

文章编号: 1001-1455(2010)04-0337-05

旋转爆轰的三维结构和侧向稀疏波的影响*

张旭东, 范宝春, 归明月, 潘振华

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 基于带化学反应的三维 Euler 方程, 采用氢气-空气的 9 组分 19 步基元反应简化模型, 对圆环燃烧室内的旋转爆轰进行了数值模拟, 讨论了旋转爆轰波的三维结构及侧向稀疏波对旋转爆轰波阵面的影响。数值结果表明, 爆轰波能够以旋转方式沿预混气层稳定传播。在侧向稀疏波作用下, 爆轰波阵面发生变形。与理想的 C-J 爆轰相比, 爆轰波强度和爆轰参数都有所下降。

关键词: 爆炸力学; 三维结构; 三维 Euler 方程; 旋转爆轰; 侧向稀疏波

中图分类号: O381

国标学科代码: 130·3510

文献标志码: A

1 引言

与普通燃烧不同, 爆轰是一种激波诱导的高温高压下进行的燃烧, 具有数千米每秒的传播速度, 因而具有更高的燃烧效率、更少的污染和更宽广的飞行马赫数适用范围。由于现代飞行特别是近空间飞行的需要, 以爆轰为能量释放方式的爆轰发动机引起了人们的关注。

由于爆轰具有稍纵即逝的特点, 所以爆轰发动机的首要问题是如何使爆轰波长期停留在燃烧室中。目前, 有 3 种方式可以达到这一目的。第 1 种是让爆轰以脉冲的方式和极高的频率, 在燃烧室中重复出现, 即在燃烧室内实现周期性的充气、点火、爆轰、排气和再充气再点火的循环过程, 称为脉冲爆轰发动机 (pulse detonation engine, PDE)^[1]。第 2 种是让爆轰驻定在燃烧室内, 使爆轰相对于燃烧室处于静止状态, 称为驻定爆轰发动机 (oblique detonation wave engine, ODWE)。第 3 种是利用爆轰波在燃烧室供气端连续旋转, 爆轰产物从另一开口端被高速甩出, 从而产生推力, 称为旋转爆轰发动机 (rotating detonation engine, RDE)。旋转爆轰的产生原理是: 当壁面压力低于供气系统压力时, 可燃气体由上底面贴着内壁注入燃烧室, 形成可燃层。爆轰波传播时, 波前压力总小于供气系统的压力, 总有预混气注入, 形成提供爆轰波绕轴旋转燃料层, 而爆轰波后, 高温高压的爆轰产物则由下底面的排气端泄出 (见图 1), 除产生推力外, 还因此形成供可燃气体注入的空间。

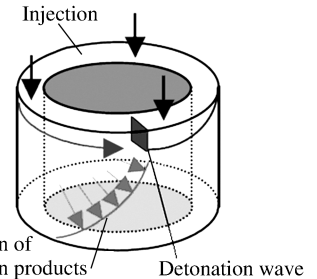


图 1 连续旋转爆轰燃烧室简图

Fig. 1 Simplified diagram of a RDE combustion chamber

对旋转爆轰发动机的研究大多集中在实验方面^[2-8], 而对旋转爆轰流场结构的研究较少, 在数值模拟方面则大多采用的是二维模型^[9-10]。但旋转爆轰流场在本质上是三维的, 采用二维模型完全不够。本文中, 采用带化学反应的三维 Euler 方程, 以氢气-空气预混气为研究对象, 对爆轰波在圆环燃烧室中的传播过程进行数值研究。根据计算结果, 分析旋转爆轰的波系结构, 以及侧向稀疏波对爆轰波阵面的影响, 为进一步开展旋转爆轰发动机的实验研究提供参考。

2 物理模型和计算方法

2.1 基本方程

在贴体坐标系中, 采用考虑基元化学反应的三维 Euler 方程

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \zeta} = \mathbf{S} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2009-05-07; 修回日期: 2009-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872096);

