文章编号：1000-5773(2006)04-0359-06

激波聚焦反射的实验和数值研究*

董 刚，叶经方，范宝春

（南京理工大学瞬态物理国家重点实验室，江苏南京 210094）

摘要：采用高速摄影技术和数值模拟方法，对入射激波在两种不同形状的抛物形反射器表面聚焦和反射的过程进行了研究，得到了激波聚焦反射过程的波系结构的实验阴影照片和数值计算结果，两者符合得很好。对激波聚焦形成的气体动力学焦点的特性进行了分析，结果表明，入射激波在两种反射器反射后聚焦所形成的气体动力学焦点均是由三波点在轴心处的会聚所导致的，气体动力学焦点位于相应的反射器壁面的几何焦点附近。不同的反射器中，激波聚焦前后的波系结构也不同，对较浅的反射器，入射激波反射前在反射器壁面形成了弓形激波，反射之后需要相对较长的时间完成聚焦，形成聚焦反射激波之后弓形激波仍未相交；对较深的反射器，入射激波反射后在更短的时间内聚焦，聚焦时弓形激波已经相交，聚焦反射激波之后的流场波系结构更加复杂。

关键词：激波聚焦；激波反射；气体动力学焦点；高速摄影；数值模拟

中图分类号：V235.221 **文献标识码**：A

1 引 言

激波聚焦是指在一定条件下激波在其传播方向上发生收敛的行为，由于激波聚焦可以在流场内产生局部的高能量密度的高压区域（又称气体动力学焦点），因此这种特殊的流动现象具有很多实际用途，例如，利用激波在惰性介质中聚焦产生高能量密度的特点，可以在医疗上用于肾结石和尿道结石的治疗[1-2]，因此开展与之相关的研究具有重要的理论和实际意义。

实际过程中的激波聚焦往往是通过平面入射激波在凹形壁面（如半圆形、抛物形）反射而实现的，Imuzi 等人[3]通过数值计算和实验测试研究了不同正激波强度和不同抛物形壁面深度对反射激波相互作用类型的影响，并指出激波马赫反射所形成的两个三波点的碰撞是形成激波聚焦的局部高温高压区的主要原因。Liang 等人[4]通过数值模拟考察了激波聚焦后的流场结构，解释了其中出现的环形波、复杂结构以及射流等现象。除了抛物形壁面外，平面入射激波在半圆形[5]和内楔形[6]等凹形壁面反射聚焦也得到了一定的理论和实验研究。然而，对于激波聚焦反射过程中的一些特殊流场结构还需要作进一步的探讨。

本工作采用实验测试和数值模拟的方法，对平面入射激波在抛物形壁面上的聚焦和反射过程进行了研究，对两种不同形状的抛物形反射器中激波聚焦的动力学过程以及流场中的波系结构进行了讨论和分析。

2 实验方法

实验装置包括卧式激波管、压力测试系统（传感器、信号放大器和瞬态记录仪）、高速摄像系统（时序控制器、触发器、多闪光光源、高压发生器和多镜头 Cranz & Schardin 相机）。其中卧式激波管由高压段、低压段和测试段组成，在测试段开有窗口用于高速摄影，其右端装有抛物形反射器，如图 1 所示。实

* **收稿日期**：2005-10-24；**修回日期**：2006-01-19

基金项目：国家自然科学基金（50376024，50476027）；南京理工大学校科研发展基金

作者简介：董 刚（1970—），男，博士，副教授，主要研究方向为爆炸力学的数值模拟与实验测量. E-mail：dgvehicle@yahoo.com

验首先由空压机在激波管的高压段冲入空气，破膜后形成激波，在低压段靠近破膜处的压力传感器获得激波传播的压力信号后，启动高速摄影的时序控制器和并触发瞬态记录仪。激波传播进入测试段后，通过预置的两个压力传感器获得的信号计算入射激波强度(Mach 数)，然后传播至抛物形反射器上形成反射、聚焦。

