

两级脉冲爆震发动机激波聚焦起爆数值模拟

王 丹, 严 宇, 张 锋, 陈鹏飞

(中国航天科技集团公司 西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室, 西安 710100)

摘 要: 通过数值模拟手段, 针对两级脉冲爆震发动机(PDE)激波聚焦点火起爆及周期性脉冲爆震进行了详细计算. 结果表明: 激波汇聚会在发动机内产生两个高温高压区域, 且后者压力温度远高于前者, 为点火关键. 针对起爆失败的工况, 提高温度、压力、马赫数 3 个条件中的任何一个都能成功起爆. 通过全场周期性脉冲计算得知, 保证成功点火起爆的前提下仍需要调整合适的参数才能维持稳定的周期性脉冲, 发动机在入口温度 600 K, 马赫数为 2.0, 压力为 150 kPa 工况时能够产生稳定的周期性脉冲爆震, 频率在 300 Hz 附近.

关 键 词: 激波聚焦; 两级脉冲爆震发动机(PDE); 点火; 爆震燃烧; 瞬态模拟技术

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Numerical simulation of shock wave imploding detonation initiation in two-stage pulse detonation engine

WANG Dan, YAN Yu, ZHANG Feng, CHEN Peng-fei

(Science and Technology on Liquid Propulsion Rocket Engine Laboratory,
Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

Abstract: Ignition method and periodic pulse in two-stage pulse detonation engine (PDE) were computed by numerical simulation. Results showed that two zones with high temperature and high pressure were engendered by shock wave imploding in engine. Temperature and pressure of the second zone became much higher than the first one, which was the key point of ignition. Depending on temperature, pressure or Mach number improvement, detonation appeared in the unfired condition. With precondition of successful ignition, modulating was still necessary to get appropriate inlet condition which can keep periodic pulse. Periodic pulse with frequency of 300 Hz appeared by the inlet temperature of 600 K, Mach number of 2.0 and pressure of 150 kPa.

Key words: shock wave imploding; two-stage pulse detonation engine (PDE); ignition; detonation combustion; transient simulation technology

激波会聚起爆两级脉冲爆震发动机是一种利用超声速射流在凹面腔内产生激波会聚, 起爆可燃混气, 形成爆震燃烧的一种新概念发动机, 是爆震发动机的一种. 相对于等容燃烧和等压燃烧, 爆震燃烧是一种更高效能量转换方式, 基于爆震

燃烧的热力循环过程具有更高的热效率^[1-2]. 之外, 采用爆震燃烧的动力装置还具有结构简单、工作范围宽、推质比高、耗油率低等潜在优点^[3-5].

环形向心射流在凹面腔内碰撞产生激波会聚起爆爆震是俄罗斯研究人员在两级脉冲爆震发动

收稿日期: 2015-08-30
作者简介: 王丹(1989—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事火箭发动机燃烧研究.

引用格式: 王丹, 严宇, 张锋, 等. 两级脉冲爆震发动机激波聚焦起爆数值模拟[J]. 航空动力学报, 2017, 32(4): 942-948. WANG Dan, YAN Yu, ZHANG Feng, et al. Numerical simulation of shock wave imploding detonation initiation in two-stage pulse detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(4): 942-948.

机(pulse detonation engine, PDE)概念中提出的应用形式。具体特点如下:环形射流以向心方式入射,一方面可以对凹面腔进行填充,另一方面还可以形成气幕封闭整个凹面腔,便于爆震起爆,当爆震波传出时,气幕打开,进行排气,在发动机工作过程中起到气动阀的作用;会聚起爆用的激波无需专门提供,而是来源于环形射流在腔内的向心碰撞;一级富燃燃烧一方面方便使用常规液体燃料,另一方面可以提供更容易起爆的富含活性粒子的高温小分子混合气;在激波会聚起爆爆震的过程中还会得到热射流和碰撞产生的高度湍流的辅助作用,更加有利于掺混和爆震起爆;射流、激波及爆震燃烧之间的互相耦合作用能够增强腔内的气动振荡,提高工作频率。

目前,俄罗斯已经完成了直径为 70 mm 和 90 mm 的两种试验样机的冷、热态实验,获得了频率为 10 kHz 的稳定推力。和国外^[6-10]相比,国内^[11-15]在激波会聚起爆方面的研究才刚刚起步。严宇等^[16]为了研究脉冲爆震发动机的部分填充效应,建立了不依赖于实验数据的通用理论分析模型。陈鑫等^[17]建立了激波起爆脉冲爆震发动机性能计算的简化模型和计算方法。母云涛等^[18]对脉冲爆震发动机点火过程离子催化效应进行了数值模拟。