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目(KFJJ09-13)

作者简介: 张旭东(1983—), 男, 博士研究生。

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \vdots \\ \rho_K \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \rho_1 \bar{U} \\ \vdots \\ \rho_K \bar{U} \\ \rho \bar{U} u + p \xi_x \\ \rho \bar{U} v + p \xi_y \\ \rho \bar{U} w + p \xi_z \\ \bar{U}(\rho + E) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho_1 \bar{V} \\ \vdots \\ \rho_K \bar{V} \\ \rho \bar{V} u + p \eta_x \\ \rho \bar{V} v + p \eta_y \\ \rho \bar{V} w + p \eta_z \\ \bar{V}(\rho + E) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho_1 \bar{W} \\ \vdots \\ \rho_K \bar{W} \\ \rho \bar{W} u + p \zeta_x \\ \rho \bar{W} v + p \zeta_y \\ \rho \bar{W} w + p \zeta_z \\ \bar{W}(\rho + E) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \vdots \\ \dot{\omega}_K \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

式中： ρ 是混合物的密度， $\rho = \sum_{k=1}^K \rho_k$ ， $\rho_k = \rho Y_k$ ， Y_k 是组分 k 的质量分数； $\bar{U} = u\xi_x + v\xi_y + w\xi_z$ ， $\bar{V} = u\eta_x + v\eta_y + w\eta_z$ ， $\bar{W} = u\zeta_x + v\zeta_y + w\zeta_z$ ，分别表示计算坐标系 ξ 、 η 和 ζ 方向的速度； u 、 v 和 w 分别是物理坐标系 x 、 y 和 z 方向的分速度； p 为体系的压力， $p = \sum_{k=1}^K \frac{\rho_k}{W_k} RT$ ， W_k 为组分 k 的分子量； E 为体系的体积总能量， $E = \rho \int_0^T c_V dT + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) + \sum_{k=1}^K \rho_k h_k^0(0)$ ， $c_V = \sum_{k=1}^K X_k c_{V,k}$ ， $c_{V,k}$ 为组分 k 的等容比热， X_k 、 $h_k^0(0)$ 分别为组分 k 的摩尔分数和标准生成焓； T 为体系的温度。

组分 k 的净生成速率为

$$\dot{\omega}_k = \sum_{i=1}^I (\gamma''_{ki} - \gamma'_{ki}) \left(k_{f,i} \prod_{k=1}^K c_k^{\gamma'_{ki}} - k_{b,i} \prod_{k=1}^K c_k^{\gamma''_{ki}} \right) \tag{2}$$

式中： γ'_{ki} 、 γ''_{ki} 分别表示第 i 个基元反应中第 k 种物质的正、逆反应计量系数； c_k 为组分 k 的浓度； $k_{f,i}$ 、 $k_{b,i}$ 分别表示第 i 个基元反应的正、逆反应速率常数，遵循 Arrhenius 定律

$$k_{f,i} = A_{f,i} T^{\beta_{f,i}} \exp(-E_{f,i}/RT) \tag{3}$$

式中： $A_{f,i}$ 表示第 i 个正反应的指前因子； $\beta_{f,i}$ 表示第 i 个正反应的温度指数； $E_{f,i}$ 表示第 i 个正反应的活化能。

对于氢气-空气的预混系统，采用 9 种组分和 19 个化学反应的详细化学反应机理^[11]，反应组分分别为 H、O、H₂、OH、H₂O、O₂、HO₂、H₂O₂ 和 N₂。

2.2 计算方法

控制方程(1)描述了 2 个物理过程，即流动过程和化学反应过程。采用分裂格式对方程(1)进行求解，对流动过程，采用二阶精度的波传播算法^[12]求解；对化学反应过程，采用基于 Gear 格式的 LSODE 程序进行计算；时间采用附加半隐的二阶 Runge-Kutta 法求解。该计算格式已经在文献[13]中得到验证。

