

多管脉冲爆震发动机流场数值研究^{*}

刘建文^{1,2,3}, 钟诚文^{1,2}, 赵书苗^{1,2,3}

(1. 西北工业大学 翼型叶栅空气动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710072

2. 西北工业大学 高性能计算研究与发展中心, 陕西 西安 710072

3. 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘 要: 针对二维带有收敛扩张喷管的双管脉冲爆震发动机 (PDE), 采用并行的时空守恒元和解元 (CE/SE) 方法对单管点火、双管同时点火和不同喉道面积情况下的爆震流场进行了数值模拟。化学反应模型采用 H_2 和 O_2 的 8 组分 34 基元反应。计算发现, 单管点火情况下传入旁通爆震管的流场可以引爆其中的可燃气体; 多管 PDE 内流场之间的相互作用使管内的压强处于比较高的状态; 增大喉道面积削弱了多管 PDE 流场之间的相互影响, 同时减小了封闭端面的压力, 从而导致发动机性能下降。

关键词: 爆震; 时空守恒元和解元方法⁺; 基元化学反应⁺; 并行计算; 数值仿真

中图分类号: V231.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2007) 06-0674-05

Numerical investigation of multi-tube pulse detonation engine

LIU Jianwen^{1,2,3}, ZHONG Chengwen^{1,2}, ZHAO Shumiao^{1,2,3}

(1. National Defence Key Lab. of Airfoil and Cascade Aerodynamic, Northwestern Polytechnical

Univ., Xi'an 710072, China; 2. Center for High Performance Computing, Northwestem

Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China; 3. Beijing Power Machinery Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract The parallel space-time conservation element and solution element (CE/SE) method was used to simulate the flow fields of dual-tube Pulse Detonation Engine (PDE) with convergent-divergent nozzle. The detailed flow structures were obtained under single-tube ignition, dual-tube ignition and different throat area conditions. The 8-species, 34 elementary reactions model for hydrogen-oxygen was used. It demonstrates that the flow fields generated by single-tube ignition can ignite the gas of side detonation tubes; interactions of the internal flow fields of multi-tube PDE keep the pressure at a higher level; increasing throat area weakens the interaction of internal flow fields and reduces the pressure on thrust wall simultaneously, thus decreasing the engine performance.

Key words Detonation; CE/SE⁺; Elementary reaction⁺; Parallel computation; Numerical simulation

1 引 言

脉冲爆震发动机 (Pulse Detonation Engine, 简称 PDE) 是依靠间断的爆震波作用在推力壁上产生推力的。一般 PDE 工作循环包括点火、传播、填充隔离气体和填充燃料这四个阶段。过去的研究多是针对单管 PDE, 为了获得更大的推力, 一般需要升高工作频率, 但是这只能限制在一定的范围内。另一种方法就是采用多管 PDE, 它是多个单管 PDE 的组合, 但是在

工作方式上存在一定的协调。相对于单管 PDE 来说, 多管 PDE 的进气道连续向多个爆震腔供气, 减小了单管 PDE 阀门关闭阶段引起的总压损失; 多爆震管同时工作能得到较稳定的流场和较大的平均推力; 同时为实现矢量推力提供了可能^[1,2]。

文献 [1] 采用一步不可逆化学反应对多管多循环脉冲爆震发动机的工作过程进行了数值模拟, 得到了流场的详细结构, 分析了比冲和循环各阶段时间的关系; 文献 [2,3] 采用 H_2/O_2 的 8 组分 16 反应对单管

* 收稿日期: 2006-11-02 修订日期: 2007-02-08.

