

文章编号:1000-6893(2009)04-0614-08

# 障碍物对脉冲爆震发动机性能影响的数值模拟

邓君香, 严传俊, 郑龙席, 黄希桥, 蒋联友

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

## Numerical Simulation of Effect of Obstacles on Pulse Detonation Engine Performances

Deng Junxiang, Yan Chuanjun, Zheng Longxi, Huang Xiqiao, Jiang Lianyou

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**摘要:** 运用计算流体力学方法计算了理想脉冲爆震发动机(PDE)单次爆震的性能参数,并和 Wintenberger 半分析模型进行了对比,研究了圆环形障碍物阻塞比和节距内径比对空气流动损失和脉冲爆震发动机单次爆震性能的影响,并与连续的多脉冲爆震实验的相关结果做了比较。研究结果表明,数值模拟计算得到的冲量和 Wintenberger 半分析模型得到的冲量非常接近,佐证了数值模拟方法和结果的正确性;障碍物阻塞比增大、节距内径比减小或进口速度增大,空气流过障碍物时的总压恢复系数减小,流动损失增大;障碍物阻塞比增大,单次爆震的体积比冲减小,单位燃油消耗率增大,性能降低;当阻塞比为 41% 时,体积比冲为理想爆震管体积比冲的 92%,损失了 8%;障碍物节距内径比增大,单次爆震的体积比冲先减小后增大,而单位燃油消耗率先增大后减小,不同节距内径比的体积比冲为理想爆震管体积比冲的 94% 左右,不同节距内径比对性能影响规律与多次脉冲爆震实验结果趋势符合。

**关键词:** 脉冲爆震发动机; 障碍物; 单次爆震; 数值模拟; 模型

**中图分类号:** V231.2      **文献标识码:** A

**Abstract:** The performance parameters of the single-cycle detonation wave of an ideal pulse detonation engine (PDE) are calculated by solving unsteady two-dimensional (2D) reacting N-S equations, and these parameters are compared with the results obtained from the Wintenberger semi-analytic model. The effects of ring obstacles on the loss of air flowing through the PDE and the performances of single-cycle detonation wave of the PDE are studied. The data of numerical simulation are compared with those of multi-pulse detonation experiments conducted on a 60 mm inner diameter detonation tube. The results show that the calculated impulse is almost the same as the impulse used by the Wintenberger semi-analytic model, which means the numerical simulation method is valid. The blockage ratio increases, or the obstacle pitch and inner diameter ratio decreases, while the total pressure recovery coefficient decreases. The blockage ratio increases, the impulse per unit volume of single-cycle detonation wave decreases and the specific fuel consumption increases. When the blockage ratio is about 41%, the impulse per unit volume is 92% of that of the ideal PDE. The obstacle pitch and inner diameter ratio increases, the impulse per unit volume of single-cycle detonation wave first decreases and then increases, while the specific fuel consumption first increases and then decreases. This effect of different obstacle pitch and inner diameter ratios on PDE performance agrees with that of the multi-pulse detonation experiments.

**Key words:** pulse detonation engine; obstacle; single-cycle detonation wave; numerical simulation; models

脉冲爆震发动机(Pulse Detonation Engine, PDE)是一种具有许多潜在优点的新概念发动机。如何以较小的点火能量起爆碳氢燃料与空气混合物,在较短的距离内形成爆震波是 PDE 迈向工程应用的关键技术问题<sup>[1]</sup>。碳氢燃料与空气混合物直接起爆需要巨大点火能量,很不实用。K. I. Shchelkin<sup>[2]</sup>提出的由爆燃向爆震转变(Deflagration to Detonation Transition, DDT)的间接起爆

方法是一种只需要较小的点火能量又能在较短的距离内形成爆震的有效方法。这种方法通过在爆震管内加装各种各样的扰流装置(例如螺旋、形状各异的突出障碍物、孔板等)增大湍流强度和火焰面积,促进火焰加速,实现由爆燃向爆震的转变。M. Cooper 等<sup>[3]</sup>对螺旋障碍物对脉冲爆震性能的影响进行了实验研究,认为螺旋障碍物能够增强爆震,缩短 DDT 距离,但由于障碍物阻力引起总压损失,使 PDE 的冲量降低了 13%。文献[4]进行了螺旋节距对爆震影响的实验研究。文献[5]研究了障碍物对爆震起爆

收稿日期:2008-01-16; 修订日期:2008-05-15

基金项目:国家自然科学基金(50336030)

通讯作者:严传俊 E-mail: ycj@nwpu.edu.cn

过程和传播过程的影响,初步分析了这种障碍物的作用机制以及点火区温度和压力对形成爆震的影响。

然而,有关 Shchelkin 螺旋和其他形式的障碍物对 PDE 性能影响的数值模拟发表的文献不多。李牧等<sup>[5]</sup>对障碍物由 DDT 来强化爆震起爆和传播过程的流场进行了数值模拟。本文重点研究障碍物对 PDE 性能的影响。研究中用具有二维轴对称构型的圆环形障碍物近似代替 Shchelkin 螺旋,应用计算流体力学(CFD)方法计算了理想 PDE 单次爆震的性能参数,并和 Wintenberger 半分析模型进行了对比<sup>[6]</sup>,研究了障碍物阻塞比和节距内径比对脉冲爆震发动机单次爆震性能及流动损失的影响,相关性能与连续的多次爆震实验结果进行了比较,为今后优化障碍物结构设计提供参考。

