

文章编号: 1001-1455(2005)05-0445-06

爆轰波通过扩张喷管的双曝光全息 实验和数值研究*

李辉煌, 朱雨建, 杨基明

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 结合实验和数值模拟方法, 对以脉冲爆轰发动机为背景的爆轰波通过扩张喷管的流动进行了系列研究。实验采用双曝光全息干涉方法对爆轰波绕射流场进行测量, 得到了比传统的纹影法更清晰和可定量化的照片。发展了基于非结构四边形网格自适应有限体积程序, 结合基元化学反应模型对扩张喷管中爆轰化学反应流场进行了数值模拟, 模拟结果与实验照片吻合较好。实验和数值模拟结果表明, 爆轰波绕射具有许多和激波绕射不同的流场特征, 其中包括二次起爆现象、化学反应面与前导激波相脱离而引起的复杂流场等, 同时初始压力和扩张角度变化也对爆轰波绕射过程产生较大影响, 初始压力越低, 化学反应区和前导激波分离现象越明显, 且前导激波的曲率越大。

关键词: 爆炸力学; 爆轰波绕射; 双曝光全息干涉; 自适应非结构网格; 基元化学反应模型

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引 言

脉冲爆轰发动机(pulse detonation engine, 简称 PDE)由于具有结构简单、运行速度范围宽、热效率高、推重比大等优点, 可望成为新一代航空、航天动力装置的重要选择之一。目前国内外诸多研究机构正积极实施 PDE 的研究计划, 建立相应实验平台, 并进行了热力循环分析、推力实验和爆轰数值模拟等相关研究^[1~3], 为脉冲爆轰发动机的应用铺平道路。为了充分发挥 PDE 的优势和提高推进性能, 除了快速起爆问题之外, 非定常喷管流动问题也是需要解决的关键问题之一。对于喷管推进效能问题, 原则上, 当面积变化的喷管设计成出口压力与环境压力相等时其效率最高, 然而对于强非定常的脉冲爆轰发动机运行过程来讲, 这一要求无法得到满足, 因此建立在定常流动基础上的喷管设计的理论与概念已经不再适用。国外对于喷管对脉冲爆轰发动机推进性能影响方面的研究已开展不少^[1~2], 内容涉及到喷管形状、喉道与出口面积比、可燃物充填以及背压等, 但仍未得到可以接受的普遍规律性结论。

爆轰波绕射是脉冲爆轰发动机尾喷管流动中的一种重要现象, 爆轰波绕射过程中爆轰波的强度虽然有所下降, 但是由于实际作用面积增大, 从而其产生推力的可能得到提高。国内外对爆轰绕射的具体流场结构进行了许多研究, 其中 S. Ohyagi 等^[4]对爆轰波在突扩通道中传播的流场进行了高速纹影拍照, 国内杜扬等^[5]对其进行了相应数值模拟研究, 并分析了二次起爆的现象和机理, D. A. Jones 等^[6]结合基元化学反应模型对 H₂-O₂ 爆轰通过突扩管道的复杂现象进行了数值模拟。但是传统的纹影法记录的是流场密度梯度信息, 很难对流场进行定量分析, 一般多用于波系结构等流场定性分析。本文中采用双曝光全息干涉技术进行实验研究, 其中双曝光全息干涉方法记录的是流场密度信息, 可以对流场的密度信息进行定量分析, 同时还能够刻画波后流场的细致结构。此外, 采用基于非结构四边形网格自适应有限体积方法并结合基元化学反应模型对爆轰波绕射进行数值模拟, 通过数值模拟与实验的有效结合以期获得对爆轰波绕射过程、复杂流场结构及其作用机理的深刻认识。

* 收稿日期: 2004-10-09; 修回日期: 2005-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(10272099)