基金项目: 国防科技重点实验室基金 (9140C4201020602)。

作者简介: 刘建文 (1981—), 男, 硕士生, 研究领域为计算流体力学和高性能计算。Email: liujw512@163.com

和多管的二维和三维的 PDE 流场进行了模拟,得到了多管 PDE 流场结构,分析了爆震管长度、爆震管个数和喉道面积等对流场和推力的影响。由于 PDE 流场模拟需要很大的计算量,国内对多管 PDE 数值模拟开展的工作比较少,目前尚没有此方面的成果介绍。文献[4]采用一步不可逆化学反应对单管的非定常爆轰过程进行了模拟;文献[5]采用 H_2/O_2 的 8 组分 24 基元反应对一维氢氧爆震波传播过程进行了数值计算。

由于非结构网格比结构网格具有更大的灵活性,本文基于二维非结构网格,采用改进的 CE/SE 方法^[6]、并行分区技术和 H_2/O_2 的 8 组分 34 基元化学反应模型,在并行集群上对多管脉冲爆震发动机的单管点火、双管点火和不同喉道面积情况下的爆震流场进行了数值模拟。

2 控制方程和计算方法

2.1 控制方程

忽略粘性,非定常带化学反应的控制方程组可以用向量的形式表示为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{U}$ 是守恒变量, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{F}$ 是无粘通量, $\mathbf{S}$ 是化学反应源项,具体的表达式和通量项对守恒变量的雅克比矩阵可参考文献[7]。

混合物的总密度可以用各组分的密度表示为

$$\rho = \sum_{k=1}^{N_s} \rho_k \quad (2)$$

式中 u 和 v 分别是直角坐标系下两个方向的速度分量。假设每种组分的质量分数用 Y_k 表示,焓用 h_k 表示,单位体积内的总能量为

$$\begin{aligned} \rho E &= \rho h - p + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) = \\ &\rho \sum_{k=1}^{N_s} Y_k h_k - p + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \end{aligned} \quad (3)$$

某一组分在温度 T 时的焓 (h_k^T) 又可以表示为

$$h_k^T = h_k^{T_0} + \int_{T_0}^T c_p(t) dt \quad (4)$$

式中 T_0 为参考温度,等压比热 c_p 一般又可以写成温度的四次多项式形式。压强可以由理想气体状态方程给出

$$p = \rho R T = \rho R_u \left(\sum_{k=1}^{N_s} \frac{Y_k}{w_k} \right) T \quad (5)$$

式中 w_k 是各组分的摩尔质量, R_u 是通用气体常数,一般取 $R_u = 8314.41 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

2.2 计算方法

CE/SE 方法的基本原理在文献[4~6]中已做了详细阐述,以下对化学反应模型和源项的处理作具体说明。

有限速率化学反应模型的一般形式可写为

$$\sum_{i=1}^{N_s} v'_{ij} M_i \xrightleftharpoons[k_{bj}]{k_{fj}} \sum_{i=1}^{N_s} v''_{ij} M_i \quad (6)$$

由质量作用定律可得,第 i 种组分的反应生成速率为

$$\omega_i = W_i \sum_{j=1}^{N_R} (v''_{ij} - v'_{ij}) (k_{fj} \prod_{l=1}^{N_s} n_l^{v'_{lj}} - k_{bj} \prod_{l=1}^{N_s} n_l^{v''_{lj}}) \quad (7)$$

式中 N_R 是基元反应的总数目, W_i 是第 i 种组分的摩尔质量, k_{fj} 和 k_{bj} 是第 j 个基元反应的正、逆反应速率常数, k_{fj} 可以由 Arrhenius 定律得到

$$k_{fj} = A_f T^n \exp(-E_a/R_u T) \quad (8)$$

式中 A_f 为指前因子, n 为温度指数, E_a 为活化能, T 为温度。 k_{bj} 可以由化学反应平衡常数 k_{eq} 求出,

$$k_{bj} = \frac{k_{fj}}{k_{eq}} \quad (9)$$

由于化学反应的特征时间远小于流场的特征时间,为了解决化学反应所造成的方程的刚性问题,本文利用分裂的方法,把求解过程分成两步:

(iv) 不考虑化学反应源项,求出流场在某一时刻的解,得到组分的质量分数。式(3)含有组分焓项,它是关于温度的非线性方程,可以通过牛顿迭代法求解,再由气体状态式(5)计算出压强;