尽管国内外的学者在激波会聚起爆方面已经开展了许多研究工作,但是激波会聚起爆过程涉及到欠膨胀射流、激波间的相互作用、快速化学反应、爆燃向爆震转变、爆震起爆等多物理化学过程,并且各过程间相互耦合,具有高温、高压、高瞬态、高脉动特性,给解析分析和实验研究带来很多困难。激波会聚的机理及各影响因素对激波会聚及爆震起爆过程的影响和作用机理尚不是很清楚。

本文通过数值模拟的方法,针对两级脉冲爆震发动机激波聚焦点火,在无反应激波汇聚计算的基础上进行热态计算,研究多种因素对激波聚焦起爆性能的影响,从而提出可靠的起爆技术。并研究发动机中周期性脉冲爆震的形成和发展过程,为进一步爆震发动机试验提供技术支持。

1 数学模型

采用二维轴对称模型进行计算,计算区域如图 1 所示,分为爆震室区和外界区。爆震室区采用半圆形结构,半径为 60 mm,爆震室区总长为 160 mm,射流入口环形带宽度为 10 mm,后方外界区尺寸为 500 mm×260 mm。高速预混燃气由

环形带向心射入爆震室区,在其中汇聚起爆,起爆后爆震波沿轴向向外界区传播,形成稳定的自持燃烧。

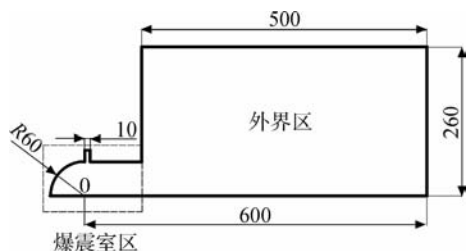


图 1 计算模型(单位:mm)

Fig. 1 Computational model (unit:mm)

采用非稳态二维轴对称 N-S(Navier-Stokes)方程,realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,近壁面采用非平衡壁面函数处理。算法上选用对于瞬态问题有着明显优势的 PISO(pressure-implicit with splitting of operators)算法,时间步长采用适应性时间推进。本文主要探索起爆过程及其后流场发展趋势,并不研究爆震波的详细结构,因此采用丙烷/空气单步化学反应进行数值模拟,燃烧模型采用 EDC(detached eddy simulation)模型。

点火计算时,由于仅关注能否点着,不考虑其着火后向空气扩散及周期性燃烧的过程,因此初始时刻,整个区域内(包括爆震室区和外界区)充满当量比为 1.0 的丙烷和空气预混气。脉冲计算时,爆震室区填充当量比为 1.0 的丙烷和空气预混气,外界区域填充空气,研究着火后向空气扩散及周期性燃烧的过程,值得注意的是,由于外界区填充了空气,为维持稳定的周期性爆震需要更高的点火能量。射流入口采用压力远场边界条件,控制入口预混气体压力和温度,外区边界为压力出口,其压力和温度分别为 100 kPa 和 300 K,其余为绝热、无滑移壁面。

2 激波聚焦起爆点火过程计算

2.1 激波汇聚冷态计算结果

首先进行冷态条件下的无反应激波汇聚过程模拟,入射气流为理想状态下的空气,通过冷态流场的分析初步了解点火过程可能存在的位置,为热态点火研究提出一个基本方向。冷态计算采用单组分常温空气入射,图 2 为 $T=300\text{ K}$, $Ma=1$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ (即气流温度为 300 K,马赫数为 1,入口压力为 150 kPa,即 1.5 个大气压)工况在不同时刻的温度和压力云图,图中 t 表示时间。