作者简介: 李辉煌(1977—), 男, 博士研究生。

2 实验装置

爆轰实验装置是由爆轰管、观察窗口、卸载段以及双曝光全息光路等构成,其中爆轰管为长度 5 m、截面尺寸为 40 mm×40 mm 的方管,观察窗口截面尺寸为 40 mm×80 mm,可以在观察窗口中放入不同楔角的楔块以形成不同形状的二维喷管(见图 1),实验中采用的是楔角分别为 20°、30°、45°、90°的直斜劈以形成扩张喷管。全息照相的光源为自行研制的红宝石脉冲激光器,曝光时间约 30 ns,实验中通过控制同步触发系统以便捕捉爆轰波瞬态流场。自行研制了点火器以实现混合气体的点火,该点火器点火能量为焦耳量级,除了点火可进行同步控制之外,点火频率可在 0~50 Hz 范围内调节,可以用于脉冲爆轰发动机的连续点火实验中(本实验仅用单次点火)。实验开始时,卸载段抽真空以消除爆轰波的冲击,爆轰管内充入摩尔比为 2:1 的氢气和氧气,混合气体初始压力分别为 73 kPa 和 36 kPa。当氢氧气体混合充分以后,首先对初始静止流场进行第一次全息曝光,然后点火器对氢氧混合气体进行引爆,产生的爆轰波向观察窗口传播,当爆轰波传播到第一个传感器时,爆轰波产生的压力信号经适当的时间延迟后触发第二次全息曝光,将全息干板再现以后即可得到两个时刻流场密度差的全息照片。由于采用了两次曝光全息干涉法,对实验观察窗等光学器件的要求以及实验操作的复杂程度都远比 M-Z 干涉仪简单,而且全息干板的分辨率也明显高于普通底片,有利于显示流场细节。

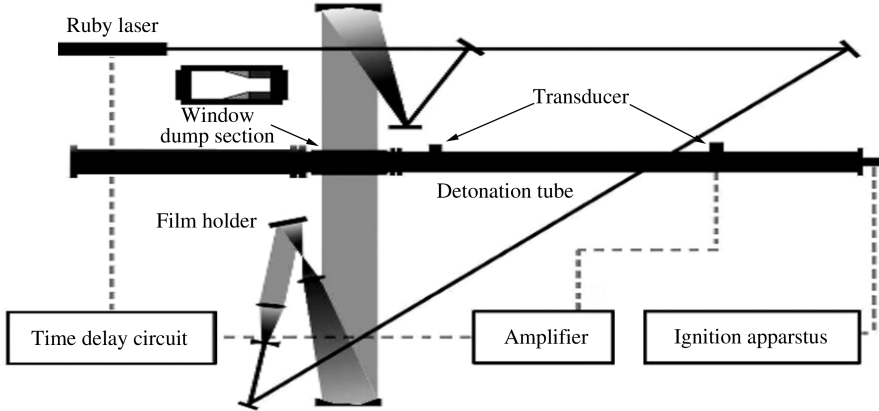


图 1 实验装置图

Fig. 1 The experimental set-up

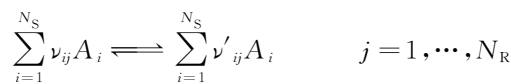
3 数值模拟方法

采用自适应非结构有限体积方法,结合基元化学反应模型对爆轰化学流场进行了数值模拟,计算中采用守恒形式的二维 Euler 控制方程

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S}$$

式中: $\mathbf{U}=[\rho, \rho Y_i, \rho u, \rho v, e]^T$; $\mathbf{F}=[\rho u, \rho Y_i u, \rho u^2 + p, \rho uv, u(e+p)]^T$; $\mathbf{G}=[\rho v, \rho Y_i v, \rho uv, \rho v^2 + p, v(e+p)]^T$; $\mathbf{S}=[0, \omega_i, 0, 0, 0]^T$ 。 ρ 为密度, u 、 v 为速度, Y_i 为各个组分的质量分数,单位质量气体总能 $e=\rho(u^2+v^2)/2+h-p$,其中各个组分的热力学参数和焓值 h 可通过 Chemkin^[7] 假设计算得到。