### 1 数值方法

#### 1.1 基本方程和湍流模型

采用非稳态二维轴对称 N-S 方程<sup>[7]</sup>,化学反应采用 5 组分单步不可逆有限速率模型。湍流模型采用标准  $k-\varepsilon$  模型,近壁面采用标准壁面函数处理。采用有限体积法求解。控制方程为

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial r} - \frac{\partial \bar{E}_v}{\partial x} - \frac{\partial \bar{F}_v}{\partial r} + \frac{\bar{S}}{r} = \mathbf{0} \quad (1)$$

式中: $\bar{Q}$  为求解变量; $\bar{E}, \bar{F}$  分别为两个坐标方向的无黏通量; $\bar{E}_v, \bar{F}_v$  分别为两个坐标方向的黏性通量; $\bar{S}$  为源项。各变量的表达式为

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e_t \\ \rho Z_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\bar{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (\rho e_t + p)u \\ \rho u Z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ (\rho e_t + p)v \\ \rho v Z_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\bar{E}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xr} \\ (\tau_{xx}u + \tau_{xr}v) - q_x \\ \rho D_i \frac{\partial Z_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\bar{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{rx} \\ \tau_{rr} \\ (\tau_{rr}v + \tau_{rx}u) - q_r \\ \rho D_i \frac{\partial Z_i}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau_{xr} \\ \rho v^2 + 2\mu \left( \frac{v}{r} - \frac{\partial v}{\partial r} \right) \\ (\rho e_t + p)v - (\tau_{rr}v + \tau_{rx}u) + q_r \\ r\dot{\omega}_i + \rho v Z_i - \rho D_i \frac{\partial Z_i}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $i=1,2,\dots,N_s-1$ (本文取  $N_s=5$ )。

#### 1.2 计算域和计算网格

计算域包括爆震管区域和外场区域两部分。爆震管一端封闭,一端开口,内径 60 mm,总长 1 000 mm,螺旋形障碍物约长 850 mm,其中点火区紧靠封闭端,长 2 mm,计算域和螺旋障碍物尺寸如图 1 所示(图中:障碍物节距为 60 mm,圆环形半径为 5 mm)。计算网格采用多块非结构化四边形网格,壁面和障碍物附近网格局部加密,爆震管内网格尺寸小于或等于 1 mm,由于是二维轴对称,所以只计算轴对称的一半区域,其网格单元总数 50 528 个,其中爆震管区域 30 953 个,外场区域 19 575 个。

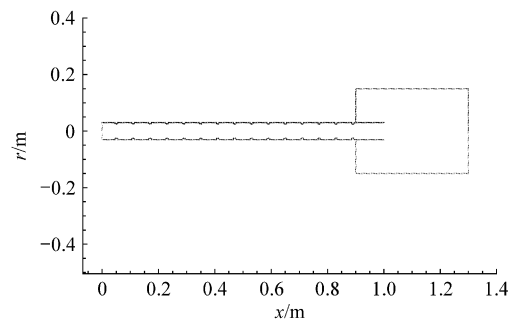


图 1 计算域、障碍物尺寸及分布

Fig. 1 Computational domain and obstacle size

#### 1.3 初边值条件

所有壁面、障碍物表面均按绝热、无滑移处

理。爆震管内填充化学恰当比丙烷-空气混合物,初始压力 101 325 Pa,温度 300 K。外场区域气体为空气,压力 101 325 Pa,温度 300 K。外场区域边界按照无反射边界条件设置,设为压力出口边界。点火区域设为高温高压区域,压力为 2 MPa,温度为 2 000 K,在点火区直接起爆。对于单次爆震,数值模拟进行了简化,计算中没有考虑 DDT 过程,只考虑爆震波传播过程和排气过程,忽略可燃预混物的填充过程,所以没有考虑可燃预混物的填充进气速度对 PDE 性能的影响。数值模拟方法用于估算和性能分析,因此计算结果有一定近似性。

#### 1.4 单次爆震冲量分析模型

E. Wintenberger 等<sup>[6]</sup>建立了一种理想爆震管单次爆震性能分析模型。他们采用爆震管推力壁压力积分法计算爆震管的冲量,模型同时考虑了推力壁压力平台区和松弛区对爆震管冲量的贡献。在 Wintenberger 单次爆震管性能分析模型中,推力壁压力理想曲线如图 2 所示。Wintenberger 半分析模型冲量为

$$I = \frac{4.3\Delta p_3}{U_{CJ}}AL = \frac{4.3\Delta p_3}{U_{CJ}}V \quad (8)$$

式中: $A$ 、 $L$ 和 $V$ 分别为爆震管横截面面积、长度和体积; $\Delta p_3$ 为爆震管推力壁压差; $U_{CJ}$ 为爆震波速。除了只能用于爆震管为均匀直管的理想爆震管的限制外,Wintenberger 单次爆震性能分析模型还要求外界环境压力等于爆震管初始填充压力。