计算时，对流项采用量纲一化(量纲一的参考值为：压力 $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$ ，温度 $T_0 = 298.15 \text{ K}$ ，特征长度 $L_0 = 0.10 \text{ m}$)，化学反应源项采用有量纲。本文在讨论中各量均采用量纲一。

2.3 算例

图 2(a) 为爆轰燃烧室的示意图。内径为 $3.2L_0$ ，外径为 $4.0L_0$ ，高度为 $1.8L_0$ 。燃料紧贴内壁面由上底面注入，如图中深色部分所示，燃料区宽度为 $0.2L_0$ ，厚度为 $0.2L_0$ 。

计算空间如图 2(b) 所示，网格数为 $\xi \times \eta \times \zeta = 40 \times 400 \times 120$ 。初始时刻，点火区长度为 $0.3L_0$ ，点火温度为 $T_i = 5.0T_0$ ，压力 $p = 10.0p_0$ ，其他区域的温度和压力分别为 T_0 和 p_0 。前后端面采用周期边界条件，下底面采用出口边界条件，其余各端面都采用无催化、绝热的固壁边界条件。预混气为等当量的氢气-空气混合物。

3 结果讨论

3.1 旋转爆轰波的三维流场

对于一端封闭一端敞开的圆环燃烧室，如果仅于燃烧室封闭端的内壁处，充填可燃混合物(见图 2(a) 深色部分)，单向起爆后，则可在可燃混合物中，形成绕圆环燃烧室中心轴旋转的爆轰波，即旋转爆轰。旋转爆轰的流场是三维的，顺时针旋转的爆轰波，流场的压力分布计算结果如图 3(a) 所示。由图可见，爆轰波波后，出现了由

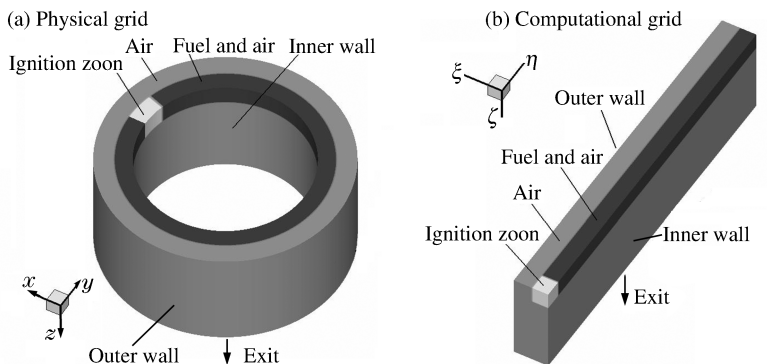
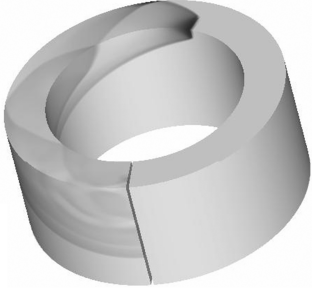


图 2 计算区域示意图

Fig. 2 Schematic of computational domain

透射激波和反射激波组成的复杂波系。图 3(b)为 3 个不同壁面上的压力阴影等位图。A 表示封闭端壁面, B 表示燃烧室外壁面, C 表示燃烧室内壁面, 虚线表示初始时刻的可燃混合气与空气的交界面。可燃气体中传播的爆轰波与外侧空气作用, 形成透射激波, 该激波在外壁面反射后, 透过空气与爆轰产物的接触界面, 再于内壁面反射, 这种内外壁面间的反复反射, 最终形成激波系列。爆轰波和反射激波的波后高压气体, 由于向敞开端膨胀, 形成向燃烧室外传播的透射激波。

