

来流状态对超声速气动斜劈诱导 爆震起爆过程的影响

李自然, 林志勇

(国防科学技术大学, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 超声速斜爆震热射流起爆特性受到气流状态参数的影响。针对低速持续热射流, 采用高速激光纹影技术和压力传感器测压技术, 研究低速热射流预混气来流当量比、温度和速度等状态参数的影响。实验发现, 当量比对起爆过程的影响具有一定的随机性, 但一般情况下, 当量比的增加, 有利于爆燃向爆震转变 (Deflagration to Detonation, DDT) 过程; 提高来流温度, 将缩短 DDT 时间, 有利于起爆; 而提高来流速度, 则将阻碍剪切层发展, 导致混合效果变差, 不利于起爆。

关键词: 超声速燃烧; 斜爆震; 低速热射流; 起爆过程; 影响因素

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 01-0029-07

Influence of flow state on initiation process of oblique detonation wave induced by hydrodynamic wedge in supersonic combustible flow

LI Zi-ran, LIN Zhi-yong

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The initiation characteristics of supersonic-speed oblique detonation thermojet are influenced by the airflow status parameters. The high speed laser schlieren technology and pressure sensor technology are adopted to study the influence of state parameters such as the thermojet premixed combustible gas equivalence ratio, inlet flow temperature and velocity on the low-speed continuous thermojet. It is found in the experiment that the influence of equivalence ratio on the initiation process has a certain randomness, but under general condition, increase of the fuel equivalence ratio will benefit DDT (deflagration to detonation), increase of the inlet flow temperature will reduce the DDT time and benefit the initiation, and increase of the inlet flow velocity will result in poor mixing effect and will not benefit the initiation.

Keywords: supersonic combustion; oblique detonation; low-speed thermojet; initiation process; influence fact

收稿日期: 2014-10-13; 修回日期: 2014-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51206182)

作者简介: 李自然 (1977—), 男, 博士, 讲师, 研究领域为先进火箭推进技术、高等教育研究

0 引言

超声速可燃气体中气动斜劈诱导的欠驱斜爆震燃烧具有循环效率高、气动阻力小、便于控制等优点,非常适合应用于高超声速空间推进^[1]。然而,研究工作中发现,目前采用的在燃烧室入口处加入斜劈来产生斜激波诱导斜爆震的技术,存在斜爆震可靠起爆和气流损失之间的矛盾^[2-5]。采用非接触式的气动斜劈来实现斜爆震,是解决这一关键技术问题的一项有益探索^[6-7]。该技术通过在燃烧室壁面引入一道射流,实现超声速可燃气流中斜爆震的起爆,并以此来维持欠驱状态斜爆震的自持^[8]。

斜爆震射流起爆特性受到射流状态参数的影响^[9],本文针对低速持续热射流,采用高速激光纹影技术和压力传感器测压技术,研究不同预混气当量比,以及来流温度和速度等条件对爆震起爆过程的影响。

1 试验系统

热射流起爆的基本原理是采用一根直径与长度较小的热射流管,在管中充入高活性预混气,而后将预混气点燃,预混气点燃后会发生DDT(Deflagration to Detonation,爆燃向爆震转变)过程。在这一过程中,如果射流管长度足够长时,燃烧将转变为爆震燃烧;但如果射流管长度有限,爆震波转变过程难以完全完成,则会形成前导激波面后跟随一道火焰的高速热射流状态;如果对射流管内燃烧的预混气体进行控制,使管内压力逐渐上升,则会形成低速热射流,这种射流前方不会形成激波,燃烧后的产物以声速进入试验段。本研究设计的热射流管如图1所示。

热射流管由燃料腔、氧化剂腔、同轴式喷嘴、燃烧室、收缩段、扰流丝组成。在本研究中,射流管壁面还设计了冷却流道,预留了压力传感器测压孔等。此外,为了研究爆震射流的需要,还设计了一个用于加长燃烧室的延伸段。实验时,在燃烧室内部加入了螺旋扰流丝,用于加快爆震波的形成。为了保证射流管能够有一定的工作时间,在本设计中,对射流管的燃烧室、延