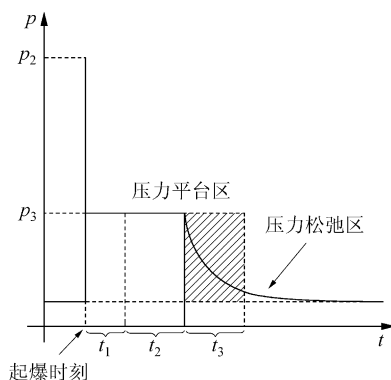


图2 推力壁压力理想曲线

Fig. 2 Ideal pressure trace of thrust wall

在非稳态二维数值模拟中,冲量或推力可以通过以下两种方法之一来计算:①对作用在推力壁上的压力积分;②通过求解作用在整个系统的动量守恒方程。第1种方法适用于直爆震管,而

对于在爆震管内加装螺旋等增爆装置后,就要选用第2种方法来计算冲量或推力。本文对理想直爆震管的数值模拟采用上述两种方法来计算冲量和推力,并进行对比;对加装螺旋障碍物的爆震管采用第2种方法来计算冲量和推力。

考虑包含整个发动机在内的控制体,由动量守恒方程得

$$\int_{CV} \frac{\partial \rho u}{\partial t} dV + \oint_{CS} [\rho u n + (p - p_\infty) n] dS = 0 \quad (9)$$

式中:CV是控制体;CS是控制体表面,它进一步分为3个部分:进口平面 $S_i$ ,出口平面 $S_e$ 以及其余表面 $S_w$ 。定义出口瞬态平均流量、瞬态平均流速和瞬态平均压力分别为

$$\dot{m}_e(t) = \int_{S_e} \rho u dS \quad (10)$$

$$u_e(t) = \frac{1}{\dot{m}_e} \int_{S_e} \rho u u dS \quad (11)$$

$$p_e(t) = \frac{1}{A_e} \int_{S_e} p dS \quad (12)$$

瞬时推力为

$$F(t) = (\dot{m}_e(t) u_e(t) - \dot{m}_a u_\infty i) + [(p_e(t) - p_\infty) A_e i] \quad (13)$$

冲量为

$$I = \int_0^T F(t) dt \quad (14)$$

#### 1.5 脉冲爆震发动机性能参数

除了爆震过程所产生的冲量,表现PDE性能参数的还有体积比冲 $I_V$ ,混合物质量比冲 $I_{sp}$ ,燃料质量比冲 $I_{spf}$ ,单位推力 $F_{sp}$ 和单位燃油消耗率sfc。计算公式分别为

$$I_V = \frac{I}{V} \quad (15)$$

$$I_{sp} = \frac{I}{m_1 g} = \frac{I}{\rho_1 V g} = \frac{I_V}{\rho_1 g} \quad (16)$$

$$I_{spf} = \frac{I}{m_f g} = \frac{I_{sp}}{\omega_f} \quad (17)$$

$$F_{sp} = \frac{F_{avg}}{\dot{m}_a} = \frac{\int_0^T F(t) dt}{m_a} = \frac{I}{m_a} = \frac{I_V}{\rho_a} \quad (18)$$

$$sfc = \frac{3600 f'}{F_{sp}} \quad (19)$$

式中: $m_1$ 、 $\rho_1$ 分别为初始可燃混合物的质量和密度; $g$ 为重力加速度; $\omega_f$ 为燃料的质量分数; $m_a$ ,

$\rho_a$  分别为爆震管内初始空气的质量和密度;  $f'$  为油气比。以上参数都是衡量爆震管和脉冲爆震发动机性能的重要参数。

## 2 数值模拟结果及分析

### 2.1 理想直爆震管性能结果

采用 NASA CEA 软件和 Wintenberger 单次爆震管性能分析模型计算初始压力 1 atm (1 atm=101.325 Pa), 初始温度为 300 K 时化学恰当比的丙烷-空气混合物的理论爆震特性及性能参数。由于汽油的成分比较复杂, 计算量很大, 作为初步近似, 通常选用丙烷代替。表 1 是 Wintenberger 模型计算值和本研究对理想直爆震管进行二维轴对称数值模拟的计算结果对比, 以及采用两种推力计算方法对直爆震管的冲量等性能参数计算的结果对比。图 3 是用推力壁积分法和求解动量守恒方程法计算的理想爆震管瞬态推力曲线。

