5% 以内.

4 计算结果与分析

为了考察球形点火腔几何尺寸对 DDT 的影响, 首先对常规爆震管点火位置进行了计算, 将获得最优性能的方案作为对比分析的基准. 然后再改变球形点火腔几何尺寸, 与获得的常规爆震管最优方案进行对比, 分析球形点火腔对 DDT 的影响规律、机理, 并由此总结出最优的设计方案. 具体各 9 种计算方案见表 1 所示.

表 1 数值模拟计算方案
Table 1 Numerical simulation schemes

模型参数	计算方案								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X'	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{7}{8}$	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{11}{8}$	$\frac{3}{8}$
D'	1	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{7}{8}$	2	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{11}{8}$	3

4.1 点火位置对等直爆震管 DDT 过程的影响

有研究表明, 点火源与封闭端的位置对 DDT 过程有一定影响^[7], 本研究中由于球形点火腔的点火源位置与左侧壁面有一定距离, 所以需要对应一系列对应球腔尺寸的低速区尺寸进行研究, 并选取最佳的等直爆震管低速区尺寸作为比较基准. 根据表 1 所设计的计算方案, 分别进行计算, 得到不同点火位置下 t_{ddt} , L_{ddt} , V_0 和 f , 具体数据见表 2 所示.

从表 2 可以看出, 当 $X'=0.5$ 时, DDT 距离最短, 工作频率最高. 其中 DDT 距离为 $10D$, 工作频率约为 46.9 Hz. 下文将以此作为对比分析基准, 分析球形点火腔对 DDT 过程的影响.

表 2 点火位置对 t_{ddt} , L_{ddt} , V_0 和 f 的影响

Table 2 Effect of ignition position on t_{ddt} , L_{ddt} , V_0 and f

X'	t_{ddt}/ms	L_{ddt}/mm	$V_0/(\text{m/s})$	f/Hz
0.5	0.615	10D	1927.2	46.9
0.625	0.620	11D	1922.3	46.7
0.75	0.570	10D	1923.5	46.5
0.875	0.580	10D	1936.3	46.3
1	0.625	10D	1891.2	45.9
1.125	0.655	10D	1907.2	45.7
1.25	0.670	10D	1907.2	45.4
1.375	0.710	11D	1904.9	45.2
1.5	0.715	10.9D	1922.5	45.0

注:燃料填充速度 V_{fill} 和废气排放速度 V_{purge} 可以近似取值 100m/s, 由此则可以计算出爆震管工作频率 $f^{[15-19]}$.

4.2 球形点火腔尺寸对 DDT 过程的影响

为了探索球形点火腔几何尺寸对 DDT 过程的影响,在计算中保持点火位置不变,均位于球腔中心,仅改变球形点火腔直径 D_0 ,分别进行计算,模拟爆震波在管道中的传播过程.得到不同球腔直径下 DDT 时间 t_{ddt} 和 DDT 距离 L_{ddt} ,其变化规律分别如图 6(a)、图 6(b)所示.

从图 6 可知,当 $D'=1.5$ 时,DDT 时间最短,为 0.515 ms,DDT 距离约为 8.6D,与最优的等直爆震管结构 ($X'=0.5$) 相比,DDT 距离缩短了 14%,DDT 时间缩短了 16.26%. 当 $D'=2.0$ 时,DDT 距离最短,约为 8D. 与最优的等直爆震管结构 ($X'=0.5$) 相比,DDT 距离缩短了 20%.

