

导流块深度对楔形空腔内激波聚焦过程的影响

陈鑫^{1,2}, 谭胜¹, 王育虔¹, 何立明¹, 朱晓彬¹, 王川¹

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 为研究导流块深度对楔形空腔内径向入射激波聚焦过程的影响, 对导流块深度分别为 0、5、10、15 mm 的楔形空腔内激波聚焦的过程开展了实验和数值模拟研究。用高速 CCD(charge coupled device)拍摄了楔形空腔中气流流动的纹影照片, 用动态压力传感器测量了聚焦过程中流场的压力变化, 并用高精度的数值方法对该过程进行了数值模拟研究。通过比较不同导流块深度下激波反射聚焦的过程发现: 导流块深度越深, 前导激波和压缩波两者聚焦的时间间隔越小, 因此增大了激波聚焦的强度和空腔底部的压力峰值。导流块深度会影响二次激波形成的时间和发展程度, 从而影响激波聚焦过程中楔形空腔内流场的紊乱程度。

关 键 词: 两级脉冲爆震发动机(PDE); 激波聚焦; 楔形空腔; 导流块深度; 径向入射

中图分类号: V231.2⁺2

文献标志码: A

Impact of depth of deflector on shock wave focusing processes in wedge-shaped cavity

CHEN Xin^{1,2}, TAN Sheng¹, WANG Yuqian¹,

HE Liming¹, ZHU Xiaobin¹, WANG Chuan¹

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering Institute,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to obtain the influence of the depth of deflector on the process of shock wave focusing in a wedge-shaped cavity, tests and numerical simulation studies were carried out to investigate shock focusing on a test section where the depth of deflector was 0, 5, 10, 15 mm. CCD (charge coupled device) camera was used to obtain the schlieren photos of the flow field. Pressure sensors were used to record the pressure histories. The numerical simulation of the process was carried out by using the numerical method with high accuracy. The shock wave focusing processes of different deflectors were compared. Result showed that, with the increase of depth, the time between leading shock focusing and compressional wave focusing decreased. Because of that, the strength of shock wave focusing and the peak of pressure in bottom of cavity increased. The depth of deflector can determine the forming

收稿日期: 2016-01-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51106178)

作者简介: 陈鑫(1976—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事气动热力推进与新概念脉冲爆震发动机研究。

引用格式: 陈鑫, 谭胜, 王育虔, 等. 导流块深度对楔形空腔内激波聚焦过程的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(10): 2321-2329.

CHEN Xin, TAN Sheng, WANG Yuqian, et al. Impact of depth of deflector on shock wave focusing processes in wedge-shaped cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2321-2329.

time of secondary shock and its degree of development, and then influence the disorder degree of the flow field during the shock wave focusing process.

Key words: two-stage pulse detonation engine (PDE); shock wave focusing; wedge-shaped cavity; depth of deflector; radial incident

两级脉冲爆震发动机(pulse detonation engine, PDE)是俄罗斯的 Levin 等^[1]于 2001 年提出的一种脉冲爆震发动机,它除了具有传统 PDE 结构简单、燃烧效率高和工作范围广等优势^[2-3]外,还有望解决制约传统 PDE 工程化的 DDT (deflagration to detonation transition)距离长、爆震频率低、需要快速响应且能迅速填充的机械阀门和高频可靠的电火花塞等难题^[4]。在 Levin 等^[1]的研究中,冷态条件下测得了 7.5 kHz 的气动振荡频率,在热态条件下频率则达到了 24~25 kHz。2010 年,Levin 等^[5]对两级 PDE 的推力性能进行了实验测试和数值计算,数值计算得到的推力和比冲与实验吻合得很好,并得到了随着入口总压的增大,推力线性增加和比冲不变的结论。

美国和日本等国都大力支持对其进行研究。2003 年,美国通用(GE)研究中心的 Leyva 等^[6]对不同结构形式的二维凹腔中冷态射流碰撞及流场振荡进行了实验和数值研究,他们在实验和计算中都发现了射流掺混以及声学的共振现象,并提出共振腔的几何结构参数对腔内气流有重要影响。2005 年,该机构的 Mcmanus 等^[7]利用天然气、乙烯和 Jet-A 航空煤油作为燃料开展了两级 PDE 原理样机的热态实验,获得了两种燃烧模式,但通过验证发现都不是爆震燃烧。2004 年,日本的 Taki 等^[8]对两级 PDE 中凹腔内激波聚焦起爆过程进行了数值模拟研究,计算结果中达到了 5 kHz 的稳定频率。

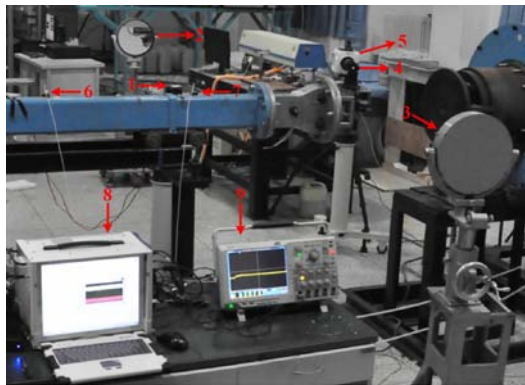
国内对两级 PDE 的研究则处于起步阶段。2008 年,南京航空航天大学周鸿等^[9]实验研究了二维模型中进口压力和凹面腔结构尺寸对激波特性的影响。2009 年,南京理工大学的姜日红等^[10]以空气为介质,研究了凹腔结构及射流参数对腔内无反应激波会聚过程的影响。2011 年,南京理工大学的邱彦杰^[11]对两级 PDE 进行了大量数值模拟研究,并实现了两级 PDE 的多循环数值模拟。空军工程大学自 2007 年开始,对两级 PDE 进行了一系列的研究工作。2010 年,李海鹏等^[12]对不同结构凹腔形式和热力学参数条件下