伸段、收敛段部分采取了冷却措施。

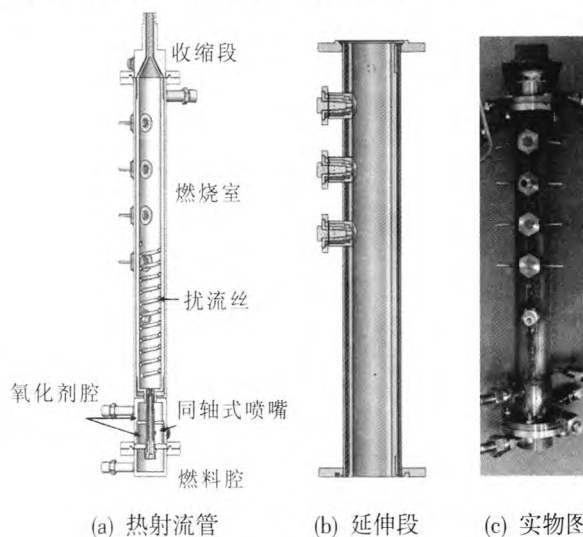


图1 热射流管设计图

Fig. 1 Design drawing of thermojet pipe

根据不同的热射流状态,热射流管有3种工作模式:爆震热射流、高速热射流和低速热射流。本文主要针对低速热射流状态开展研究,首先将氧化剂喷入燃烧室,而后接通火花塞点火,同时喷入燃料气体,发生缓燃过程,燃烧室内的压力并不突然升高,燃烧产物经过收缩段以声速或者低于声速状态喷入试验段。

实验中通过控制燃料与氧化剂的流量改变热射流的状态,通过安装在壁面的压力传感器测量压力波形与分布,进而判断射流所处状态。

2 静止气体中热射流管起爆情况

首先对热射流管在静止气体中的起爆情况进行研究。此时,低速热射流起爆主要依靠高湍流度热射流与预混气混合,增大局部区域燃烧速率来实现(图2)。研究采用 H_2/O_2 燃烧产生热射流,混合当量比为1.18,压力传感器安装于燃烧室中间观测窗上壁面,得到射流管内的压力曲线如图3所示。图中出现第一个尖峰时刻为热射流管的点火时刻,尖峰为点火时火花塞干扰造成。