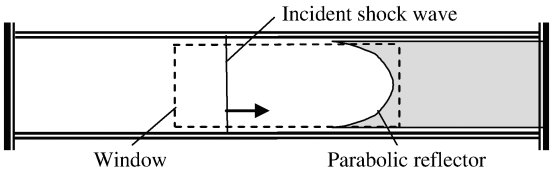


图 1 测试段

Fig. 1 Test section

用于捕捉激波聚焦反射过程的高速摄影系统如图 2 所示，时序控制器使多闪光光源依次闪光，光线经凹面反射镜反射后，通过被测试流场进入对应的相机镜头，使底片曝光，从而获得激波聚焦的分幅阴影照片，实验中的照片分幅间隔为 30 μs。

实验获得的入射激波 Mach 数为 1.17，选用了两种不同深度的抛物形反射器(反射壁面满足 $\bar{x}=f\bar{y}^2$，$\bar{x}$、$\bar{y}$ 代表无量纲长度，$f=1$ 或 2)，用以考察入射激波在不同形状反射壁面聚焦和反射的行为。

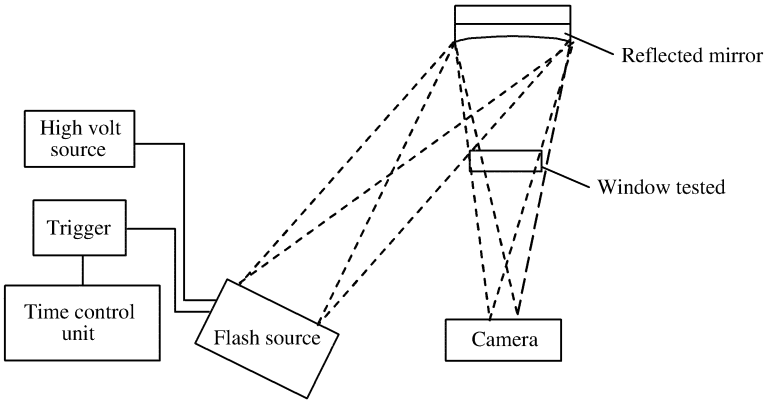


图 2 高速摄影系统

Fig. 2 High speed photograph system

3 数值计算

采用二维轴对称非定常 Euler 方程求解激波在抛物形壁面聚焦的过程，如图 3 所示。首先采用非正交网格划分计算区域，并使用有限体积方法对控制方程进行离散。为精确捕捉流场中的波系结构，采用波传播算法(Wave Propagation Algorithm)[7]构造计算格式，该格式除具有二阶精度的 TVD 特性之外，还考虑了横传波的影响，因而可以反映流场中的复杂波系结构。

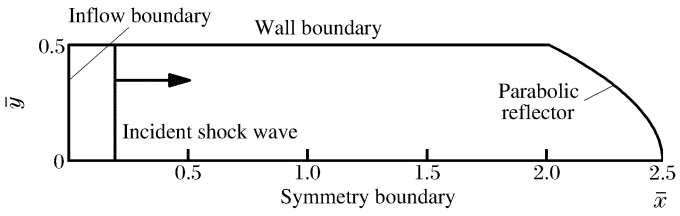


图 3 计算区域及边界条件

Fig. 3 Computational domain and boundary conditions

计算的边界条件为：管壁和抛物形反射壁面为绝热刚性壁面，底部为轴边界条件，左端为进口边界条件，其参数为入射激波波后参数值。数值计算采用无量纲量，计算初始时，入射激波位于 $\bar{x}=0.2$ 的位置，其 $Ma=1.17$，与实验测量值相同；波前空气 $\bar{p}=1.0$，$\bar{T}=1.0$，波后空气热力学性质根据 Rankine-Hugoniot 关系得到。

计算选用了两种不同规模的网格(400×100，200×50)以考察计算结果对网格数量的依赖性，计算结果表明，两种网格均能反映流场的基本结构，但较密的网格(400×100)能给出更为精细的结果，因此，

