

气流出口型面对凹面腔内激波聚焦起爆的影响

曾 昊, 刘圣平, 赵 坤, 何立明

(空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘 要: 为提高两级脉冲爆震发动机工作的可靠性, 探寻强化凹面腔内激波聚焦起爆爆震波的方法, 通过数值模拟, 采用氢气作为燃料、空气作为氧化剂, 探讨了 3 种凹面腔气流出口型面及出口面积对激波聚焦起爆的影响。结果表明: 采用垂直出口壁面有助于提高凹面腔内的激波聚焦起爆压力和温度, 使起爆时刻提前, 随着出口面积的减小, 激波聚焦峰值压力有较大的提高; 但效果不如垂直壁面, 随着倾斜壁面出口面积减小, 起爆点的压力和温度只有小幅度增加, 起爆时刻基本无变化; 采用弧形出口壁面, 不能对向凹面腔底部传播的激波产生反射强化作用, 不能有效起爆爆震波。对比 3 种出口壁面型面, 垂直壁面能更有利于凹面腔内的能量聚集, 强化激波聚焦起爆爆震波。

关 键 词: 脉冲爆震发动机; 爆震波; 激波聚焦; 射流; 激波

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Influence of flow outlet surface shape on detonation initiation via shock wave focusing in cavity

ZENG Hao, LIU Shengping, ZHAO Kun, HE Liming

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To improve two-stage pulse detonation engine's operational reliability, a method of enhancing detonation initiation via shock wave focusing was explored. Numerical simulation was conducted, hydrogen was used as a fuel and air as an oxidizing agent. Influences of 3 outlet surface shapes and various exit areas on shock wave focusing were discussed. Results indicated that vertical outlet surface was helpful to increase the pressure and temperature of shock wave focusing and make it occur ahead of focusing time. Pressure of focusing point increased as exit area decreased. Tilting outlet surface was inferior to vertical outlet surface, pressure and temperature of focusing point increase little. Curved exit surface was not helpful to increase the pressure and temperature of shock wave focusing, and detonation wave was not initiated. Compared with 3 outlet surface shapes, vertical outlet surface was better. Simulation results provided a reference for experiment design.

Key words: pulse detonation engine; detonation wave; shock wave focusing; jet; shock wave

脉冲爆震发动机(PDE)是一种利用脉冲式爆震波产生高温、高压燃气来产生推力的发动

机^[1-2], 以其结构简单、比冲大、质量轻的诸多优点被誉为“21 世纪最具潜力的动力装置之一”, 可用

收稿日期: 2017-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(51406234, 91541109)

作者简介: 曾昊(1983—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为脉冲爆震发动机, 微波等离子体助燃。

引用格式: 曾昊, 刘圣平, 赵坤, 等. 气流出口型面对凹面腔内激波聚焦起爆的影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(11): 2694-2702.
ZENG Hao, LIU Shengping, ZHAO Kun, et al. Influence of flow outlet surface shape on detonation initiation via shock wave focusing in cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(11): 2694-2702.

于航空飞行器的动力装置。如何提高脉冲爆震发动机的频率,使其推力输出接近连续,是急需突破的关键技术。两级脉冲爆震发动机(two-stage pulse detonation engine)中利用凹面腔内超声速射流聚心碰撞形成的激波聚焦有望实现高频的爆震起爆。凹面腔内的激波聚焦是指激波在凹面腔底部壁面反射后聚焦,能够在狭小区域能积聚能量,产生高温、高压区,当达到凹面腔内混合物的着火条件时,即形成激波聚焦点火,当条件合适或点火能量足够大,有望实现爆震起爆。关于平面激波轴向入射凹面腔的研究结果已证明可以通过激波在壁面的反射形成有效聚焦^[3-5]。还有平面激波被中置在激波管内的障碍物均匀切割后形成的环形绕射与聚焦^[6-7]。国内近年来也多有研究。上海理工大学的陈二云等^[8]采用间断有限元方法对环形激波在同轴圆柱形激波管内的聚焦流场进行了数值模拟。获得了环形激波在圆柱形激波管内聚焦过程的气动特性,并比较了网格尺度对聚焦点峰值压力的影响。北京航空航天大学的中国航空研究院新技术研究所的秦亚欣、于军力等^[10-15]对几种不同结构形式的爆震发生器进行了数值模拟及实验验证,发现射流火焰在轴线上汇聚过程,有利于激波的加强,在多重激波与火焰反复作用下,激波和火焰面之间出现热点,进而形成过驱爆震波。空军工程大学的荣康等^[16]实验研究了暂冲式环形射流诱导非定常激波聚焦,结果表明环形射流启动时形成的前导激波聚心碰撞是产生非定常激波的主要原因,当喷口前后压比大于临界压比(1.89)时,输入凹面腔的能量由环形

喷口宽度所决定。

如何强化凹面腔内的激波聚焦起爆,使其快速可靠的起爆爆震波是两级脉冲爆震发动机的重要研究方向。凹面腔几何构型和出口型面都能对爆震起爆产生一定影响,为分析其影响规律,本文通过数值模拟的方法探索不同凹面腔出口壁面型面及出口面积对爆震起爆的影响。主要分析垂直型出口壁面、倾斜型出口壁面和弧形出口壁面对激波聚焦起爆的影响,在此基础上,考虑各型面不同出口面积对激波聚焦起爆的影响。