从图 2 中可以看出,空气由入口进入,在 0.15

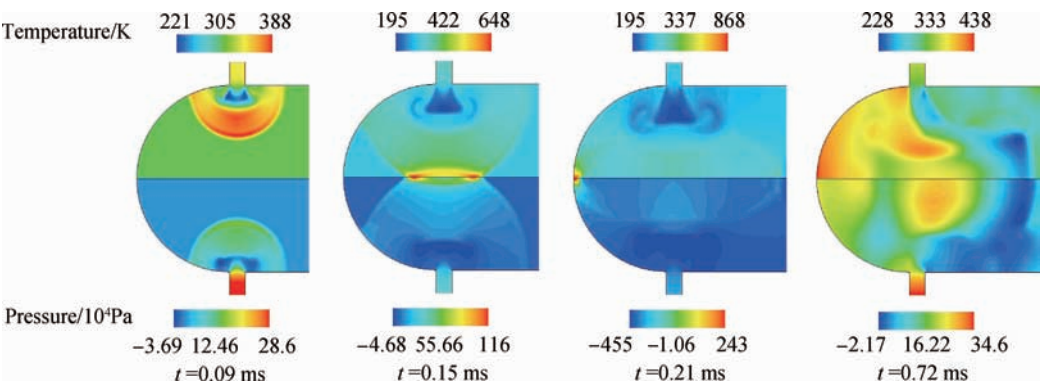


图 2 工况 $T=300\text{ K}$, $Ma=1$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 温度及压力分布

Fig. 2 Temperature and pressure distributions of $T=300\text{ K}$, $Ma=1$, $p_{in}=150\text{ kPa}$

ms 时在轴线处形成一个纺锤形高温高压区域,这是由于射流碰撞产生的.到 0.21 ms 时,左侧半圆壁面中心点也出现一个高温高压点,并且其温度和压力高于先前轴线处的高温高压区,这是由于碰撞后的射流沿轴线反向向半圆壁面传播,在碰壁后速度截止,动能转化为压力势能.随后,半圆壁面中心点的高温高压区域逐渐沿轴线正向扩散,能量也在传播中逐渐衰减,待到 0.72 ms 在爆震室区头部形成一个较为稳定的区域,该区域的温度在 400 K 左右,压力在 300 kPa 左右.分析冷态汇聚过程可以发现,在射流汇聚时会先后产生两个高温高压的区域,在可燃气体入射时同理可以推测,在轴线区域和圆形壁面中心处也会先后形成两个高压区域,这两个区域可能就是点火的关键部位.为了后文表述更加清楚,列出两个关键的研究位置.其中位置 1($x=0\text{ mm}$)为第 1 个高温高

压区,位置 2($x=-60\text{ mm}$)为第 2 个高温高压区.

2.2 激波汇聚热态点火计算结果

2.2.1 激波汇聚火焰传播特性分析

基于冷态计算的结果,进行了丙烷激波汇聚起爆的热态点火计算,考虑化学反应,入射气流采用当量比为 1.0 的丙烷和空气混合气体,改变其温度、压力、马赫数等参数,初始时刻全场填充与射流入口相同的丙烷和空气预混气体.

当入口参数 $T=500\text{ K}$, $Ma=1$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 工况时,最高温度仅为 1 500 K 且集中在爆震室中,温度场分布与冷态汇聚的结果类似,没有产生爆震波.提高入口参数后,流场中出现了明显的爆震波,发生了爆震燃烧,计算域内温度和压力大幅提升,下面通过一个成功点火的算例来分析爆震波的形成和发展过程.图 3 列出了工况 $T=500\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 点火过程的温度及压力云图.

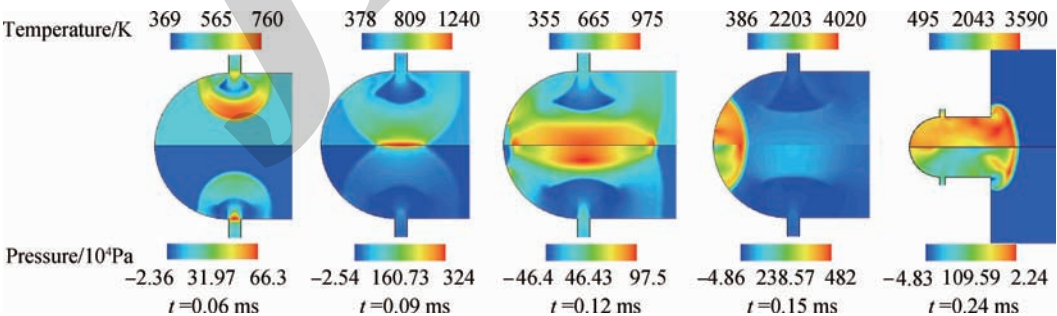


图 3 工况 $T=500\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 温度及压力分布

Fig. 3 Temperature and pressure distributions of $T=500\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$