4.3 球形点火腔尺寸对爆震管工作频率及出口压力的影响

由上述计算结果可知,大部分的球形点火腔几何爆震波强化装置的设计方案均能有效地缩短

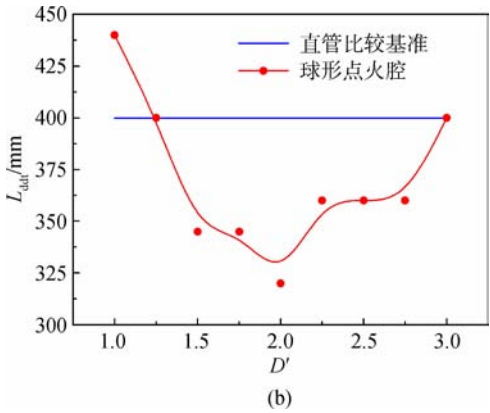


图 6 球形点火腔尺寸对 DDT 时间和距离的影响

Fig.6 Effect of spherical ignition chamber size on DDT time and length

DDT 距离,加速爆震波的传播. DDT 距离的缩短,相应得也可以缩短整个爆震管道的长度 L . 根据上文所介绍的 PDE 工作频率计算方法,分别计算出不同直径球形点火腔方案下的 PDE 工作频率,得到其变化规律如图 7 所示.

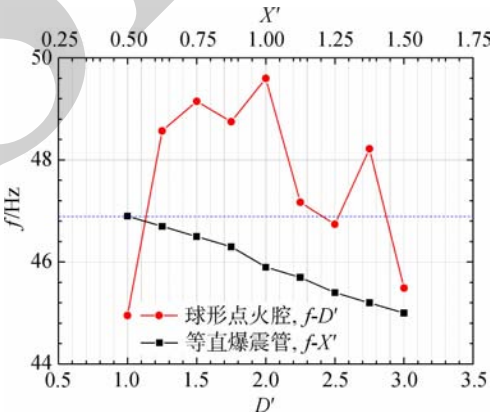
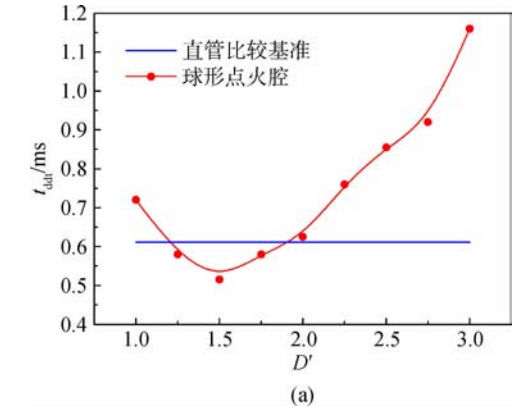


图 7 球形点火腔对 PDE 工作频率的影响

Fig.7 Effect of spherical ignition chamber on PDE operation frequency

由图 7 可知,当 $D'=2.0$ 时,由于带球形点火腔的新型爆震管具有最短的 DDT 距离,其 PDE 工作频率到达峰值, $f=49.60\text{ Hz}$, 相对于等直爆震管提升了 5.82%.

此外,衡量 PDE 性能除了要考虑工作频率之外,还必须关注其出口压力,出口压力直接决定着 PDE 的瞬时推力的大小. 根据计算所得到的结果,在两种不同结构的爆震管最优方案下(等直爆震管 $X'=0.5$,带球形点火腔爆震管 $D'=2.0$, $L'=0.96\text{ m}$)的出口压力进行对比,结果如图 8 所示,其中纵坐标为管道模型 $D'=2.0$, $L=0.96\text{ m}$ 出口压力与等直爆震管 $X'=0.5$ 出口压力之比.



