

脉冲爆震发动机快起爆的二维数值模拟^{*}

刘云峰¹, 余荣国¹, 王健平²

(1. 北京大学 力学与工程科学系, 北京 100871; 2. 北京大学 环境学院, 北京 100871)

摘 要: 为研究脉冲爆震发动机的点火过程, 用二维欧拉方程和 Korobeinikov 两步爆震模型对爆震波快起爆过程进行了数值模拟研究。用高温高压未燃气体点火方式来模拟试验中的电火花塞点火。研究表明: 电火花塞的能量不足以直接点燃爆震波, 爆震波是在经历了一系列反射激波的相互作用后最终建立的。激波-爆震波转换是快点火过程, 是爆震波建立的一个非常重要的机理。在设计点火装置时, 火花塞要尽可能靠近壁面和拐角, 以便产生高强度的反射激波。同时还要控制反射激波的方向, 使之向未燃气体中顺利传播, 才能起到很好的点火效果。

关键词: 脉冲爆震发动机; 激波-爆震波转换; 爆震波; 点火; 数值模拟

中图分类号: V235.22 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2004) 05-0454-04

Two-dimensional numerical simulation for ignition of pulse detonation engine

LIU Yun-feng¹, YU Rong-guo¹, WANG Jian-ping²

(1. Dept. of Mechanics and Engineering Science, Peking Univ., Beijing 100871, China;

2. Coll. of Environmental Sciences, Peking Univ., Beijing 100871, China)

Abstract: Two-dimensional Euler equations and Korobeinikov's two-step detonation model were used to study the strong ignition of pulse detonation engine. Small regions of high pressure and temperature unburnt reactants were used to simulate the electric sparks used in experiments. Simulation showed that the energy of electric sparks was too weak to directly trigger a detonation. The detonation was fully established through a series of interactions and impacts of reflected shock waves. Studies indicate that shock to detonation transition process plays an important role in initiation of pulse detonation engine.

Key words: Pulse detonation engines; Shock to detonation transition; Detonation wave; Ignition; Numerical simulation

1 引 言

脉冲爆震发动机(PDEs)的点火问题是发展过程中遇到的主要问题之一^[1]。在试验研究中,常用的点火方式是电火花塞点火^[2~4],点火能量一般在0.1J到1J的量级,这样的能量不足以直接点燃爆震波。解决方法之一就是利用爆燃-爆震转换过程(DDT)^[2~4],扰流器产生大尺度湍流,提高火焰传播速度,促进DDT过程,但是会产生阻力^[2,4],从而引起推力损失。另一种方法是利用激波的作用来快速点燃爆震波^[5~7],从而进一步提高整个推进系统的性能。Oppenheim^[8]将点火过程分为快点火(Strong ignition)和慢

点火(Mild ignition)两类。DDT过程属于慢点火过程,而激波-爆震波转换(SDT)过程属于快点火过程。脉冲爆震发动机应该应用快点火过程。本文对SDT进行了二维数值模拟,目的是来研究PDEs的快点火过程的主要机理。

2 物理模型和数值方法

控制方程是二维 Euler 方程和 Korobeinikov 两步爆震模型。气体是预混的、满足化学当量比的、氢气-氧气混合物 $H_2 + 0.5O_2 = H_2O$ 。假设混合气体是理想气体,忽略扩散、粘性和热传导等输运过程,分子量和

* 收稿日期: 2003-12-03; 修订日期: 2004-04-18。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90305013)。

作者简介: 刘云峰 (1971—), 男, 博士生, 研究领域为计算流体力学。

比热比是常数。文献[9]给出了详细的控制方程。

PDEs 简化成一根等截面的二维直爆震管,左端封闭,右端开口。爆震管内预先充满了压力是 0.1MPa,温度是 300K 的氢气-氧气混合气体。空间方向用有限谱 ENO 格式来求解,对物理通量进行 Steger-Warming 通量分裂,时间方向采用 3 阶 TVD Runge-Kutta 法,在壁面上采用镜面反射条件,在整个计算域内采用了均匀网格, $dx = dy = 0.1\text{mm}$ 。文献[10]给出了具体的实现过程。

3 结果和讨论

假设爆震管的尺寸是 $10\text{cm} \times 4\text{cm}$ 。由于对称条件,计算域是物理域的上面一半, $y = 0$ 是中心对称线。用一个直径为 10mm,充满压力 2MPa,温度 1500K 的未燃气体的圆形区域来模拟电火花塞点火,位置靠近推力墙。用工程热力学理论简单分析,该点火能量相当于 0.1J 的量级。在数值模拟中,这种模拟点火的方式是最多被采用的。