从图 3 中可以看出,0.06ms 时高速预混气体射流以激波的形式进入爆震室,0.09 ms 时射流汇聚,温度上升至 1 240 K,压力上升至 3 240 kPa,这就是冷态计算中提到的位置 1 附近的高温高压区域,此时该区域已经开始发生部分燃烧反应,产生了少量的水,但是还没有发生爆震燃烧,温度和

压力还较低.0.12ms 位置 1 的温度和压力沿轴向向两侧传播,到 0.15 ms 时在位置 2 形成第 2 个高温高压区,并开始发生爆震燃烧.可以看出,发生爆震燃烧后最高温度上升至 4 020 K,压力上升至 4 820 kPa,这是远远高于冷态汇聚时所能达到的数值的.在位置 2 发生爆震燃烧后,形成了一个

马赫数为 1 的激波面,随后激波面沿轴线方向向外界区传播,到达出口后引燃整个流场.由于只关心点火过程,全场填充可燃预混气体,因而对后续的燃烧过程并未继续计算.由上述分析可知,爆震发动机点火过程是经过射流汇聚,在位置 1 附近和位置 2 附近产生两次高温高压区后发生爆震燃烧,随后爆震波以声速向外传播直至引燃整个区域.

2.2.2 射流温度、压力、马赫数对点火性能影响

表 1 不同入口条件下爆震情况
Table 1 Detonation in different inlet conditions

	工况 1		工况 2		工况 3		
爆震情况	$T=500\text{ K},$ $Ma=1,$ $p_{in}=150\text{ kPa}$	$T=550\text{ K},$ $Ma=1,$ $p_{in}=150\text{ kPa}$	$T=500\text{ K},$ $Ma=1,$ $p_{in}=250\text{ kPa}$	$T=500\text{ K},$ $Ma=1.3,$ $p_{in}=150\text{ kPa}$	$T=600\text{ K},$ $Ma=1,$ $p_{in}=150\text{ kPa}$	$T=500\text{ K},$ $Ma=1,$ $p_{in}=350\text{ kPa}$	$T=500\text{ K},$ $Ma=1.5,$ $p_{in}=150\text{ kPa}$
是否爆震	否	否	否	否	是	是	是

那么,试验允许的情况下是否需要一味地提升入口温度、压力和马赫数来保证点火则是一个需要探讨的问题.图 4、图 5 列出了改变温度、压力、马赫数 3 个条件下 3 种成功点火的情况下位

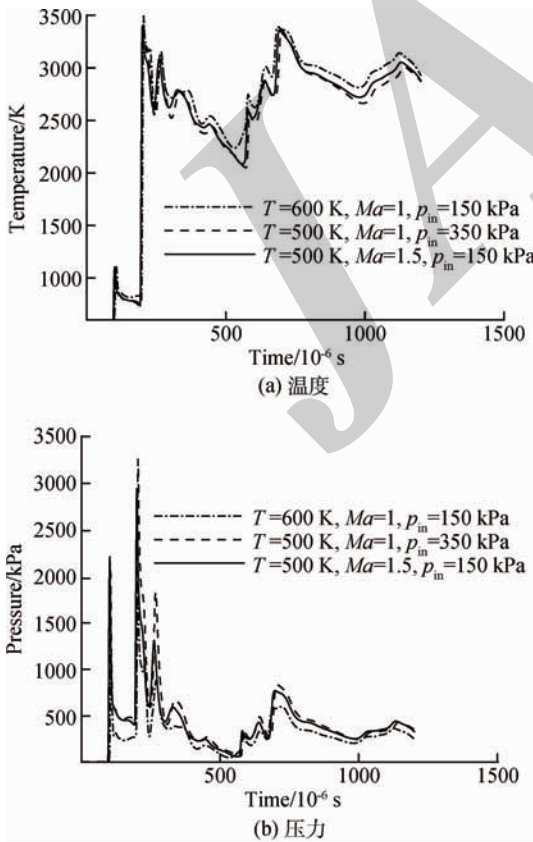


图 4 位置 1 的 3 种成功爆震情况

Fig. 4 Three conditions of successful detonation on location 1

探讨了激波汇聚点火的基本过程,下面来分析入射气流参数对点火的影响.首先,按照经验推断,温度对于点火应当具有重要的影响;其次,改变射流的马赫数和压力值也能够影响射流的总压,因此针对 3 个影响因素进行了计算.表 1 列出了不同工况参数下爆震的情况,即针对 $T=500\text{ K}, Ma=1, p_{in}=150\text{ kPa}$ 这个无法成功起爆的工况,提高入口温度、压力或马赫数中的任何一个都可以成功发生爆震燃烧.