1 计算模型和方法

1.1 计算模型

对 3 类不同结构的轴对称模型(共 3 种模型)进行数值模拟,模型结构如图 1 所示,图中 x 为模型横坐标, y 为模型纵坐标,计算模型都包括射流入射通道、凹面腔、喷管。凹面腔均采用型面为 $x^2 + y^2 = 37^2$ 的部分圆,其出口直径为 $D = 70$ mm,环形射流入口宽度 $d = 5$ mm,等截面尾喷管长为 17 mm,尾喷管扩张角为 45° 。在凹面腔底部中心点、对称轴线上距离凹面腔底部中心点 15 mm 和 27.5 mm 处、气流入射通道等位置分别布置 A、B、C、D 四个监测点。初始网格尺寸为 $\delta = 0.1$ mm。并采用了自适应网^[6],为了克服外界对爆震室出口流场的干扰,计算模型增加了外区,爆震室出口外区部分网格尺寸逐渐增大。模型 1(见图 1(a))凹面腔出口采用垂直向下延伸的壁面,并将垂直延伸长度记为 H ;模型 2(见图 1(b))凹面腔出口采用 45° 倾斜延伸的壁面,并将 45° 倾斜延伸的垂直长度记为 H ;模型 3(见图 1(c))凹面腔出口采用与凹面腔相同弧度对称延伸壁面,并将垂直方向的延伸长度记为 H 。通过调整 3 种出口壁面模型的 H 值来调整凹面腔气流

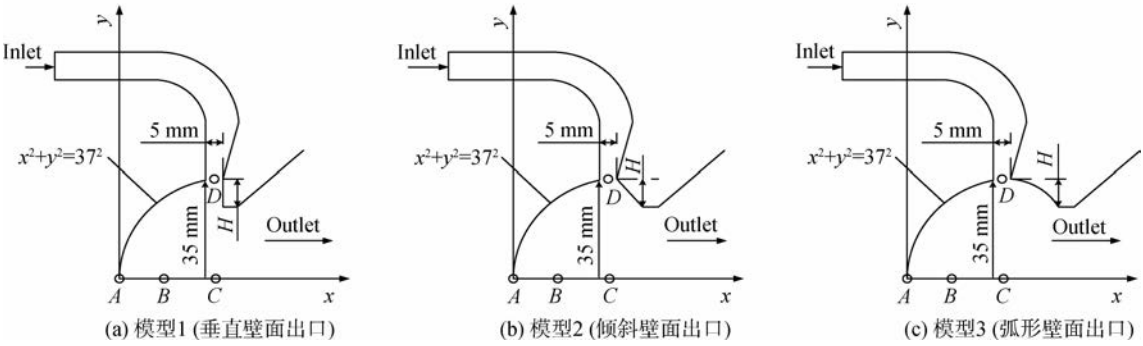


图 1 模型结构

Fig. 1 Model configuration

出口面积,为探寻其中的变化规律,对每种凹面腔出口型面分别计算 $H=0,2,4,6,8,10\text{ mm}$ 时的起爆过程,分析凹面腔出口型面和面积对激波聚焦过程的影响。

1.2 计算方法

采用非稳态二维轴对称 Navier-Stokes(N-S)方程,Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,近壁面采用非平衡壁面函数处理。在对方程离散格式上,选用的是 2 阶迎风格式,在算法上选用对于瞬态问题有着明显优势的 PISO(pressure implicit split-operator)算法。PISO 算法的精度主要取决于时间步长,使用越小的时间步长,可取得越高的计算精度,在选用此算法模拟时,时间步长采用适应性时间推进,最小时间步长为 10^{-9} s ,最大时间步长为 $5\times 10^{-7}\text{ s}$ 。化学反应采用 Chemkin 数据库中 H_2/Air 的 9 组分 19 步反应机理^[7]。

1.3 计算方法验证

采用轴对称模型,计算爆震波在爆震管内的起爆传播过程。计算区域包括起爆区域、爆震燃烧室、外区 3 部分,具体尺寸如图 2 所示,点火起爆条件为压力为 2 MPa,温度为 2 000 K。初始网格尺寸为 $\delta=0.1\text{ mm}$ 。图 3 是不同时刻爆震燃烧室轴线上的压力分布,其中 t 为不同的测量时刻。

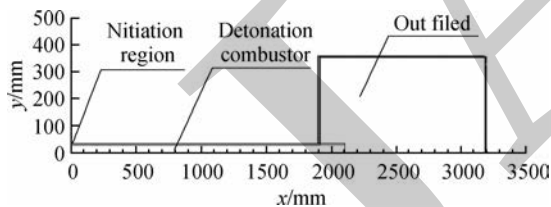


图 2 计算模型
Fig. 2 Calculation model

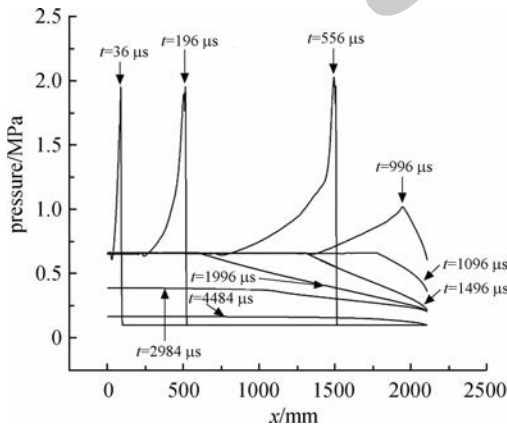


图 3 不同时刻爆震燃烧室轴线上的压力分布
Fig. 3 Pressure distribution of axis of detonation combustion chamber at different times

表 1 是本文计算结果与 STANJAN 软件^[17]和实验值^[18]的对比,其中 $p_{\max}$ 为峰值压力, v 为爆震波速度。从表 1 的数据可以看出,本文计算的爆震波速度和峰值压力与 STANJAN 软件和实验值差别较小,说明本文的计算方法具有一定的可靠性。

表 1 计算结果与 STANJAN 软件和实验值的对比
Table 1 Comparison between calculation, STANJAN software and experimental results

参数	计算结果	STANJAN 软件	实验结果
$p_{\max}/\text{MPa}$	1.921	1.896	
$v/(\text{m/s})$	2764.5	2841.2	2819

1.4 初值和边界条件

环形射流入口为压力入口边界,入口压力 $p_{\text{in}}=0.6\text{ MPa}$,温度 $T_{\text{in}}=450\text{ K}$,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,环境压力 $p_{\text{a}}=0.101\text{ MPa}$,温度 $T_{\text{a}}=300\text{ K}$,填充空气,凹面腔及尾喷管内填充质量比为 $0.02:0.22:0.76$ 的 $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$ 混合气,初始温度 $T_0=300\text{ K}$,化学反应机理采用 9 组 31 个化学反应的基元反应模型。

