

# 喷口与凹面腔距离 $L$ 对激波聚焦起爆震波的影响分析\*

张荣理,何立明,荣康,陈鑫,曾昊

(空军工程大学工程学院,西安 710038)

**摘要:**为研究两级脉冲爆震发动机环形喷口与凹面腔距离  $L$  对激波聚焦起爆震波的影响,文中以氢气和空气混合物为例,对不同  $L$  下激波聚焦起爆震波的过程进行了数值模拟。结果表明, $L$  的存在会使激波入射方向与壁面法线方向夹角减小,在壁面反射聚焦的激波面积增大,腔内的反射聚焦效应增强;随着  $L$  的增大,起爆点与壁面间距离增加,起爆点压力下降;在  $L = 1d$  附近,一个爆震循环作用于单位面积壁面的冲量最大。

**关键词:**环形喷口与凹面腔距离;激波聚焦;数值模拟

中图分类号: V211.3 文献标志码: A

## The Investigation on the Influence of Distance between Jet Inlet and Concave Exit Plane on Detonation Initiation by Shock Wave Focusing

ZHANG Rongli, HE Liming, RONG Kang, CHEN Xin, ZENG Hao

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of the distance between jet inlet and concave exit plane on detonation initiation via shock wave focusing in a 2-stage PDE, detonation initiation with different  $L$  (the distance between jet inlet and concave exit plane) was simulated and hydrogen-air mixture was used in this paper. The results indicate that in the hemisphere concave cavity, the appropriate length of  $L$  can improve the incidence of leading shock at the concave wall to increase the reflected shock wave area and improve the incidence angle and thus improve the reflecting effect. As  $L$  increases, the distance between the focus and concave wall is enlarged. Further more, when  $L = 1d$ , the impulse on unit concave area is the largest during a detonation cycle.

**Keywords:** distance between jet inlet and concave exit plane; shock wave focusing; numerical simulation

### 0 引言

俄罗斯研究人员提出的两级脉冲爆震发动机(2-stage pulse detonation engine,简称 2-stage PDE)<sup>[1-2]</sup>,可以连续注入常规航空煤油,无机械阀门,具有极高的频率和极短的 DDT 距离,提供接近连续的推力输出,具有重要的工程应用价值。继俄罗斯的研究之后,GE 研究中心的 Ivett A. Leyva 等人<sup>[3]</sup>于 2003 年对无反应气流在二维凹面腔中的激波聚焦过程进行了一系列实验和数值模拟研究。2005 年 GE 研究中心的 Keith R. McManus 等人<sup>[4]</sup>进行了 2-Stage PDE 热态实验,但未能获得爆震波。国内此项研究刚刚起步,2007 年南京理工大学<sup>[5]</sup>以冷态空气为介质,研究了凹面腔结构及射流参数对腔内激波聚焦过程的影响,并实现了爆震起爆

的模拟<sup>[6]</sup>。

目前,环形喷口与凹面腔出口之间的距离  $L$  对凹面腔内激波聚焦起爆震波的影响尚未有人分析。文中通过数值模拟研究了环形喷口与凹面腔出口之间的距离对激波聚焦起爆震波的影响。

### 1 物理模型和数值方法

#### 1.1 计算模型

文中选取与实物 1:1 的计算模型,由于结构的轴对称性,只计算其一半,如图 1 所示。凹面腔采用半球型壁面(型面曲线为

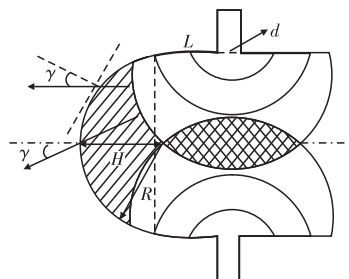


图 1 计算模型

\* 收稿日期:2011-05-27

作者简介:张荣理(1988-),男,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向:信息系统与决策支持系统。

