

甲烷 空气中对撞射流火焰的实验和数值研究^{*}

归明月, 范宝春, 叶经方, 董 刚

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘 要: 以甲烷/空气为研究对象, 利用 YA-16多闪光高速照相机对碰撞射流火焰进行了实验研究。基于带化学反应的二维轴对称 Navier-Stokes 方程, 采用带有 Superbee 限制函数的波传播算法, 对该现象进行了数值模拟。结果表明, 对撞前, 由于 Helmholtz 不稳定的作用, 射流火焰演变成带有涡环的蘑菇云。碰撞后, 在其诱导的流场和涡的作用下, 形成的火焰杆的直径基本没有变化, 火焰盘则沿着碰撞平面往四周发展, 而其厚度逐渐变薄。计算结果和实验照片进行了比较, 两者符合得较好。

关键词: 对撞射流火焰; 阴影照片; 数值仿真

中图分类号: O382 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2008) 06-0651-05

Experiment and numerical research of impinging jet flames of methane/air

GU Ming-yue, FAN Bao-chun, YE Jing-fang, DONG Gang

(National Key Lab. of Transient Physics, Nanjing Univ. of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract Using YA-16 high-speed photograph technique, a series of experimental shadowgraph images of impinging jet flame from methane/air were recorded. Based on the two-dimensional axisymmetric Navier-Stokes equations coupling with chemical reactions, this phenomena was numerically studied by using wave propagation algorithm with Superbee limiter. The results show that before impinging jet flames become mushroom cloud with vortex because of Helmholtz instability. After impinging with influence of the flow and vortex induced the flame, the diameter of flame pole remains, and flame disc expands around impinging plane and its thickness becomes thin. The calculated results are compared with the experiments, and good agreements have been obtained.

Key words Impinging jet flame; Shadowgraph; Numerical simulation

1 引 言

由于理论研究和实际应用方面的价值, 惰性系统或反应系统的射流碰撞一直受到人们的关注。反应系统中的碰撞射流研究, 大多集中于空气中火焰射流对平板的垂直碰撞。此时, 预混的可燃物由喷嘴喷出, 以射流形式撞击与其垂直的平板 (平板可以被冷却也可不作处理)。与流动相比, 由于火焰对各种影响因素更敏感, 因此, 在射流出口速度、平面距离以及点火位置等诸多因素的影响下, 火焰可以具有不同的燃烧形态, Zhang^[1,2]对该情形进行了系统的研究, 并

将火焰形态分为环状、盘状和锥状等八类。

当脉冲爆震发动机 (PDE) 的脉冲频率很高时, 它才具有应用价值, 这要求爆震管足够短。PDE 的点火能量常为毫焦级, 故必须在较短的距离内完成 DDT 过程, 才能保证 PDE 所需的频率。人们采用许多方法强化 DDT 过程, 例如设置弹簧^[3]、圆管^[4]或多层孔板^[5]等, 但这些手段皆因在管内添置了附加物, 从而具有一定的负面影响。Levin^[6]提出一种方法, 先让燃料和氧化剂部分反应, 再以射流的方式从四周射入充满预混可燃气体的共振腔中。此时, 腔内将发生火焰的聚心对撞和一系列的激波在轴线与壁面的反

* 收稿日期: 2007-09-27; 修订日期: 2008-05-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (10472047); 北京理工大学爆炸科学与技术重点实验室开放基金 (KFJJ06-3)。

作者简介: 归明月 (1977—), 男, 博士生, 研究领域为燃烧、爆轰等。Email: guimingyue@yahoo.com.cn

射以及各式激波与火焰的相互作用,这些最终导致爆震的生成。Ivett^[7]对此进行了初步探讨,本文^[8]也曾通过数值方法,对共振腔中的聚心火焰与激波的相互作用过程进行了模拟和讨论。

