

文章编号:1000-8055(2011)05-1025-06

双管爆轰单引射增推机理的数值研究

张焕好, 陈志华, 孙晓晖

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094)

摘 要: 基于二维 Euler 方程, 结合高精度 Roe/HLL (Harten-Lax-Van Leer) 混合格式与自适应网格加密技术, 对引射模式下的双管爆轰非定常单次引射复杂流场进行了数值模拟. 结果分别描述了方管爆轰波喷出及引射管内二次爆轰波的传播过程. 双爆轰波喷出爆轰管后, 以欠膨胀射流形式向外传播, 同时, 它们相互作用延长了引射管尾气排出时间, 减少了引射管内环境气流吸进量, 从而降低了双管爆轰引射效率, 并与相关实验研究结果相符.

关 键 词: 非定常引射; 超声速引射; 爆轰; 燃烧; 数值模拟

中图分类号: O381

文献标志码: A

Numerical investigations on thrust augmentation mechanism of single ejection driven by two detonation tubes

ZHANG Huan-hao, CHEN Zhi-hua, SUN Xiao-hui

(National Key Laboratory of Transient Physics,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on two-dimensional Euler equations, and in combination with the high-resolution hybrid Roe/HLL (Harten-Lax-Van Leer) scheme and adaptive mesh refinement method, numerical simulations of single ejection driven by two pulse detonation engines (PDE) were performed. The results show the propagation processes of the ejection of the primary detonation and the secondary detonation induced inside the ejector. After two detonation waves are ejected out, they propagate in the form of unexpanded jet flow, and interact with each other at the same time, postponing the ejection time of the exhausted gases and decreasing the absorption time of ambient air. As a result, the ejection efficiency of the ejector decreases, and the numerical results agree well with corresponding experimental results.

Key words: unsteady ejection; supersonic ejection; detonation; combustion; numerical simulation

爆轰动力系统与目前广泛应用的燃烧动力系统相比, 具有更高的燃烧与推进效率, 并能推广用于多种推进领域, 然而爆轰波喷出发动机后因横向膨胀, 使得其所蕴藏的高能量不能转化为推力而损失到周围环境中^[1]. 研究表明, 在其喷口加

装引射器可充分利用喷出的高焓气体来提高爆轰发动机推力^[2].

引射器由放置在发动机出口的同轴管组成, 它利用主流卷吸环境二次流^[2], 增加发动机总排气量. 关于定常引射理论及相关设计等已相当成

收稿日期: 2010-04-20; 修订日期: 2010-05-24

基金项目: 国家重点实验室基金 (9140C3004050802)

作者简介: 张焕好 (1985—), 女, 广东中山人, 博士生, 主要从事爆炸力学研究.

熟,而对于非定常引射,特别是脉冲爆轰引射理论则仍需进一步研究.初步研究表明,非定常引射的推力增益较定常引射高,主要归因于非定常引射过程中主流与二次流的能量转换效率更高^[3-4].

目前,相关研究主要集中在引射器进口位置与发动机出口的距离、引射器进口形状以及整体几何结构对脉冲非定常增推的影响. Opalski^[4]通过研究引射器进口流场特性,发现涡环与引射器直径比对发动机推力增益影响很大. Glaser 等^[2]发现引射性能跟引射器进口与爆轰管出口间的轴向距离密切相关,且最佳轴向距离位于爆轰管下游约 $x/D_{pde}=+2$ 处,而引射器置于爆轰管出口上游则会降低推力增益. 然而,此结论与 Bravo 等^[5]的研究结果并不相符. 此外, Glaser 等^[3]还开展了系列实验研究 PDE (pulse detonation engine) 运行参数与引射器结构参数对推力增益的影响. 结果表明,最优引射器几何结构为引射器长径比 $L_{eject}/D_{eject}=5.61$,并在填充系数(混合可燃气体长度与爆轰管长度之比)为 0.6、运行频率为 30 Hz 时获得最大推力增益(85%). 基于以上实验结果, Allgood 等^[6]发现了最佳引射管轴向位置是一个权衡爆轰波引起的阻力与增加引射量之间的填充系数关系. 结果表明,在低填充系数运行情况下,引射管下游放置能得到较好引射性能. 国内黄希桥等^[7]以及范育新等^[8]同样对 PDE 引射管增推进行了相关实验研究,均获得了较高的推力增益.