采用有限速率化学反应模型



式中: ν_{ij} 、 ν'_{ij} 分别为反应式两边第 j 个基元反应第 i 种组分化学计算(当量)系数, A_i 表示第 i 种化学组分。可得到源项中不同组分生成速率的表达式

$$\omega_i = M_i \sum_{j=1}^{N_R} (\nu_{ij} - \nu'_{ij}) \left[k_{tj} \prod_{k=1}^{N_S} \left(\frac{\rho_k}{M_k} \right)^{\nu_{kj}} - k_{bj} \prod_{k=1}^{N_S} \left(\frac{\rho_k}{M_k} \right)^{\nu'_{kj}} \right]$$

式中： k_{ij} 、 k_{ji} 分别是第 j 个化学反应的正、逆反应速率常数。

具体的化学反应模型采用 11 组分、23 步基元化学反应模型^[7]，具体化学组分包括了 H_2 、 O_2 、 OH 等。数值模拟过程中采用分裂时间步方法对流动控制方程和化学反应方程进行解耦分别处理，其中流动控制方程采用了基于非结构四边形网格的自适应有限体积方法^[8]进行求解，并采用 Muscle-Hancock 格式以达到时间二阶、空间二阶的求解精度，而相应的化学反应组分方程组则采用 DVode^[9] 程序进行求解以解决化学反应的刚性问题。

4 结果与分析

典型的从封闭端壁起爆的爆轰波是由前导激波、化学反应区、Taylor 波构成。波前静止混合气体经过前导激波的冲击压缩后压力温度迅速上升，氢氧化学反应迅速进行。化学反应释放的热量进一步支持着前导激波的传播，从而使爆轰波能以高马赫数向前稳定传播。当爆轰波传播进入扩张管道以后，前导激波的波阵面形状变化和激波绕射现象非常相似，但是爆轰波后却出现了许多跟激波绕射现象不同的特征。

首先对扩张角为 90° 的情形进行讨论。采用双曝光全息干涉法拍摄到的全息照片如图 2(a) 所示，其中氢氧混合气体初始压力 $p_0 = 73 \text{ kPa}$ ，氢气和氧气的摩尔比为 $2 : 1$ ，并且没有注入任何惰性气体。此时爆轰波已经从爆轰管内传播出来并且绕过 90° 拐角往出口传播，同时可以观察到 90° 拐角处诱导出一道漩涡，爆轰波撞击壁面后反射激波向管中心传播，同时在拐角附近产生了分叉，靠近拐角部分反射激波呈凸起状。计算得到相应的数值全息图像(密度等值线)如图 2(b) 所示，图像中呈现的主要流场特征与实验照片比较吻合，但是由于采用的是二维计算模型而实际上爆轰波存在着非常复杂的三维胞格结构，所以在细节上还是有一定差别。考虑同样马赫数的激波绕射现象，计算得到的密度云图示于图 3，对比图 2 和图 3 可以看出，无论是前导激波形状还是波后流场都存在显著的差别，其中高马赫数激波绕射过 90° 拐角后出现了普朗特-迈耶膨胀波系，而且反射激波被拐角处喷出的超声速气流吹向下游。

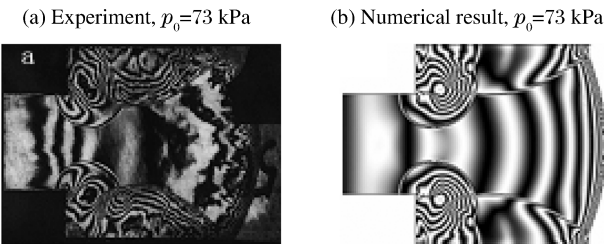


图 2 爆轰波绕射 90° 拐角后的全息干涉图

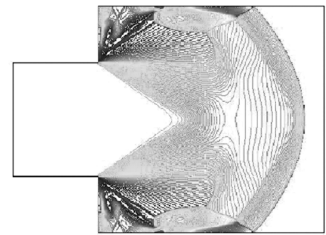


图 3 激波绕射的流场密度等值线

Fig. 2 Detonation wave diffraction through 90° divergent nozzle Fig. 3 The density contour of shock wave diffraction