(⑤)把(iv)的结果作为初始值,计算由于化学反应作用,流场在一个时间步长后的解。

对于(iv)采用改进的 CE/SE 方法直接求解,对于(⑤)中源项的计算采用变系数常微分方程求解器 DVODE^[8],调用 CHEMKIN^⑨计算各组分的 thermodynamic 特性和反应物生成率,最终得到组分的质量分数、温度和压强。

3 计算结果及讨论

3.1 问题描述

本文共计算了两种模型,采用的基本模型与文献[3]相同,如图1所示,直管长 68 mm,高 10 mm,两段直管之间的间隔为管高的一半。直管尾部和喷管相连,喉道高度和直管相同,喉道与直管开口端的水平

距离是 17 mm, 喷管总长 42 mm, 喷管入口和出口的高都是 27 mm, 外流场是 $90\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 的矩形区域。在第二种计算模型中, 只是喉道高度增加了 50%, 其他参数保持不变。

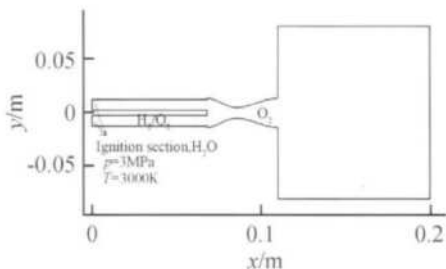


Fig 1 Multi-tube PDE computational model

由于采用基元反应对化学反应过程进行模拟, 求解的方程数目大大增加, 导致计算量剧增。文中采用并行方法来缩短计算时间, 利用 METIS^[10] 来完成计算域上非结构网格的分区。在计算中首先在计算域上生成非结构网格 (三角形), 采用 METIS 把流场划分成 12 个子域。图 2 是网格分区的结果, 从图中可以看出, 由于网格疏密不同, 划分后的各子域的形状、大小不尽相同, 而且有些子域是不连续的, 但这并不会影响最终的计算结果和计算精度。各子域中最大网格数量

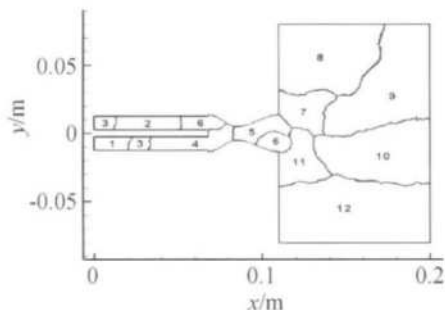


Fig 2 Sub-zone after decomposition of METIS

为 5542 最小为 5154 偏离平均值 5381 不到 3%, 很好的保证了各计算节点之间的负载均衡。计算中采用的时间步长是 $2.5 \times 10^{-8}\text{ s}$ 模拟流场时间是 $250\text{ }\mu\text{s}$ 。

文中共计算了五种状况, 算例 1 和 2 是第一种模型 (小喉道面积) 单管点火和双管同时点火的计算, 算例 3 和 4 是第二种模型 (大喉道面积) 单管点火和双管同时点火的计算, 算例 5 是单爆震管 (只有一根直管) 的计算。文中的计算都是针对初始循环而言的, 不涉及到多循环流场的相互影响及多循环过程之间的衔接。初始流场的压强和温度分别是 0.1 MPa 和 300 K , 喷管段和外流场填充的气体是氧气。对于

双管同时点火的情况, 上、下直管填充的都是按恰当化学当量比混合的氢气和氧气, 而在单管点火时, 上管填充的是氧气。直管封闭端是宽为 8 mm 的点火区, 它是压强为 3 MPa 温度为 3000 K 的水蒸气。