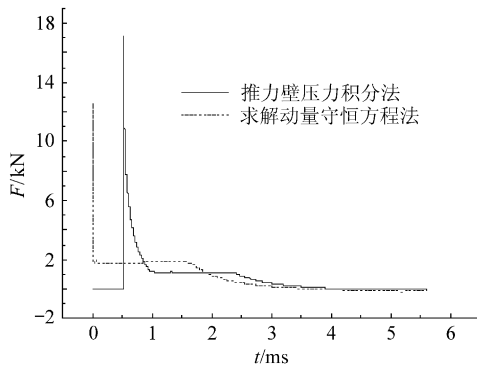


图 3 用推力壁积分法和求解动量守恒方程法计算的理想爆震管瞬态推力曲线

Fig. 3 Transient thrust trace of ideal PDE calculated by integrating ( $p_3 - p_0$ ) and solving momentum equation

由表 1 可见, 在本文中运用二维轴对称数值模拟, 采用推力壁压力积分得到的冲量和求解动量守恒方程得到的冲量, 与 Wintenberger 半分析模型得到的冲量接近, 只相差 1.2% 左右, 而且数值模拟中采用推力壁压力积分法和求解动量守恒方程法两种方法计算的结果则更加接近, 仅相差 0.012 95%, 这说明用推力壁压力积分法来计算冲量和推力的方法与求解动量守恒方程来计算冲量和推力的方法都正确。在后面计算爆震管内加装障碍物等非直管的情况, 采用求解动量守恒方程方法来计算冲量和推力。

### 2.2 障碍物对空气流动损失的影响

用二维轴对称方法计算空气流过装有螺旋形障碍物的爆震管时所产生的流动损失, 用总压恢复系数来表示。图 4 是当螺旋障碍物节距为 60 mm 不变时, 改变的障碍物圆环形半径分别为 3, 4, 5, 6, 7 mm 时, 不同速度情况下, 总压恢复系数随障碍物阻塞比变化的规律。阻塞比定义为障碍物阻

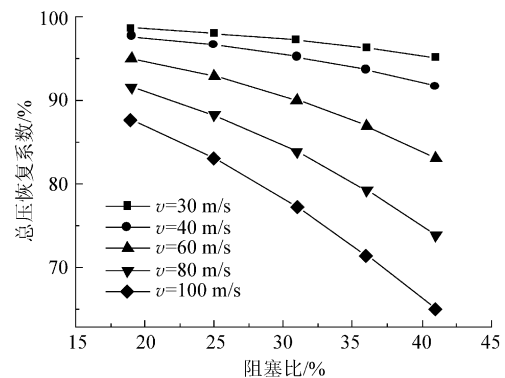


图 4 总压恢复系数随障碍物阻塞比变化的曲线

Fig. 4 Total pressure recovery coefficient vs obstacle blockage ratio

表 1 理想直爆震管的 Wintenberger 模型计算结果和数值模拟结果的对比

Table 1 Comparison of Wintenberger model results and numerical simulation results for ideal PDE

参 数	CEA 和 Wintenberger 模型结果	数值模拟		差值/%		
		推力壁压力积分方法	动量守恒方法	推力壁积分方法与 Wintenberger 模型	动量守恒方法与 Wintenberger 模型	推力壁积分方法与动量守恒方法
$U_{Cl}/(m \cdot s^{-1})$	1 800.8	1 905.0	1 905.0			
爆震波峰值压力 $p_2/MPa$	1.839 2	2.76	2.76			
推力壁压力 $p_3/MPa$	0.691 456	0.741 962	0.741 962			
$I/(N \cdot s)$		3.861 75	3.861 25			0.012 95
$I_V/(kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	1 349.55	1 365.816	1 365.639	1.205 28	1.192 17	0.012 95
$I_{sp}/s$	116.633	116.395 90	116.380 83	-0.203 29	-0.216 21	0.012 95
$I_{spf}/s$	1 932.78	1 932.968	1 932.717	0.009 71	-0.003 24	0.012 95
$F_{sp}/(9.8N \cdot kg^{-1} \cdot s)$	117.696 13	119.114 70	119.099 28	1.205 28	1.192 18	0.012 95
$sfc/(kg \cdot N^{-1} \cdot h^{-1})$	0.199 99	0.197 60	0.197 63	-1.190 90	-1.178 15	-0.012 91

塞面积与理想 PDE 横截面面积之比 ( $A_s/A_0$ ), 对应的阻塞比分别为 19%, 25%, 31%, 36% 和 41%。由计算结果可知, 在障碍物半径为 5 mm, 进口速度为 30 m/s 时, 总压恢复系数为 97.3%, 而当进口速度为 220 m/s 时总压恢复系数竟降低到 46.7%, 总压损失了一半左右。当进口速度一定时, 障碍物阻塞比增大, 阻力增大, 总压恢复系数减小, 流动损失增大, 而且速度越高, 湍流强度越大, 障碍物阻塞比对总压恢复系数的影响越大。