图 1 给出了激波-爆震波转换过程(SDT)的压力等值线图(算例 1)。等值线的最小值是 0.1MPa,最大值是 3MPa,间隔是 0.2MPa。图 1(a)表明点火区(2MPa, 1500K)对称布置在推力墙附近,边缘紧靠推力墙。爆震管中其它部分的反应气体的初始条件是 0.1MPa, 300K 和零速度。高温高压未燃气体剧烈燃烧,形成圆形爆震波,向未燃气体中传播。在碰撞到壁面之前,爆震波面会解耦,强度逐渐减弱成激波。但是当激波最先碰撞到推力墙的时候,在推力墙上反射,形成局部高温高压区,加剧了那里的化学反应和放热,在局部点燃爆震波,并沿着推力墙向 y 方向传播,因为在 x 正方向前面的气体基本被燃尽。在 $t = 8\mu\text{s}$ 时,激波与壁面碰撞(见图 1(b)),由于沿推力墙

运动的激波(局部是爆震波)的动能很大,因此反射激波(马赫反射)的强度非常大,反射激波同原来的激波相互作用,产生了一个非常强的高温($> 3000\text{K}$)、高压($> 8\text{MPa}$)区。这样的高温高压加剧了局部化学反应,形成局部爆震波,受壁面的挤压和约束,沿着壁面向 x 正方向传播(见图 1(c))。同时由于存在横向压力梯度,在 y 方向上形成一个横波,向爆震管中间运动(见图 1(d))。这时的结构可以看作是一个完整的三波结构,包括横波、入射激波和马赫杆,只是还没有达到平衡状态。在 $t = 20\mu\text{s}$ 时,这个三波点到达中心线,同另一侧相向运动的三波点相碰撞(见图 1(e))。到此时为止,爆震波基本横向充满了整个爆震管,SDT 过程基本结束,距离是 4.4cm,约为管径的 1 倍多一点。在爆震管壁面的约束下,三波点相互碰撞,爆震波具备了自维持传播的基本条件,不会解耦,在爆震管内继续传播下去(见图 1(f))。图 2 给出了压力沿轴线($y = 0$)的分布,时间从 0 到 $40\mu\text{s}$,间隔是 $5\mu\text{s}$,表明 Chapmann Jouguet (CJ) 爆震波已经完全建立。图 3 给出了算例 4 中的充分建立的爆震波压力等值线放大图,可见其中至少包含了 6 对三波点。

共模拟了四种点火情况,点火条件和模拟结果列在表 1 中。从表 1 中可以看出,如果较弱点火区的直径小于 6mm,是无法建立 CJ 爆震波的。增加点火压力和区域尺寸,会保证点火的成功。另外注意到在点火压力是 3MPa 时(算例 3),较大火花的 SDT 距离比较小火花的长。从反应进行度参数 β 的等值线图上可以很好地解释这一现象(见图 4)。在 $t = 10\mu\text{s}$ 时,激波与上壁面相碰,产生局部高温、高压区(见图 4(a)),反射激波二次点燃爆震波。但是由于初始点火能量非常大,其周围的大部分气体被原始爆震波燃尽,二次爆震波被局限在壁面附近,只能沿着壁面向