由图 8 可知,带球形点火腔的新型爆震管在大幅提高 PDE 工作频率的同时,出口压力也基本保持不变,仅减小约 1%。

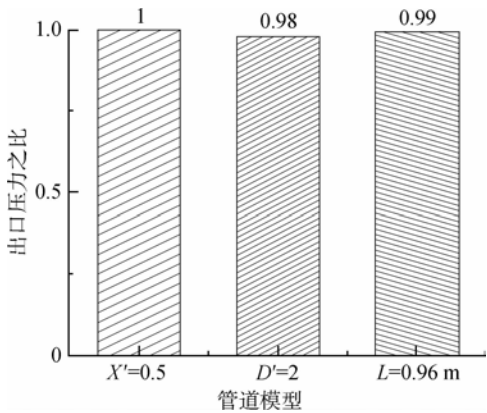


图 8 不同爆震管道模型出口压力对比

Fig. 8 Export pressure comparison of different detonation pipe models

4.4 带球形点火腔爆震管爆震波传播过程分析

从上述数据可以看出,恰当尺寸的球形点火腔能够明显缩短 DDT 过程的距离和时间. 为了分析其内在物理机理,现以 $D'=1.5$ 的 DDT 过程为例,根据爆震管道中的压力和温度变化,详细分析爆震波产生及传播机制。

球形点火腔中心点火后,燃烧产生的压缩波迅速向腔体壁面传播,接触到壁面后会发生反射. 如图 9(a)所示,在 $t=5\times10^{-5}\text{ s}$ 时,从腔体壁面反射的压缩波汇聚到球形附近,这是点火后压缩波的第 1 次汇聚. 汇聚后的压缩波改变了火焰核心附近未燃气体的密度,使点火中心反应速率迅速升高,汇聚后的压缩波又开始向壁面移动. 同时,有部分较弱的压缩波传出了点火腔。

如图 9(b)所示,当 $t=1\times10^{-4}\text{ s}$ 时,在球形点火腔中心发生第 2 次汇聚,由于部分已经传出球腔,所以第 2 次汇聚中心的强度相较于第 1 次有所下降. 第 1 次反射的压缩波部分传出点火腔,由于汇聚后压力提升,速度也更快,逐渐赶上点火形成的压缩波. 球形点火腔内的压缩波如此在腔体中反复震荡,每次震荡都会有部分压缩波传到爆震管道中参与管道中波系构成,每次汇聚都会加强火焰核心的反应速率并推动着核心更快速向爆震管道移动,直到球腔中的可燃混合物完全反应。

如图 9(c)所示,当 $t=1.5\times10^{-4}\text{ s}$ 时,压缩波刚刚经过第 1 个 Shchelkin 螺旋结构的障碍物,

一部分压缩波碰到障碍物后强度增加并向球形点火腔反射,反射回点火腔后参与震荡,更加促进了球腔中的火焰核心的移动,另外有一部分较弱的压缩波翻过障碍物继续向出口传播. 障碍物的存在使管道中的波系变得更加复杂,流体的密度分布不均匀,火焰峰面经过时湍流度更高,因此加速了火焰的传播。