对于超声速来流,热射流进入主流后会受到高速来流的影响,与静止气体中的起爆过程有所不同,下面研究在超声速来流中低速热射流的起爆过程与来流状态对起爆过程的影响。

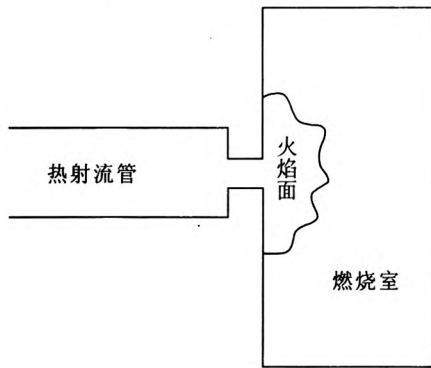


图 2 静止气体低速热射流起爆示意图

Fig. 2 Diagram of static gas low-speed thermojet initiation process

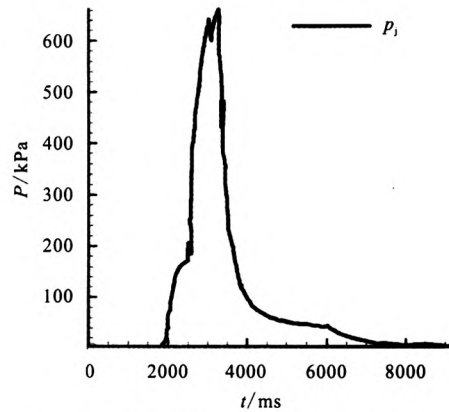


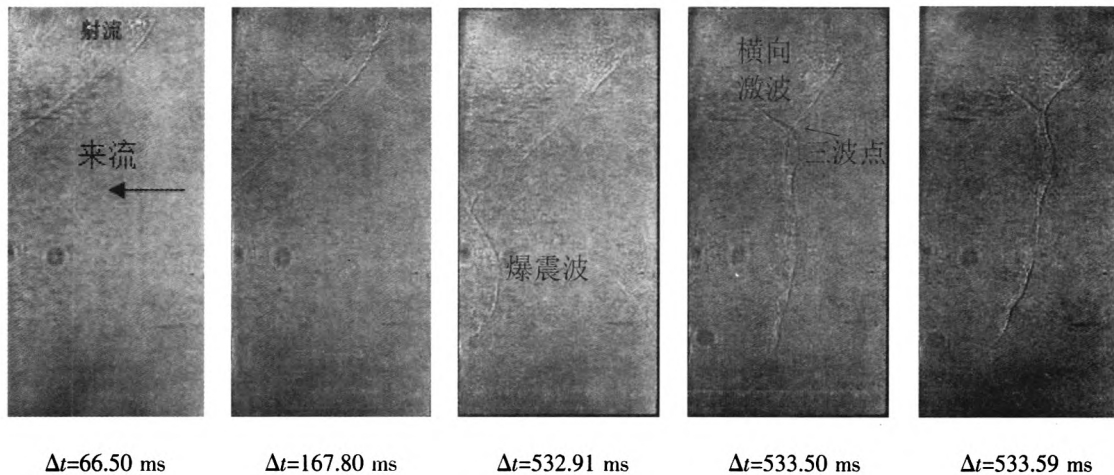
图 3 静止气体起爆低速热射流管内压力

Fig. 3 Pressure in low-speed thermojet pipe during static gas initiation