的凹腔内激波聚焦过程进行了详细的数值模拟研究。张强等^[13-14]对两级 PDE 的理想热力循环和性能进行了理论分析,并对欠膨胀超声速射流的相互作用进行了机理研究。曾昊等^[15-16]对两级 PDE 原理样机进行了冷态和热态实验研究。荣康等^[17-18]对两级 PDE 单次激波聚焦起爆和环形超声速射流聚心碰撞诱导非定常激波聚焦的机理开展了实验研究。

然而,目前的工作大多都是针对两级 PDE 的可行性验证或功能部件形式对整体性能的影响,激波反射聚焦过程中流场的演化特点和规律还有待进一步研究与掌握。本文利用径向入射激波聚焦实验系统,对 4 种导流块深度条件下激波在楔形空腔中反射聚焦的过程开展了实验研究,对楔形空腔中激波反射聚焦的过程进行了较为详细的描述,并对比揭示了导流块深度对聚焦过程的影响。

1 实验系统

图 1 为径向入射激波聚焦实验系统实物图,该系统由激波管系统、数据采集系统、纹影系统和实验段等组成。



1 光源; 2、3 凹面反射镜; 4 刀口; 5 高速摄像机;
6、7 传感器 1#、2#; 8 数据采集系统; 9 示波器; 10 实验段

图 1 实验系统

Fig. 1 Test system

1.1 激波管系统

实验中使用内截面为 128 mm×78 mm 的总

长为 14 m 的矩形激波管来形成所需的平面激波。在激波管高低压段中间设计有长度为 40 mm 的双膜机构,用来对破膜时机进行精确控制。在激波管低压段出口前 300 mm 处设置有压力传感器 1# 和 2#,两者之间距离为 $s=667$ mm,传感器采用型号为 113B24 的 PCB 压电式传感器。入射激波的马赫数可以用 s 除以两个传感器测量得到的压力跃升时的时间差再除以当地声速得到。经计算,本文所有实验工况入射激波马赫数都约为 1.41。

1.2 数据采集系统

数据采集系统采用美国 NI(National Instruments)公司生产的 PXI Express,NI PXI-4496 作为其数据采集模块的一部分,具有 16 路同步输入,每一路采样频率为 204.8 kHz,可同时进行 16 通道高精度高速动态信号采集的任务。本文使用 NI PXI-4496 模块对动态压力信号进行采集。

1.3 纹影系统

实验中使用平行光反射式纹影系统来对楔形空腔内激波聚焦过程中复杂的激波和滑移线等间断面进行显示,该系统由光源(氙灯)、两块凹面反射镜(焦距为 3 m)、刀口和高速摄像机等组成。其中,高速摄像机使用的是 Vision Research 公司的一款型号为 PHANTOM V1210 的高速摄像机,可选配 48GB 的存储空间,最大分辨率为 1280 像素×800 像素(对应 12600 帧/s),最小分辨率为 128 像素×16 像素(对应 820 000 帧/s)。实验中设置的分辨率为 256 像素×256 像素,摄像速率为 100 000 帧/s,曝光时间为 5 μs。

1.4 实验段

实验段由中央尖劈外壳、内楔空腔和喷口帽组成,其剖面图如图 2 所示,它与激波管用法兰连接。内楔空腔的内楔角为 112°,开口宽度为 70 mm,其顶端装有 PCB 动态压力传感器 8#。导流块深度表示的是楔形空腔入口唇口与导流块内侧唇口在垂直方向上的距离,如图 2 中 D 所示。通过增减喷口帽与外壳之间法兰连接处垫片的数量来改变楔形空腔入口的宽度 W ,本次实验入口宽度为 11.1 mm,实验段其他尺寸见图 2。楔形空腔两侧可以安装石英玻璃,用作对聚焦过程流场的纹影照片进行拍摄,也可以安装带有 PCB 压力传感器的密封板,用作对流场的压力数据进行测量,其 PCB 压力传感器的安装示意图如图 3 所示。

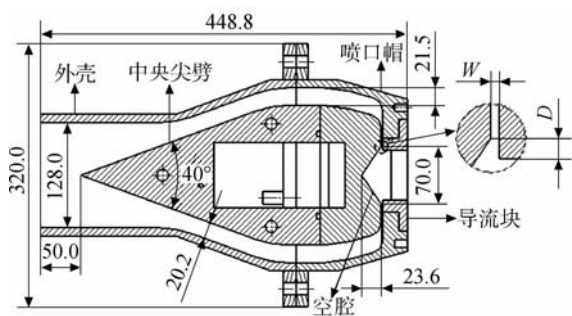


图 2 实验段剖面图(单位:mm)
Fig. 2 Cross-section diagram of the test section
(unit:mm)