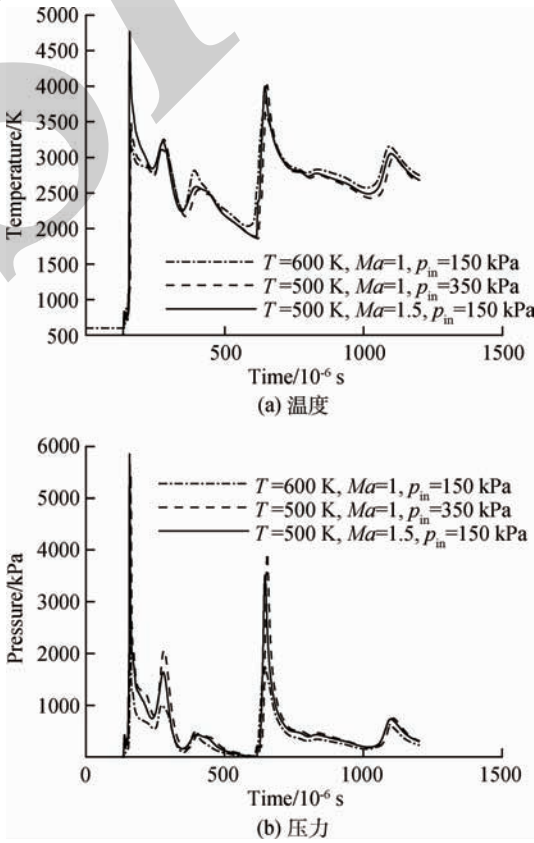


图 5 位置 2 的 3 种成功爆震情况

Fig. 5 Three conditions of successful detonation on location 2

置 1、位置 2 的温度和压力变化曲线.

从图 4、图 5 中可以看出,对于提高入口温度的工况 $T=600\text{ K}, Ma=1, p_{in}=150\text{ kPa}$,提高压力的工况 $T=500\text{ K}, Ma=1, p_{in}=350\text{ kPa}$,提高马赫

数的工况 $T=500\text{ K}$, $Ma=1.5$, $p_{in}=150\text{ kPa}$, 都发生了爆震燃烧. 3 种工况下, 虽然入口射流的温度和总压各不相同, 但这种区别仅体现在约 0.09 ms 之前未着火的部分, 当发生了爆震燃烧后, 位置 1 及位置 2 附近的温度压力变化有着高度的同步性, 这说明, 在当量比为 1 的预混气体汇聚起爆中, 不同的入口参数仅仅影响是否能够成功起爆, 而发生爆震后的火焰传播、发展情况则基本类似. 因此, 在只考虑点火过程时, 设计爆震发动机的入口参数仅需要控制温度、压力和马赫数中的一个, 使其满足发生爆震的最低要求即可, 不需要采用过高的入口参数.

3 激波汇聚周期性脉冲爆震计算

前文已经获得了可靠的激波汇聚点火条件, 随后对爆震发动机全场进行了计算, 在爆震室内

填充预混气体, 在外界区域填充空气, 模拟发动机工作的真实情况. 点火计算仅研究能否点着, 而全场计算需要研究点着后爆震波的发展情况, 两者计算的初始条件不同(点火计算不考虑爆震波的传递, 全场初始化为与射流入口相同的丙烷和空气预混气体, 而周期性计算涉及到火焰熄灭、排气的过程, 外界区填充的是常温空气), 全场计算是在能够着火的前提下进行的. 图 6 为脉冲爆震发动机周期性原理示意图, 从图中可以看出, 与点火过程不同, 当外界区填充空气时, 激波汇聚所产生的爆震波在半圆形壁面撞击后形成反射激波沿轴向向外传播, 由于外界区填充的是空气, 爆震波无法继续维持, 因而在外界区发生衰减, 高温燃气将排出. 而爆震室入口又会有新的超声速射流入射, 会在轴线处发生新一轮的激波汇聚, 从而进入下一个爆震周期.

