

文章编号: 0258-1825(2008)01-0096-05

# 共用尾喷管多管脉冲爆震发动机数值模拟研究\*

李建中<sup>1</sup>,王家骅<sup>1</sup>,王春<sup>2</sup>,张德良<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;  
2. 中国科学院力学研究所高温气动重点实验室, 北京 100080)

**摘要:**采用基元反应模型和显式迎风 TVD 差分格式数值模拟方法, 研究共用尾喷管多管脉冲爆震发动机 (Pulse Detonation Engine, 简称 PDE) 各爆震管之间相互影响。采用点隐算法解决化学反应引起的刚性问题, 模拟了共用尾喷管内的流场, 以及爆震波退化为激波遇到尾喷管收敛斜面反射及反射波向爆震管上游传播的过程。研究结果为多管 PDE 的共用尾喷管设计提供了理论基础。

**关键词:**脉冲爆震发动机; 数值模拟; 共用尾喷管; 基元反应模型

**中图分类号:** V235.22 **文献标识码:** A

## 0 引言

脉冲爆震发动机的工作过程决定了, 将 PDE 的工作频率提高到准稳定 (100Hz) 工作状态具有一定难度, 为了使得 PDE 稳定输出推力, 通常采取多管组合的办法, 形成多管 PDE。多管 PDE 方案能够控制推力, 工作频率和推力矢量, 另外, 多管 PDE 使用共用进气道充填混气和共用尾喷管排气, 减少了 PDE 间歇式工作引起的非稳定性, 降低了整体 PDE 发动机振动和 PDE 重量等。多管 PDE 模型最大的不利是各爆震管之间存在相互干扰, 原则上, 适当设计阀门系统, 能够阻止倒流高温高压燃气直接影响进气道, 不影响多管 PDE 正常工作。但是, 共用尾喷管提供了各爆震管之间扰动传播的直接通道, 当爆震波从一个爆震管中传出爆震管时, 爆震波退化为激波, 通过共用尾喷管向邻近爆震管上游传播, 影响正在充填混气的邻近爆震管中的流场, 并且, 尾喷管的表面能够增强爆震管之间的相互干扰作用。

Fuhua<sup>[1]</sup>等人数值模拟了美国海军研究生院试验研究的无阀吸气式脉冲爆震发动机内的流场, 采用时空守恒元/解元 (CE/SE) 数值方法求解二维轴对称 Euler 方程, 采用时间算子分裂方法处理化学反应引起的刚性问题, 完成了爆燃向爆震转变过程、动态充填过程和循环工作条件下流动发展的数值模拟研究。Hui-Yuan Fan<sup>[2]</sup>等人数值模拟了可燃混合物在圆锥通

道内的爆震过程, 计算模型楔面半角的范围为  $0 \sim 20^\circ$ , 马赫数范围为  $2 \sim 6.5$ 。Houshang<sup>[3~6]</sup>等人应用了有限速率、八组分、粘性、瞬时流场的 CFD 模型, 研究了多管 PDE 共用尾喷管时爆震管之间的相互影响。王春<sup>[7]</sup>进行了对称双楔内腔激波聚焦引燃氢气/空气化学反应的数值模拟研究, 发展了基于有限速率化学反应模型的气相多组分、含化学反应的可压缩流动流场数值计算程序, 改变入射激波马赫数, 研究激波聚焦直接引燃氢气/空气可燃混合气体爆轰的起始位置。中科院力学研究所<sup>[8~12]</sup>开展了爆震波的传播、爆震波的马赫反射、激波在圆柱形激波管内绕射、反射和聚焦, 爆震波的起爆机理等数值模拟研究, 研究爆震波反应区的真实化学反应, 计算结果指导了爆震试验研究。本文主要通过数值模拟的方法, 研究多管 PDE 共用尾喷管时, 各爆震管之间的相互影响。

## 1 物理问题和数学模型

### 1.1 物理问题

图 1 给出了三管 PDE 共用尾喷管的物理模型, 按照设定点火时序, 三个爆震管依次爆震燃烧。三个爆震管呈正三角对称排列, 一个爆震管影响其它两个爆震管的程度一致, 这儿, 我们将它简化为二维的两管 PDE 的计算模型, 如图 2 所示, 能够定性分析爆震管之间相互影响。共用尾喷管收敛面的半角为  $12^\circ \sim$

\* 收稿日期: 2007-01-07; 修订日期: 2007-03-25.