同样对 90° 扩张角，初始压力 $p_0 = 36 \text{ kPa}$ 情形下得到的实验全息照片如图 4(a) 所示，相应的数值全息照片示于图 4(b)。此时爆轰波撞击壁面后形成规则反射，并且与初始压力 $p_0 = 73 \text{ kPa}$ 的全息照片相比较，其前导激波的弯曲程度比较大，而且前导激波后一段较厚的区域内具有复杂的条纹结构。通过数值模拟结果分析发现，在这个时刻绕射后的前导激波与化学反应面已经脱离，脱离的反应区与壁面规则反射激波相互作用，同时由于实验中爆轰波的三维胞格结构影响从而呈现非常复杂的干涉条纹分布。前导激波由于缺乏化学反应的支持，激波马赫数下降，尤其是靠近壁面附近的部分，从而使得前导激波弯曲程度更大。

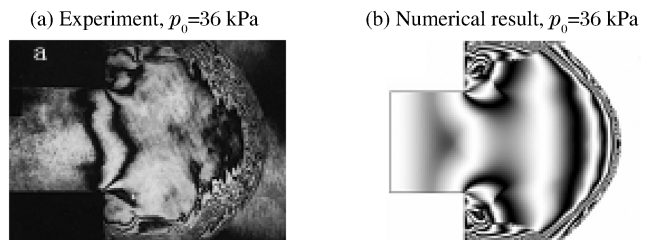


图 4 爆轰波绕射 90° 拐角的全息图

Fig. 4 Detonation wave diffraction through 90° divergent nozzle

为了进一步了解爆轰波后流场的作用过程,并对爆轰波绕射的流场特征形成机理深入分析,我们对数值模拟结果中化学组分进行了分析。发现爆轰波进入 90°扩张喷管绕射过程中前导激波强度不断减弱,当爆轰波传播一段距离后,壁面附近出现了前导激波和化学反应区的脱离,同时在角落区域形成氢气和氧气组分的高分布区且 OH 质量分数非常低,说明在这部分区域出现了爆轰熄火现象。爆轰波刚撞击底面时的 OH 质量分数分布如图 5(a)所示,可以发现在底壁面角落附近的 OH 质量分数非常低,该区域内 OH 质量分数约为 0.07%。将经过 7.08 μs 流场演化后的 OH 质量分数分布如图 5(b)所示,这时爆轰波已经撞击壁面并产生反射激波往上传播,在反射激波的作用下靠近壁面的化学反应面迅速发展,但是壁面角落内的 OH 质量分数仍然很低,此时 OH 质量分数约为 0.4%。但是经过短暂的 0.17 μs 后,可以发现这个时刻底壁面角落的 OH 质量分数迅速上升,达到 12%(见图 5(c)),说明在这个时刻发生了二次起爆。在壁面角落内二次起爆产生的能量注入下,壁面附近的反射激波迅速往上传播,然后与涡流相互作用后出现图 2(a)实验全息照片中观察到的反射激波凸起现象。

在 30°扩张角情形,充入初始压力 $p_0 = 65, 34$ kPa,摩尔比为 2 : 1 的氢氧混合气体,进行爆轰全息拍照得到的实验照片分别如图 6(a)、(c)所示,相应的数值全息图如图 6(b)、(d)所示。通过全息照片,可以观察到在喷管入口附近出现了一道二次激波,数值模拟结果分析显示这道二次激波开始出现在喷管入口的拐角附近并被吹向下游,经过一段时间后再向上游传播。比较不同初始压力条件下拍摄得到的全息照片,可以发现较低初始压力条件下由于化学反应区的加厚甚至和前导激波脱离,使得图 6(c)照片中前导激波波后的干涉条纹区明显变厚。