图 5 是当螺旋障碍物半径为 5 mm 不变时, 改变的障碍物节距分别为 40, 50, 60, 70, 80 mm, 对应的障碍物节距与 PDE 内径之比 ( $S/D$ ) 分别为 0.67, 0.83, 1.00, 1.17 和 1.33 时, 不同速度情况下, 总压恢复系数随障碍物节距内径比的变化规律。由图 5 可见, 当进口速度一定时, 节距内径比增大, 阻力减小, 总压恢复系数增大, 而且速度越高, 湍流强度越大, 节距内径比对总压恢复系数的影响越大。

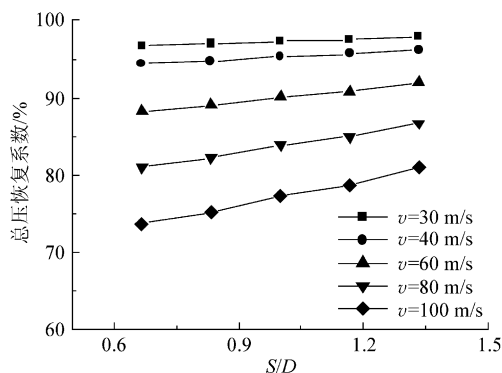


图 5 总压恢复系数随障碍物节距内径比变化的曲线  
Fig. 5 Total pressure recovery coefficient vs obstacle pitch and PDE inner diameter ratio

### 2.3 障碍物阻塞比对单次爆震性能的影响

障碍物节距为 60 mm 不变, 改变的障碍物圆

环形半径分别为 3, 4, 5, 6, 7 mm, 对应的阻塞比分别为 19%, 25%, 31%, 36% 和 41% 时, 用非稳态二维轴对称数值模拟计算单次爆震性能随阻塞比变化的规律, 包括冲量、体积比冲、混合物比冲、燃料比冲、单位推力和单位燃油消耗率。当爆震管内压力降低到 1 atm 以下再回升到 1 atm 时, 终止计算。

表 2 是在不同阻塞比情况下产生的单次爆震性能参数, 图 6 是加装障碍物后产生的单次爆震参数 ( $I_V$  和  $sfc$ ) 与理想爆震管的单次爆震参数之比随障碍物阻塞比变化的曲线。  $A_s/A_0=0$  对应理想爆震管情况,  $I_V$  百分比和  $sfc$  百分比都为 100%。

由图 6 可见, 障碍物圆环形半径增大, 阻塞比增大,  $I_V$  百分比减小,  $sfc$  百分比增大, PDE 性能降低, 当障碍物阻塞比为 36%~41% 时,  $I_V$  只有理想爆震管  $I_V$  的 92%, 损失了 8%。由 2.2 节可知空气流过加装障碍物的爆震管时, 若进气速度较大则产生的损失很大, 所以如果考虑实际连续多次爆震情况中较大的空气进气充填速度、液体燃料的雾化以及与空气等氧化剂混合充填等问题, 可以推测损失会更大。

图 7 是不同阻塞比情况下的推力壁压力  $p_3$  随时间变化的曲线及放大图。图 8 是不同阻塞比情况下的爆震管出口压力曲线及爆震波传出爆震管时刻的压力放大图。图 9 是不同阻塞比情况下瞬态推力随时间变化的曲线。由图 7 和图 8 可知, 阻塞比越大, 阻力越大, 爆震波在爆震管内传播的时间越长, 推力壁压力越高, 振荡越剧烈, 推力壁压力降低到 1 atm 以下再回升到 1 atm 所用的时间越长, 意味着排气时间越长, 排气越不完全。这说明在形成爆震波之后, 阻塞比越大对提高爆震点火频率越不利,  $I_V$  降低越多,  $sfc$  增加越多, PDE 性能越差。

表 2 不同阻塞比的单次爆震性能参数 (节距为 60 mm)

Table 2 Performance parameters of single-cycle detonation wave at different blockage ratios (pitch=60 mm)

障碍物半径/ mm	阻塞比/%	$I/(N \cdot s)$	$I_V/$ ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )	$I_{sp}/s$	$I_{spt}/s$	$F_{sp}/$ ( $9.8N \cdot kg^{-1} \cdot s$ )	$sfc/$ ( $kg \cdot N^{-1} \cdot h^{-1}$ )
0	0	3.861 25	1 365.638 98	116.380 83	1 932.717 43	119.099 28	0.197 63
3	19.000	3.698 64	1 326.078 87	113.009 49	1 876.730 06	115.649 18	0.203 53
4	24.889	3.584 78	1 298.649 47	110.671 93	1 837.910 67	113.257 03	0.207 82
5	30.556	3.489 36	1 280.850 94	109.155 13	1 812.721 34	111.704 79	0.210 71
6	36.000	3.360 14	1 253.262 46	106.804 02	1 773.676 82	109.298 76	0.215 35
7	41.222	3.295 04	1 252.221 01	106.715 26	1 772.202 91	109.207 94	0.215 53