本文通过实验和数值计算,着重研究充满预混可燃气的燃烧室中,两股射流火焰的对撞现象,讨论可燃气体中,射流火焰对撞的发展变化规律。数值计算结果和实验照片比较吻合,对碰前,火焰呈蘑菇云状。对碰后,杆部并未出现因火焰传播而变粗的现象,头部则沿着碰撞平面迅速向四周扩展,且厚度变薄。对碰部分呈圆盘状,盘的周围存在突起的涡环。这与空气环境下,对碰射流火焰中出现的盘状火焰类似。

2 实验研究

实验系统如图 1 所示,由实验装置、光学测量系统和控制系统组成。

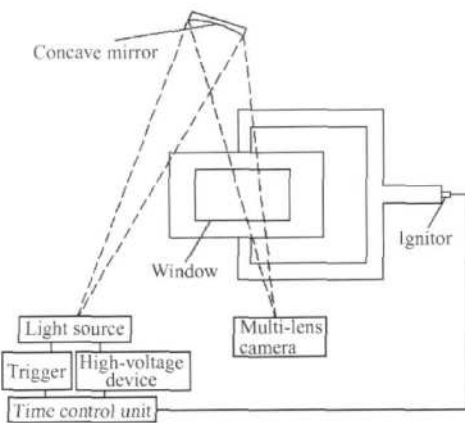


Fig 1 Schematic of test facility

实验装置由点火室、火焰加速管和装有玻璃视窗的燃烧室组成。先将整个实验装置抽成真空,然后充入预混的可燃气体(本实验充入当量比为 1 的甲烷/空气混合物)。实验时,用火花塞使点火室内的气体燃烧,火焰在其中充分发展后,通过分叉管分为两部分,分别在两个支路管道中传播。被管道加速的火焰从两条管路同时传至燃烧室,再通过位于燃烧室上下壁面的两个对称入口,以火焰射流的方式进入燃烧室,形成对撞射流火焰。通过安装于燃烧室两侧的玻璃观察窗口,利用高速摄影系统可以记录对撞射流火焰相互作用过程中的流场变化。

光学测量系统由 YA-16 多闪光高速照相机和其它辅助设备组成。多闪光光源在时序控制器的作用下依次闪光,经凹面反射镜反射后,光线穿过待研究的流场,最终使照相机镜头后面的底片曝光,从而得到不同时刻火焰对撞的阴影照片。

控制系统用于控制和协调火花塞与多闪光光源。火花塞点火时,同时触发时序控制器,使其按照预先设定的延时时间来驱动触发器和高压发生器,进而使多火花光源在火焰发生对撞过程中依次发光,保证相机可以拍摄火焰碰撞的照片。

3 数值模拟

本文采用二维轴对称的带化学反应的可压缩的 Navier-Stokes 方程

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

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \vdots \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ u(p + E) \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v^2 + p \\ \rho uv \\ v(p + E) \end{bmatrix}$$

$$F_D = \begin{bmatrix} -D\rho(\partial Y_1/\partial x) \\ \vdots \\ -D\rho(\partial Y_k/\partial x) \\ -\tau_{xx} \\ -\tau_{xy} \\ -\frac{\eta}{c_p}\frac{\partial h}{\partial x} - u\tau_{xx} - v\tau_{xy} \end{bmatrix}, W = \frac{v}{y} \begin{bmatrix} \rho \\ \vdots \\ \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ p + E \end{bmatrix}$$

$$G_D = \begin{bmatrix} -D\rho(\partial Y_1/\partial y) \\ \vdots \\ -D\rho(\partial Y_k/\partial y) \\ -\tau_{yx} \\ -\tau_{yy} \\ -\frac{\eta}{c_p}\frac{\partial h}{\partial y} - u\tau_{yx} - v\tau_{yy} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_k \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\tau_{xx} = \mu \left(\frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right),$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \tau_{yy} = \mu \left(\frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