多管爆轰较单管具有更现实的意义. Hoke 等^[9-10]对多爆轰管后安装单个引射管进行了系列实验研究,发现安装单个引射管可使多管爆轰发动机获得推力增益的同时,还比多管引射能减少更多额外设备. 然而,多管爆轰运行时存在一些负作用使得整体推力增益值比单管少. 随后,他们采用高速纹影以及 CSV (coherent structural velocimetry) 速度测量技术对爆轰管出口与引射管唇部之间的流场进行检测,再次得到了以上低推力增益的结论^[10].

虽然实验数据已表明多管 PDE 引射可提高发动机性能,但缺乏对其流场特性及其与周围空气相互作用机理的研究,且爆轰波进入引射管后,引射管内流场变得极其复杂,既存在发动机出口喷射超声速燃烧流动,还存在引射二次流中燃料与氧化剂的快速混合燃烧以及引射器内部激波、涡系、燃烧及边界层相互干扰等复杂流动现象,因而单纯的实验并不能全面揭示内外流场整体结

构. 为了能清楚了解多爆轰管引射流场的主要物理特性,本文基于 Euler 均相反应方程,采用能够准确捕捉激波的高精度 Reo/HLL (Harten-Lax-Van Leer) 混合格式及自适应网格加密 (adaptive mesh refinement, 简称 AMR) 技术对双爆轰管引射过程进行数值模拟,揭示爆轰波从爆轰管喷射及在引射管中诱导二次爆轰与引射的整个过程.

1 数值方法及计算模型

1.1 控制方程

基于带化学反应,二维非定常可压流 Euler 方程来描述双管引射过程的主要特性. 假设管内气体为满足完全化学反应所需当量比的理想预混气体,其控制方程为

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

其中

$$\mathbf{U} = [\rho, \rho u, \rho v, E, \rho Y]^T,$$

$$\mathbf{F} = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (E + p)u, \rho u Y]^T,$$

$$\mathbf{G} = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (E + p)v, \rho v Y]^T,$$

$$\mathbf{S} = [0, 0, 0, 0, \omega]^T.$$

式中 ρ 为气体密度, u 和 v 分别为 x 和 y 方向的速度分量, Y 为反应物的质量分数. 总能的表达式为

$$E = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) + \rho q Y \quad (2)$$

其中 γ 为比热比, $\gamma = 1.20$, q 为反应放热,源项 ω 为反应速率,按单步反应的 Arrhenius 定律有

$$\omega = -K \rho Y e^{-(E_a/T)} \quad (3)$$

其中 T 为反应温度, E_a 是活化能, K 为恒定反应系数. 理想气体状态方程为

$$p = \rho RT \quad (4)$$

方程(1)~(4)构成封闭方程组,且基于常温 ($T_0 = 300 \text{ K}$)、常压 ($p_0 = 101\,325 \text{ Pa}$) 理想气体特征参数进行无量纲化处理.

1.2 数学方法及验证

利用有限体积法对方程(1)进行离散. 时间推进采用二阶精度 Runge-Kutta 法,对流项离散则选用二阶 Roe 格式,并选用 HLL 格式对强激波区域进行处理,以解决 Roe 格式在求解强间断高速流时所带来的 Carbuncle 现象^[11]. 由于爆轰波的捕捉对网格要求非常高,若采用均匀网格则所需计算资源巨大,而 AMR 技术则能有效提高时间与空间的求解效率. 计算过程中,根据流场中网

格加密原则(压力或密度梯度)来进行网格加密,详细描述参见文献[12].

为验证上述数值方法对爆轰波捕捉的能力,以典型方管内燃燃烧扰动诱导爆轰现象为例进行数值验证实验.设在长管封闭端给出初始点火条件,并在点火阵面后加初始扰动.一段时间后,火焰阵面出现不稳定,并开始变形,最终诱导形成稳定爆轰,其典型的爆轰波结构如图1(a)所示,结果与文献[13]等相符,表明上述方法的有效性.图1(b)为爆轰波三波点处自适应加密网格的局部放大图,可知,管中压力梯度较大处,如爆轰波附近,网格得到加密,其他地方则基本为基网格,这样可充分节省相关资源,并加快计算速度.