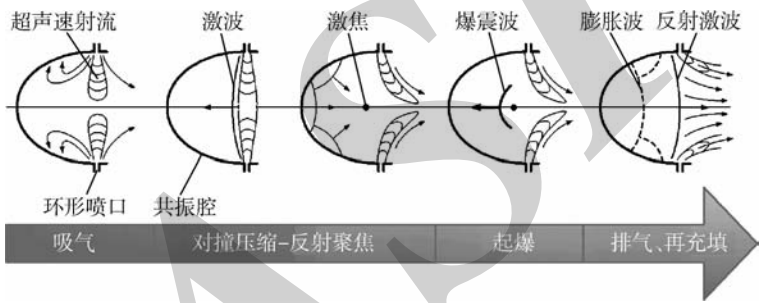


图 6 脉冲爆震发动机周期性原理

Fig. 6 Period principle of pulse detonation engine

根据点火计算, $T=500\text{ K}$, $Ma=1.5$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 已经能够成功点火, 继续提高马赫数至 2.0, 选取 $T=500\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 作为入口条件进行周期性计算, 结果发现射流入射后成功产生爆震波并向外界区传播, 爆震波传播至外界空气后经过一段时间被耗散, 随即熄灭、排气, 随着入口射流汇聚在此成功起爆, 第 2 个周期结束后熄灭, 未进入第 3 个爆震周期. 可见即使成功点火发生了爆震燃烧, 仍需要适当提高入口参数爆震脉冲爆震能够维持下去.

继续提高入口参数, $T=600\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 时, 发生了稳定的脉冲爆震, 且爆震发生时第 1 个温度峰值较高, 第 2 个温度峰值较低, 从第 3 个脉冲开始维持稳定的峰值, 脉冲频率为 300 Hz , 此时脉冲爆震发动机具备良好的工作性能.

图 7 给出了 $T=600\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 第 1 个周期到第 2 个周期中不同时刻压力及马赫

数分布云图. 0.3 ms 时, 第 1 个周期开始后, 激波汇聚产生爆震波, 以马赫数为 1 的激波面沿轴线向外传播, 0.72 ms 时爆震波锋面仍旧向外传播, 但是由于外界区壁面的干涉, 阻挡了波面的进一步扩展, 撞壁爆震波产生了向轴线方向的速度. 由壁面反射的爆震波在轴线处相遇再次发生碰撞, 继而再向壁面传播. 经过几次反复的碰撞, 爆震波的能量被耗散殆尽, 3.6 ms 时流场中火焰已熄灭. 随后经过排气过程, 入口处的射流再次在轴线处发生汇聚, 4.26 ms 时下一个爆震周期开始, 继续重复上一个周期的过程.

当入口条件为 $T=700\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 时, 位置 1 温度一直维持在 3000 K 以上, 说明过高的入口参数会导致排气过程不完全, 将发动机整场引燃, 无法周期性产生推力.

图 8 列出了不同工况下位置 1 的温度及压力变化情况, 由变化曲线可以看出脉冲爆震的具体情况. 从图中可以看出, 当入口条件为 $T=500\text{ K}$,

$Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 时,产生的第 2 个脉冲早于 $T=600\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 时的第 2 个脉冲,且压力和温度也比 $T=600\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 工况的第 2 个脉冲要高,但并没有继续进入

下一个周期. 而 $T=600\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 的第 2 个脉冲温度压力均较低,在之后产生的脉冲则基本保持稳定,即位置 1 峰值温度为 3500 K ,峰值压力为 2 MPa .