基金项目: 南京航空航天大学科研创新基金资助 (Y0802-021).

作者简介: 李建中 (1979-), 男, 安徽泗县人, 南京航空航天大学讲师, 工学博士, 研究方向: 燃烧学及脉冲爆震发动机.

30°,最大半角收剑面的投影落在爆震管出口截面上,爆震波传出爆震管时,退化的无反应激波直接作用在这收敛斜面上,发生马赫反射,影响爆震管本身上游流场,同时扰动也向其它爆震管上游传播,相对与其它位置,此处干扰影响最大,因此,本文仅计算收敛面半角为 30°的共用尾喷管计算模型,将这里的干扰影响降到能够保证三管 PDE 稳定工作,其它位置的干扰影响肯定不会影响三管 PDE 稳定工作。

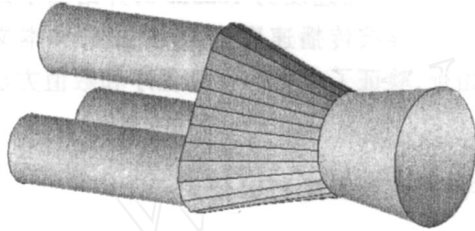


图 1 三管 PDE 的共用尾喷管

Fig. 1 Common nozzle of multi-tube PDE

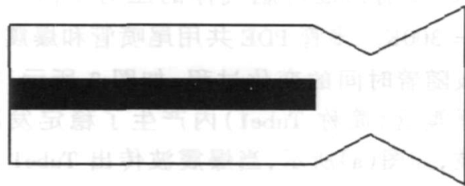


图 2 简化的共用尾喷管计算模型

Fig. 2 Numerical model of common nozzle

### 1.2 数值方法

采用具有化学反应的二维多组分 Euler 方程,其守恒方程的形式为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = W \quad (1)$$

式中:

$$U = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ \dots \\ ns \\ u \\ v \\ e \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} 1u \\ 2u \\ \dots \\ nsu \\ u^2 + p \\ uv \\ (e+p)u \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} 1v \\ 2v \\ \dots \\ nsv \\ uv \\ v^2 + p \\ (e+p)v \end{pmatrix}, \quad W = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_{ns} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$p = \sum_{k=1}^{ns} \frac{Y_k}{M_k} RT, \quad e = \sum_{k=1}^{ns} Y_k \left( \frac{u^2 + v^2}{2} + e_k(T) \right)$$

数值方法采用具有空间二阶精度的显式迎风 TVD 差分格式,在光滑处具有二阶精度,在间断处自动降为一阶精度,在激波附近不出现振荡的前提下,尽量减小格式粘性,提高格式对激波的分辨率。采用 Chemkin 数据库中 H<sub>2</sub>/Air 的 11 组分 23 步化学反应模型(如表 1 所示),其组分依次为 H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, O, H, OH, HO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, N, NO, 反应模型表达式:

表 1 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 基元反应模型

Table 1 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> finite-rate chemical reaction model