式中 ρ 为混合物的密度, u 和 v 分别为 x 和 y 方向的速度分量, p 为体系的压力。单位体积的总内能 $E = \rho_0 \int_0^T c_v dT + \frac{1}{2} \rho(u^2 + v^2) + \sum_{k=1}^K \rho_k h_k^0(0)$, $\rho = \sum_{k=1}^K \rho_k$, $\rho_k = \rho Y_k$, $p = \sum_{k=1}^K \frac{\rho_k}{M_k} RT$, $c_v = \sum_{k=1}^K X_k c_{vk}$, c_{vk} 为组分 k 的等容比热, ρ_k , M_k , Y_k , X_k , $h_k^0(0)$ 分别为组分 k 的质量密度、摩尔质量、质量分数、摩尔分数、标准生成焓, μ 和 η 为

分别为体系的粘性系数、导热系数和扩散系数, T 为体系的温度, W 为轴对称修正源项。 ω_k 为组分 k 的净生成速率

$$\omega_k = \sum_{i=1}^I (Y_{ki}'' - Y_{ki}') \cdot (k_{fi} \prod_{k=1}^K [X_k]^{Y_{ki}'} - k_{bi} \prod_{k=1}^K [X_k]^{Y_{ki}'}) \quad (2)$$

式中 Y_{ki}' , Y_{ki}'' 分别表示第 i 个基元反应中组分 k 的正、逆反应计量系数; $[X_k]$ 为组分 k 的摩尔浓度; k_{fi} , k_{bi} 分别表示第 i 个基元反应的正、逆反应速率常数, 它们遵循 Arrhenius 定律

$$k_{fi} = A_{fi} T^{\beta_{fi}} \exp \left[-\frac{E_{fi}}{RT} \right] \quad (3)$$

式中 A_{fi} 表示第 i 个正反应的指前因子; β_{fi} 表示第 i 个正反应的温度指数; E_{fi} 表示第 i 个正反应的活化能。

本文采用甲烷/空气氧化反应的详细动力学机理, 由 19 个基元反应和 14 种组分构成。考虑到不同过程特征时间的差异所引起方程的刚性, 数值求解时采用分裂格式, 即将控制方程中的流动项和化学反应项分开处理。对流过程采用带有 Superbee 限制函数, 考虑横传波影响的波传播算法^[9], 粘性项采用二阶中心差分格式, 轴对称项采用二阶 Runge-Kutta 法, 化学反应过程采用基于 Gear 算法的隐式方法。

数值计算采用的模型见图 2(a), 由火焰加速管和燃烧室组成。加速管内的可燃气体的点火燃烧, 并在管内加速后, 以一定速度从上下两侧进入燃烧室, 以致发生对撞。火焰碰撞面在图中记作 mn , 设对撞过程关于 ef 轴对称, 故采用图 2(b) 所示的计算区域, 其中区域 a 为火焰加速管, 区域 b 为燃烧室。

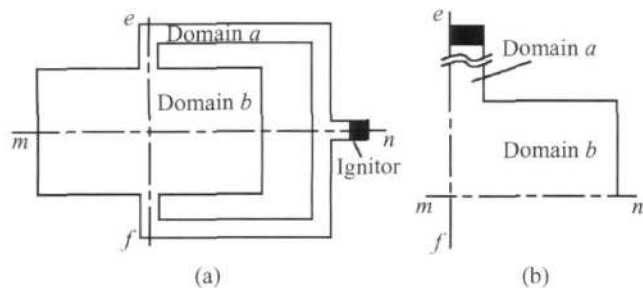


Fig. 2 Computational domain and initial conditions

初始时刻, 区域 a 和区域 b 充满温度为 300 K, 压力为 0.1 MPa 的等当量比的甲烷/空气预混气, 点火区域的温度为 1 500 K, 压力为 0.11 MPa。区域 a 右端和上端为无滑移边界, 左端为轴对称边界, 下端和区域 b 相通。区域 b 上端部分和区域 a 相通, 其余部

分和右端为无滑移边界, 左端为轴对称边界, 下端为平面对称边界。

4 结果与讨论

图 3 为实验阴影照片。根据照片记录的图像, 由燃烧室上下壁面同时进入的射流火焰已经发生对撞, 此时, 火焰由火焰杆和火焰盘组成。在随后的发展过程中, 火焰杆的直径并未发生显著变化, 火焰盘的厚度略微变薄 (见图 4), 火焰主要沿碰撞对称面向四周扩展, 从而使火焰盘不断扩大。火焰盘的周边带有涡环, 火焰阵面带有明显的湍流特征。