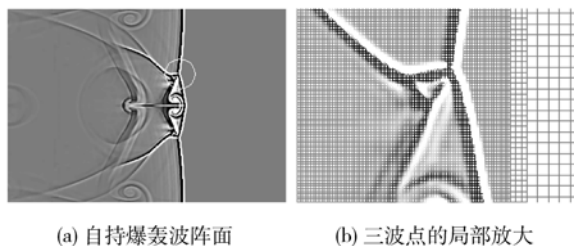


图1 规则爆轰波的典型计算结果

Fig.1 Typical computational result of a regular detonation

1.3 计算模型

本文主要对双管爆轰单引射进行研究,其计算模型如图2所示.两爆轰管宽度均为 D ,长度为 $L=8.82D$,并排置于引射管进口中心轴线上,爆轰管与引射管的重叠距离为 $d=3.82D$.引射管长度为 $L_e=33.5D$,管径为 D_e .初始基网格为均匀分布的结构网格,总数为 142×2200 ,加密次数取为3.

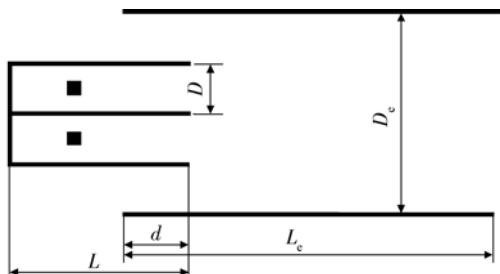


图2 双爆轰管单引射器的计算模型

Fig.2 Schematic of two detonation tubes with single ejector

为了加速爆轰波的形成,缩短爆轰管长度,可

在其点火端附近放置方块障碍物以加速诱导爆轰^[14],故将大小为 $0.3D \times 0.3D$ 的方块固定在靠近爆轰管点火端的轴线上.图3为 $t=2.9$ 时爆轰波流场的计算阴影图.可见,在喷射进入引射管前已在爆轰管内形成规则爆轰波.

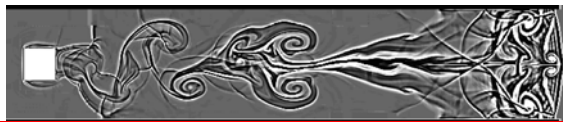


图3 在 $t=2.9$ 时爆轰管中流场的计算阴影图

Fig.3 Numerical shadowgraph of the flow-field in the detonation tube at $t=2.9$

2 结果与讨论

双爆轰管后安装单引射管比双引射管能更有效地减少附加设备.然而,初步实验结果表明,其推力增益要比单管爆轰单引射管小^[9-10].表明多爆轰管工作模式下存在负面影响,其作用机理需进一步研究.

爆轰波从小管(主管)喷射进入大管(引射管)后存在超临界爆轰、临界爆轰与次临界爆轰三种不同模式^[15].这主要是由于爆轰波从主管喷出后,因膨胀使其前导激波强度变弱,波后温度降低,并降低反应区燃烧速率.超临界爆轰的膨胀过程短,燃烧速率下降不大,因而化学反应区一直紧随前导激波,使爆轰在引射管内继续维持.而临界爆轰是指爆轰波膨胀过程中存在短暂熄火,随后在引射管内因激波反射等原因重新点燃并诱导第二次爆轰.次临界爆轰则指引射管内不能重新点火,爆轰在引射管内最终消失.

计算开始时,在主管与引射管内充满预混可燃燃气,取 $q_0=50$, $E_a=10$, $f=1.2$ (f 为过驱系数),引射管膨胀率 $r=2.0$ (引射管与爆轰管的管径比).计算表明,此时引射管内为临界爆轰传播模式.图4为 $t=2.9$ 时,主爆轰管轴线上压力及速度分布曲线.此时爆轰波刚好到达爆轰管出口,波阵面压力及速度峰值分别为 $p=21.0$ 和 $v=5.2$.图5为爆轰波进入引射管后流场的计算纹影图.图6则为不同时刻爆轰管及引射管轴线上压力的分布曲线.可见,两管爆轰波进入引射管后,其前导激波相互碰撞与耦合(图5(a)),最终形成一个球形波阵面在引射管内传播(图5(b)).且两前导激波在爆轰管出口的反反复撞,在该处形成局部高压区(图6(a), $t=3.4$, $p=32.0$ 和图6

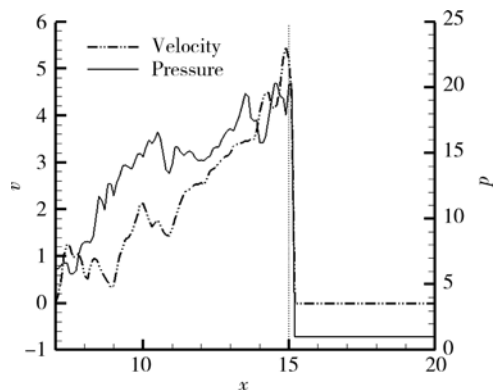


图4 $t=2.9$ 时, 爆轰管轴线上压力和速度分布曲线
Fig. 4 Distribution of pressure and velocity along one detonation tube center axis at $t=2.9$