2 计算结果讨论与分析

2.1 垂直壁面出口面积对激波聚焦起爆的影响

图 4 是 $H=4\text{ mm}$ 时模型 1 的激波聚焦起爆过程压力(p)和温度 T 云图。由图 4 可以看出 $t=152\text{ }\mu\text{s}$ 时,射流由环形入射通道进入凹面腔,由于流道面积突然变化,气流呈柱状面聚心对撞并形成激波,激波在轴线处的相互作用形成了两个交点,分别向凹面腔底部和凹面腔出口运动。 $t=168\text{ }\mu\text{s}$ 时,向凹面腔底部运动的激波交点与凹面腔底部壁面碰撞反射,对近壁面气体的快速二次压缩使得局部区域温度、压力激增。 $t=168\text{ }\mu\text{s}$ 时刻流场峰值温度为 $3\text{ }730\text{ K}$,峰值压力为 9.32 MPa ,混合气被点燃。随后燃烧阵面呈球面快速传播。 $t=178\text{ }\mu\text{s}$ 时燃烧阵面峰值压力为 5.6 MPa ,温度为 $3\text{ }510\text{ K}$,根据相邻时刻燃烧阵面扫过的距离计算,其波速为 $1\text{ }812\text{ m/s}$,可以判定形成了爆震波。当 $t=196\text{ }\mu\text{s}$ 时,爆震波衰减的激波其压力和温度都有明显下降,并经喷管传出。

图 5 是 $H=4\text{ mm}$ 时模型 1 各监测点的压力和温度随时间的变化曲线。由图 5 可以看出,监测点 A 在 $t=169\text{ }\mu\text{s}$ 时峰值压力达到 9.9 MPa ,峰

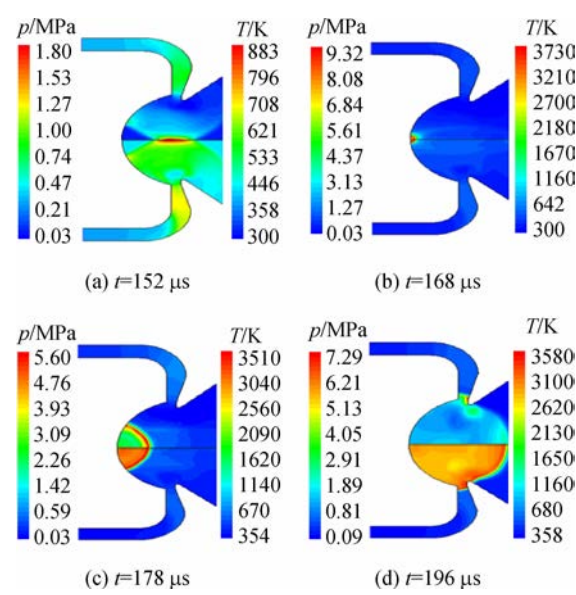


图 4 模型 1 激波聚焦起爆过程的压力(上半面)和温度(下半面)云图($H=4\text{ mm}$)

Fig. 4 Pressure (up side) and temperature (down side) distribution of detonation initiation via shock wave focusing in model 1 ($H=4\text{ mm}$)

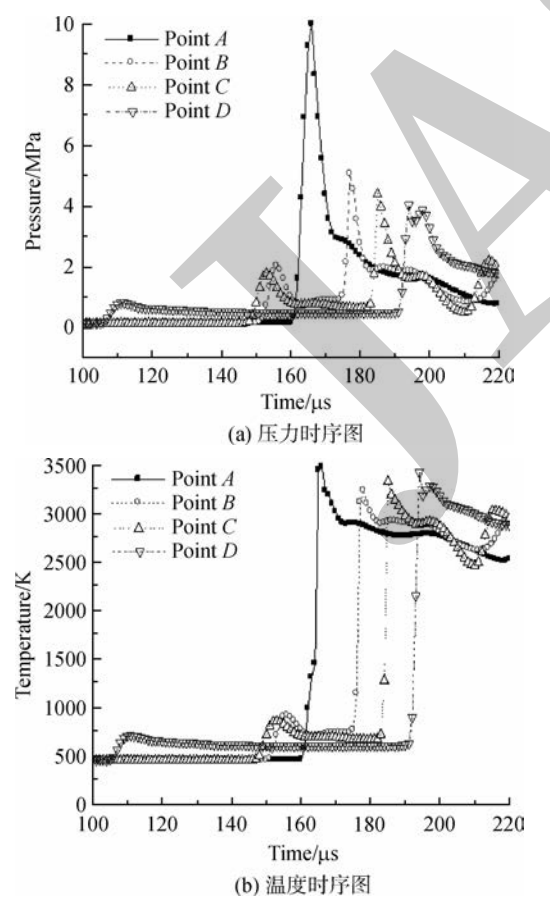


图 5 模型 1 各监测点的压力和温度随时间的变化 ($H=4\text{ mm}$)

Fig. 5 Variation of pressure and temperature with time of various monitor points in model 1 ($H=4\text{ mm}$)

值温度达到 3471 K 。监测点 B 、 C 、 D 的最大峰值压力到达时间分别是 179 、 185 、 $196\text{ }\mu\text{s}$ ，其峰值压力分别为 5 、 4.3 、 4 MPa ，对应的峰值温度都超过了 3200 K ，可以判断产生了爆震波。观察监测点 B 、 C 、 D 的温度和压力曲线，都有两次明显的跃升峰值，第 1 个跃升峰值是由射流入射形成的激波传至监测点而产生的，第 2 个跃升峰值是由激波聚焦起爆后的爆震波传到监测点引起的。