3 热射流预混气当量比对高超声速来流起爆的影响

选取来流基准工况为：压力 11 kPa，温度 622 K，马赫数 3.0， $\Phi=0.60$ ，设 t 为点火起爆发展时间， $\Delta t=t-t_0$ 为热射流管点火所经过的时间。图 4 为射流进入试验段后的起爆过程。初始时刻只有氧气进入主流中，而后在 t_0 时刻热射流管点

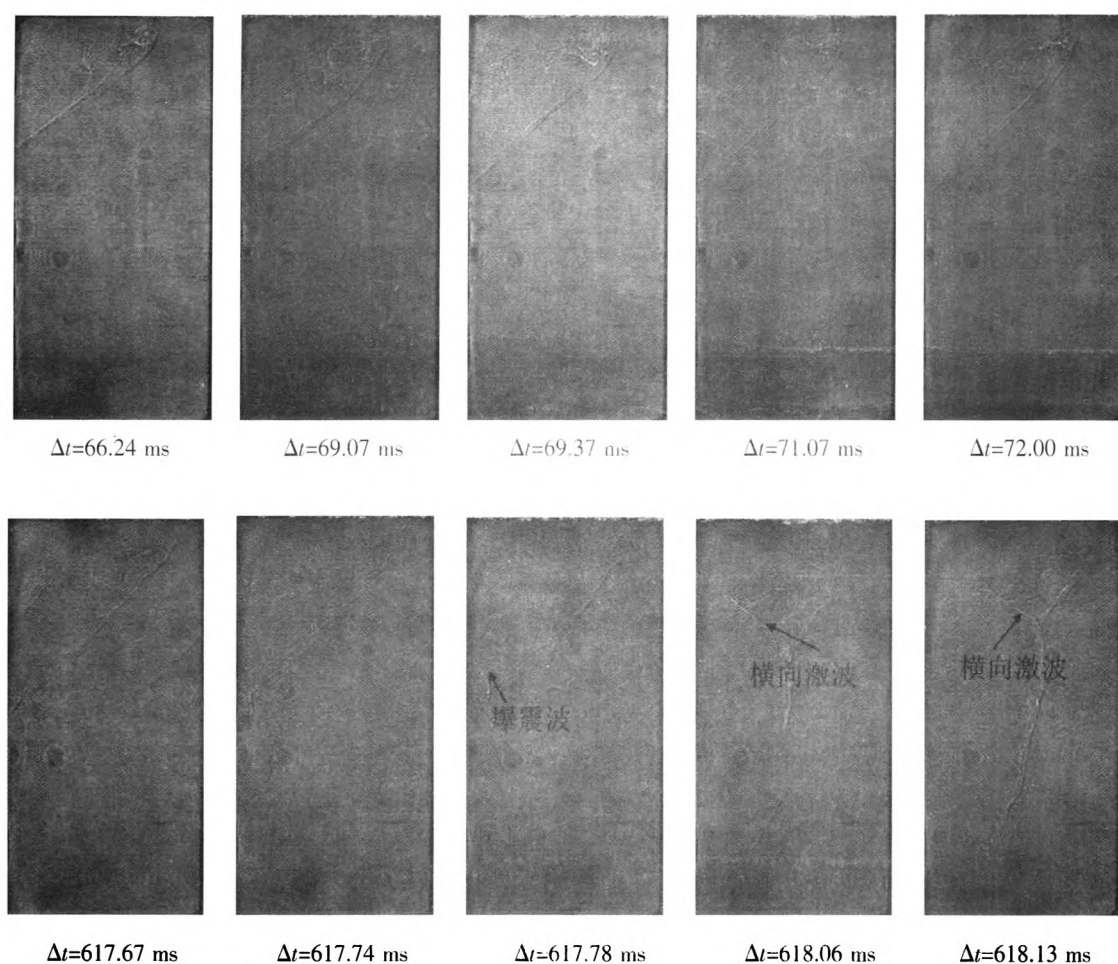
火并同时打开氢气管路阀门，在射流管中加入氢气，与氧气反应，发生燃烧并产生低速热射流，以声速喷出。从图中可看到弓形激波角度逐渐抬升，但并没有发生爆震。在 $\Delta t=532.91$ ms 时，在观察段下游出现一道爆震波。在爆震波形成初期，爆震波占据流道中心位置；随后爆震波向下壁面扩展并且向上游传播。由于爆震波与激波相交，在交点形成横向激波并形成了三波点结构。