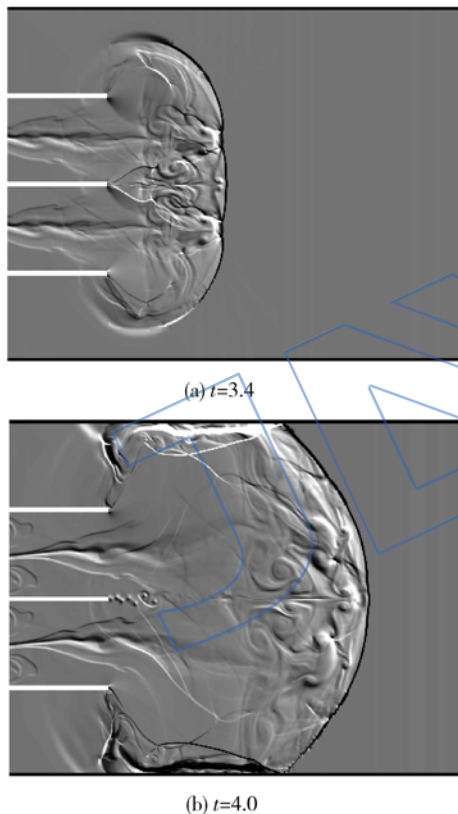
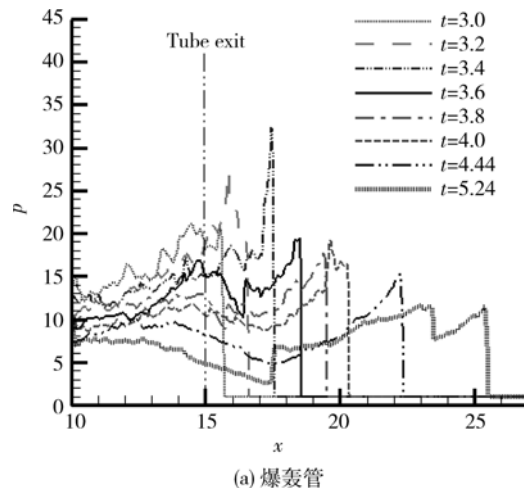


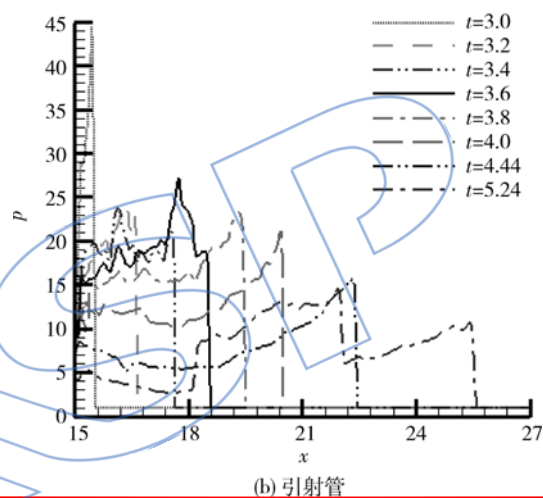
图5 爆轰波进入引射管后流场的计算纹影图
Fig. 5 Numerical schlieren images of the flow-field after the detonation wave injected into the ejector

(b), $t=3.6$, $p=28.0$), 并使部分燃烧气体从引射器进口被排出。随着前导激波在引射管内的传播, 前导激波的强度不断衰减, 引射管轴线上的压力开始下降(图 6(b), $t=3.6 \sim 5.24$)。随后, 前导激波跟引射管内壁面碰撞, 并发生反射(图 5(b), $t=4.0$)。

图 7 为引射管内激波碰撞再次诱导形成爆轰



(a) 爆轰管



(b) 引射管

图6 不同时刻, 爆轰管及引射管轴线上压力分布
Fig. 6 Pressure distribution along the centerline of the upper detonation tube and the ejector at different times