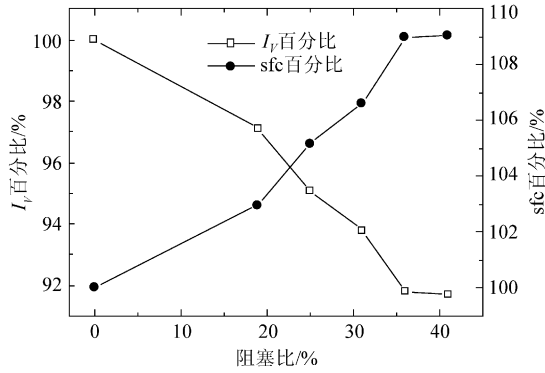


图 6  $I_V$  百分比和 sfc 百分比随障碍物阻塞比变化的曲线  
Fig. 6 Impulse per unit volume and sfc vs obstacle blockage ratio

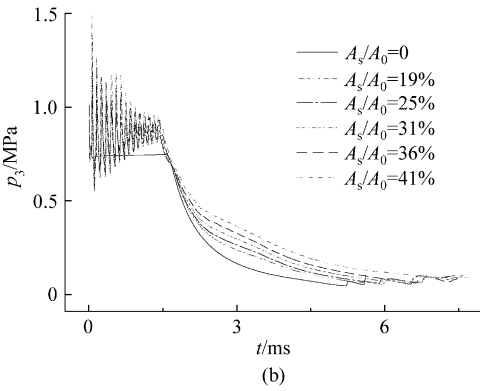
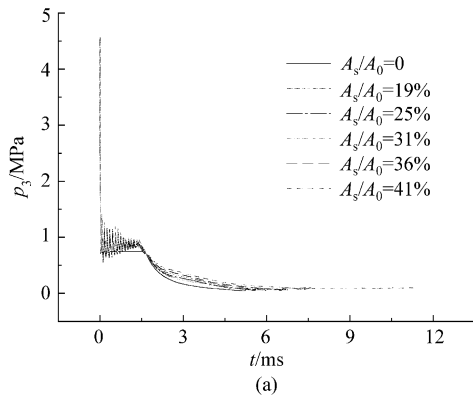


图 7 不同阻塞比情况下推力壁压力随时间变化的曲线及放大图  
Fig. 7 Pressure trace of thrust wall and extended pressure trace at different blockage ratios

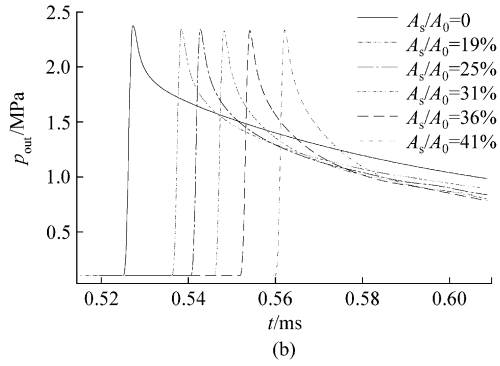
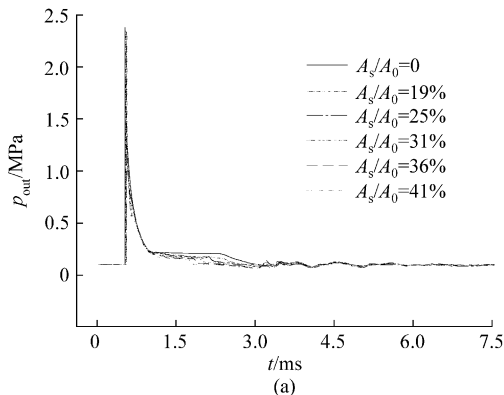


图 8 不同阻塞比情况下的爆震管出口压力曲线及爆震波传出爆震管时刻的压力放大图  
Fig. 8 Pressure trace of PDE outlet and extended pressure trace at different blockage ratios

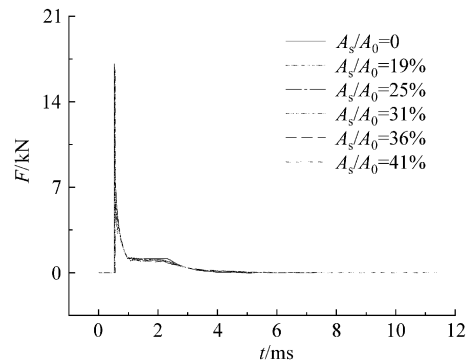


图 9 不同阻塞比情况下的瞬态推力曲线  
Fig. 9 Transient thrust trace at different blockage ratios

## 2.4 障碍物节距对单次爆震性能的影响

障碍物圆环形半径为 5 mm 不变,改变的障碍物节距分别为 40,50,60,70,80 mm,对应的障碍物节距内径比( $S/D$ )分别为 0.67,0.83,1.00,1.17 和 1.33 时,用非稳态二维轴对称数值模拟计算单次爆震性能随  $S/D$  变化的规律。表 3 是不同  $S/D$  情况下产生的单次爆震性能参数。图 10 是加装障碍物后产生的单次爆震性能参数( $I_V$  和 sfc)与理想爆震管的单次爆震性能参数之比随  $S/D$  变化的曲线。 $S/D=0$  对应理想爆震管情况, $I_V$  百分比和 sfc 百分比都为 100%。不同  $S/D$  情况下的推力曲线、推力壁压力曲线、爆震管出口压力曲线与不同阻塞比的曲线类似。表 3 和图 10 说明,随着障碍物节距内径比增大, $I_V$  百分比先减小后增大,在  $S/D=1$  时达到最小,而 sfc 百分比先增大后减小,在  $S/D=1$  时达到最大。在障碍物半径为 5 mm 时,不同节距内径比对应的  $I_V$  百分比在 94% 左右。 $S/D$