图 6 和图 7 分别是模型 1 不同出口面积的监测点 A 、 B 的压力与温度变化曲线。由图 6 可以看出，随着出口面积的不断减小，凹面腔内 A 点的峰值压力不断增加，峰值压力到达时刻不断提前； B 点峰值压力到达时刻也随之提前，观察图 6 (b) 可见，当 $H=0\text{ mm}$ 时， B 点的峰值压力不到 1 MPa ，显著低于其他出口面积的。由图 7 可以看出，监测点 A 和 B 的峰值温度到达时刻随着气流出口面积的减小而提前，峰值温度除 $H=0\text{ mm}$ 的情况外，均在 3000 K 以上，可以判定，当 $H>2$

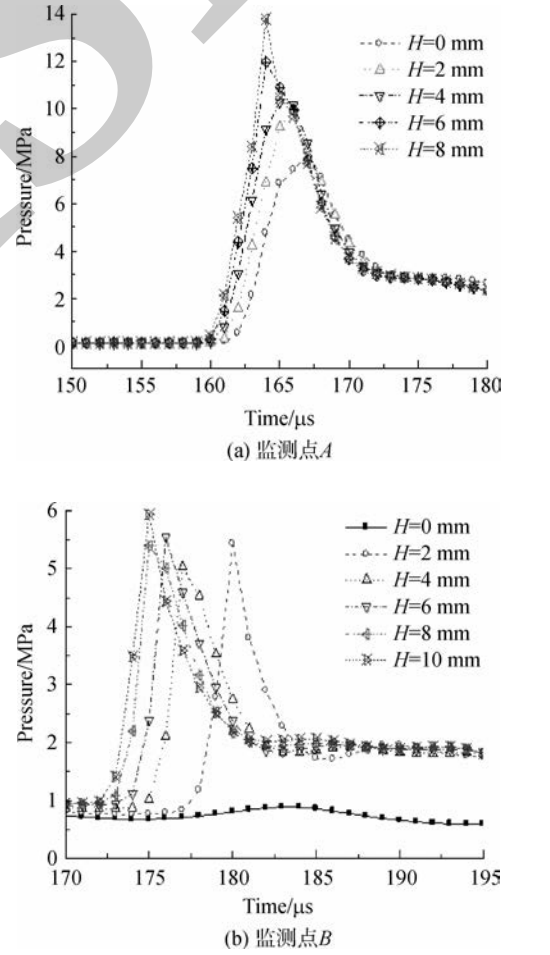


图 6 模型 1 不同出口面积的监测点 A 和 B 的压力变化

Fig. 6 Pressure variation of monitor point A and point B in model 1 with various outlet areas

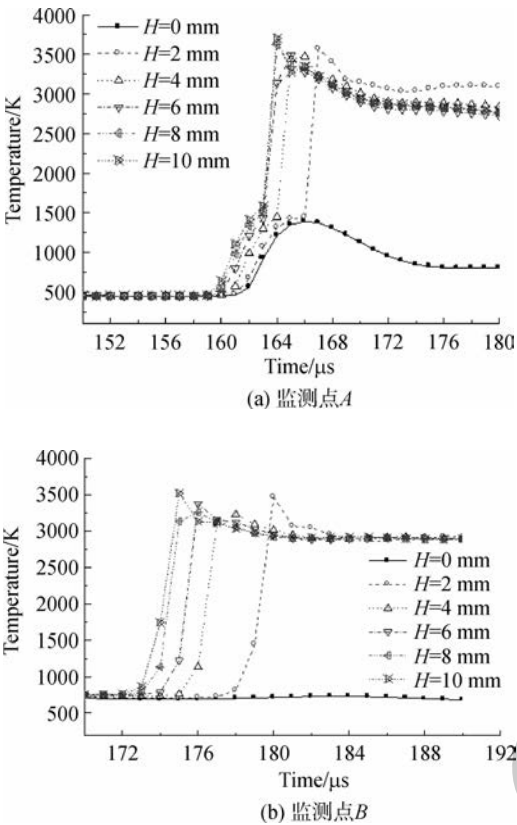


图 7 模型 1 不同出口面积的监测点 A 和 B 的温度变化
Fig. 7 Temperature variation of monitor point A and point B in model 1 with various outlet areas

mm 时,成功起爆了爆震。而 $H=0$ mm 的情况,其监测点 B 的峰值温度不到 600 K,可以判定,没有起爆爆震波。

2.2 倾斜壁面出口面积对激波聚焦起爆的影响

图 8 是 $H=4$ mm 时模型 2 的激波聚焦起爆过程压力和温度云图。由图 8 可以看出 $t=154 \mu\text{s}$ 时,柱状激波在轴线处碰撞。当 $t=172 \mu\text{s}$ 时,激波在凹面腔底部反射聚焦起爆爆震波,峰值压力为 4.7 MPa,峰值温度为 3710 K;随后爆震波呈球面向凹面出口传播, $t=186 \mu\text{s}$ 时,爆震波峰值压力为 4.7 MPa,峰值温度为 3470 K,相比于模型 1 中 $t=178 \mu\text{s}$ 时的 5.6 MPa 和 3510 K 均有减小,这说明模型 2 的 45° 倾斜式出口壁面与垂直出口壁面相比,对激波聚焦过程的能量聚集作用较弱。

图 9 是 $H=4$ mm 时模型 2 各监测点的压力和温度随时间的变化曲线。由图 9 可以看出,监测点 A 在 $t=169 \mu\text{s}$ 时峰值压力达到 7.1 MPa,而温度在 $t=171 \mu\text{s}$ 达到 3562 K。监测点 B、C、D 的峰值压力分别为 4.9、4.1、3.6 MPa,其到达时间分别是 185、193、201 μs ,可以判断 $H=4$ mm 的 45° 倾斜壁面出口模型内能够形成爆震波。