No.	Elemental reaction	A	n	E <sub>a</sub>
1	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> = 2OH	1.70 × 10 <sup>13</sup>	0.0	47780
2	OH + H <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O + H	1.17 × 10 <sup>09</sup>	1.3	3626
3	O + OH = O <sub>2</sub> + H	4.00 × 10 <sup>14</sup>	- 0.5	0
4	O + H <sub>2</sub> = OH + H	5.06 × 10 <sup>04</sup>	2.7	6290
6	OH + HO <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub>	7.50 × 10 <sup>12</sup>	0.0	0
7	H + HO <sub>2</sub> = 2OH	1.40 × 10 <sup>14</sup>	0.0	1073
8	O + HO <sub>2</sub> = O <sub>2</sub> + OH	1.40 × 10 <sup>13</sup>	0.0	1073
9	2OH = O + H <sub>2</sub> O	6.00 × 10 <sup>08</sup>	1.3	0
10	H + H + M = H <sub>2</sub> + M	1.00 × 10 <sup>18</sup>	- 1.0	0
11	H + H + H <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	9.20 × 10 <sup>16</sup>	- 0.6	0
12	H + H + H <sub>2</sub> O = H <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	6.00 × 10 <sup>19</sup>	- 1.3	0
13	H + OH + M = H <sub>2</sub> O + M	1.60 × 10 <sup>22</sup>	- 2.0	0
14	H + O + M = OH + M	6.20 × 10 <sup>16</sup>	- 0.6	0
15	O + O + M = O <sub>2</sub> + M	1.89 × 10 <sup>13</sup>	0.0	- 1788
16	H + HO <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1.25 × 10 <sup>13</sup>	0.0	0
17	HO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	2.00 × 10 <sup>12</sup>	0.0	0
18	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + M = OH + OH + M	1.30 × 10 <sup>17</sup>	0.0	45500
19	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + H = HO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	1.60 × 10 <sup>12</sup>	0.0	3800
20	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + OH = H <sub>2</sub> O + HO <sub>2</sub>	1.00 × 10 <sup>13</sup>	0.0	1800
21	O + N <sub>2</sub> = NO + N	1.40 × 10 <sup>14</sup>	0.0	75800
22	N + O <sub>2</sub> = NO + N	6.40 × 10 <sup>09</sup>	1.0	6280
23	OH + N = NO + H	4.00 × 10 <sup>13</sup>	0.0	0

其中,第三体化学反应增强系数为:

(5) H<sub>2</sub>O = 18.6, H<sub>2</sub> = 2.86, N<sub>2</sub> = 1.26

(10) H<sub>2</sub>O = 0.0, H<sub>2</sub> = 0.0

(13) H<sub>2</sub>O = 5.0

$$\sum_{k=1}^{ns} \nu_{l,k} X_k \rightleftharpoons \sum_{k=1}^{ns} \nu_{l,k} X_k \quad (2)$$

其中,  $\nu_{l,k}$  和  $\nu_{l,k}$  分别为第  $l$  步反应的正向和逆向的

化学反应计量系数。各组分的质量生成速率  $w_k$  为:

$$w_k = \frac{\partial \rho_k}{\partial t} = M_k \sum_{i=1}^{nr} (v_{i,k} - v_{i,k}) \times [k_{f,i} (X_j)^{v_{i,k}} - k_{b,i} (X_j)^{v_{i,k}}] \quad (k = 1, 2, \dots, ns) \quad (3)$$

其中  $M_k$  为第  $k$  组分的摩尔质量,  $k_{f,i}$  和  $k_{b,i}$  分别代表正向和逆向反应速率系数, 通常由阿累尼乌斯公式得到:

$$k_{f,i}(T) = A_i T^{n_i} e^{(-E_{a,i}/RT)} \quad l = 1, 2, \dots, nr$$

其中  $E_{a,i}$  为第  $l$  步反应的活化能,  $k_{b,i}$  根据正向反应速率系数  $k_{f,i}$  和平衡常数  $k_{e,i}$  计算获得:

$$k_{b,i}(T) = \frac{k_{f,i}}{k_{e,i}} \quad l = 1, 2, \dots, nr$$

采用点隐算法, 解决化学反应的特征时间远小于流场的特征时间引起的刚性问题, 控制方程的“点隐式”格式求解形式为:

$$\frac{\hat{U}^n}{t} = -CONV^n + \hat{S}^{n+1} \quad (4)$$

其中  $CONV^n$  为控制方程的对流项,  $\hat{S}^{n+1}$  为  $n+1$  时刻的化学反应源项,

$$\hat{S}^{n+1} = \hat{S}^n + C^n \hat{U}^n$$

其中,  $C^n = \partial \hat{S} / \partial \hat{U}^n$  为化学反应源项的雅克比矩阵, 处理后的点隐式格式形式为:

$$(I - t \cdot C^n) (\hat{U}^{n+1} - \hat{U}^n) = CONV^n \quad (5)$$

## 2 计算结果及分析

### 2.1 数值方法验证

首先计算  $H_2/O_2/N_2$  比例为 2:1:7 的混合物, 在  $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $T_0 = 300 \text{ K}$  的初始条件下获得稳定发展的爆震波, 爆震波传播速度为  $1632.4 \text{ m/s}$ , Soloukhin<sup>[13]</sup> 采用烟熏膜技术记录了气相爆震波胞格结构, 获得此条件下爆震波传播速度为  $1623 \text{ m/s}$ , 并给出了此条件下理论 C 爆震波传播速度为  $1619 \text{ m/s}$ , 和本文的计算结果相近, 验证了本文的计算程序和数值方法是可靠的。