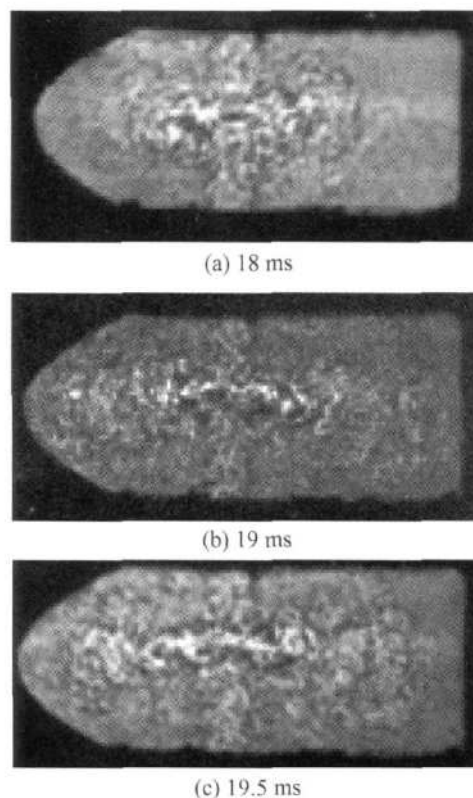


Fig. 3 Instantaneous shadowgraph images of impinging flame jets

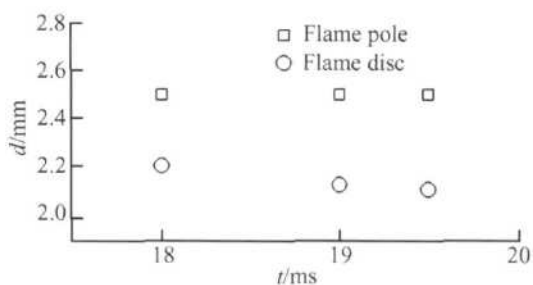


Fig. 4 Thickness of flame pole and flame disc at the different time

图 5 为计算结果。阴影图表示温度分布, 用来描述火焰形状; 箭头表示速度分布, 用来描述流场。火焰对未燃物的压缩作用, 诱导前方质点的运动。因此, 火焰是在一个具有复杂流动的流场中传播的, 这

种背景流场在很大程度上决定着传播火焰的形状。当火焰以射流形式从区域 a 进入燃烧室时, 由于射流火焰与周围未燃气体的切向速度差所导致的 Helmholtz 不稳定, 火焰逐渐演变为带有涡环的蘑菇云形状, 涡核位于火焰内部, 如图 5(a) 和 (b)。火焰的传播受到旋涡和法向速度的影响, 蘑菇云的杆部拉长, 头部增大, 涡核逐渐外移, 如图 5(c) 和 (d)。在图 5(e) 中, 射流火焰开始对撞, 此时, 涡核已离开火焰, 卷吸作用减小。随后, 火焰杆侧面, 流场质点从碰撞平面的法向流向碰撞平面, 即流动方向与当地火焰阵面平行, 故火焰杆径向传播速度很小, 直径没有显著变化。碰撞平面附近, 法向速度很小, 切向速度占主

导地位, 从碰撞滞止点向外, 切向速度的分布由零增加至极大值, 再逐步变小。这种与火焰阵面的相向运动使火焰沿切向迅速扩展。火焰在碰撞面法向下游的阵面, 即面对燃烧室壁面的火焰阵面, 质点以一定的速度向着火焰阵面相对流动, 这使得火焰很难向下游传播, 质点速度足够大时, 火焰反而向碰撞平面收缩, 从而使火焰盘变薄, 如图 5(f) 和 (h)。实验照片图 3(a), (b) 和 (c) 大致与计算结果的图 5(f), (g) 和 (h) 对应, 两者所描述的对撞射流火焰的发展变化趋势是一致的。该火焰与空气中对撞射流火焰分类中的盘状类火焰较为相似。