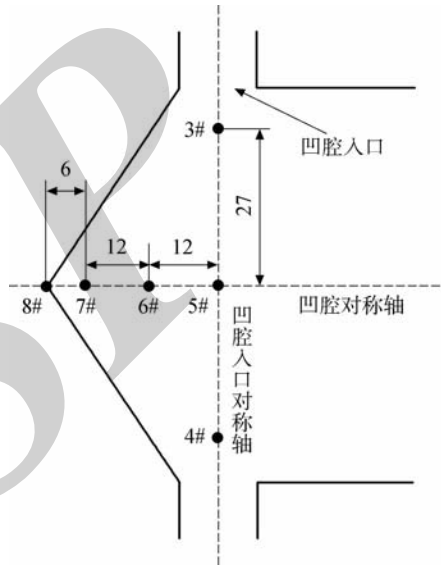


图 3 动态压力传感器示意图(单位:mm)
Fig. 3 Schematic diagram of dynamic pressure sensors
(unit:mm)

2 数值计算方法

为获得较高的时间和空间分辨率,计算时采用 3 阶加权基本无振荡算法和龙格-库塔算法求解二维欧拉方程。由于实验段的对称性,计算区域为图 2 所示结构的一半。实验段入口和出口分别设为进口和出口边界条件,壁面设为绝热刚性壁面。计算范围长为 800 mm,高为 128 mm,初始网格为 800×128,采用块结构动态自适应网格加密,根据密度梯度来标记待加密的网格,采用 4 层网格,加密倍数为 2×4×2×2,可算得最小网格尺寸为 0.031 25 mm。数值计算方法详见文献[19-21]。

3 结果与讨论

3.1 楔形空腔内激波聚焦过程

前导激波进入楔形空腔后,激波在楔形空腔

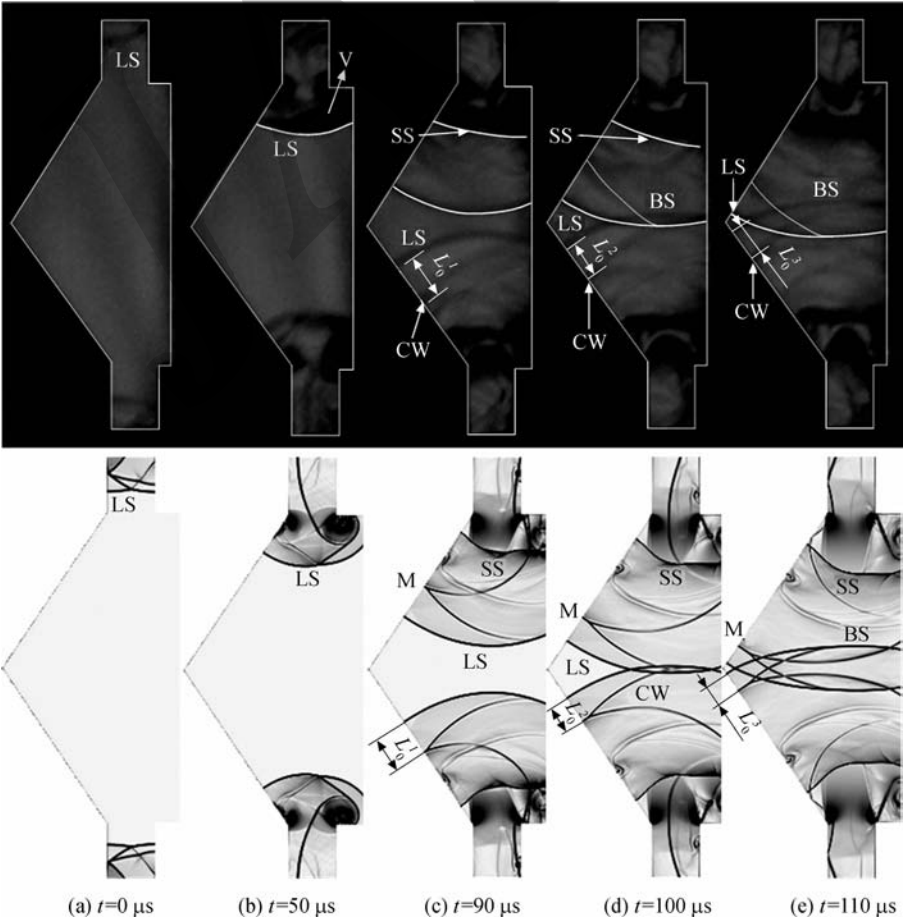
中聚焦反射的过程如图 4 所示,图中 LS 表示前导激波,V 表示旋涡,CW 表示压缩波,SS 表示二次激波,BS 表示弓形激波,RS 表示反射激波,IS 表示入射激波,M 表示马赫杆,其中上侧图片为实验纹影图,下侧图片为数值纹影图。由于在不同工况下拍摄时间会略有差异,为了描述的方便,假设前导激波 LS 刚进入楔形空腔入口的时间为初始时刻($t=0\ \mu\text{s}$)。同时,为了更清楚的显示流场的波系结构,在实验纹影图中用白粗实线描绘出了凹腔边框和激波结构,其中为了与保持实验纹影图的原貌,激波结构只描绘了一半。在 $t=50\ \mu\text{s}$ 时,前导激波 LS 进入楔形空腔入口,在入口右侧唇口形成旋涡,如图 4(b)中的 V 所示。此后,传感器 3#,4# 分别感受到上下前导激波的到来,其压力分别提高到 0.201 MPa 和 0.218 MPa,如图 5(a)所示。由图 5(a)可知,尽管传感器 3# 和 4# 的峰值压力略有不同,然而压力开始升高的时间和峰值压力相对应的时间相同,这说明了本次实验具有良好的对称性。