$\bar{y}^2 + \bar{x}^2 = 8^2$ ), 环形射流喷口宽度为  $d = 1\text{mm}$ 。文中研究在深腔( $H = R$ )中调整  $L$  对腔内激波聚焦及爆震起爆过程的影响。 $R$  为凹面腔出口截面半径,  $H$  为凹面腔深度。较短的  $L$  一方面可以削弱射流出口处的涡及弧形壁面对前导激波的影响, 改善前导激波在凹面腔内的入射形式, 增强反射聚焦效果; 另一方面由于  $L$  较短, 又不至于使前导激波的强度过度衰减。在此取  $L = 0, 1d, 2d, 3d$  (其中  $d$  为环形喷口宽度) 4 个值进行对比研究。将环形喷口设置为压力入口边界, 压力  $P_{in} = 0.5\text{MPa}$ , 温度  $T_{in} = 400\text{K}$ , 凹面腔及尾喷管为刚性、无滑移、绝热壁面, 外区域为环境条件, 压力  $P_a = 0.101\text{MPa}$ , 温度  $T_a = 300\text{K}$ , 填充  $\text{O}_2/\text{N}_2$  混合气, 凹面腔及尾喷管内

填充当量比为 1:1 的  $\text{H}_2/\text{O}_2$  混合气, 初始温度  $T_0 = 300\text{K}$ 。化学反应机理采用 9 组分 31 个化学反应的基元反应模型<sup>[9-10]</sup>。

### 1.2 计算方法的初步验证

为了验证文中数值方法模拟激波聚焦起爆的有效性, 本节以  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$  混合气为介质, 对轴向入射的平面激波在凹面腔中反射聚焦后起爆爆震燃烧的过程进行模拟, 并与文献[11]中的实验结果进行对比。从图 2 中的模拟结果可以清楚地看出文献中实验照片反映的激波入射到凹面腔、经壁面反射、反射激波聚焦后起爆及爆震波以弧形向开口端传播的整个过程, 且吻合较好, 模拟结果可信。

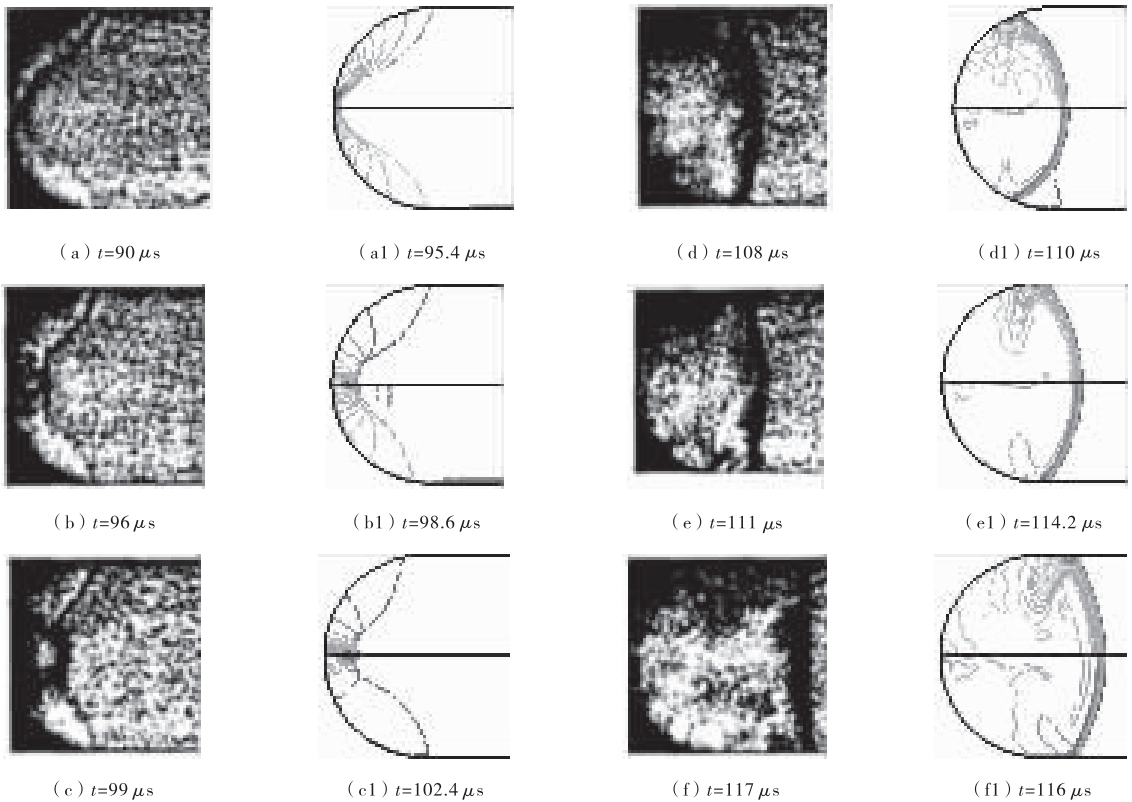


图 2 轴向入射的平面激波在凹面腔中聚焦起爆爆震波过程模拟结果与文献[1]实验图片对比, 左侧为实验照片, 右侧为文中模拟结果(上半部为密度等值线, 下半部为温度等值线)