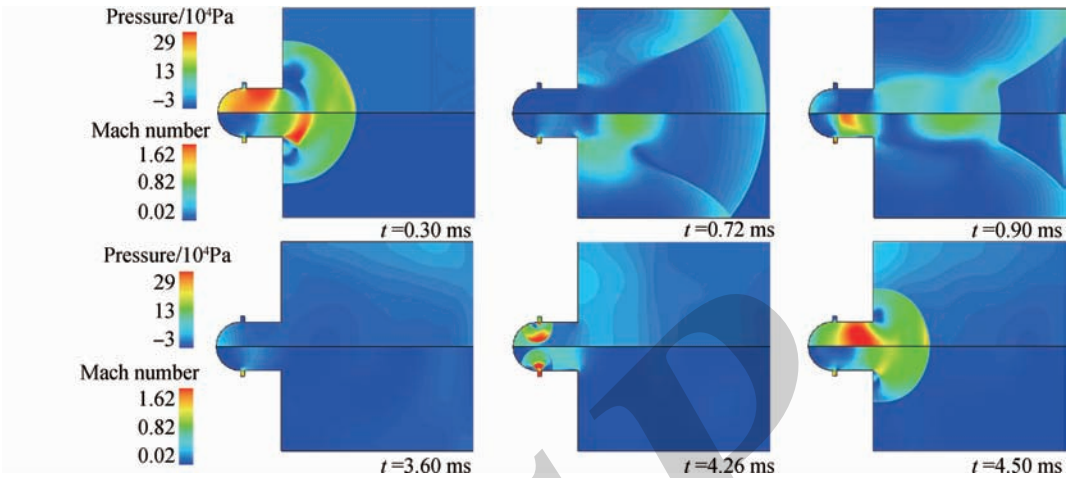


图 7 $T=600\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 压力及马赫数变化

Fig. 7 Pressure and Mach number change under $T=600\text{ K}$, $Ma=2$, $P_{in}=150\text{ kPa}$

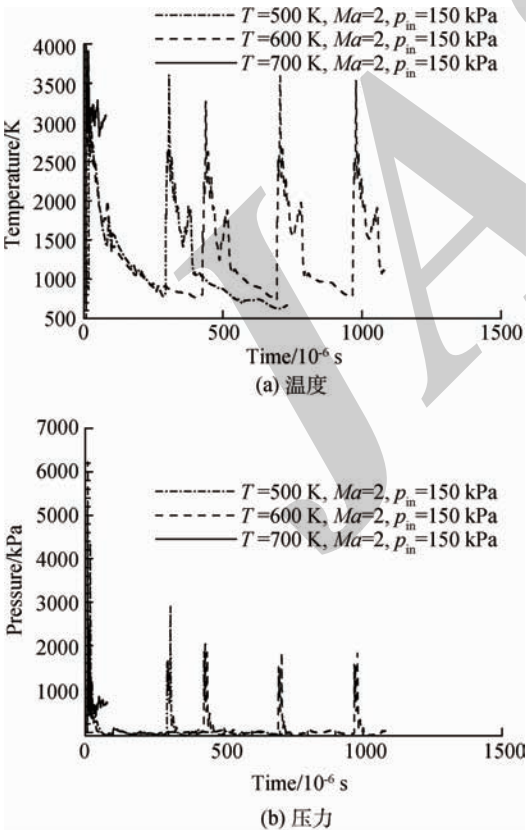


图 8 不同工况下位置 1 温度及压力变化

Fig. 8 Variation of temperature and pressure in location 1 under different conditions

由此可见,在保证能够成功点火起爆的前提下仍旧需要合适的选择入口参数,才能发生稳定

的脉冲爆震燃烧,并且在发生稳定的脉冲爆震燃烧前的头两个周期具有一定的不稳定性,与之后稳定段的压力温度峰值有较大差异.

4 结 论

本文得出了以下主要结论:

- 1) 由冷态汇聚计算得知,激波汇聚过程会产生轴线处及爆震室半圆壁面中心处两个高温高压区域,且第 2 个区域温度压力值更高,是发动机点火的关键所在.
- 2) 由热态点火计算得知,通过改变入口参数能够成功点火,其中提高气流入口温度、压力、马赫数都有利于爆震. 对于无法起爆的工况,提高入口参数至温度为 600 K ,压力为 350 kPa ,马赫数为 1.5 中的任何一个条件就可以成功点火.
- 3) 在仅考虑点火过程时,不同入口参数条件下,只要发生了爆震燃烧,则爆震波的参数及发展规律基本相同,与入口条件关系不大.
- 4) 全场脉冲爆震计算表明,脉冲爆震情况取决于入口参数,在保证成功点火起爆的前提下仍需要调整合适的参数才能维持稳定的周期性脉冲,本文发动机在 $T=600\text{ K}$, $Ma=2$, $p_{in}=150\text{ kPa}$ 工况时能够产生稳定脉冲,频率在 300 Hz 附近.

参考文献:

[1] Kentfeld J A C. Fundamentals of idealized airbreathing

pulse-detonation engines[J]. Journal of Propulsion and Power,2002,18(1):77-83.

[2] Kentfeld J A C. Thermodynamics of airbreathing pulse-detonation engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002,18(6):1170-1175.

[3] 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.

[4] Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines[J]. AIAA Journal,2003,41(2): 145-159.