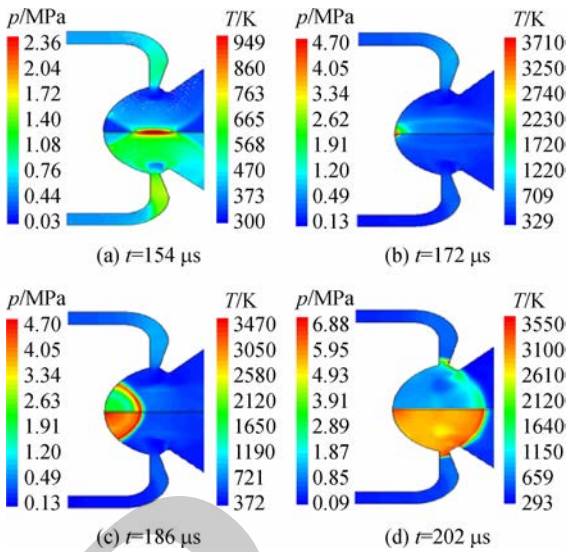


图 8 模型 2 激波聚焦起爆过程的压力(上半面)和温度(下半面)云图($H=4$ mm)
Fig. 8 Pressure (up side) and temperature (down side) distribution of deronation initiation via shock wave focusing in model 2 ($H=4$ mm)

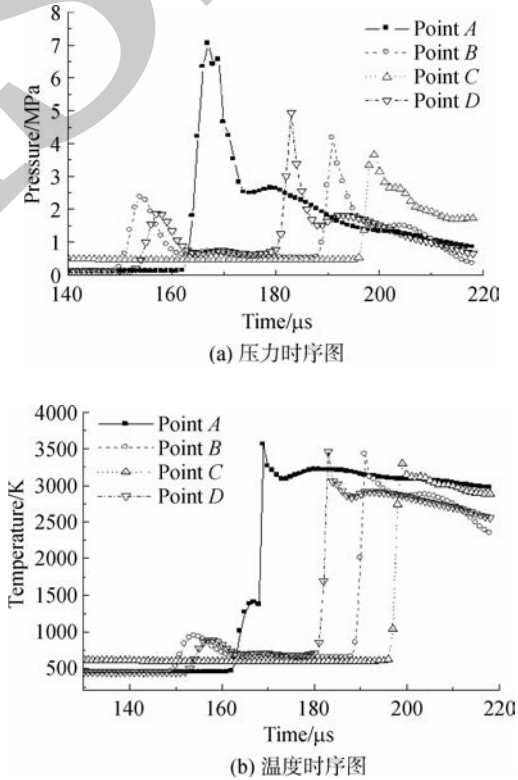


图 9 模型 2 各监测点的压力和温度随时间的变化 ($H=4$ mm)
Fig. 9 Variation of pressure and temperature with time of various monitor points in model 2 ($H=4$ mm)

图 10 和图 11 分别是模型 2 不同出口面积时的监测点 A、B 的压力与温度变化曲线。从图 10

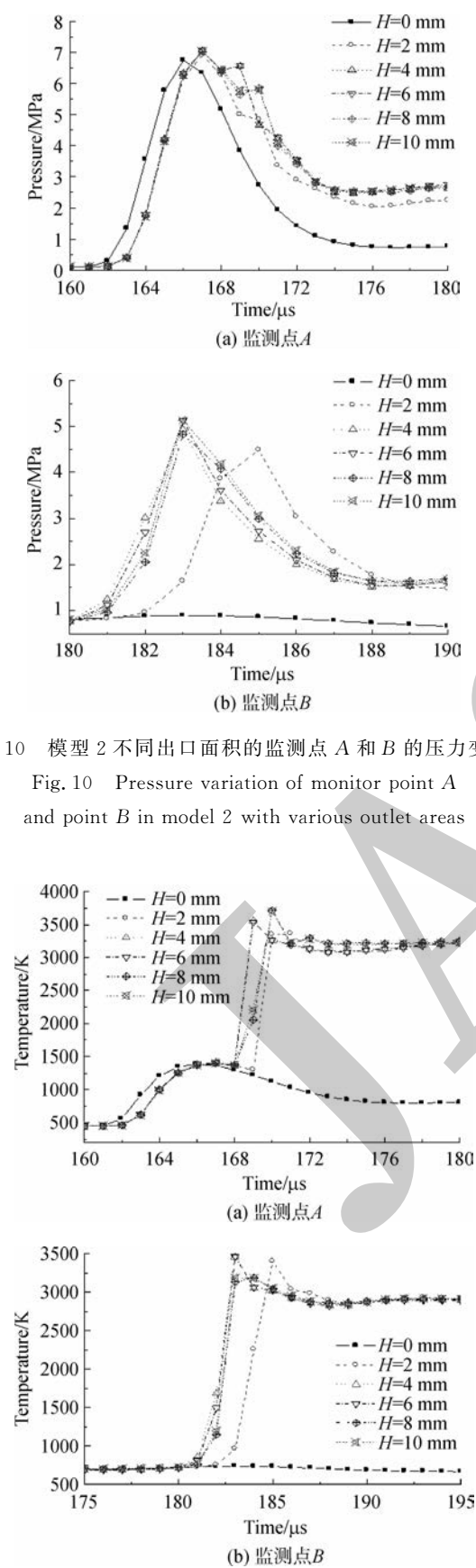


图 11 模型 2 不同出口面积的监测点 A 和 B 的温度变化
Fig. 11 Temperature variation of monitor point A and point B in model 2 with various outlet areas

和图 11 可以看出,随着出口壁面深度 H 的增大,凹面腔的起爆时刻、峰值压力和温度略有提高,但幅度很小,由此可见,此模型随着出口面积的减小,对激波聚焦强化效果有限。由图 11 可以看出,随着气流出口面积的减小提前,峰值温度除 $H=0$ mm 的情况外,均在 3 000 K 以上,可以判定,当 $H>2$ mm 时,成功起爆了爆震波。