### 2.2 共用尾喷管多管 PDE 研究

初始条件设定为:  $H_2/O_2$  当量比  $ER = 1$ ,  $N_2$  稀释比例 49%, 波前预混可燃气体的压力  $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$ , 温度  $T_0 = 300 \text{ K}$ 。多管 PDE 共用尾喷管和爆震管内压力等值线随着时间的变化过程, 如图 3 所示, 首先在底面的爆震管 (简称 Tube1) 内产生了稳定发展的平面爆震波, 如图 (a) 所示, 当爆震波传出 Tube1 出口以后, 退化为无反应激波, 靠 Tube1 外侧的激波遇到尾喷管收敛斜面时, 发生马赫反射, 马赫反射的激波回传到 Tube1 中, 靠近爆震管内侧的激波发生绕射形成弓形激波进入上面爆震管 (简称 Tube2), 如图 (b) 所示, 靠 Tube1 外侧的激波运动到尾喷管喉道发生绕射

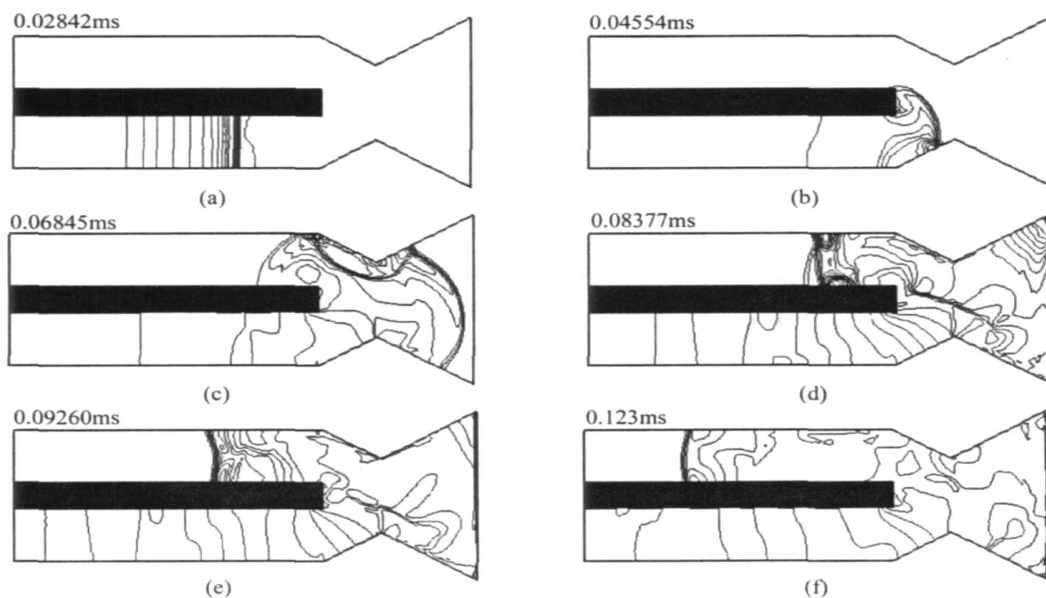


图3 压力等值线

Fig. 3 Contour of pressure

形成弓形激波进入尾喷管的扩张段,弓形激波继续向前运动,部分遇到收敛段的上侧面发生正规反射,反射的激波进入 Tube2,影响 Tube2 中的流场,部分弓形激波遇到尾喷管扩张段的上侧面,发生马赫反射,扩张段马赫反射激波和收敛段正规反射激波组合形成弓形激波向爆震管中回传,影响上游流场,如图(c)所示,弓形激波进入 Tube2 中以后,在上、下壁面发生马赫反射,马赫反射激波同时向中间运动,如图(d)所示,马赫反射使得壁面附近激波强度和运动速度略高于中间部分,激波运动速度差导致产生弓形激波,此时,两个马赫反射激波对撞,如图(e)所示,激波对撞增强了中间部分激波强度,提高激波传播速度,中间部分激波反超壁面附近激波,形成如图(f)所示的弓形激波,弓形激波在壁面发生反射,又增强了壁面附近激波强度,提高壁面附近激波传播速度,弓形激波