图 4 $\Phi=0.6$ 起爆过程Fig. 4 Initiation process when $\Phi=0.6$

由于热射流进入主流后并没有直接起爆预混来流，因此定义爆震管点火时间至试验段出现压力跃升的时间为起爆转变时间 t_0 。从试验段的压力来看，此工况下，起爆转变时间 $t_0=534$ ms。

将当量比提高到 $\Phi=0.66$ ，基本起爆过程与

图 4 类似，但起爆转变时间有所增加， $t_0=607$ ms（起爆过程如图 5 所示）。理论分析认为，当量比的增加有利于起爆过程，会加快爆震波的传播速度，使得起爆转变时间变短^[10]。但本文在实验中却发现当量比升高后，转变时间变长，与一般的

图 5 $\Phi=0.66$ 起爆过程/Fig. 5 Initiation process when $\Phi=0.66$

认识不同, 具体原因有待进一步分析。

为进一步确定当量比改变对起爆过程的影响, 将来流的当量比增加至 $\Phi=0.81$, 整个起爆过程如图 6 所示。整个起爆过程与 $\Phi=0.60$ 时相似, 但转变时间 $t_0=440$ ms, 相比 $\Phi=0.60$ 减小。重复实验后发现, 对于相同来流条件, t_0 在单次实验中并不是一个定值, 最大与最小值相差 340 ms。在爆震波和 DDT 起爆机理中, 直接起爆具有相对稳定的时间特征, 而 DDT 起爆过程, 因为伴随着湍流火焰的作用, 故而往往具有较大的随机性, 结合实验观测, 可以得出结论, 低速热射流起爆属于一个 DDT 过程。

降低当量比至 $\Phi=0.54$ 后, 发现在实验时间内实验段的压力最高值仅为 14 kPa, 远低于 $\Phi=0.60$ 时的峰值压力 70 kPa, 说明在当量比较

低的情况下, 来流当量比的降低将导致相同强度热射流难以起爆预混气。

以上实验说明低速射流进入主流后的起爆过程具有一定的随机性, 其起爆过程的转变时间无法准确确定。一般来说, 起爆过程需要一定的转变时间与热射流强度, 低速热射流很难直接起爆预混气体, 即使在静止气体中也难以实现。因此, 这种起爆过程为一个 DDT 过程。进一步分析后认为, 低速热射流起爆超声速预混气的过程为: ①热射流管点燃后, 管内压力逐渐上升, 射流穿透度增加, 斜激波的角度不断增大, 使得波后的压力温度不断上升; ②由于来流为强烈的湍流, 射流进入主流后, 由于剪切作用, 会在火焰面表面产生大量的涡结构, 涡的形成与湍流的作用会加速火焰燃烧速度, 在涡团前方形成弱压缩