在前导激波 LS 向对称轴方向运动时,因为流通面积的不断增加,因此其强度在不断减小。同时,因为压缩波 CW^[18] 处在前导激波流过后压

力、温度升高的波后流场,因此其速度比前导激波快,从而它不停追赶前导激波。本文定义 L_i 为 LS 与 CW 之间的距离,其中 i 表示导流块深度。由图 4(c)、图 4(d)、图 4(e)可知: $L_0^1>L_0^2>L_0^3$,这也验证了后面压缩波在不停追赶前导激波。

随后,前导激波在中轴线上碰撞,引起传感器 5# 的压力瞬时增加到 0.30 MPa(如图 5(b)所示),并产生一个弓形激波 BS,如图 4(d)所示。几乎同时,弓形激波的左波头运动到传感器 6#,其压力突增至 0.306 MPa,如图 5(b)所示。此时,碰撞后的激波已经将空腔封闭,称之为气幕^[4]。与此同时,由前导激波诱导的指向空腔中轴线的射流经过一段时间的发展,在空腔内形成二次激波 SS^[22]。

随着弓形激波的进一步发展,弓形激波左边的空间不断减小,从而使得气体不断被压缩,气体压力不断升高。当其扫过传感器 7# 时,其压力升高,但是由于传感器 7# 距离腔底离很短,只有 6 mm,而激波的运动速度很快(特别是聚焦后的反射激波),使得聚焦前后两次激波经过该点时的时间间隔较短,因此传感器 7# 测得的压力数据中不能分别显示出聚焦前后激波扫过时的两个压



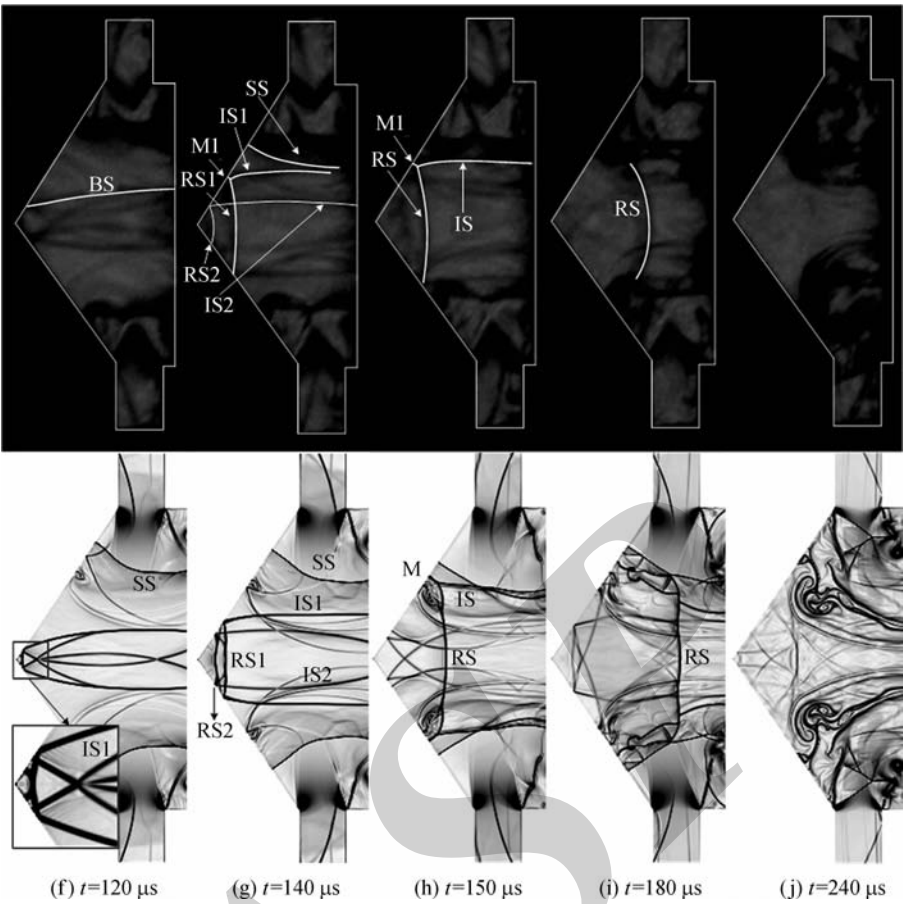


图 4 实验段内不同时刻的纹影图($D=0\text{ mm}$)

Fig. 4 Schlieren figures at different times in the test section ($D=0\text{ mm}$)