继续向前传播。

图 4 给出了爆震管轴向位置的压力随时间变化关系的计算结果,Tube1 中轴向位置的压力曲线上平台压力存在压力脉动,这是因为尾喷管收敛面反射激波回传引起的,Tube2 中相同位置,在经过一段时间以后存在较大的压力波动,这是因为激波在尾喷管中经过一系列反射、衍射作用进入 Tube2 中,并继续向上游传播引起的,两个爆震管中相同位置受到尾喷管影响作用的时间存在差异,这是由于回传的反射激波经过的路径、强度等不同导致的。图 5 给出了 Tube1 封闭端压力随时间的变化关系,可以看到压力平台  $P_3$  非常平滑,压力衰减过程存在波动,这是由于共用尾喷管的反射波影响的原因,说明了尾喷管的使用能够改变爆震管封闭端的压力变化历程,有效提高 PDE 的推力性能。

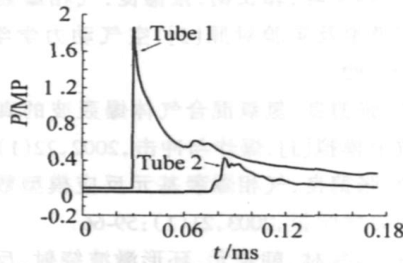


图 4 爆震管轴向某位置压力时间历程

Fig. 4 Pressure time history at tube

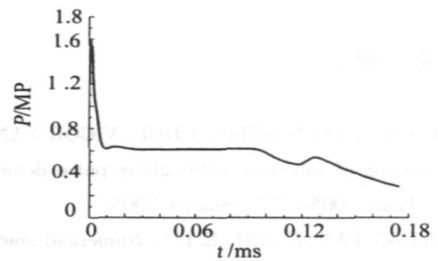


图 5 Tube1 封闭端压力时间历程

Fig. 5 Pressure time history at tube1 end

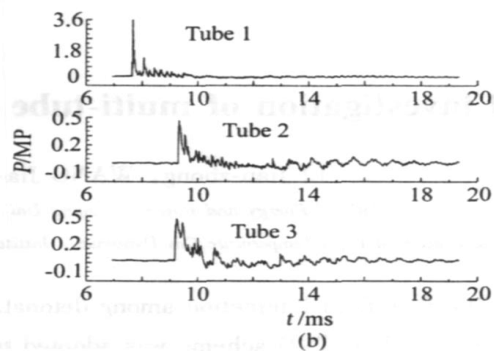
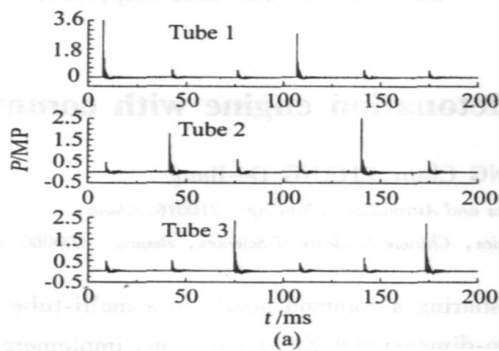


图 6 三管 PDE 共用尾喷管试验结果

Fig. 6 Experimental results of multi-tube PDE with common nozzle

图 6 给出了三管 PDE 安装收敛 - 扩张尾喷管的试验结果,在三个爆震管的轴向位置利用 PCB 压力传感器记录爆震室内压力历程,可以清晰地看到当一个爆震管爆震燃烧时,其它两个爆震管上的压力传感器能够测量到尾喷管引起的压力脉动( $P_{back}$ 表示),并且本身爆震管上的压力传感器也能够记录到回传激波引起的压力脉动,图 6 中 (b) 是图 (a) 中第一组压力曲线的局部放大图。从图 6 中 (a) 可以看到,Tube1 中

已经获得充分发展的爆震波,峰值压力为 3.58MPa,  $C_f$  压力为 2.14MPa。从图 6 中 (b) 可以看到,在 Tube1 中的压力曲线上存在一个较大的压力脉动,这是由于回传反射激波引起的,Tube2 和 Tube3 中的压力曲线的峰值压力基本相同,这说明尾喷管反射回传进入 Tube2 和 Tube3 中激波强度基本相同,到达时间略有差异(100 $\mu$ s),这是由于尾喷管结构没有完全对称(100%对称)引起的,在误差允许的范围内,不影响研