波; ③压缩波随着涡团向下游传播, 随着火焰燃烧的不断加强, 压缩波的强度逐渐增大, 从而形成激波; ④当激波达到一定强度后, 会导致局部热点的产生而引发 DDT 过程。由于大涡的形成

具有一定的随机性, 从而影响到起爆时间也具有随机性。此外, 在当量比较低时, 由于火焰放热速率较低, 使得在燃烧室的有限长度内, 不足以形成足够强的激波以导致 DDT 过程的发生。

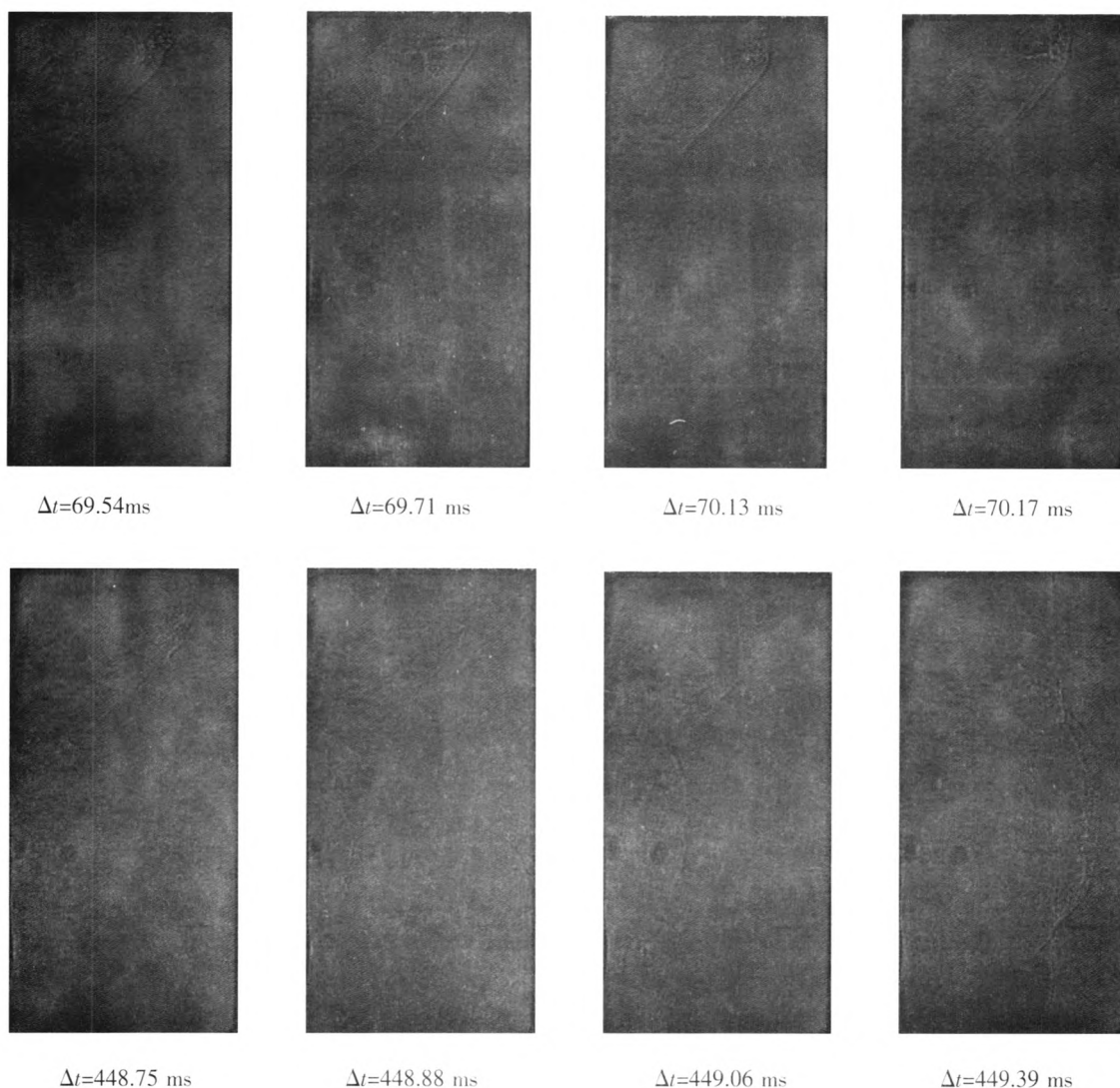


图 6 $\Phi=0.81$ 起爆过程

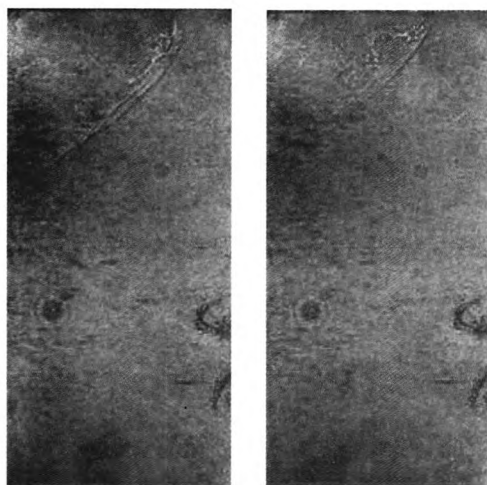
Fig. 6 Initiation process when $\Phi=0.81$

4 来流温度对起爆过程的影响

将图 4 实验中的来流温度降为 523 K, 其它参数不变, 在 $t=2\ 500\ \text{ms}$ 时刻热射流管点火并同时开阀, 在射流管中加入氢气, 实验结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出热射流管点火后弓形激波面出现了抬升, 与此同时, 试验段中出现了压力跃升, 但压力并未稳定下来。除点火干扰外存

在两个突跃点, 说明在燃烧室内发生了两次起爆过程。第一个突跃点的压力峰值很低, 跃升之后立刻回落, 说明在此有起爆趋势, 涡前方已经形成了较强的激波, 但未实现起爆而被吹出试验段。第二个突跃点符合爆震波的特征, 但整个转变时间较长, 达到 736 ms, 对应时序中, 此时射流管内已经加入氮气, 处于实验的无效区域, 说明起爆并不是由于 H_2/O_2 本身燃烧的射流所导致

的,此时射流已经不能起爆来流预混气,应视作无效起爆。



(a) 点火前

(b) 点火后

图7 低温工况下试验段变化情况

Fig. 7 Changes in test section under low-temperature condition

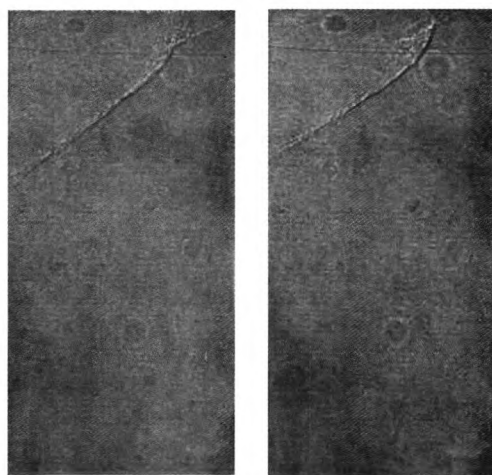
分析实验数据,认为在相同射流条件下,温度降低会加大 DDT 时间,导致 DDT 过程还没有完成,涡团前的强激波就会被吹出试验段,因此来流温度的降低不利于起爆。

5 来流速度对起爆过程的影响

将图4中的来流马赫数加大到4.0,其它参数保持不变,实验结果如图8所示。其中,(a)为热射流管还未点火时的阴影图,此时射流组分全部为氧气;(b)为热射流管点火后热射流进入主流后的情况。