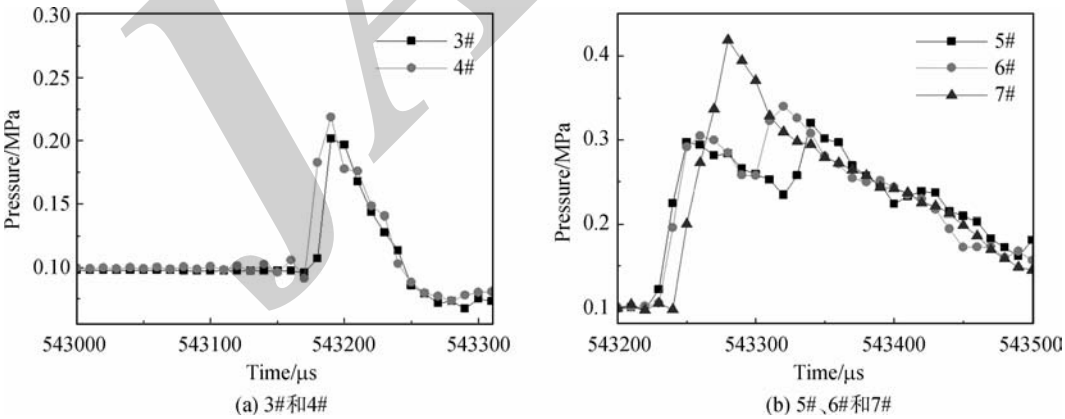


图 5 压力传感器测得的压力时序图($D=0\text{ mm}$)

Fig. 5 Pressure sequence diagram recorded by pressure sensors ($D=0\text{ mm}$)

力尖峰。因此,不能判断出聚焦前激波扫过传感器 7 号时的压力大小。

由于激波在空腔中运动速度较快,实验中拍摄时并没有拍到聚焦时刻的流场,但通过比较图 4(e)、图 4(f)可知:当 $t=110\sim120\text{ }\mu\text{s}$ 之间时,弓形激波运动到空腔底部,并与空腔底部壁面碰撞,在底部狭小的空间内会聚,产生了压力的聚焦点,

传感器 8 号测得的焦点处的压力峰值为 0.44 MPa ,如图 6 所示。聚焦时两道弓形激波 BS 转变成两道入射激波 IS1 在空腔底部发生反射,观察图 4(g)、图 4(h)可知,此时发生的是马赫反射,在照片中能看到入射激波 IS1、反射激波 RS1 和较短的马赫杆 M1,仔细观察可以发现,图 4(h)中的马赫杆比图 4(g)中的长,由此可知发生了直接

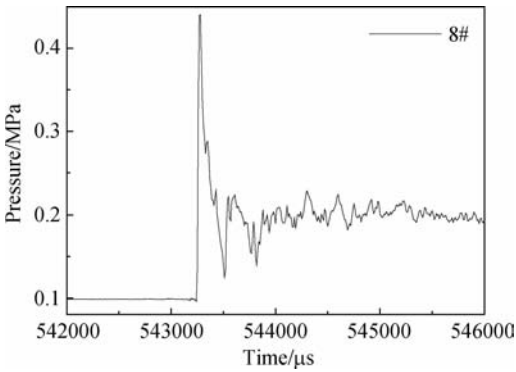


图 6 压力传感器 8#测得的压力时序图

Fig. 6 Pressure sequence diagram recorded by pressure sensors 8#

马赫反射。前导激波聚焦后不久,紧跟前导激波后的压缩波也在空腔底部发生了类似的聚焦,如图 4(g)中 IS2 和 RS2。

同时由图 4(g)、图 4(h)、图 4(i)可知,两道入射激波沿着壁面向前方运动并融合成一道入射激波 IS,而两道反射激波由于壁面的限制组合成一道突起的反射激波 RS 向出口运动。在反射激波向出口运动过程,由于流通面积的增大,激波的强度不断减弱。反射激波在向出口运动时依次扫过传感器 7#、6#、5#,其压力值分别为 0.421、0.3415、0.322 MPa,如图 5(b)所示,这也验证了反射激波强度不断减弱的论断。

随着入射激波和反射激波向出口处传播,在 $t=180\mu\text{s}$ 时刻,入射激波,反射激波和二次激波相互作用,生成复杂的流场结构。

由以上对实验和数值纹影图的分析可知,数值模拟的结果能清晰地捕捉到激波、马赫杆、滑移线、射流和旋涡等流场结构,与实验获得的结果吻合较好。因此,这表明所采用的数值方法能较好的对径向入射激波聚焦过程进行模拟,且有较高的精度。

3.2 导流块深度对楔形空腔内激波聚焦的影响

图 7~图 9 分别为导流块深度为 5、10、15 mm 时,激波在楔形空腔中的流场纹影图。比较图 4 和图 7~图 9 可知,入射激波在这几种导流块深度下聚焦时流场结构的发展较为相似,但是在一些地方存在差别。

1) 当导流块深度的加深时,前导激波 LS 抵达入口右侧唇口的时间增加,旋涡 V 生成的时间变晚,以至于当导流块深度为 15 mm 时,旋涡生成没多久就与入射激波 IS 相互作用,从而导致出口流场紊乱。同时,导流块深度越深,出口通道越窄,会造成聚焦后的激波流出空腔变得困难,使得更多的激波回传进入入口通道,不利于两级 PDE 的高频工作。