由 0.67 增大到 1 时,节距增大,障碍物对爆震波的加速减弱,使得爆震波能量释放速度降低, $I_V$  百分比减小,sfc 百分比增大,PDE 性能变差;而  $S/D$  由 1 增大到 1.33 时,障碍物对爆震波的流动阻力减小,总压恢复系数增大,使得  $I_V$  百分

比增大,sfc 百分比降低,PDE 性能变好。由图 6 和图 10 可见,障碍物阻塞比比  $S/D$  对 PDE 性能的影响大。今后设计障碍物结构尺寸时可调整障碍物节距来改善起爆性能而又不会太大地影响 PDE 性能。

表 3 不同节距内径比的单次爆震性能参数(半径为 5 mm)

Table 3 Performance parameters of single-cycle detonation waves at different pitch and PDE inner diameter ratios (spiral radius=5 mm)

$S/\text{mm}$	$S/D$	$I/(\text{N} \cdot \text{s})$	$I_V/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$I_{sp}/\text{s}$	$I_{spt}/\text{s}$	$F_{sp}/(9.8\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s})$	sfc/ ( $\text{kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )
0	0	3.861 25	1 365.638 98	116.380 83	1 932.717 43	119.099 28	0.197 63
40	0.666 67	3.457 16	1 289.985 07	109.933 55	1 825.648 41	112.501 39	0.209 22
50	0.833 33	3.475 10	1 282.324 72	109.280 72	1 814.807 12	111.833 32	0.210 47
60	1.000 00	3.489 36	1 280.850 94	109.155 13	1 812.721 34	111.704 79	0.210 71
70	1.166 67	3.522 74	1 285.671 53	109.565 94	1 819.543 68	112.125 20	0.209 92
80	1.333 33	3.543 50	1 288.545 45	109.810 86	1 823.610 99	112.375 84	0.209 45

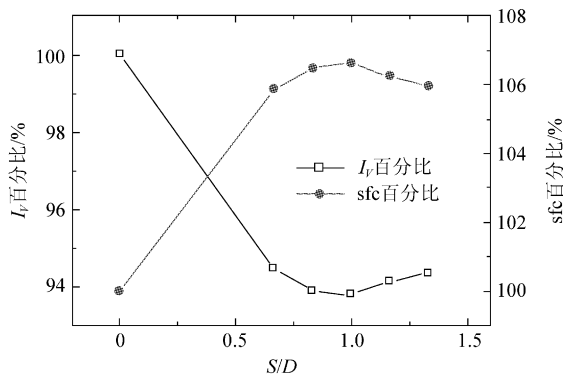


图 10  $I_V$  百分比和 sfc 百分比随障碍物节距内径比变化的曲线

Fig. 10 Percentages of impulse per unit volume and sfc vs obstacle pitch and PDE inner diameter ratio

### 3 与连续脉冲爆震实验相关结果的比较

因为完全验证数值模拟结论正确性的工作量和难度很大,所以采用汽油-空气可爆混合物对连续脉冲爆震性能进行实验研究<sup>[4]</sup>,与前面的丙烷-空气混合物的数值模拟进行近似实验比较。爆震管头部封闭,尾端敞口,爆震室长 1.3 m,内径 60 mm,混合室长 0.25 m,在混合室安装火花塞,沿爆震室轴线方向,在推力壁处位置 1、爆震管出口前位置 2 和位置 3 处安装压电式压力传感器 P3,P4,P5,用以测量爆震室内不同位置的压强变化。改变的螺旋节距  $S$  分别为 30,40,50,60 mm,对应螺旋节距  $S$  与爆震管内径  $D$  的比值  $S/D$  分别为 0.50,0.67,0.83 和 1.00 时,测量爆震管推力壁和尾部处的压力波形,研究混合室内不同节

距的螺旋对爆震形成和性能的影响。

图 11 是爆震频率为 6 Hz 时的压力波形图。由图 11 可见,在推力壁处峰值压力可达 5 atm 左右,爆震管出口前位置 3 的压力可达 20 atm 左右。图 12 是爆震平均峰值压力随  $S/D$  的变化趋