3.2 算例分析

图 3 给出了算例 1 不同时刻的流场压力云图。图 3(a) 是 $t = 25\text{ }\mu\text{s}$ 时刻流场的压力, 爆震波刚刚传出直管段, 由于 H_2 完全消耗, 爆震波蜕变成激波。在直管出口的直角壁处, 产生 Prandtl-Meyer 波, 使波后的压强迅速下降, 一部分气体经过喉道进入外流场, 另一部分气体进入上面直管。在图 3(b) 中, 上管中的激波刚好传播到封闭端, 波后压力约为 0.66 MPa 然后在壁面处发生反射, 向右传播, 压力峰值在传播过程中逐渐衰减。从图 3(c) 可以看出, 激波在上面管内两壁之间反射, 外流场刚刚传播到远场边界处。此时喷管内的流场呈现出很强的不对称性, 在喷管扩张段的上、下壁面处产生不对称的两个涡。图 4 同样也给出了算例 2 不同时刻的流场压力云图。与图 3(a) 相比, 算例 2 在 $t = 25\text{ }\mu\text{s}$ 以前的流场和算例 1 相同, 上、下直管内产生的流场还没有互相作用。在喷管收敛段产生的反射激波在 $t = 87\text{ }\mu\text{s}$ 时刻传播到上游的封闭端, 产生反射后向右传播, 从图 4(b) 中可以看出在 $t = 110\text{ }\mu\text{s}$ 激波已经到达直管长度一半的位置。在 $t = 200\text{ }\mu\text{s}$ 时, 流场已经传出远场边界。直管出口处的气体以超声速进入喷管, 扩张段处于低压区。

图 5 给出了算例 1 上、下直管封闭端面中心点的压强随时间的变化曲线和文献 [3] 的比较, 可以看出本文的结果和此文献吻合很好, 而且峰值压力捕捉的也很准确。爆震波经过下面直管所需的时间约为 $21\text{ }\mu\text{s}$, 爆震波平均速度为 2857.1 m/s 而进入上面直管的激波流过整个管道的时间却需要 $75\text{ }\mu\text{s}$ 可见爆震波的速度和激波的传播速度相差近 2.6 倍。下管存在一个约为 0.6 MPa 的平台压力, 喷管处产生的膨胀波到达封闭端面壁面后, 此压力缓慢减小。对于上面的直管, 在 $110\text{ }\mu\text{s}$ 以前, 下面直管中产生的激波还没有到达封闭端面, 压力始终都保持在 0.1 MPa 然后压力突然升高到 3.26 MPa 不过此压强衰减的很快, 经过 $90\text{ }\mu\text{s}$ 已经下降到 0.3 MPa 。

图 6 给出了算例 1 和算例 3 上下直管封闭端面压力的比较。左边的曲线对应下管, 右边的曲线对应上管。从图中可以看出, 在 $80\text{ }\mu\text{s}$ 以前下管压力曲线基本重合, 在 $80\text{ }\mu\text{s}$ 以后算例 3 的压力偏低, 最后趋于