2) 由图 4(e)、图 7(d)、图 8(c)、图 9(c)可知:

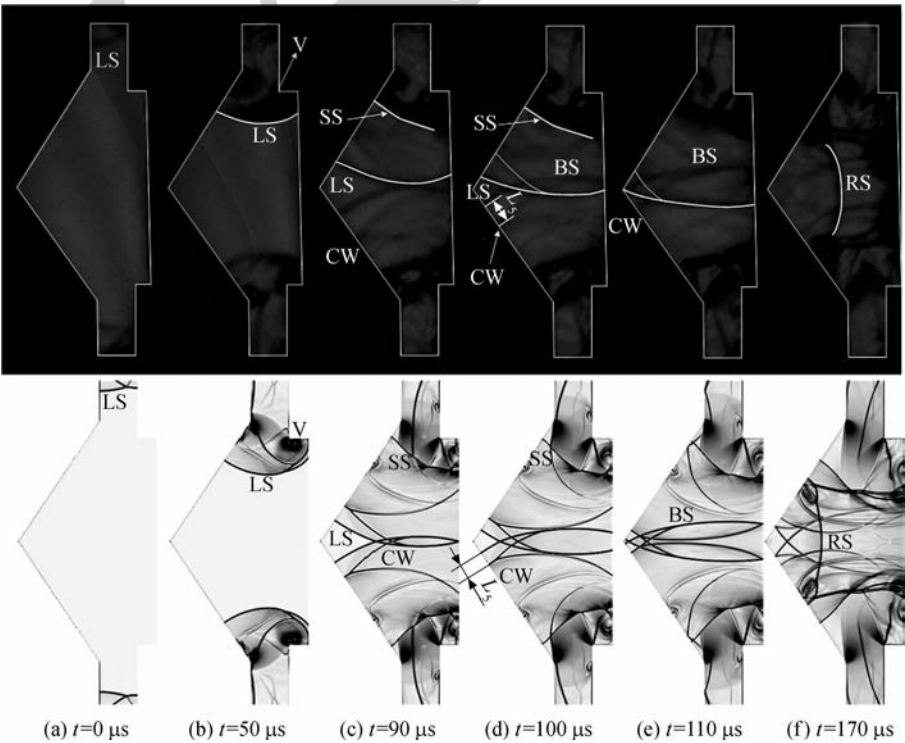


图 7 实验段内不同时刻的纹影图($D=5\text{ mm}$)

Fig. 7 Schlieren figures at different times in the test section ($D=5\text{ mm}$)

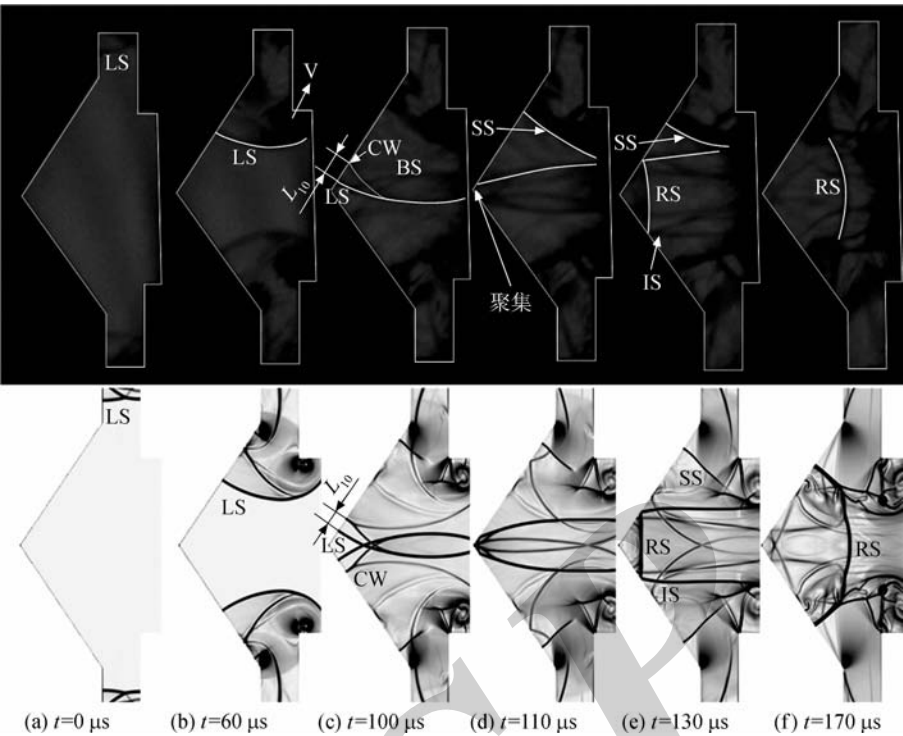


图 8 实验段内不同时刻的纹影图($D=10\text{ mm}$)

Fig. 8 Schlieren figures at different times in the test section ($D=10\text{ mm}$)