从两幅图中可以看到,低速热射流进入主流后并未起爆来流,其产生的弓形激波角度有一定增加。由于射流压力加大,射流出口前的分离区有所加大。由于 DDT 过程需要一定的转变时间,在来流马赫数增加后,弓形激波后的绝对速度也会增加,导致 DDT 时间大于燃料在燃烧室内的滞留时间,最终导致 DDT 过程还没完成,涡团就被吹出燃烧室。此外,由于来流速度的增加,射流管燃烧产物与来流预混气的剪切层对流马赫

数增加,这会阻碍剪切层发展,导致混合效果变差,此种情况下要想实现起爆,就需要增加热射流压力以增大穿透度,加强弓形激波强度,减小波后的马赫数,增强热射流与预混来流的混合等方式来实现。因此,提高来流速度,不利于起爆。



(a) 点火前

(b) 点火后

图8 马赫数增大后热射流管点火前后阴影图

Fig. 8 Shadow graph of thermojet pipe before and after initiation when Mach number is increased

6 结束语

低速热射流斜爆震射流起爆特性受到热射流预混气当量比、来流温度和速度等状态参数的影响。通过本文的研究,发现在其它参数相同的情况下,当量比对 DDT 起爆过程的影响具有一定的随机性,但一般情况下,增加当量比有助于缩短起爆转变时间,有利于起爆过程,且当量比过小,将不利于 DDT 过程的发生;提高来流温度,将缩短 DDT 时间,有利于起爆;而提高来流速度,则不利于起爆。

参考文献:

- [1] LU F K. Prospects for detonations in propulsion[C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows. Gyeongju, Korea: [s.n.], 2009: 11-14.
- [2] HARRIS P G. Structure of conical oblique detonation

- waves [C]//44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Harvard, CT: AIAA, 2008: 111-115.
- [3] OSTRANDER M J, HYDE J C, YOUNG M F, et al. Standing oblique detonation wave engine performance, AIAA 1987-2002[R]. USA: AIAA, 1987.
- [4] SISLIAN J P. Propulsive performance of hypersonic oblique detonation wave and shock-induced combustion ramjets[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(3): 599-604.
- [5] FUSINA G. Formation and stability of near chapman-jouguet standing oblique detonation waves [J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005, 43 (7): 1591-1604.
- [6] HARRIS P G. Structure of conical oblique detonation waves[C]//44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Harvard, CT: AIAA, 2008: 222-228.
- [7] FUSINA G, PARENT B. Numerical study of structure and stability of oblique detonation waves [C]//42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2004-1125. Reno, Nevada: AIAA, 2004: 123-128.
- [8] CARRIER G F, FENDELL F E. Nonintrusive stabilization of a conical detonation wave for supersonic combustion [J]. Combustion and Flame, 1995, 103(4): 281-295.
- [9] LEE J H S. Initiation of gaseous detonation[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 1977, 28: 75-104.
- [10] CHOI J Y. Capturing unstable wrinkled oblique detonation wave front by Hi-Fi numerical simulation, AIAA 2006-5100[R]. USA: AIAA, 2006.

(编辑: 王建喜)

(上接第 14 页)

- [6] 张蒙正, 杨伟东, 王玫. 双股互击式喷嘴凝胶水雾化特性试[J]. 推进技术, 2008, 29 (1): 22-24, 61.
- [7] CHEN Xiao-dong, MA Dong-jun, YANG Vigor. High-fidelity numerical simulations of impinging jet atomization, AIAA 2012-4328 [R]. USA: AIAA, 2012.
- [8] MA Dong-jun, CHEN Xiao-dong, KHARE Prashant, et al. Atomization patterns and breakup characteristics of liquid sheets formed by two impinging jets, AIAA 2011-97[R]. USA: AIAA, 2011.
- [9] 强洪夫, 刘虎, 陈福振, 等. 基于 SPH 方法的射流撞击仿真[J]. 推进技术. 2012, 33(3):424-429.
- [10] CHIHIRO Inoue, TOSHINORI Watanabe, TAKEHIRO Himeno. Study on atomization process of liquid sheet formed by impinging Jets, AIAA 2008-4847 [R]. USA: AIAA, 2008.
- [11] CHEN Xiao-dong, MA Dong-jun, YANG Vigor. Mechanism study of impact wave in impinging jets atomization, AIAA 2012-1089 [R]. USA: AIAA, 2012.

(编辑: 陈红霞)