[5] 李牧. 多循环爆震起爆研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007.

LI Mu. Multi-cycle detonation initiation[D]. Xi'an:North-western Polytechnical University,2007. (in Chinese)

[6] Nicholls J, Wilkinson H, Morrison R. Intermittent detona-tion as a thrust producing mechanism[J]. Jet Propulsion, 1957,27(5):534-541.

[7] Fickett W, Davis W C. Detonation theory and experiment [M]. New York:Dover Publications,2000.

[8] Zel'dovich Y B. On the theory of the propagation of deto-nation in gaseous systems[J]. Journal of Experimental and Theoretical Physics,1940,10:542-568.

[9] Bull D C, McLeod M A, Mizner G A. Detonation of uncon-fined fuel aerosols[J]. Progress in Astronautics and Aero-nautics,1981,75:48-60.

[10] Kailasanath K. Liquid-fueled detonation in tubes[J]. Jour-nal of Propulsion and Power,2006,22(6):1261-1268.

[11] 郑龙席,卢杰,彭畅新,等. 吸气式无阀脉冲爆震发动机 DDT 过程数值模拟[J]. 西北工业大学学报,2014,32(5): 713-717.

ZHENG Longxi, LU Jie, PENG Changxin, et al. Numerical investigation of DDT (deflagration to detonation transi-tion) process in a valveless air-breathing pulse detonation engine[J]. Journal of Northwestern Polytechnical Univer-sity,2014,32(5):713-717. (in Chinese)

[12] 王治武,陈星谷,郑龙席,等. 不同类型射流起爆爆震波特性的数值研究[J]. 西北工业大学学报,2014,32(4):618-622.

WANG Zhiwu, CHEN Xinggu, ZHENG Longxi, et al. Nu-merical research of the different types of jet effect on deto-nation initiation characteristics[J]. Journal of Northwest-ern Polytechnical University, 2014, 32(4): 618-622. (in Chinese)

[13] 杨青,李志强,邸亚超,等. 激波聚焦诱导气液两相爆震燃烧的数值模拟[J]. 航空动力学报,2014,29(8):1802-1809.

YANG Qing, LI Zhiqiang, DI Yachao, et al. Numerical simulation on gas-liquid two-phase detonation combustion induced by shock wave focusing[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(8):1802-1809. (in Chinese)

[14] 邱华,龚婷婷,熊蛇,等. 带二次流增推尾喷管的脉冲爆震发动机数值模拟研究[J]. 西北工业大学学报,2015,33(2):271-276.

QIU Hua, GONG Tingting, XIONG Cha, et al. Numerical simulation of pulse detonation engine (PDE) with fluidic nozzle[J]. Journal of Northwestern Polytechnical Univer-sity,2015,33(2):271-276. (in Chinese)

[15] 何惠琴,翟志刚,司廷,等. 偏心对汇聚激波诱导的 RM 不稳定性影响的数值研究[J]. 计算物理,2016,33(1): 66-74.

HE Huiqin, ZHAI Zhigang, SI Ting, et al. Numerical in-vestigation on eccentricity effect in richtmyer-meshkov in-stability induced by converging shock wave[J]. Chinese Journal of Computational Physcis,2016,33(1):66-74. (in Chinese)

[16] 严宇,杨岸龙,范玮,等. 脉冲爆震发动机部分填充效应理论分析[J]. 推进技术,2015,36(9):1361-1367.

YAN Yu, YANG Anlong, FAN Wei, et al. Theoretical a-nalysis of partial-filling effect of pulse detonation engine [J]. Journal of Propulsion Technology,2015,36(9):1361-1367. (in Chinese)

[17] 陈鑫,朱晓彬,何立明,等. 激波聚焦起爆脉冲爆震发动机性能分析[J]. 弹箭与制导学报,2015,35(3):89-92.

CHEN Xin, ZHU Xiaobin, HE Liming, et al. Performance analysis of shockwave focus pulse detonation engine[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2015,35(3):89-92. (in Chinese)

[18] 母云涛,王玉清,李立翰,等. 脉冲爆震发动机点火过程离子催化效应数值模拟[J]. 航空动力学报,2015,30(3): 694-700.

MU Yuntao, WANG Yuqing, LI Lihan, et al. Numerical simulation for ion catalytic effect in ignition process of pulse detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2015,30(3):694-700. (in Chinese)

(编辑:王碧珺)