## 2 计算结果与分析

调整  $L$  对半球型凹面腔内的激波聚焦及爆震起爆过程的影响如图 3 ~ 图 5 所示。从图 3 可见, 由于  $L = 0$ , 前导激波 LS 在发展过程中受到凹壁面作用, 最终在腔底的轴向入射激波面积较小, 入射方向与腔壁面法方向之间夹角  $\gamma$  较大(图 3(b)), 在腔底发生反射聚焦的激波面积较小。

随着  $L$  的不断增大, 射流前导激波自由发展空间增大, 激波在腔底的轴向入射面积逐渐增大, 入射方向与腔壁面法向之间夹角  $\gamma$  逐渐减小(图 4(a)), 更加有利于激波在凹壁面的反射聚焦。从图(4)中可见, 由于沿轴向入射到凹壁面并发生反射聚焦的激波面积增大及  $\gamma$  角的减小, 反射强度增加, 激波聚焦点离壁面的距离增加(图 4(d))。

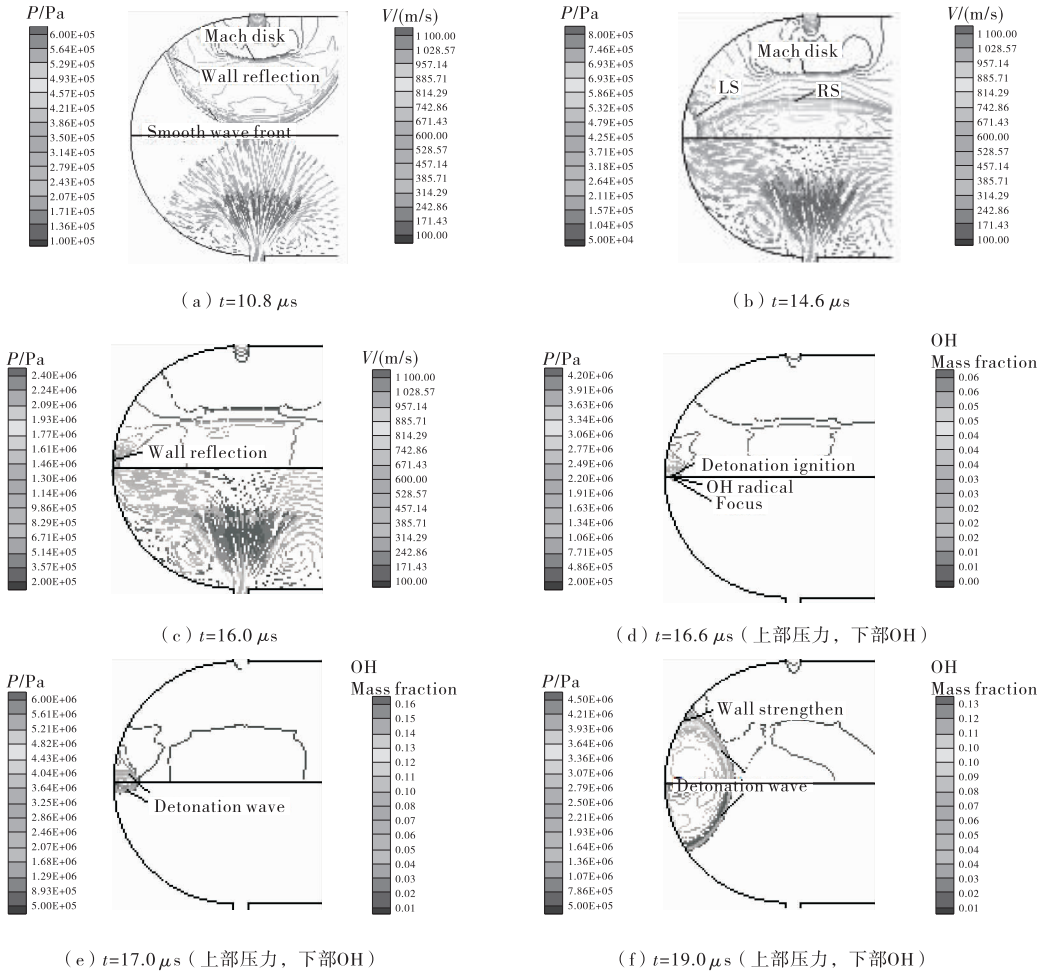


图 3  $L=0$  的半球型凹面腔中的激波聚焦及爆震起爆过程(上部为压力等值线,下部为速度矢量或 OH 质量分数等值线)