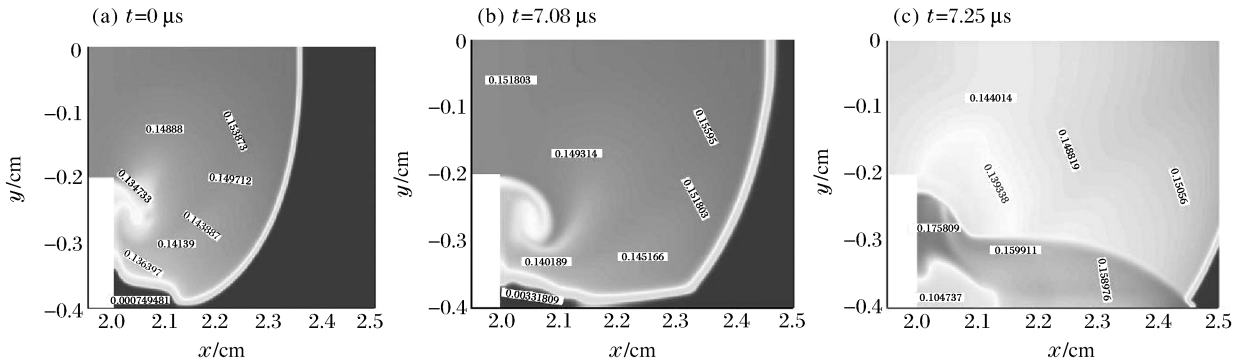


图 5 OH 质量分数云图
Fig. 5 The contour of OH mass fraction

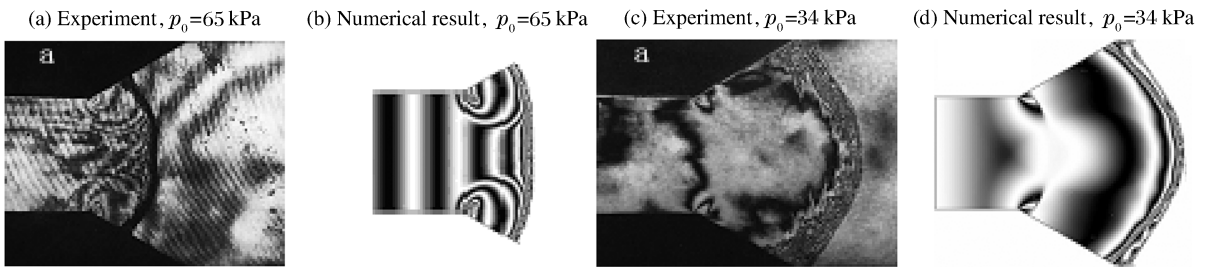


图 6 爆轰波绕射 30°拐角的全息图
Fig. 6 Detonation wave diffraction through 30° divergent nozzle

为了考察不同初始压力下扩张喷管对爆轰波绕射形状的影响程度,将 30°扩张角度初始压力 $p_0 = 65, 34$ kPa 情形下计算得到的爆轰波面形状示意于图 7(a),并且将壁面上压力比值示意于图 7(b)。可以发现在较低的初始压力条件下,扩张喷管对爆轰波影响程度更为显著,其中爆轰波面的弯曲程度随着传播距离增大而增大,同时爆轰波在壁面附近的波后压力与波前压力比值明显下降,前导激波强度明显减弱,从而导致爆轰波面往壁面倾斜的程度加剧,这主要是爆轰波绕射过程中,波后化学反应受前导激波强度衰减影响,且在较低初始条件下影响程度更为显著,从而使得波后化学反应对前导激波的能量支