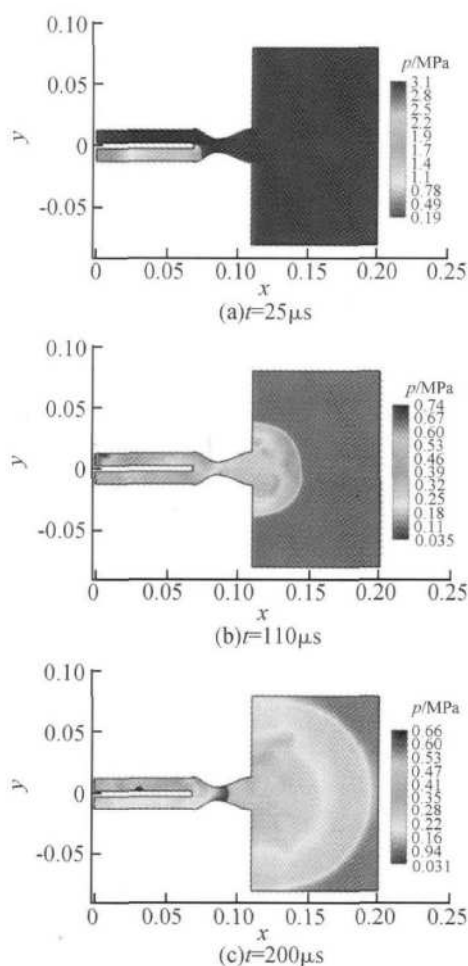


Fig 3 Pressure contour of case 1 at different time

相同的值;对于上面的直管,喉道面积增大,使流入喷管的气体增多,相应的进入上面直管的气体变少,激波的强度变弱。从图中可以看出,上管的激波到达封闭端壁面的时间延迟了 $4.5 \mu\text{s}$ 而且封闭端壁面压力峰值也由小喉道情况下的 3.26 MPa 变为 3.01 MPa 降低了近 8% ,而且此压力的衰减速度明显要快一些。图 7 还给出了算例 2 和算例 4 下面直管封闭端压力的比较。由于同时点火情况下流场具有对称性,这里只给出了下管的比较。通过比较也能得出和图 6 相同的结论。增大喉道面积使喷管收敛段变得更光滑,这就削弱了在收敛段发生反射后的激波的强度,因此激波传到上游封闭端面后造成的封闭端压力的跃升量也减小,此后的压力也一直比算例 2 的偏低。图 8 还给出了算例 1, 2 和 5 的比较。在单管计算(算例 5)中,由于在出口产生的膨胀波向上游传播,封闭端的压力一直是减小的,得到的封闭端壁面的压力也是这几个中最小的。对于多管 PDE,不论是单管点火还是多管点火,内流场之间的相互作用比单管要强烈的多,从而使封闭端压力保持在比较高的状态。

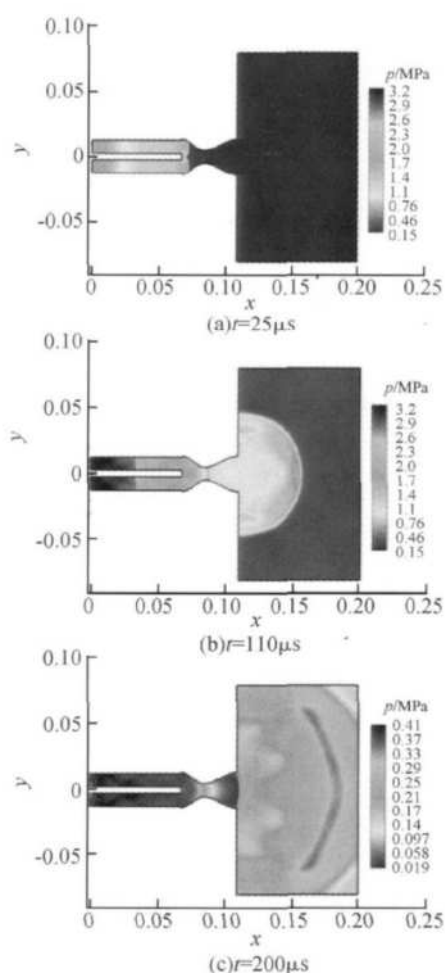


Fig. 4 Pressure contour of case 2 at different time

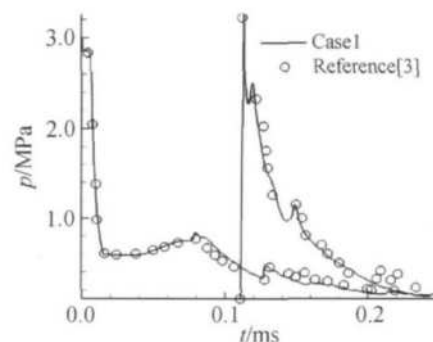


Fig. 5 Pressure comparison on the lower closed end wall between case 1 and reference [3]

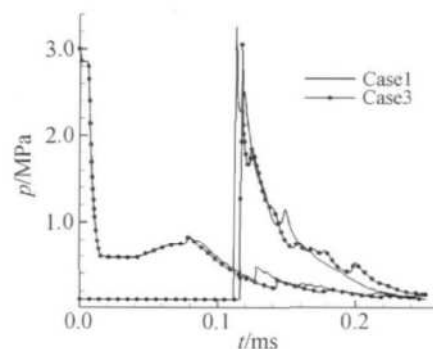


Fig. 6 Pressure comparison on closed end wall between case 1 and case 3

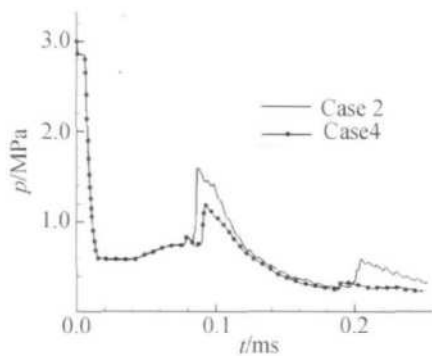


Fig. 7 Pressure comparison on the lower closed end wall between case 2 and case 4