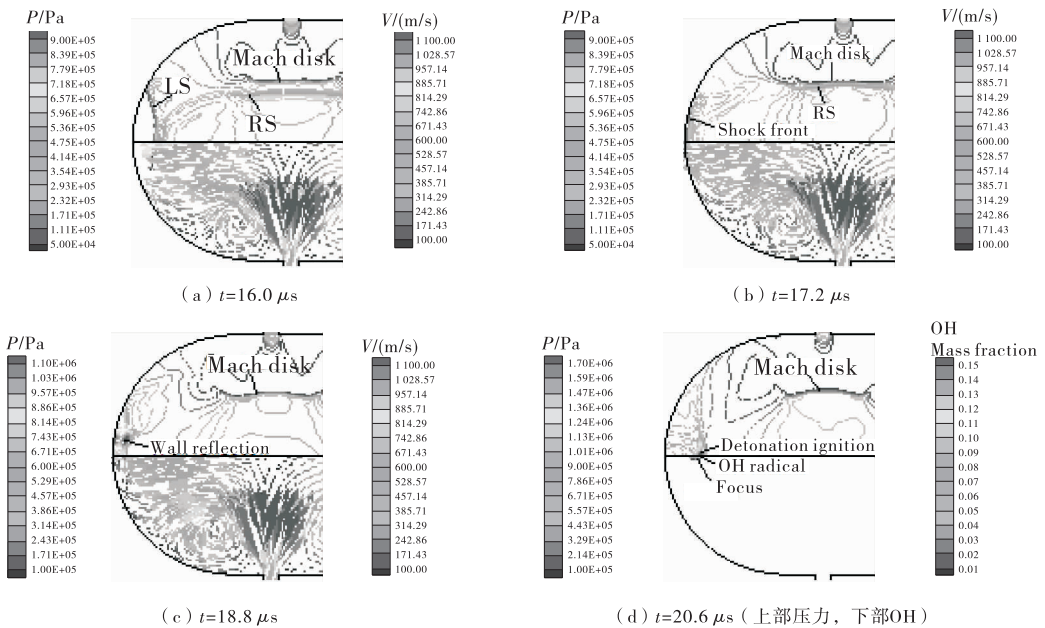


图 4  $L=2d$  的半球型凹面腔中的激波聚焦及爆震起爆过程(上部为压力等值线,下部为速度矢量或 OH 质量分数等值线)

进一步增加  $L(L=3d)$  后,激波在凹面腔底部的入射面积进一步增加,入射角  $\gamma$  进一步缩小,越来越近似平面激波轴向入射情形(图 5(a)),然而由于  $L$  过大,