究结果。试验结果和计算结果基本一致,验证了计算结果是可靠的。

### 3 结 论

(1) 发展了  $H_2/O_2$  基元反应模型的气相多组分化学反应流计算程序,采用迎风 TVD 差分格式,点隐算法解决化学反应时间尺度和流场特征时间尺度较大差异引起的刚性问题。

(2) 利用计算程序数值模拟多管 PDE 共用尾喷管之间的相互干扰过程,计算结果和试验结果基本一致,验证了计算程序和数值方法是可靠的。

(3) 计算结果表明,多管 PDE 使用共用尾喷管会存在相互影响,进而影响爆震管充填过程,设计合理结构的尾喷管是保证多管 PDE 协调工作的重要因素之一。

### 参 考 文 献:

- [1] FUHUA MA, J EONG YEOL CHOI, VIGOR YANG. Numerical modeling of valveless airbreathing pulse detonation engine [R]. AIAA 2005-0227, January 2005.
- [2] HUF YUAN FAN, FRANK KLU. Numerical study of reactive flow past a wedge in a channel [R]. AIAA 2005-1168, January 2005.
- [3] HOUSHANG B EBRAHIMI, FAURE J MALO-MOLINA. Numerical investigation of multi-tube pulse detonation [R]. AIAA 2003-718, January 2003.
- [4] HOUSHANG B EBRAHIMI, FAURE J MALO-MOLINA. Numerical investigation of three-dimensional multi-tube pulse detonation [R]. AIAA 2003-4513, July 2003.
- [5] HOUSHANG B EBRAHIMI, FAURE J MALO-MOLINA. Numerical investigation of 2-D and 3-D multitube pulse detonation using  $H_2$  and  $JP_8$  fuel [R]. AIAA 2004-465, January 2004.
- [6] HOUSHANG B EBRAHIMI. Simulation of 2-D and 3-D Multi-tube pulse detonation engines with conical nozzle and different splitter plates [R]. AIAA 2005-1305, January 2005.
- [7] 王春. 激波聚焦高速可燃混和气流的实验研究 [D]. [博士学位论文], 中国科学技术大学, 2004 年.
- [8] 胡宗民, 高云亮, 张德良, 杨国伟, 姜宗林. 爆轰波在楔面上反射数值分析 [J]. 力学学报, 2004, 36(4): 385-392.
- [9] 胡宗民, 孙宇峰, 郭长铭, 张德良. 气相爆轰波传播特性的数值模拟及实验对照 [J]. 空气动力学学报, 2005, 23(2): 178-182.
- [10] 胡湘渝, 张德良. 氢氧混合气体爆轰波的真实化学反应模型数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(1): 1-7.
- [11] 胡湘渝, 张德良. 气相爆轰基元反应模型数值模拟 [J]. 空气动力学学报, 2003, 21(1): 59-66.
- [12] 腾宏辉, 姜宗林, 韩肇元. 环形激波绕射、反射和聚焦的数值模拟研究 [J]. 力学学报, 2004, (1): 9-15.
- [13] SOLOUKHIN RI. Shock waves and detonations in gases [M]. Baltimore, MD: Mono Book Corp; 1966.

## Numerical investigation of multi-tube pulse detonation engine with common nozzle

LI Jian-zhong, WANG Jia-hua, WANG Chun, ZHANG De-liang

(1. Coll. of Energy and Power, Nanjing Uni. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The flow-field interaction among detonation tubes sharing a common nozzle in a multi-tube pulse detonation was investigated and explicit TVD scheme was adopted to solve two-dimensional Euler equations implemented with detailed chemical reaction kinetics of hydrogen/air mixture. Point Implicit method was applied to treat the stiff problem arising from computation of chemical reaction flow. The flow-field of common nozzle was simulated numerically. When detonation wave went out the tube, the detonation wave declined and turned into shock wave. The shock wave reflection over common nozzle surface and the reflected shock wave traversing back up the other tube were simulated numerically. The numerical simulation result is of importance to supply theory and practice for optimizing common nozzle of multi-tube pulse detonation engine.

**Key words:** pulse detonation engine; numerical simulation; common nozzle; detailed chemically reacting model