持力度下降,爆轰波面更弯曲。

初始压力为 65 kPa、扩张角为 30°和 45°情形下得到的波面形状与壁面压力比值如图 8(a)、(b)所示,通过比较分析可以发现在爆轰波刚进入扩张管道时,45°扩张角情形下爆轰波后压力与波前压力比值下降得更厉害,但是随着爆轰波的向前传播,压力比值逐渐上升并且逐渐与 30°扩张角情形持平。

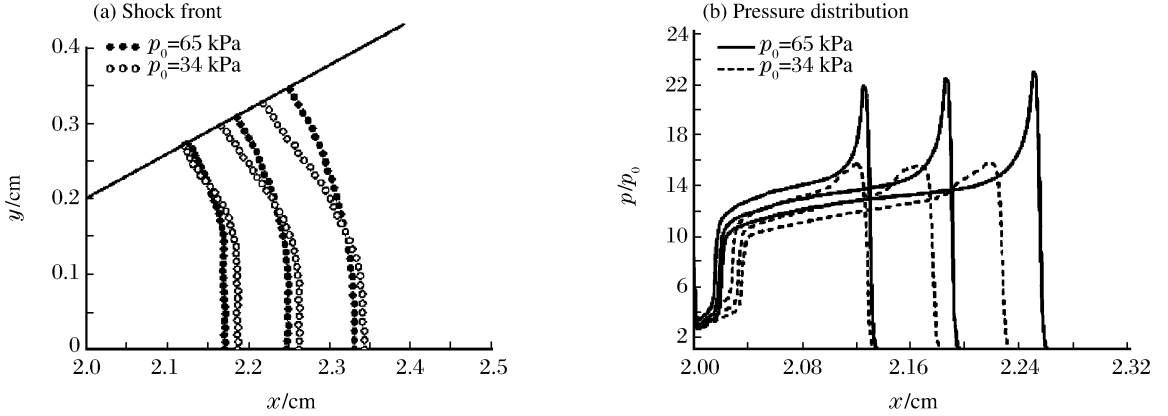


图 7 不同初始压力下爆轰波绕射的比较

Fig. 7 Comparison of detonation waves propagating through 30° divergent nozzle with different initial pressure

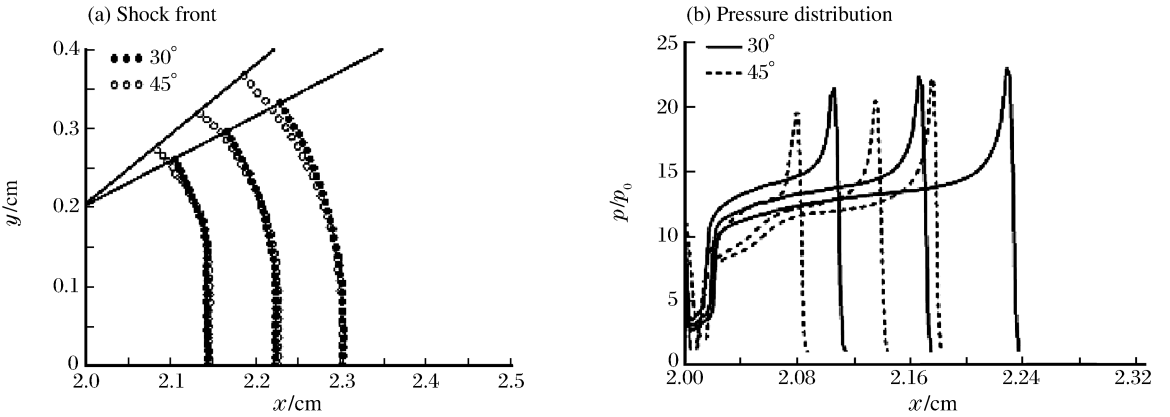


图 8 不同扩张角度下爆轰波绕射的比较

Fig. 8 Comparison of detonation waves propagating through different angle of divergence