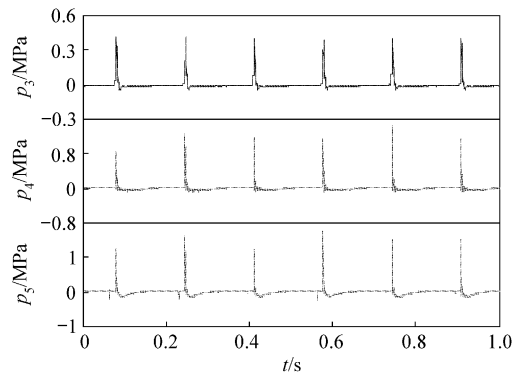


图 11  $S/D=1$  时 3 个位置处的压力波形( $f=6$  Hz)

Fig. 11 Pressure trace at three locations ( $S/D=1$ ,  $f=6$  Hz)

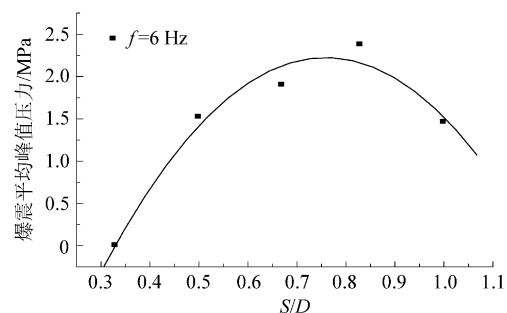


图 12 爆震平均峰值压力随障碍物节距内径比的变化趋势

Fig. 12 Average detonation peak pressure vs obstacle pitch and PDE inner diameter ratio

势。由图 12 可见,当  $S/D$  取比较合适的数值时,如  $S/D=0.67$  或  $0.83$ ,发动机的工作状态比较理想,压力峰值较高,此时流动阻力对发动机的综合影响最小,湍流度效果比较好,发动机工作比较稳定,对应的 DDT 距离也较短。而在具有较大螺旋节距内径比(如  $S/D=1$ )时,发动机工作不连续,爆震室内的压力也不高。该结论与数值模拟结果趋势符合。

#### 4 结 论

(1) 采用推力壁压力积分法得到的冲量和求解动量守恒方程法得到的冲量,与 Wintenberger 半分析模型得到的冲量接近,只相差 1.2% 左右,而且数值模拟中采用推力壁压力积分法和求解动量守恒方程法两种方法计算的结果则更加接近,仅相差 0.012 95%,佐证了本文所用的二维轴对称数值模拟方法的正确性。

(2) 数值模拟计算空气流过障碍物时的总压,障碍物阻塞比增大、 $S/D$  减小或进口速度增大,阻力增大,总压恢复系数减小,流动损失增大。

(3) 障碍物阻塞比增大,单次爆震的  $I_V$  减小,  $sfc$  增大,性能降低,当阻塞比为 41% 时,  $I_V$  为理想爆震管  $I_V$  的 92%,损失了 8%。

(4)  $S/D$  增大,单次爆震的  $I_V$  先减小后增大,  $sfc$  先增大后减小,不同  $S/D$  的  $I_V$  为理想爆震管  $I_V$  的 94% 左右,其变化规律与连续脉冲爆震实验相关结果趋势符合。

(5) 障碍物能增强起爆,缩短 DDT 距离,减少点火能量,同时障碍物阻力又会产生总压损失,使脉冲爆震发动机冲量减少,性能降低,所以在优化设计障碍物时要折中考虑。

#### 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.

Yan Chuanjun, Fan Wei. Principle and key technologies of pulse detonation engine[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)

[2] Shchelkin K I. Combustion and detonation in gases[M]. Moscow: Voenizdat, 1944. (in Russian)

[3] Cooper M, Jackson S, Austin J. Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations[R]. AIAA-2001-3812, 2001.

[4] 杜魁善.脉冲爆震发动机原理样机设计与性能分析[D].西安:西北工业大学,2004.

Du Kuishan. Design and performance analyses of pulse detonation engine prototype[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)

[5] 李牧,严传俊,王治武.障碍物强化爆震起爆和传播的数值模拟与验证[J].西北工业大学学报,2006,24(3):299-303.

Li Mu, Yan Chuanjun, Wang Zhiwu. Numerical simulation of and experimental study on effect of ring obstacles on detonation initiation and propagation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(3): 299-303. (in Chinese)

[6] Wintenberger E, Austin J, Cooper M. Analytical model for the impulse of single-cycle pulse detonation tube[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(1): 22-38.

[7] 赵坚行.燃烧的数值模拟[M].北京:科学出版社,2002:403-410.

Zhao Jianxing. Numerical simulation of combustion[M]. Beijing: Science Press, 2002: 403-410. (in Chinese)

#### 作者简介:

邓君香(1973—)女,博士研究生,副教授。主要研究方向:燃烧学。

Tel: 13679122928

E-mail: djxiang@tom.com

严传俊(1936—)男,硕士,教授,博士生导师。主要研究方向:燃烧学。

Tel: 029-88492748

E-mail: ycj@nwpu.edu.cn

(责任编辑:赵利)