本文的计算结果均依据 400×100 的网格。

4　结果与讨论

4.1　实验与计算结果的对比

考察了 Mach 数为 1.17 的激波分别在两种不同深度的抛物形反射器壁面聚焦和反射的过程。图 4 为浅反射器($\bar{x}=f\bar{y}^2$,$f=1$)的实验和计算结果,其中,左边代表计算的密度等值线,右边代表高速摄影测得的阴影照片。图 4(a)显示入射激波由左向右运动抵达反射器的顶点,此时,入射波在反射器的壁面上反射形成了弓形波;图 4(b)为入射波在反射壁面反射后的结果,此时在管内靠近轴心处形成了上下两个三波点(T);随着时间的进行,两个三波点在轴心处会聚,从而形成高压区,称之为气体动力学焦点(Gasdynamic Focus),如图 4(c)所示;聚焦后的反射激波向左传播并呈半圆形,在此过程中,上下两个弓形波基本没有相交,如图 4(d)所示;随着时间的进一步发展,聚焦反射激波在管上下壁面发生正规反射,再次形成弓形反射波并向轴心处传播,而左传的反射激波则呈弧形,其流场构型如图 4(e)所示。

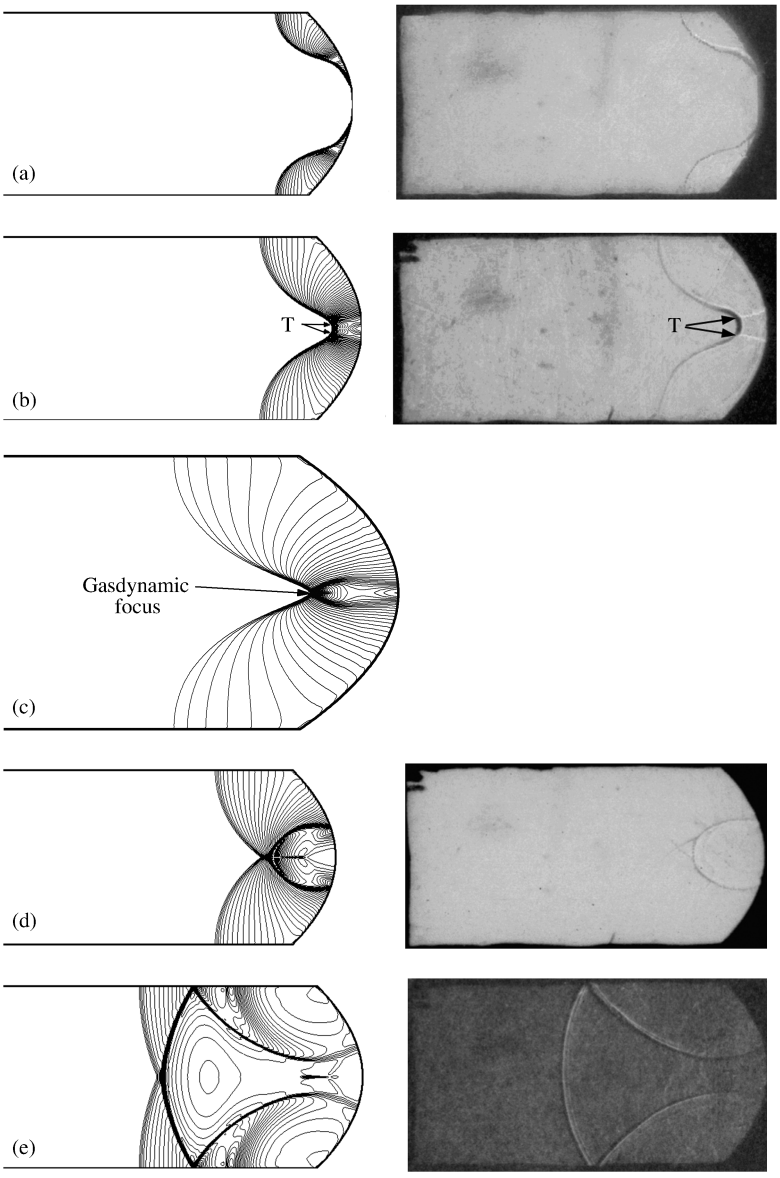


图 4　激波聚焦和反射的实验和计算结果(反射器 $f=1.0$)

Fig. 4　Experimental and computational results of shock wave focusing and reflecting (reflector $f=1.0$)