时的反应物质量分数、温度以及压力的等值线分布。此时, 主管出口中心区的可燃气已基本耗尽, 而在引射管近壁面、引射管左端进口以及前导激波以后区域的可燃反应物质量分数仍然较高而有可能被再次点燃(图 7(a)), 但此时高温区的分布与反应物质量分数分布趋势相反, 因而不可能靠管内高温来点燃(图 7(b))。然而此时, 随着激波阵面的传播 ($x=24.5 \sim 25.5$), 它与壁面发生的规则反射开始演变成马赫反射, 并在上下壁面附近形成两个高温高压的三波点(图 7(b)和(c)), 可再次点燃引射器内可燃混合气并诱导形成二次爆轰波。但是此时, 点火区域只在壁面附近, 轴线附近的激波强度在持续衰减(图 6, $t=5.24$, 图 7(b)和(c)), 直到两个三波点在引射管轴线上发生碰撞。

可见, 在双爆轰管情况下, 前导激波跟引射管

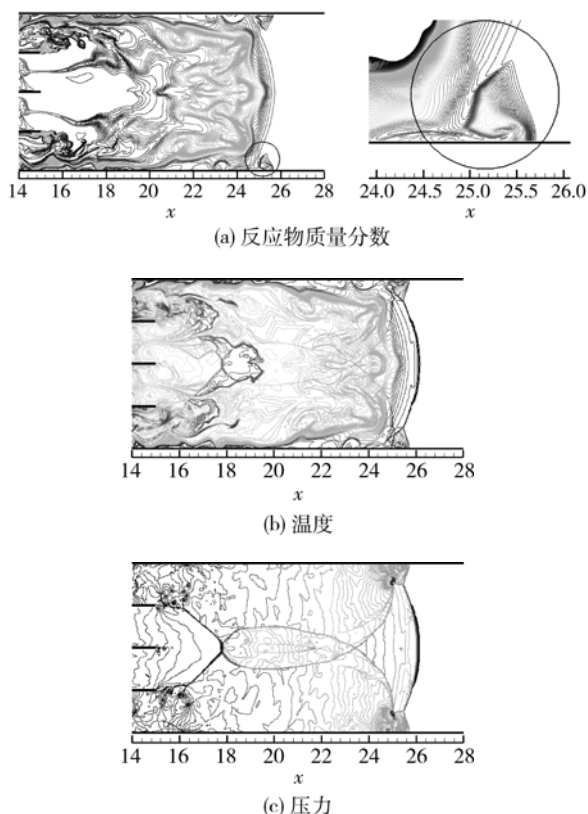


图7 $t=5.4$ 时,引射管内反应物质量分数、温度以及压力的等值线分布

Fig. 7 Contours of mass fraction of reactant, temperature and pressure in the ejector at $t=5.4$

内壁面碰撞后形成规则反射(图5(b), $t=4.0$),并由规则反射($t=4.0$)发展成为马赫反射($t=5.4$),这与单爆轰管情况基本相同,然而其演变过程所需时间要比单管爆轰长,且两个三波点在引射管内再次诱导形成的位置距爆轰管口要远^[16].这表明双爆轰波进入引射管后需要经过更长的时间及距离才能形成二次爆轰.

图8为引射管不同模态时的流线分布.可知,该区经历了爆轰波的膨胀期(图8(a))及引射吸入期(图8(b)).在爆轰波喷出主管初期,在主管边缘形成了两个涡环,并由于两个爆轰波在引射管内迅速膨胀,迫使重叠区附近的气流从引射管进口排出(图8(a)),这部分气流的能量不能转化为发动机推力而损失到环境当中.随着爆轰波在引射管内的传播,重叠区压力不断下降,最终于 $t=16.34$ 时,引射管外气流通过引射管进口处涡环被卷吸进入引射管中(图8(b)),从而增加了发动机后期的排气总质量及总动量.然而,由于高温气体从引射器的排出时间($t=3.0 \sim 16.30$)比单

爆轰管^[16]要长.若发动机运行频率一样,则气体吸入时间会变少.因此,减少了从环境中卷吸进入引射器的气体总量.最终,降低了发动机排气总流量,从而降低其推力增益,这与 Hoke 等人^[10]的实验结果相符合.