(a) Three-dimensional structure



(b) Plane structure

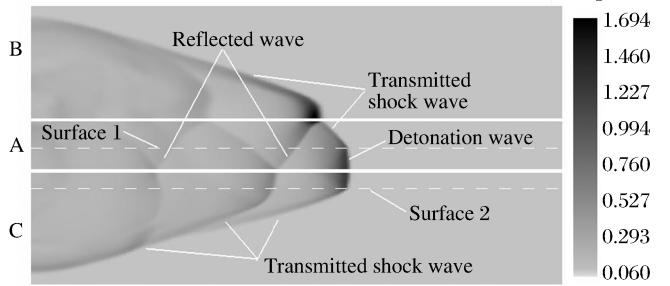


图 3 $t=0.50$ 时流场的压力分布

Fig. 3 Pressure distribution in the flow field at $t=0.50$

图 4 为 3 个不同壁面上的温度阴影等位图, 图中虚线表示初始时刻的可燃混合气与空气的交界面。该图可分为 3 个区域: 波前未扰动区域, 温度最低; 波后爆轰产物区域, 相对温度最高; 经激波压缩后的空气, 温度较波前温度有所升高。在封闭端壁面 A, 由于膨胀和离心力的作用, 爆轰产物已进入燃烧室的外侧。在燃烧室内壁面 C, 爆轰产物向敞开端运动, 进而泄出。在燃烧室外壁面 B, 爆轰产物几乎未抵达燃烧室外壁面。

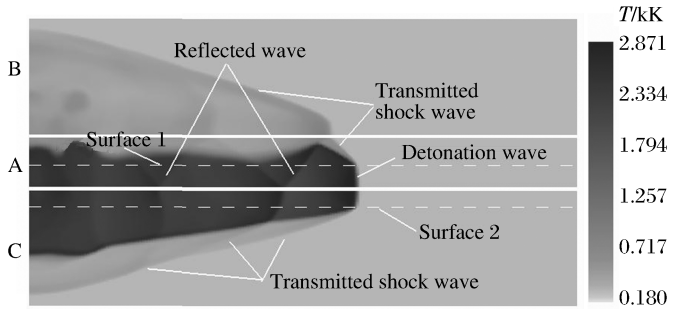


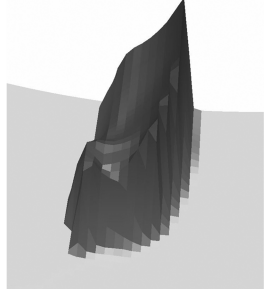
图 4 $t=0.50$ 时流场的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in the flow field at $t=0.50$

3.2 侧向稀疏波对爆轰反应区的影响

由于可燃混合物仅充填在燃烧室内侧, 所以与空气接触的爆轰反应区将受到侧向稀疏波的影响。图 5 为爆轰波附近局部区域的 OH 质量分数分布图, 反映了爆轰反应区的宽度和形状, 其中图 5(a)为 OH 三维分布图, 图 5(b)为封闭端壁面上的等 OH 图。由图 5(a)可见, 沿着爆轰波阵面, OH 的质量分数分布是不均匀的, 由内壁面向外壁面降低, 这说明, 在侧向稀疏波影响下, OH 质量分数变稀, 反应速率下降。由图 5(b), 沿爆轰阵面, 反应区的宽度是变化的, 由内壁面向外, 开始反应区的宽度变化不大, 然后逐步增加, 与空气交界处, 宽度最大。此外, 爆轰波阵面是弯曲的, 说明稀疏波影响下, 外侧的爆轰波传播速度低于内侧的。

(a) Three-dimensional structure



(b) Plane structure

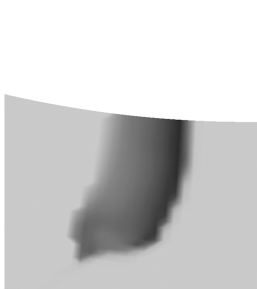


图 5 爆轰波阵面 OH 质量分数分布

Fig. 5 Distribution of the OH mass fraction in the region of the detonation front