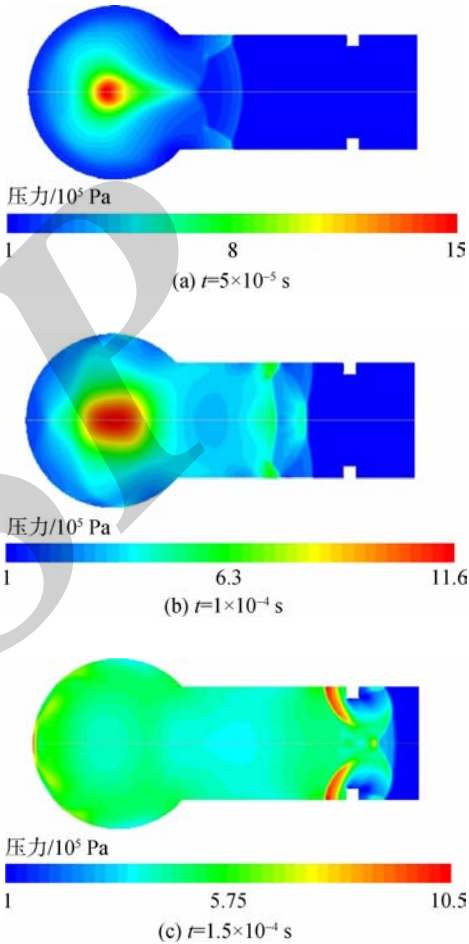


图 9 $D'=1.5$ 时点火过程压力云图

Fig. 9 Ignition process pressure nephogram in $D'=1.5$ model

如图 10(a)所示,当 $t=5.15\times10^{-4}\text{ s}$ 时,压缩波经历了 7 次障碍物的促进作用,在火焰峰面形成了压力和温度最高的区域,已经形成过驱爆震,产生了爆震波. 之后爆震波继续加速,在 $t=5.4\times10^{-4}\text{ s}$ 时,如图 10(b)所示,爆震波锋面变得非常平齐,形成了稳定的爆震波. 之后,稳定的爆震波不断传播,直至出口,如图 10(c)所示。

根据以上分析,球形点火腔能够使压缩波的波系结构更加复杂,增加了可燃混合物的湍流度,提高了燃烧的反应速率,从而引起火焰面的快速移动,进而缩短了 DDT 距离和时间。

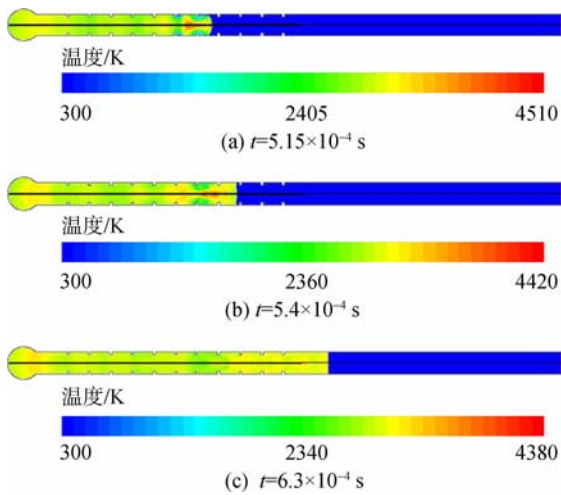


图 10 $D' = 1.5$ 时部分温度云图

Fig. 10 Temperature nephogram in $D' = 1.5$ model

5 结 论

本文采用丙烷-空气的可爆混合物,对不同低速区轴向长度的直管和不同直径球形点火腔结构的爆震管道进行了单循环二维对称轴数值模拟分析,通过对比直管和球形点火腔结构的计算数据,主要得出以下几点结论:

1) 恰当直径的球形点火腔内点火后,压缩波传播到点火腔壁面经过反射会在球心附近产生一个高压区,随着压缩波不断的在点火腔内震荡,形成的每一个高压区都推动着火焰核心向爆震管道内的传播,从而促进了 DDT 过程,起到缩短 DDT 距离和时间的作用。

2) 直径为 1.5 倍管径的球形点火腔结构能使 DDT 时间最短,为 0.515 ms。直径为 2 倍管径的球形点火腔结构能使 DDT 距离最短,最短距离为 320 mm;同时工作频率最高,相对于等直管爆震管道,工作频率提高了 5.82%,而出口压力仅降低了 1%。对 PDE 性能的提升较为显著。

参考文献:

[1] HELMAN D, SHREEVE R, EIDELMAN S. Detonation pulse engine[R]. AIAA-86-1683, 1986.

[2] BROPHY C, WERNER S, SINIBALDI J. Performance characterization of a valveless pulse detonation engine[R]. AIAA 2003-1344, 2003.

[3] 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 Xiqiao, YAN Chuanjun, WANG Zhiwu, et al. Effect of operation frequency on pulse detonation engine performance[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(1): 22-26. (in Chinese)

[4] 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 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. (in Chinese)

[5] 张义宁,王家骅,张靖周. 频率 30~50 Hz 两相脉冲爆震发动机研究[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 993-997.