2.3 弧形壁面出口面积对激波聚焦起爆的影响

图 12 和图 13 分别是当 $H=4$ mm 的模型 3 中 $t=170\ \mu s$ 和 $t=200\ \mu s$ 时刻的压力、水质量分数分布,观察图中 2 个时刻的水质量分数接近于 0,说明出口壁面深度 $H=4$ mm 的凹面腔内没有水产生,即没有发生燃烧; $t=200\ \mu s$ 时刻峰值压力只有 0.92 MPa,没有起爆爆震波。

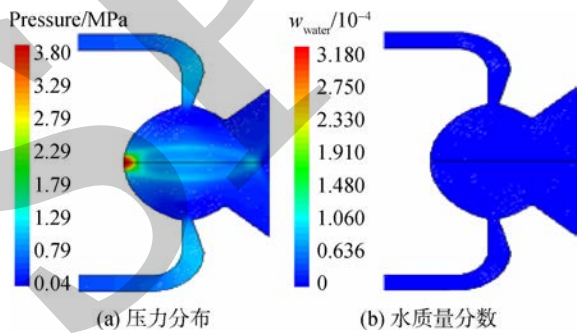


图 12 模型 3 中压力和水质量分数分布
($t=170\ \mu s$, $H=4$ mm)
Fig. 12 Pressure and water mass fraction distribution of model 3 ($t=170\ \mu s$, $H=4$ mm)

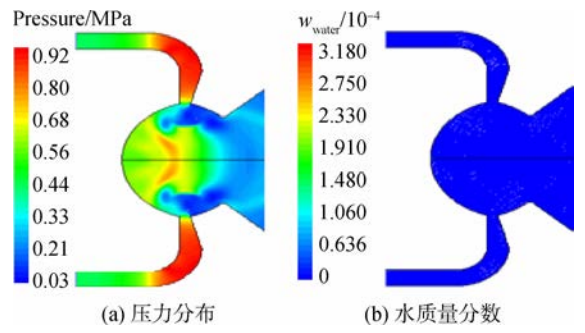


图 13 模型 3 中压力和水质量分数分布
($t=200\ \mu s$, $H=4$ mm)
Fig. 13 Pressure and water mass fraction distribution of model 3 ($t=200\ \mu s$, $H=4$ mm)

图 14 是 $H=4$ mm 时模型 3 各监测点的压力和温度随时间的变化曲线。由图 14 可以看出,监测点 A 在 $t=169\ \mu s$ 时峰值压力达到 6.8 MPa,温度达到 1 388 K,这说明射流聚心碰撞产生的激波

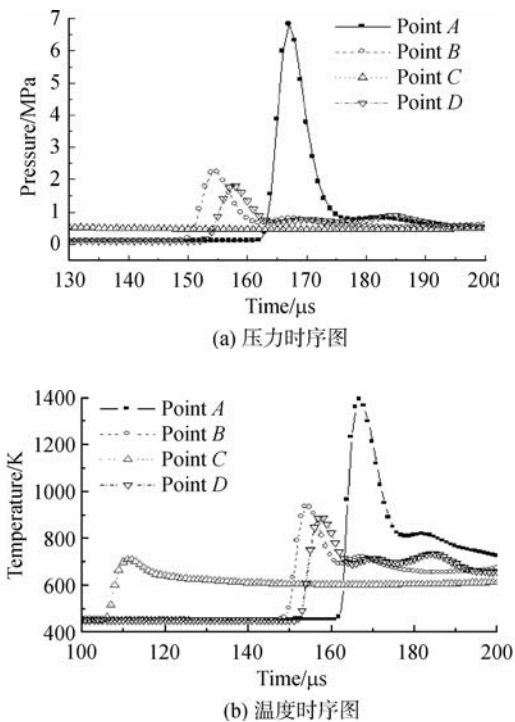


图 14 模型 3 各监测点的压力和温度随时间的变化 ($H=4\text{ mm}$)

Fig. 14 Variation of pressure and temperature with time of various monitor points in model 3 ($H=4\text{ mm}$)

在 $t=169\text{ }\mu\text{s}$ 时传到 A 点并经过 $H=4\text{ mm}$ 的弧形壁面出口模型 3 内没有形成爆震波。

凹壁面反射聚焦产生较大压力,但温度相比于模型 1 和模型 2 中 $H=4\text{ mm}$ 的较低。监测点 B、C、D 的峰值压力分别为 2.2、1.92、0.51 MPa,峰值压力分别均不超过 960 K,可以判断图 15 和图 16 分别是模型 3 不同出口面积时监测点 A、B 的压力与温度变化曲线。由图可以看出,当模型 3 的出口面积减小时,各监测点的压力及温度均无明显变化,监测点 B 的压力均低于 1.9 MPa,温度小于 900 K。说明不同出口面积的模型 3 中并没有起爆爆震波。因此,模型 3 的弧形出口面积变化并不能强化激波聚焦强度成功起爆爆震波。

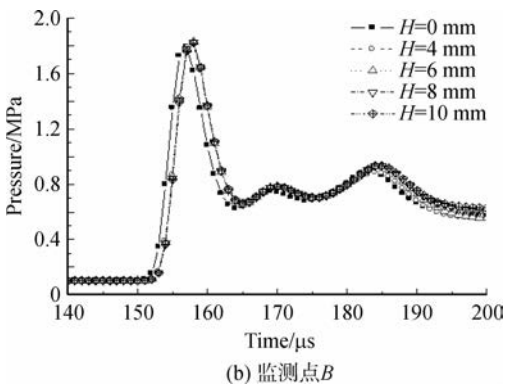
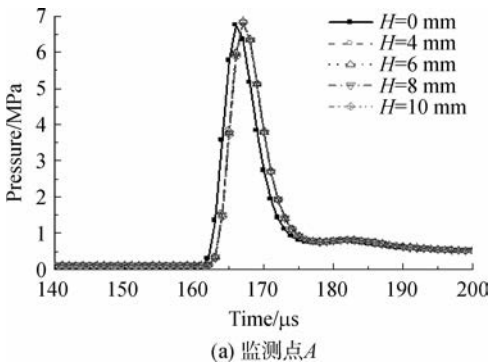