3.3 旋转爆轰的亏损

图6为封闭端壁面A上,沿爆轰波的阵面,波后压力和温度变化曲线。图中实线为本文数值计算值;虚横线是利用Gordon-McBride程序^[14]计算的CJ爆轰值,有 $T_{CJ} = 9.91T_0$, $p_{CJ} = 15.18p_0$;虚竖线表示初始时刻的可燃混合气与空气的交界面。由图可见,近内壁的爆轰波由于未受到侧向稀疏波的影响,更接近于理想的CJ爆轰波。而外侧爆轰波,在稀疏波影响下,压力和温度与CJ值相比都有不同程度的下降,这与爆轰波的强度或者爆轰波的传播速度的下降有关,这种现象称为侧向稀疏波影响下的爆轰亏损。

图7为封闭端壁面A上,不同径向截面的压力和温度分布剖面图,进一步描述了稀疏波导致的爆轰亏损。由图可知,随着半径的增加,爆轰强度的衰减特征。

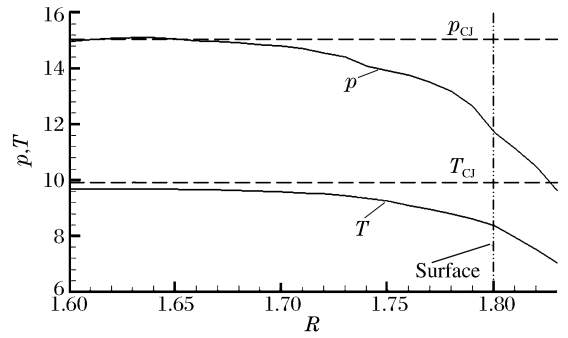
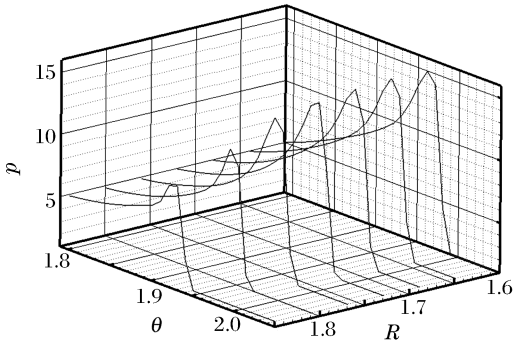


图6 沿径向爆轰波阵面温度和压力变化
Fig. 6 Pressure and temperature distribution of the detonation front along the radial direction

(a) Profile of pressure



(b) Profile of temperature

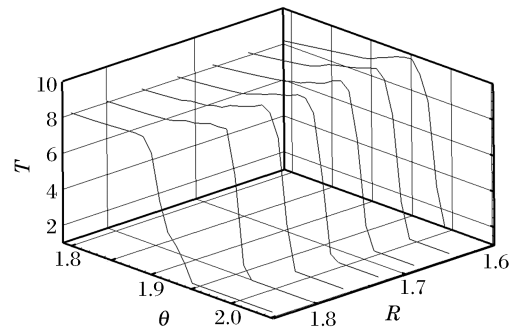


图7 爆轰波阵面压力和温度的剖面图

Fig. 7 Profile of pressure and temperature in the region of the detonation front

4 小结

对于一端封闭一端敞开的圆环燃烧室,如果将可燃混合物充填在燃烧室封闭端的内壁处,经单向起爆,可形成绕燃烧室中心轴旋转的爆轰波,爆轰波具有不同于经典爆轰模型的特殊结构。基于三维多组分的Euler方程,对圆环燃烧室内的旋转爆轰波进行了数值模拟。依据计算结果,有如下结论:

- (1) 旋转爆轰波的流场是三维的,存在由透射激波和反射激波组成的复杂波系。
- (2) 在侧向稀疏波影响下,爆轰波化学反应区发生显著变化,反应速率下降,反应区宽度增加。
- (3) 侧向稀疏波导致爆轰亏损,与理想的CJ爆轰值相比,爆轰波强度和爆轰参数都有所下降。

参考文献:

- [1] Roy G D, Frolov S M, Borisov A A, et al. Pulse detonation propulsion: Challenges, current statues and future perspective[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004,30:545-672.
- [2] Voitsekhovskii B V. Stationary detonation[J]. Doklady Akademii Nauk USSR, 1959,129(6):1254-1256.
- [3] Mikhailov V V, Topchian M E. To the studies of continuous detonation in an annular channel[J]. Combustion, Explosion, and Shock Wave, 1965,1(4):12-14.
- [4] Bykovskii F A, Mitrofanov V V. Detonation combustion of a gas mixture in a cylindrical chamber[J]. Combustion, Explosion, and Shock Wave, 1980,16(5):570-578.
- [5] Bykovskii F A, Mitrofanov V V. A continuous spin detonation in liquid fuel sprays[C]//Roy G D. Control of detonation processes. Moscow: Elex-KM, 2000:209-211.
- [6] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous spin detonations[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006,22(6):1204-1216.

- [7] Lentsch A, Bec R, Serre L, et al. Overview of current French activities on PDRE and continuous detonation wave rocket engines[R]. AIAA 2005-3232, 2005.
- [8] Daniau E, Falempin F, Bykovskii F A, et al. Continuous detonation wave propulsion systems: First step toward operational engines[R]. ISABE 2005-1302, 2005.
- [9] Zhdan S A, Bykovskii F A, Vedernikov E F. Mathematical modeling of a rotating detonation wave in a hydrogen-oxygen mixture[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Wave*, 2007, 43(4):449-459.
- [10] 姜孝海, 范宝春, 董刚, 等. 旋转爆轰流场的数值模拟[J]. *推进技术*, 2007, 28(4):403-407.
JIANG Xiao-hai, FAN Bao-chun, DONG Gang, et al. Numerical investigation on the flow field of rotating detonation wave[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(4):403-407.
- [11] 归明月, 范宝春, 于陆军, 等. 聚心火焰与激波相互作用的数值研究[J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(3):204-209.
GUI Ming-yue, FAN Bao-chun, YU Lu-jun, et al. Numerical investigations on interaction of implosion flame with shock[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(3):204-209.
- [12] Leveque R J. Wave propagation algorithms for multidimensional hyperbolic systems[J]. *Journal of Computational Physics*, 1997, 131(2):327-353.
- [13] GUI Ming-yue, FAN Bao-chun, DONG Gang, et al. Interaction of a reflected shock from a concave wall with a flame distorted by an incident shock[J]. *Shock Waves*, 2009, 18(6):487-494.
- [14] Gordon S, McBride B J. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and application. I. Analysis[R]. NASA-RP-1311, 1994.

Three-dimensional structure of rotating detonation and effect of lateral rarefaction waves*

ZHANG Xu-dong, FAN Bao-chun, GUI Ming-yue, PAN Zhen-hua
(*Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China*)

Abstract: Based on the multicomponent three-dimensional Euler equation, the phenomena of rotating detonation in the annular combustor were simulated numerically, and the three-dimensional structure of the rotating detonation wave and the effects of the lateral rarefaction waves on the detonation wave front were discussed. The numerical results show that the rotating detonation wave can propagate steadily in the layer of premixed gas, and the detonation wave front is distorted due to the lateral rarefaction waves. Compared with the ideal CJ detonation, the intensity and parameters of rotating detonation wave both decline somewhat.

Key words: mechanics of explosion; three-dimensional structure; three-dimensional Euler equation; rotating detonation; lateral rarefaction waves

* Received 7 May 2009; Revised 17 November 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10872096)

Corresponding author: FAN Bao-chun, bcfan@mail.njust.edu.cn