5 结 论

(1) 成功采用了双曝光全息干涉方法对爆轰波绕射流场进行流场显示,实验结果表明双曝光全息干涉方法能够刻画爆轰波后流场的细致结构,为实验与数值模拟的结合提供了有利条件。

(2) 爆轰波绕射具有许多不同于激波绕射的流场特征。在较大扩张角(如 90°)情形下,由于绕射爆轰波在上下壁面的反射以及二次起爆等使得反射波远高于纯激波绕射时的强度,从而出现了反射激波回传至拐角时的凸起现象;在中等扩张角(如 30°)情形下爆轰波绕射流场中会出现二次激波;绕射过程中由于化学反应速率的下降乃至反应区与前导激波相脱离,使得爆轰波后的流场结构相当复杂。

(3) 在初始压力较低和扩张角较大等条件下,爆轰波绕射过程中化学反应区和前导激波脱离的现象更易发生,前导激波弯曲程度更为显著。

参考文献:

[1] Eidelman S. Pulse detonation engine: A status review and technology development road map[A]. AIAA Paper[Z]. 1997-2740.

[2] Kailasanath K. A review of research on pulse detonation engine nozzle[A]. AIAA Paper[Z]. 2001-3932.

- [3] 范玮, 严传俊, 黄希桥, 等. 新概念脉冲爆震发动机研究的最新进展[J]. 飞机设计, 2003, 2: 55-61.
FAN Wei, YAN Chuan-jun, HUANG Xi-qiao, et al. Recent advances in new-concept pulse detonation engine research[J]. Aircraft Design, 2003, 2: 55-61.
- [4] Ohyagi S, Obara T, Hoshi S, et al. Diffraction and re-initiation of detonations behind a backward-facing step[J]. Shock Waves, 2000, 10(1): 31-41.
- [5] 杜扬, 沈伟, 周建忠. 爆轰波在突扩通道中传播的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(1): 75-79.
DU Yang, SHEN Wei, ZHOU Jian-zhong. Numerical simulation of detonation wave propagating through the channels with suddenly expending section[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(1): 75-79.
- [6] Jones D A, Kemister G, Tonello N A, et al. Numerical simulation of detonation reignition in H_2-O_2 mixtures in area expansions[J]. Shock Waves, 2000, 10(1): 33-41.
- [7] Robert J Kee, Fran M Rupley, Meeks E, et al. Chemkin-III: A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical and plasma kinetics[R]. UC-405, SAND96-8216, Unlimited Release, 1996.
- [8] Sun M, Takayama K. Conservative smoothing on an adaptive quadrilateral grid[J]. Journal of Computational Physics, 1999, 150: 143-180.
- [9] Brown P N, Byrne G D, Hindmarsh A C, et al. VODE, a variable-coefficient ODE solver[J]. SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing, 1989, 10(5): 1038-1051.

Experimental and numerical investigation of gaseous detonation diffraction through a divergent nozzle based on double exposure holography

LI Hui-huang, ZHU Yu-jian, YANG Ji-ming*

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China*)

Abstract: An investigation of detonation wave diffraction over a divergent nozzle was carried out experimentally and numerically. The experiment was conducted in a detonation tube with double exposure holographic interferometric measurement, which offers better resolution and quantitative information as well, in comparison with conventional flow visualization such as schlieren method. Adaptive finite volume method combined with kinetic chemical reaction model was programmed to simulate the flow field. The numerical results agree fairly well with the experimental measurements. It was found that detonation diffraction has quite a lot of flow feature compared with shock wave diffraction, including the detachment of reaction front and leading shock wave and reignition phenomena. The divergent angle and initial pressure have great influence to the flow field of detonation diffraction. The lower initial pressure, the earlier the detachment of chemical reaction front and leading shock wave will happen.

Key words: mechanics of explosion; detonation diffraction; double exposure holographic; adaptive finite volume method; kinetic chemical reaction model

* Corresponding author: YANG Ji-ming
E-mail address: jmyang@ustc.edu.cn
Telephone: 0551-3607046