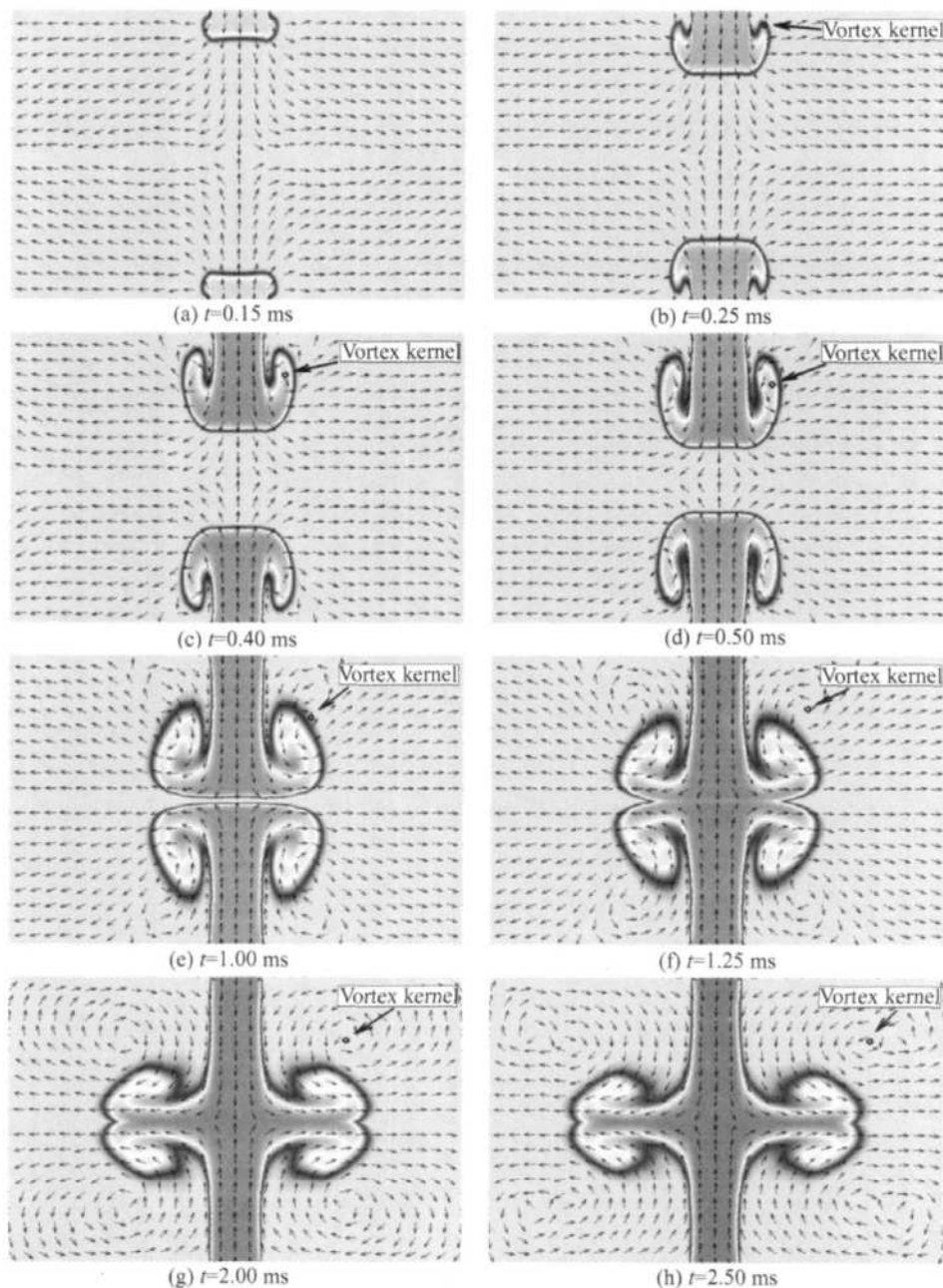


Fig 5 Velocity field and temperature variation (shade)

(下转第 661 页)