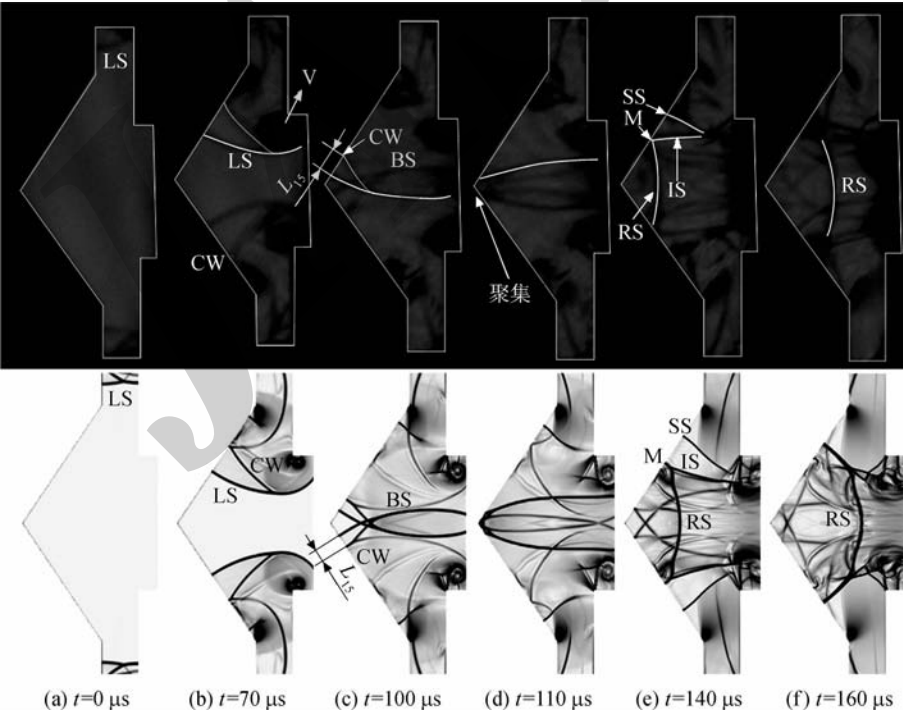


图 9 实验段内不同时刻的纹影图($D=15\text{ mm}$)

Fig. 9 Schlieren figures at different times in the test section ($D=15\text{ mm}$)

$L_0^3 > L_5 > L_{10} > L_{15}$, 这表明当导流块深度加深时, 聚焦前的 L 在不断变短。其原因是: 随着导流块深度的增加, 楔形空腔的空间在减小, 前导激波 LS 后的压缩波 CW 运动速度变快。 L 的缩短会造成前导激波 LS 和压缩波 CW 两者聚焦的时间间隔 Δt 减小。图 10 为计算得到的前导激波 LS 和压缩波 CW 两者聚焦的时间间隔 Δt 随导流块深度的变化趋势图, 由图可知, 随着导流块深度的

加深, Δt 减小, 且减小的趋势逐渐减小。 Δt 减小, 就会使得激波聚焦的强度进一步增强。图 11 所示为传感器 8# 测得压力峰值数据随导流块深度的变化趋势图, 由图可知, 随着导流块深度的加深, 腔底压力峰值增大。

3) 较深的导流块下, 二次激波形成的时间较晚, 且发展的不充分, 这会使得其与激波相互作用后形成较为紊乱的流场结构; 而较浅的导流深度, 二次激波形成的时间较早, 且得到了充分的发展, 这会使得其与激波相互作用后形成的流场结构紊乱程度较低。

这是因为随着导流块深度的增加, 前导激波 LS 和压缩波 CW 两者聚焦的时间间隔 Δt 变小, 从而增大了激波聚焦的强度。

2) 导流块深度能影响二次激波形成的时间和发展程度, 从而影响激波聚焦过程楔形空腔内流场的紊乱程度。

3) 导流块深度会影响旋涡 V 形成的时间, 从而影响排气过程的进行。

参考文献:

[1] LEVIN V A, NECHAEV J N, TARASOV A I. A new approach to organizing operation cycles in pulse detonation engines[R]. Moscow: High-Speed Deflagration and Detonation, 2001.

[2] 严传俊, 刘军, 范玮, 等. 脉冲爆震发动机工作原理与循环分析[J]. 推进技术, 1996, 17(3): 56-63.
YAN Chuanjun, LIU Jun, FAN Wei, et al. Operating principle and cycle analysis of pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(3): 56-63. (in Chinese)

[3] 严传俊, 范玮, 郑龙席, 等. 脉冲爆震发动机原理及关键技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.

[4] ROY G, FROLOV S, BORISOV 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] LEVIN V A, AFONINA N E, GROMOV V G. The dynamics of combustion products flow in ring nozzle with a half-closed cavity[J]. Combustion Science and Technology, 2010, 182(11/12): 1564-1579.

[6] LEYVA I A, TANGIRALA V, DEAN A J. Investigation of unsteady flow field in a 2-stage PDE resonator[R]. Reno: The 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2003.

[7] MCMANUS K R, DEAN A J. Experimental evaluation of a two-stage pulse detonation combustor[R]. Tucson, Arizona: The 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2005.

[8] TAKI S, FUJIWARA T A. Numerical study of detonation resonator[R]. Moscow: Application of Detonation to Propulsion, 2004.