ZHANG Yining, WANG Jiahua, ZHANG Jingzhou. Investigation on two phase pulse detonation engine at the frequency 30~50 Hz[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 993-997. (in Chinese)

[6] 张宇. 脉冲爆震发动机 DDT 过程数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

ZHANG Yu. Numerical simulation research of pulse detonation engine DDT process[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

[7] 胡晓煜. 基于爆震燃烧的新概念发动机[J]. 国际航空, 2003, 479(1): 50-52.

HU Xiaoyu. Development of pulsed detonation engine technology[J]. International Aviation, 2003, 479(1): 50-52. (in Chinese)

[8] TANGGIRALA V E, DEAN A J, Tsuboi N, et al. Performance on a pulse detonation engine under subsonic and supersonic flight conditions[R]. AIAA 2007-1245, 2007.

[9] 刘建文,钟诚文,赵书苗. 多管脉冲爆震发动机流场数值研究[J]. 推进技术, 2007, 28(6): 674-678.

LIU Jianwen, ZHONG Chengwen, ZHAO Shumiao. Numerical investigation of multi-tube pulse detonation engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(6): 674-678. (in Chinese)

[10] WINTENBERGER E, AUSTIN J M, COOPER M, et al. Analytical model for the impulse of single-cycle pulse detonation tube[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(1): 22-38.

[11] 张群,严传俊,范玮,等. 多循环脉冲爆震发动机概念化设计[J]. 推进技术, 2003, 24(6): 500-504.

ZHANG Qun, YAN Chuanjun, FAN Wei, et al. Conceptual design of multi-cycle pulse detonation engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(6): 500-504. (in Chinese)

[12] 李建中,王家骅,范育新,等. 脉冲爆震发动机最大净推力和最佳工作频率[J]. 推进技术, 2014, 25(6): 543-548.

LI Jianzhong, WANG Jiahua, FAN Yuxin, et al. Maximal net thrust and optimal frequency of pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 25(6): 543-548. (in Chinese)

[13] 郑龙席,卢杰,彭畅新,等. 吸气式无阀脉冲爆震发动机 DDT 过程数值模拟[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(5): 713-718.

ZHENG Longxi, LU Jie, PENG Changxin, et al. Numerical investigation of DDT (deflagration to detonation transition) process in a valveless air-breathing pulse detonation

engine[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(5): 713-718. (in Chinese)

[14] 王玮, 范玮, 严传俊, 等. 小能量点火脉冲爆震发动机 DDT 过程数值模拟[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(4): 603-607.

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]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(4): 603-607. (in Chinese)

[15] 秦亚欣, 高歌. 火焰加速和爆燃向爆震转变过程的数值模拟及试验验证[J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1488-1494.

QIN Yaxin, GAO Ge. Numerical simulation and experimental study on flame acceleration and deflagration to detonation transition[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1488-1494. (in Chinese)

[16] 黄希桥, 严传俊, 张群, 等. 两相脉冲爆震发动机模型试验研究[J]. 推进技术, 2001, 22(2): 108-110.

HUANG Xiqiao, YAN Chuanjun, ZHANG Qun, et al. Experimental study on two-phase pulse detonation engine model[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(2): 108-110. (in Chinese)

[17] 黄希桥, 严传俊, 范玮, 等. 提高脉冲爆震发动机工作频率的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(5): 438-442.

HUANG Xiqiao, YAN Chuanjun, FAN Wei, et al. Experimental study on increasing the operation frequency of pulse detonation engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(5): 438-442. (in Chinese)

[18] 于军力, 秦亚欣, 高歌. 环截面管中的爆燃转爆震实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1733-1737.

YU Junli, QIN Yaxin, GAO Ge. Experimental investigations of deflagration to detonation transition in toroidal section tube[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1733-1737. (in Chinese)

[19] 秦亚欣, 于军力, 高歌. 环形爆震室中火焰加速数值模拟及验证[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1744-1749.

QIN Yaxin, YU Junli, GAO Ge. Numerical simulation and experimental study on flame acceleration in annular detonation duct[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1744-1749. (in Chinese)

(编辑: 李岩梅)