图 5 给出了深反射器($\bar{x}=f\bar{y}^2$,$f=2$)情况下的实验和计算结果,与图 4 的结果相比,其流场波系结构明显不同。图 5(a)为入射激波到达反射壁面顶点时刻的结果,此时形成的弓形激波开始在轴心处相交;接下来形成两个明显的三波点(图 5(b)),然后在轴心处会聚形成气体动力学焦点(图 5(c)),在这一过程中,弓形激波已经在管轴心处相交并开始透射;随着时间的进行,聚焦激波自气体动力学焦点向左呈弧形传播,同时在聚焦激波反射壁面再次发生正规反射,形成上下两个反射波,图 5(d)的计算和实验结果均反映了该现象;当反射激波继续向左传播时,随着抛物形壁面曲率的变化,壁面上的正规反射逐渐过渡成为 Mach 反射,上下两个反射波逐渐延长,如图 5(e)所示;当聚焦激波离开反射器后,流场中的波系结构变得更加复杂:即 Mach 反射移至管壁后形成了双 Mach 反射结构(两个三波点,T_1 和 T_2,图 5(f)),原来的 Mach 反射波在轴心处汇合,形成了在弧形聚焦激波之后的第二道左行反射波,而第二个 Mach 反射波则呈现出不断向轴心处传播的弓形波。

图 4 和图 5 的结果还表明,计算结果与实验结果符合得很好,从而说明了计算结果的合理性和精确性。

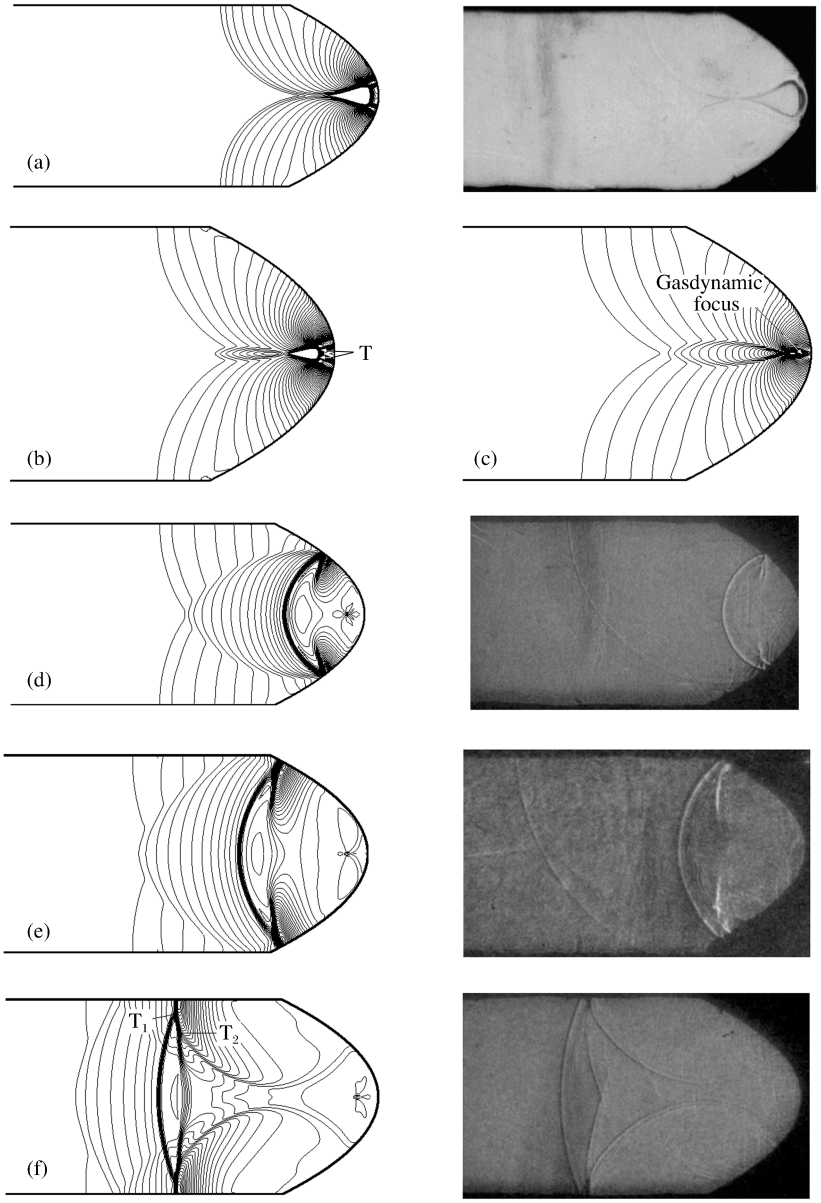


图 5 激波聚焦和反射的实验和计算结果(反射器 $f=2.0$)