[9] 周鸿. 两步法高频爆震发动机 (two-stage PDE) 机理与特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
ZHOU Hong. Investigation on the basic theory and characteristic of two-stage high frequency pulse detonation engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)

[10] 姜日红, 武晓松, 王栋. 共振型 PDE 谐振腔喷嘴匹配关系研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 1006-1010.
JIANG Rihong, WU Xiaosong, WANG Dong. Matching research of resonant PDE's resonator and jet[J]. Journal of

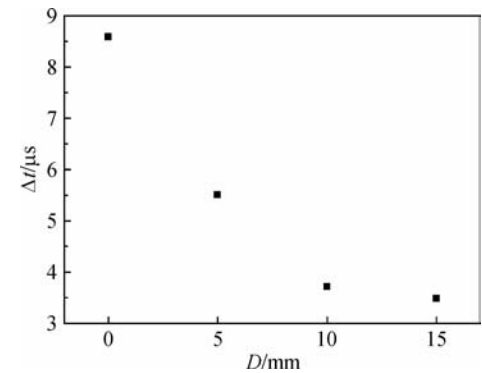


图 10 聚焦的时间间隔随导流块深度的变化
Fig. 10 Δt of focusing with the change of depth of deflector

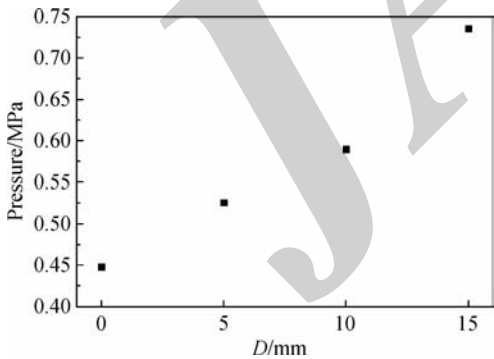


图 11 腔底压力峰值随导流块深度的变化
Fig. 11 Peak pressure in the cavity bottom with the change of depth of deflector

4 结 论

本文对径向入射激波在楔形空腔内的反射聚焦过程开展了实验和高精度的数值模拟研究, 主要结论如下:

1) 导流块深度的增加会使得激波聚焦的强度增加, 同时也增大了空腔底部测得的压力峰值。

Aerospace Power,2009,24(5):1006-1010. (in Chinese)

[11] 邱彦杰. 两级脉冲爆震发动机数值模拟[D]. 南京:南京理工大学,2011.

QIU Yanjie. Simulation study of two stage pulse detonation engine[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2011. (in Chinese)

[12] 李海鹏. 两级脉冲爆震发动机中激波会聚起爆过程的数值模拟研究[D]. 西安:空军工程大学. 2010.

LI Haipeng. Simulation study of shock wave focusing of two stage pulse detonation engine[D]. Xi'an: Air Force Engineering University,2010. (in Chinese)

[13] 张强,何立明,陈鑫,等. 两级脉冲爆震发动机的理想热力循环和性能分析[J]. 推进技术,2012,33(4):499-454.

ZHANG Qiang,HE Liming,CHEN Xin,et al. Ideal thermodynamic cycle and performance analys of 2-stage pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012,33(4):499-454. (in Chinese)

[14] 张强,陈鑫,何立明,等. 矩形喷口欠膨胀超声速射流对撞的实验研究[J]. 物理学报,2013,62(8):360-365.

ZHANG Qiang,CHEN Xin,HE Liming,et al. An experimental study of rectangular under-expanded supersonic jets collision[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8): 360-365. (in Chinese)

[15] 曾昊. 两级爆震发动机中的实验与数值模拟[D]. 西安:空军工程大学,2011.

ZENG Hao. Experimental study and numerical simulation of two stage pulse detonation engine[D]. Xi'an: Air Force Engineering University,2011. (in Chinese)

[16] 曾昊,何立明,荣康,等. 凹面腔内的激波会聚冷态实验[J]. 航空动力学报,2012,27(12):2655-2659.

ZENG Hao, HE Liming, RONG Kang, et al. Experiment on shock wave focus in resonator[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(12):2655-2659. (in Chinese)

[17] 荣康. 环形向心射流诱导激波聚焦与起爆的实验及数值模拟研究[D]. 西安:空军工程大学,2011.

RONG Kang. Experimental study and numerical simulation of shock wave focusing and detonation initiation through annular jet collision[D]. Xi'an: Air Force Engineering University,2011. (in Chinese)

[18] 荣康,陈鑫,何立明,等. 暂冲式环形射流诱导非定常激波聚焦的机理研究[J]. 推进技术,2015,36(6):824-831.

RONG Kang,CHEN Xin, HE Liming, et al. Investigation on mechanism of unsteady shock waves focus induced by blowdown imploding annular jet[J]. Journal of Propulsion Technology,2015,36(6):824-831. (in Chinese)

[19] SHU C W. High order ENO and WENO schemes[M]. New York:Springer-Verlag,1999.

[20] BERGER M J, OLIGER J. Adaptive mesh refinement for hyperbolic partial differential equations [J]. Journal of Computational Physics,1984,53(3):484-512.

[21] DEITERDING R. Block-structured adaptive mesh refinement-theory, implementation and application [J]. Esaim Proceedings,2011,34:97-150.

[22] LAW C, MURITALA A O, SKEWS B W. Unsteady flow with separation behind a shock wave diffracting over curved walls[J]. Shock Waves,2014,24:283-294.

(编辑:王碧琚)