图 15 模型 3 不同出口面积的监测点 A 和 B 的压力变化

Fig. 15 Pressure variation of monitor point A and point B in model 3 with various outlet areas

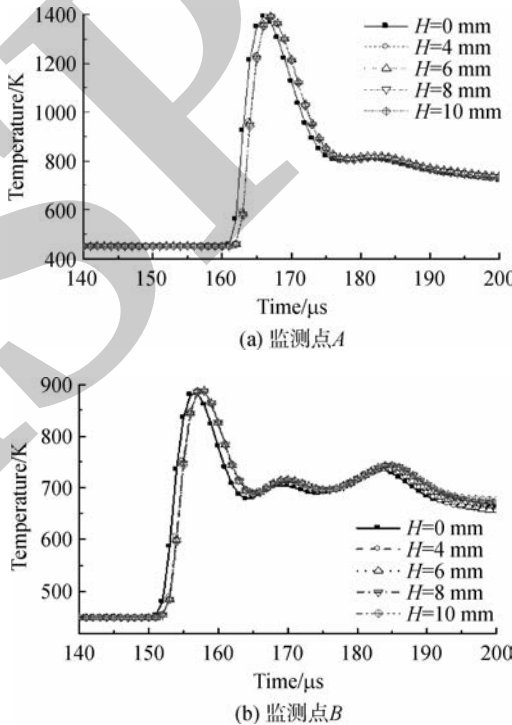


图 16 模型 3 不同出口面积的监测点 A 和 B 的温度变化

Fig. 16 Temperature variation of monitor point A and point B in model 3 with various outlet areas

由图 15 和图 16 可以看出,不同出口面积的压力和温度曲线与 $H=0\text{ mm}$ 时的基本吻合,这主要是因为,采用相同曲率延伸的弧形出口壁面,不能对凹面腔底部传播的激波产生反射强化作用,因此,其激波聚焦效果等同于 $H=0\text{ mm}$ 的情形。

2.4 三种出口壁面的激波聚焦起爆对比

图 17 和图 18 分别是 $H=4\text{ mm}$ 时 3 种模型各监测点的压力和温度随时间变化曲线。由图 17 可以看出,不同出口壁面型面对激波聚焦强化作用是不同的,模型 1 的垂直出口壁面起爆的峰

值压力远大于另外 2 种,由图 17(b)可以看出,模型 3 中并未形成爆震波,因此相同出口面积情况下,模型 1 和模型 2 的出口型面能够强化激波聚焦起爆且模型 1 的效果更好,不仅能够提高凹面腔内激波聚焦起爆压力,还能使得激波聚焦起爆时刻提前,各监测点的峰值温度和峰值压力到达时刻也随之提前。弧形出口壁面的模型 3 无法使凹面腔内的混合气成功引爆。这主要是由于两方面原因造成的:一是由于射流经入射通道射入凹面腔后,垂直型出口壁面和倾斜式出口壁面均能增强向凹面腔底部的传播的射流前导激波强度,而采用与凹面腔等曲率的弧形延伸的出口壁面不

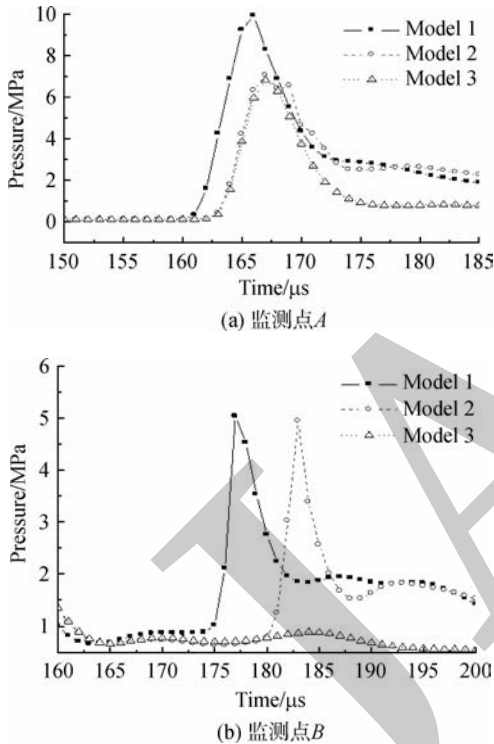


图 17 3 种模型各监测点的压力随时间变化($H=4\text{ mm}$)
Fig. 17 Variation of pressure with time of monitor points in three kinds of model ($H=4\text{ mm}$)

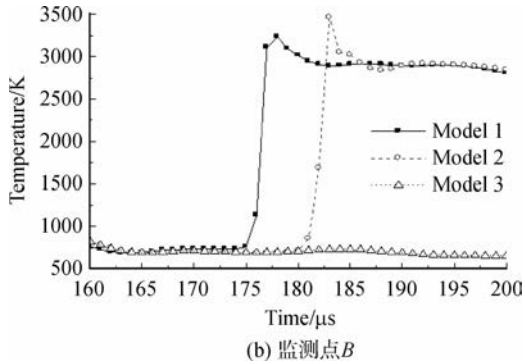
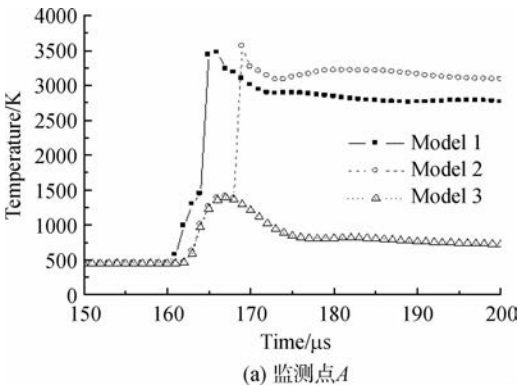


图 18 3 种模型各监测点的温度随时间变化($H=4\text{ mm}$)
Fig. 18 Variation of temperature with time of monitor points in three kinds of model ($H=4\text{ mm}$)