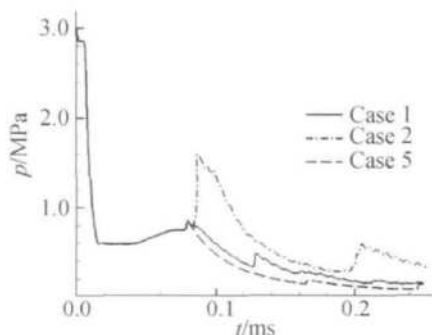


Fig. 8 Pressure comparison on down close end wall between case 1, 2 and 5

4 结 论

本文首先对 CE/SE 方法、化学反应源项的处理等做了详细介绍,采用 METIS 把流场网格划分成网格数量相当的 12 个子域,然后利用改进的 CE/SE 方法和 H_2/O_2 的 8 组分 34 基元化学反应模型,对二维多管脉冲爆震发动机在单管点火、双管同时点火和不同喉道面积情况下的流场进行了数值模拟,得到了精细的流场结构。计算发现单管点火的爆震流场对旁通爆震管有很大的影响,它可以使封闭端压力升高到点火所需的状态,从而点燃其中的可燃气体(假设管中已填充可燃气体);多管 PDE 内流场之间的相互作用使管内的压强处于比较高的状态;增加喉道面积削弱了内流场之间的相互作用,同时减小了封闭端的压力,使 PDE 产生的推力减小,将导致发动机的性能下降。文中的计算结果和相关文献符合良好,因此,本文的并行 CE/SE 方法对爆震流场的数值模拟是成功的,能为多管脉冲爆震发动机的流场分析和设计提供

一定的参考数据。

参考文献:

- [1] Fuhua Ma, Jeong-Yeol Choi, Vigor Yang. Thrust chamber dynamics and propulsive performance of multitube pulse detonation engines[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(4).
- [2] Ebrahim i H B, Mohanraj R, Merkle C L. Modeling of multitube pulse detonation engine operation[R]. *AAA*, 2001-3813.
- [3] Ebrahim i Houshang B, Malo-Molina Faure J. Numerical investigation of 2-D and 3-D multitube pulse detonation using H_2 and JP8 fuel[R]. *AAA*, 2004-465.
- [4] 翁春生, Tay P Gore. CE/SE 方法在非定常爆轰计算中的应用[J]. *空气动力学学报*, 2003, 21(3): 301~310.
- [5] 陈永刚, 何立明, 刘建勋. 时空守恒元和解元方法的爆震波一维数值模拟[J]. *推进技术*, 2005, 26(3): 256~259. (CHEN Yong-gang HE Liming LIU Jian-xun. One-dimensional numerical simulation of detonation waves based on space-time conservation element and solution element method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2005, 26(3).)
- [6] Chang S C. The method of space-time conservation element and solution element—a new approach for solving the navier-stokes and euler equations[J]. *Journal of Computational Physics*, 1995, 119(2): 295~324.
- [7] Deiterding R. Parallel adaptive simulation of multidimensional detonation structures[D]. *Brandenburgische Technische Universität Cottbus*, 2003.
- [8] Brown P N, Byrne G D, Hindmarsh A C. VODE: A variable coefficient ODE solver[J]. *SAM J. Sci Stat Comput*, 1989, 10(5): 1038~1051.
- [9] Kee R J, Rupley F M, Miller J A. CHEMKIN-II: A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics[R]. *Technical Report SAND 89-8009*, 1989.
- [10] Karypis G, Kumar V. Multilevel K-way partitioning scheme for irregular graphs[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 1998, 48(1).

(编辑: 梅 瑛)