- premixed turbulent flames [J]. *Combustion and Flame*, 1989, 77(3).
- [3] 耿 辉. 超声速燃烧室中凹腔上游横向喷注燃料的流动、混合与燃烧特性研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [4] 曹建福, 韩崇昭, 方洋旺. 非线性系统理论及应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.
- [5] Kennel M B. Determining minimum embedding dimension using a geometrical construction [J]. *Physical Review*, 1992, 45(5).
- [6] Georgiadis N J, Alexander J I D, Reshotko E. Hybrid RANS-LES simulations of supersonic turbulent mixing [J]. *AAA Journal*, 2003, 41(2).
- [7] Arunajatesan S, Sinha N. Unified unsteady RANS-LES simulations of cavity flow fields [R]. *AAA* 2001-0516.
- [8] Rmurray G S E. Subgrid scale models for compressible large eddy simulations [J]. *Theoret Comput Fluid Dynamics*, 2000, 13(5).
- [9] Lenoir and E. Subgrid scale models for large eddy simulations of compressible wall bounded flows [J]. *AAA Journal*, 2000, 38(8).
- [10] Yoshizawa A K H. A statistically derived subgrid scale kinetic energy model for large-eddy simulation of turbulent flows [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1985, 54(2).
- [11] Joseph M, Powers S P. Accurate spatial resolution estimates for reactive supersonic flow with detailed chemistry [J]. *AAA Journal*, 2005, 45(5).
- [12] Blin L, Hadjadj A. Large eddy simulation of compressible turbulence flows [R]. *AAA* 99-3358.
- [13] Gamier E S P. Large eddy simulations of shock / boundary-layer interaction [J]. *AAA Journal*, 2002, 40(10).

(编辑: 梅 瑛)

(上接第 654 页)

5 结 论

本文通过实验和数值模拟, 研究了甲烷 / 空气预混气中火焰射流的对撞, 得到的计算结果和实验阴影图像比较吻合, 清晰描述了该现象的流场发展变化过程。火焰射流在进入燃烧室时, 由于 Helmholtz 不稳定的作用, 发展成带有涡环的蘑菇云, 涡核位于火焰内部, 随着蘑菇云杆部的拉长, 涡核逐渐外移。碰撞后, 在流场的作用下, 火焰杆的直径没有显著变化, 而在碰撞平面上火焰往四周发展, 形成盘状, 其厚度逐渐变薄。

参考文献:

- [1] Zhang Y, Bray K N C. Brief communication characterization of impinging jet flames [J]. *Combustion and flame*, 1999, 116(4): 671~ 674.
- [2] Foat T, Yap K P, Zhang Y. The visualization and mapping of turbulent premixed impinging flame [J]. *Combustion and flame*, 2001, 125(1-2): 839~ 851.
- [3] Lu F K, Meyers J M, Wilson D R. Experimental study of a pulse detonation rocket with Shchelkin spiral [A]. Jiang Z. *Proceedings of the 24 th International Symposium on Shock Waves Vol2* [C]. Beijing, China: Tsinghua University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, 825~ 830.
- [4] Roy G D, Frolov S M, Borisov A A, et al. Pulse detonation propulsion challenges: current status and future perspective [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(6): 545~ 672.
- [5] Tangirala V E, Dean A J, Chapin D M. Pulsed detonation engine processes: experiments and simulations [J]. *Combust Sci and Tech*, 2004, 176 (10).
- [6] Levin V A, Nechaev J N, Tarasov A I. A new approach to organizing operation cycles in pulse detonation engines [A]. *High-Speed Deflagration and detonation: fundamentals and Control* [C]. Moscow 2001: 223~ 238.
- [7] Leyva Ivett A, Venkat Tangirala, Dean Anthony J. Investigation of unsteady flow field in a 2-stage PDE resonator [J]. *AAA* 2003-715.
- [8] 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).
- [9] Leveque R J. Wave propagation algorithms for multidimensional hyperbolic systems [J]. *J Computational Physics*, 1997, 131(2): 327~ 353.

(编辑: 梅 瑛)