能对射流前导激波起到反射加强作用;二是由于激波聚焦点的位置是随着凹面腔几何型面和激波进入凹面腔底部的方向而改变的,即聚焦点与凹面腔底部的之间的距离会随之变化,不同凹面腔出口型面改变了射流前导激波进入凹面腔底部的方向,导致聚焦点位置和聚焦点强度改变,聚焦点峰值温度和峰值压力也不同。

由于激波聚焦点是与凹面腔底部有一定距离的,所以从图 17(a)的曲线中可以看出,即使激波在凹面腔底部的峰值压力接近,但由于凹面腔出口型面不同,导致向凹面腔底部运动的激波强度不同,聚焦点位置不同,聚焦强度不同,A 点的峰值压力只能间接反映入射激波强度,但不是激波聚焦点的峰值压力。

3 结 论

通过数值模拟,对比了不同出口壁面型面和出口面积对激波聚焦起爆的影响规律,结论如下:

1) 垂直出口壁面对激波聚焦起爆的作用效果较为明显,能够有效增大凹面腔内的激波聚焦起爆压力和温度,并使起爆时刻提前,随着出口面积的减小,激波聚焦峰值压力有较大的提高,同时聚焦起爆的时刻会提前;倾斜出口壁面同样能够增强起爆的压力,但效果不如垂直壁面,随着倾斜壁面出口面积减小,各个监测点的压力和温度只有小幅度增加,起爆时刻基本无变化;弧形出口壁面对强化激波聚焦起爆的效果不理想,采用相同曲率延伸的弧形出口壁面,不能对向凹面腔底部传播的激波产生反射强化作用,因此,其激波聚焦效果等同于 $H=0\text{ mm}$ 的情形,不能有效起爆爆震波。

2) 对比 3 种出口壁面型面,垂直壁面能更有

利于凹面腔内的能量聚集,强化激波聚焦起爆爆震波。随着出口面积的减小,凹面腔内的空间变小,射流在较小区域碰撞反射会产生较大的压力,出口壁面的阻挡使激波更多向凹面腔底部传播,聚焦产生较大的压力,从而加强激波聚焦起爆;二是当出口面积减小到一定程度时,会使爆震波及燃烧后的气体不易排出,对再次填充和聚焦起爆带来阻碍,因此凹面腔出口面积应优化选取。

参考文献:

[1] BUSSING T, PAPPAS G. An introduction to pulse detonation engines[R]. AIAA 94-0263, 1994.

[2] 严传俊,何立明,范玮,等. 脉冲爆震发动机的研究与发展[J]. 航空动力学报, 2001, 16(3): 212-217.

YAN Chuanjun, HE Liming, FAN Wei, et al. Research and development of pulse detonation engines [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(3): 212-217. (in Chinese)

[3] BARTENEVL A M, KHOMIKL S V, GELFANDL B E. Effect of reflection type on detonation initiation at shock-wave focusing[J]. Shock Waves, 2000, 10(3): 205-215.

[4] WITT B D, CICCARELLI G, ZHANG F, et al. Shock reflection detonation initiation studies for pulse detonation engines[J]. AIAA-2004-3747, 2004.

[5] THOMAS G O, WARD S M, WILLIAMS R L, et al. On critical conditions for detonation initiation by shock reflection from obstacles[J]. Shock Waves, 2002, 12(2): 111-119.

[6] LI Chiping, KAILASANATH K. Detonation initiation in pulse detonation engines[R]. AIAA-2003-1170, 2003.

[7] JACKSON S I, SHEPHERD J E. Detonation initiation via imploding shock waves[R]. AIAA-2004-3919, 2004.

[8] CHEN Eryun, ZHAO Gaiping, ZHUO Wentao, et al. Numerical investigation of toroidal shock waves focusing using discontinuous Galerkin finite element method [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 29(1): 9-15.

[9] 包醒东,李志强,妥欢,等. 斜向环形激波聚焦诱导直接起爆的大涡模拟[J]. 航空动力学报, 2013, 28(11): 2455-2461.

BAO Xingdong, LI Zhiqiang, TUO Huan, et al. LES of direct detonation induced by incident circular shock wave focusing [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(11):

2455-2461. (in Chinese)

[10] 秦亚欣,高歌. 火焰聚心和激波聚焦诱导爆震波[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(10): 280-289.

QIN Yaxin, GAO Ge. Flame implosion and shock wave focusing induced detonation initiation [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(10): 280-289. (in Chinese)

[11] 秦亚欣,于军力,高歌. 环形爆震室中火焰加速数值模拟及验证[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1744-1749.

QIN Yaxin, YU Junli, GAO Ge. Numerical simulation and experimental study on flame acceleration in annular detonation duct [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1744-1749. (in Chinese)

[12] 秦亚欣,于军力,高歌. 环形脉冲爆震发动机引射性能[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 35-41.

QIN Yaxin, YU Junli, GAO Ge. Performance studies of annular pulse detonation engine ejectors [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 35-41. (in Chinese)

[13] 于军力,秦亚欣,高歌. 环截面管中的爆燃转爆震实验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1733-1737.

YU Junli, QIN Yaxin, GAO Ge. Experimental investigations of deflagration to detonation transition in toroidal section tube [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1733-1737. (in Chinese)

[14] 秦亚欣,高歌. 环形爆震波聚焦起爆数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 1037-1042.

QIN Yaxin, GAO Ge. Numerical simulation of detonation initiation in a duct via imploding annular detonation [J]. 2011, 26(5): 1037-1042. (in Chinese)

[15] QIN Yaxin, YU Junli, GAO Ge. Detonation initiation induced by flame implosion and shock wave focusing [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 28(1): 57-65.

[16] 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 wave focus induced by blowdown imploding annular jet [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(6): 824-831. (in Chinese)

[17] 严传俊,范玮. 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.

[18] KAILASANATH K. Recent developments in the research on pulse detonation engines[R]. AIAA-2002-0470, 2002.

(编辑:王碧珺)