Fig. 5 Experimental and computational results of shock wave focusing and reflecting (reflector $f=2.0$)

4.2　聚焦行为的分析

不同形状的反射器,其激波聚焦过程明显不同,图 6 给出了激波反射后,计算的流场最大压力随无量纲时间的变化关系,图中竖线代表了入射激波到达反射器顶点的时刻。可以看出,不同的反射器内,流场中的最大压力都经历了由低到高然后再下降的过程,其中的压力峰值所处时刻代表了聚焦(形成气体动力学焦点)时刻。对于不同深浅的反射器,入射激波到达其顶点的时刻相同($\bar{t}=1.68$),然而从顶点处反射到形成聚焦的时间间隔不同:对较深的反射器($f=2$),入射激波到达顶点后很快形成聚焦($\bar{t}=1.75$),然后随着聚焦激波左行,波后气体膨胀,压力很快降低;对较浅的反射器($f=1$),激波到达顶点后需要更长的时间才能形成聚焦($\bar{t}=1.85$),之后的压力降低也相对缓慢。图 7 为两种反射器聚焦时刻轴心处的压力分布曲线,对较深的反射器($f=2$),气体动力学焦点(压力峰)更靠近反射壁面顶点,形成的压力峰值更大;而对较浅的反射器($f=1$),气体动力学焦点(压力峰)在更远离反射壁面顶点处形成,其压力峰值要小。两种反射器中气体动力学焦点处压力的不同在于,深反射器中入射激波在顶点处形成的 Mach 反射,其 Mach 杆后的压力大于浅反射器中的相应压力,因此其三波点碰撞后形成了更高的压力。表 1 给出了计算的不同深浅的反射器其几何焦点位置、气体动力学焦点位置的比较,可以看出,激波聚焦的位置位于抛物形壁面的几何焦点位置之后(即更靠近壁面顶点),然而随着反射器深度的增加,气体动力学焦点的位置会随着几何焦点的右移而右移,即激波聚焦总是发生在几何焦点的附近。

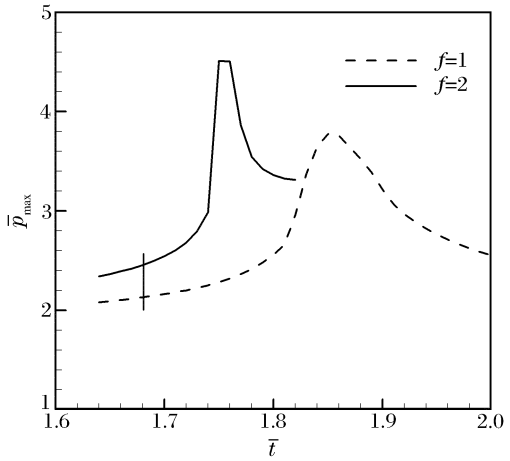


图 6　最大压力随时间的变化

Fig. 6　Maximum pressure histories

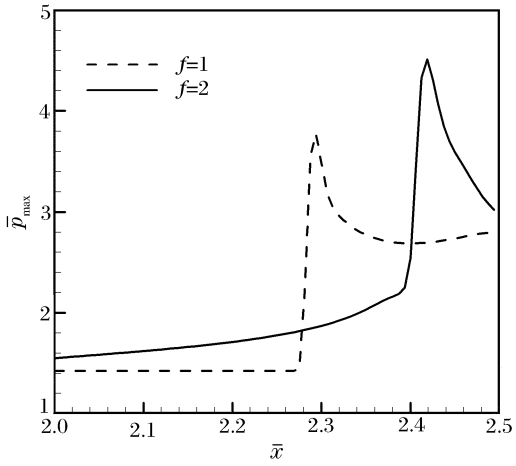


图 7　聚焦时刻轴心的压力分布

Fig. 7　Distributions of pressure of axis at the time of focusing

表 1　不同形状反射器的动力学和几何焦点在 x 轴上的无量纲位置

Table 1　The dimensionless positions of gasdynamic and geometrical focuses at x axis for different reflectors