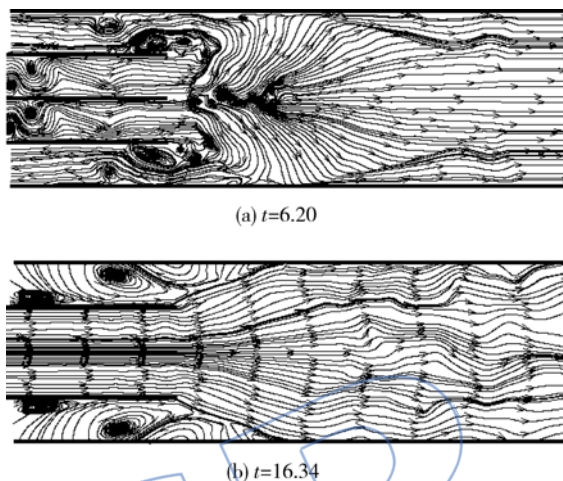


图8 爆轰管与引射管相交处的流线分布
Fig. 8 Distribution of streamline near the intersection of tubes and ejector

3 结 论

本文基于二维 Euler 方程,利用高精度 Roe/HLL 混合格式以及 AMR 技术,对双管爆轰单引射过程进行了数值模拟.结果表明,双管爆轰单引射的临界爆轰模态下,由于喷射进入引射管的两个爆轰波之间的相互作用,改变了其管口的压力分布,增大了引射管排气强度与持续时间,延长了引射管内二次爆轰的诱导,从而使得引射吸入环境气流时间变短,最终导致推力增益较单管爆轰引射小.

参考文献:

- [1] Canteins G, Franzetti F, Zoclo'nska E, et al. Experimental and numerical investigations on PDE performance augmentation by means of an ejector[J]. Shock Waves, 2006, 15 (2): 103-112.
- [2] Glaser A J, Caldwell N, Gutmark E. Experimental study of ejectors driven by a pulse detonation engine[R]. AIAA 2007-447, 2007.
- [3] Glaser A J, Caldwell N, Gutmark E. Performance measurements of straight and diverging ejectors integrated with a pulse detonation engine[R]. AIAA 2006-1022, 2006.
- [4] Opalski A B. Detonation driven ejector exhaust flow characterization using planar DPIV[R]. AIAA 2005-4379, 2005.

- [5] Bravo L G, Santoro R J, Guillet G L. Experimental study of rounded ejector inlets for pulse detonation engines[R]. AIAA 2004-14342, 2004.
- [6] Allgood D, Gutmark E, Hoke J, et al. Performance studies of pulse detonation engine ejectors[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(6):1317-1323.
- [7] 黄希桥, 严传俊, 王治武, 等. 爆震频率对脉冲爆震发动机引射性能影响的实验[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(3): 401-405.
HUANG Xiqiao, YAN Chuanjun, WANG Zhiwu, et al. Effect of operating frequency on performance of pulse detonation engine driven ejector[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(3):401-405. (in Chinese)
- [8] 范育新, 王家骅, 李建中, 等. 脉冲爆震发动机(PDE)引射增推装置试验[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(6):983-988.
FAN Yuxin, WANG Jiahua, LI Jianzhong, et al. Experimental investigation on thrust augmentation of pulsed detonation engine (PDE)[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(6):983-988. (in Chinese)
- [9] Hoke J, Bradley R. Single-ejector augmentation of a multi-tube pulsed detonation engine[R]. AIAA 2008-115, 2008.
- [10] Hoke J, Naples A G, Goss L P. Schlieren imaging of a single-ejector, multi-tube pulsed detonation engine[R]. AIAA 2009-1065, 2009.
- [11] Deiterding R. A parallel adaptive method for simulating shock-induced combustion with detailed chemical kinetics in complex domains[J]. *Computers & Structures*, 2009, 87(11-12):769-783.
- [12] Berger M, Colella P. Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics[J]. *Journal of Computational Physics*, 1988, 82(1):64-84.
- [13] Liang Z, Bauwens L. Detonation structure with pressure-dependent chain-branching kinetics[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2):1879-1887.
- [14] Chan C K, Dorofeev S. Collision of a shock wave with obstacles in a combustible mixture[J]. *Combustion and Flame*, 1995, 100(1-2):341-348.
- [15] Papalexandris M V, Thomas J F, Jacobs C, et al. Structural characteristics of detonation expansion from a small channel to a larger one[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2):2407-2414.
- [16] 张焕好, 陈志华, 孙晓晖, 等. 非定常超声速引射流场的数值研究[R]. 南京:瞬态物理国家重点实验室报告, 2010.
ZHANG Huanhao, CHEN Zhihua, SUN Xiaohui, et al. Numerical investigations on the unsteady supersonic flow field of an ejector[R]. Nanjing: Report of National Key Laboratory of Transient Physics, 2010. (in Chinese)