前导激波运动到壁面的距离增加,且此过程中得不到壁面压缩增强,激波强度逐渐减弱,最终虽然在凹面腔底部发生了很好的反射聚焦过程,但由于聚焦强度较

低,未能成功起爆震波(图 5(c)、图 5(d))。

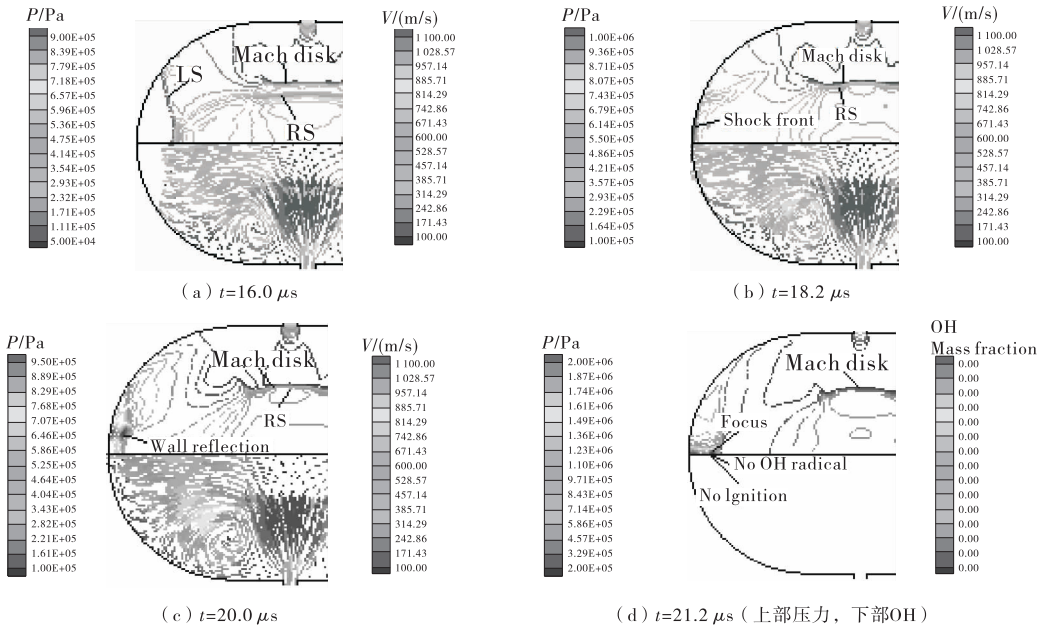
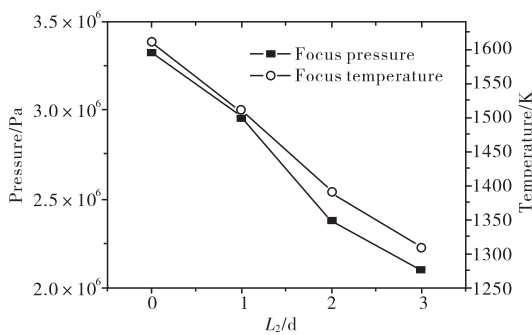


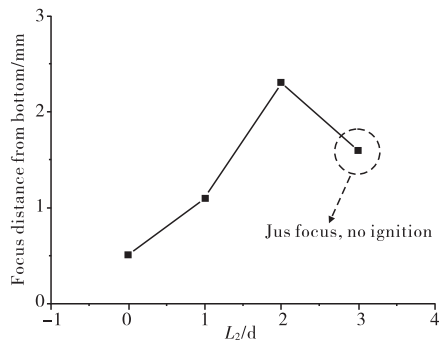
图 5  $L = 3d$  的半球型凹面腔中的激波聚焦及爆震起爆过程(上部为压力等值线,下部为速度矢量或 OH 质量分数等值线)

图 6 记录了不同  $L$  条件下,半球型凹面腔内激波聚焦压力和温度及聚焦点位置随  $L$  的变化情况。图 6 (a) 显示,在半球型凹面腔中,随着  $L$  增加激波聚焦压力和聚焦温度近似呈线性就下降,而聚焦点与壁面的

距离不断增加(图 6(b)),其中  $L = 3d$  时由于前导激波强度下降较大,反射聚焦点位置与壁面间距离缩小,并且未能成功起爆震燃烧。



(a) 激波聚焦点压力、温度变化



(b) 激波聚焦点位置变化

图 6 半球型凹面腔内激波聚焦压力和温度及聚焦点位置随  $L$  的变化情况

图 7 为不同  $L$  条件下,至腔内可燃混合气反应完毕过程中作用于半球型凹腔壁面的平均压力及单位面积壁面上的冲量情况对比。图 7(a) 显示当  $L$  较小时,因起爆点离壁面较近,爆震燃烧区扩展至壁面后,在壁面的约束下爆震波以弧形向开口端传播,整个过程中爆震波后高压一直作用于凹腔壁面,故壁面平均压力上升较早,压力值较高。而  $L$  较大时,聚焦起爆点离壁面较远,在爆震燃烧区以球形扩展至壁面之前爆震波后高压一直被包围在球形波面内,此时壁面压力一直较低,当爆震燃烧区扩展至壁面后,由于此时爆震波面已展开,凹腔壁上较大区域同时受到爆震波的冲

击,壁面平均压力陡升至较高值(图 7(a) 中  $L = 2d$  的曲线),但此时爆震波在另一个方向也已扩展至出口处,因此高压在壁面上作用时间较短。而  $L = 3d$  时,由于未能起爆震燃烧,激波聚焦后得不到能量支持,腔内压力逐渐下降。为了衡量在腔内发生一次爆震燃烧过程中,不同  $L$  条件下的推力性能,对作用于壁面的平均压力曲线进行积分,得到作用于单位面积壁面上的冲量曲线如图 7(b) 所示,从图中可见, $L$  越小,作用于壁面的冲量上升越早,上升速率越快;随  $L$  不断增大,作用于壁面的总冲量呈现先升高后降低的趋势。