Shape of reflector	Gasdynamic focus	Geometrical focus
$f=1.0$	2.294	2.250
$f=2.0$	2.419	2.375

5　结　论

(1) 利用高速摄影系统拍摄了入射激波在两种抛物形反射器壁面聚焦、反射的分幅阴影照片;采用数值计算的方法对这一过程进行了模拟,实验结果与计算结果吻合得很好,表明了本研究的合理性和准确性。

(2) 研究结果表明,不同深浅的反射器其流场波系结构明显不同:在较浅的反射器中,激波聚焦时弓形激波没有相交,聚焦形成的气体动力学焦点的压力值相对较低,反射激波在壁面呈正规反射;在较深的反射器中,激波聚焦时弓形激波已经相交,聚焦形成的气体动力学焦点的压力值较高,反射激波在壁面形成 Mach 反射,整个流场的波系结果更加复杂。

(3) 对研究的两种反射器,激波聚焦均是由于三波点在轴心处的碰撞所形成的,随着反射器深度的变化,聚焦形成的气体动力学焦点会随着几何焦点的移动而移动,但气体动力学焦点总是稍滞后于几何焦点;浅反射器中入射激波反射后需要较长时间聚焦,而深反射器中入射激波反射后在更短的时间内发生聚焦。

References:

[1] Cate J E, Sturtevant B. Application of Geometrical Shock Dynamics to Weak Shock Focusing in Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy [J]. J Acous Soc America, 1996, 99(4): 2512-2529.

[2] Takayama K, Saito T. Shock Wave/Geophysical and Medical Applications [J]. Annu Rev Fluid Mech, 2004, 36: 347-379.

[3] Izumi K, Aso A, Nishida M. Experimental and Computational Studies Focusing Processes of Shock Reflected from Parabolic Reflectors [J]. Shock Waves, 1994, 3: 213-222.

[4] Liang S M, Wu L N, Hsu R L. Numerical Investigation of Axisymmetric Shock Wave Focusing over Paraboloidial Reflectors [J]. Shock Waves, 1999, 9: 367-379.

[5] Babinsky H, Onodera O, Takayama K, et al. The Influence of Entrance Geometry of Circlar Reflectors on Shock Wave Focusing [J]. Computers & Fluids, 1998, 27: 611-618.

[6] Wang C, Situ M, Han Z Y. Numerical Investigations on Cold Flowfields of Shock Focusing for Ignition of Pulse Detonation [J]. J Propulsion Technology, 2003, 24(2): 156-159. (in Chinese)
王 春,司徒明,韩肇元. 用于爆震引燃的激波聚焦无反应流场数值模拟 [J]. 推进技术, 2003, 24(2): 156-159.

[7] Leveque R J. Wave Propagation Algorithms for Multidimensional Hyperbolic Systems [J]. J Comp Phys, 1997, 131: 327-353.

Experimental and Numerical Investigation of Shock Wave Focusing and Reflection

DONG Gang, YE Jing-Fang, FAN Bao-Chun

(*National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: The incident shock wave focusing and reflection on the two parabolic reflectors were studied by means of high speed photograph technique and numerical simulation method. The experimental shadow photographs and computational density contours were obtained, and the good agreements between the experimental and computational results were presented. The properties of the gasdynamic focus, formed by shock wave focusing, were analyzed. The results show that for both reflectors studied the gasdynamic focus is formed by the collision of two triple points at the axis, and that this focus is located in the vicinity of the corresponding geometrical focus. The shock-shock structures after shock wave focusing are different for the two reflectors. For the shallow reflector, the bow shock waves form on the surface of reflector before the reflection of incident shock wave; it takes long time to complete the focusing once incident shock wave reflects from reflector; the bow shock waves do not intersect each other during the shock wave focusing and reflection. For the deep reflector, it takes short time to complete the focusing, the bow shock waves have intersected during the shock wave focusing and reflector, and this process leads to the more complex shock-shock structure.

Key words: shock wave focusing; shock wave reflection; gasdynamic focus; high speed photograph; numerical simulation