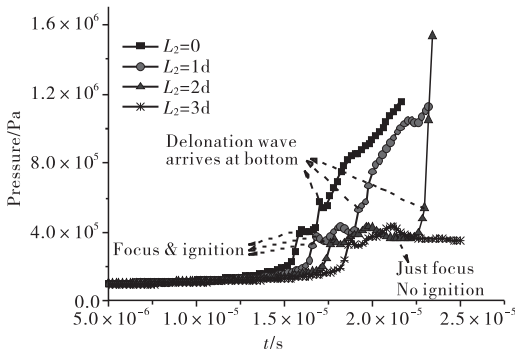
### 4 结束语

文中在分析末制导炮弹结构的基础上,提出了多刚体弹道模型建模的方法。该方法为更加精确的解算弹道提供了新的方法和思路。但是实际情况更加复杂,还有许多外界因素没有考虑,需要在今后的工作中进一步研究。

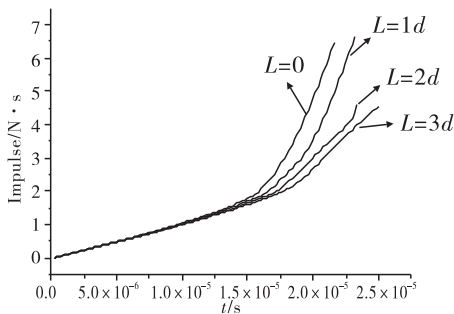
### 参考文献:

[1] 赵庆岚,宋卫东,鲁飞等. 有风条件下末制导炮弹弹道模型研究[J]. 工程设计学报,2008,15(5):373-377.  
 [2] 宋丕极. 枪炮与火箭外弹道学[M]. 北京:兵器工业出版社,1993.  
 [3] 宋卫东,张进忠,赵庆岚. 末制导炮弹弹道模型研究综述[C]//弹道学术交流会,2007.  
 [4] 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1999.

(上接第 140 页)



(a) 壁面平均压力



(b) 作用于单位面积壁面的冲量

图 7 半球型凹面腔壁面平均压力及作用于单位面积壁面的冲量随 L 的变化规律

### 3 结论

通过以上的数值计算和分析,可以得到以下结论:

- 1) L 的存在会改善激波在凹面腔底部的入射形式,在凹腔壁面反射聚焦的激波面积增大,且激波入射方向与壁面法线方向夹角减小,腔内的反射聚焦效应增强。
- 2) 随着 L 的增大,起爆点与壁面间距离逐渐增加,起爆点压力下降,当 L 过大时不能产生爆震而仅发生爆燃。
- 3) 在 L = 1d 附近,一个爆震循环作用于单位面积

壁面的冲量最大。

### 参考文献:

[1] Roy G D, Frolov S M, Borisov A A, et al. Pulsed detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004,30(6):545-672.  
 [2] Levin V A, Nechaev J N, Tarasov A I. A new approach to organizing operation cycles in pulse detonation engines, ADA406683[R].  
 [3] Ivett A Leyva, Venkat Tangirala, Anthony J Dean. Investigation of unsteady flow field in a 2 - Stage PDE resonator, AIAA-2003-0715[R]. 2003.  
 [4] Keith R McManus, Anthony J Dean. Experimental evaluation of a two-stage pulse detonation combustor, AIAA - 2005 - 3773[R]. 2005.  
 [5] 王栋. 脉冲爆震发动机工作过程数值模拟研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.  
 [6] 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):56-60.  
 [7] 李海鹏,何立明,陈鑫,等. 不同结构形式凹面腔内的激波聚焦起爆爆震波数值研究[C]//第九届全国冲击动力学学术会议,2009.  
 [8] 李海鹏,何立明,陈鑫,等. 凹面腔内激波聚焦起爆爆震波过程的数值模拟[J]. 推进技术,2010,31(1):87-91.  
 [9] KONNOV A A. Refinement of the kinetic mechanism of hydrogen combustion [J]. Khimicheskaya Fizika, 2004, 23(8): 5-18.  
 [10] KONNOV A A. Remaining uncertainties in the kinetic mechanism of hydrogen combustion [J]. Combust. Flame,2008,152(4): 507-528.  
 [11] Achasov O V, Penyazkov O G. Some gasdynamic method for control of detonation initiation and propagation, AIAA 2001-3614[R]. 2001.