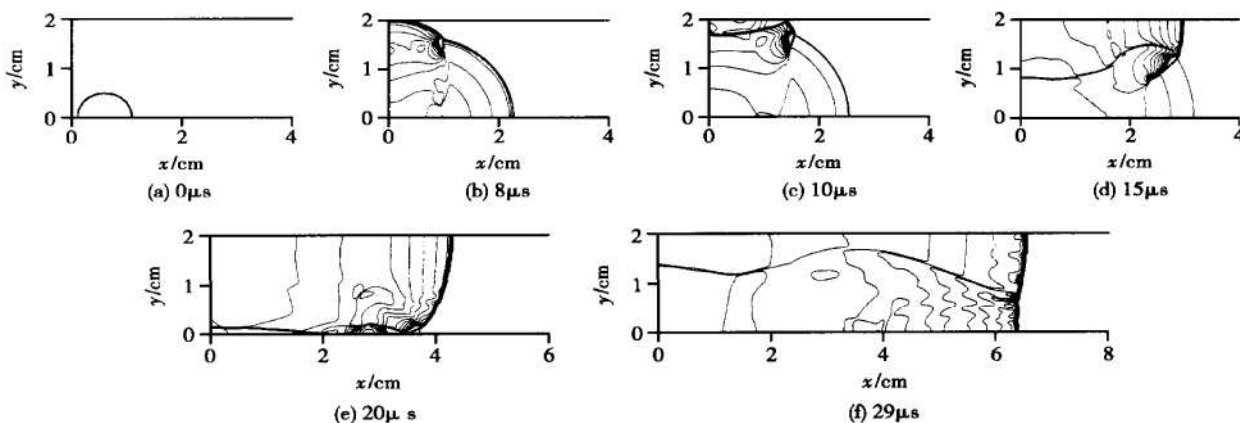


Fig.1 Pressure contours of detonation in case 1

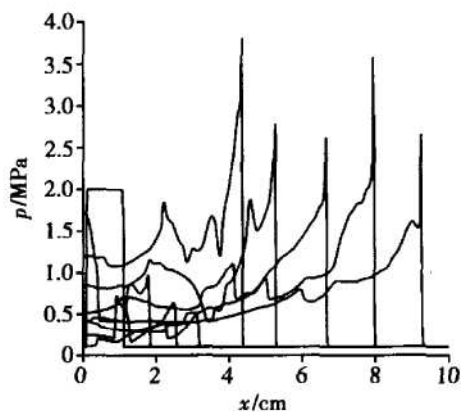


Fig.2 Pressure distribution along $y = 0$, time interval $5\mu s$

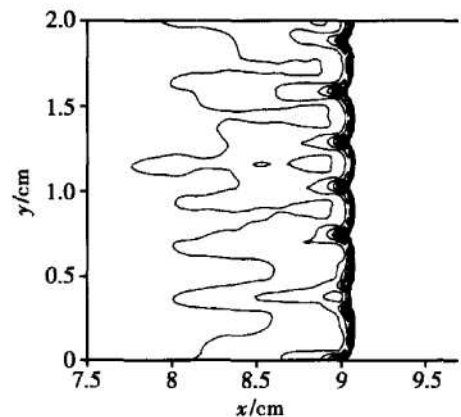


Fig.3 Pressure contours of detonation in case 4

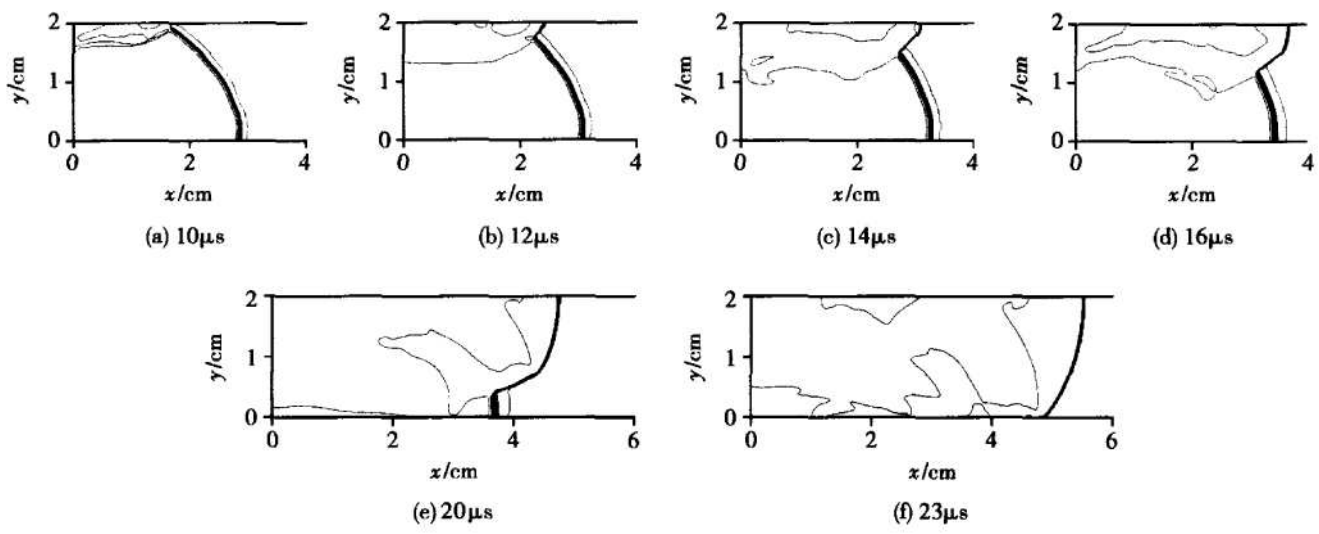


Fig.4 Parameter β contours of detonation in case 3

Table 1 Conditions of the initiation spark

Case	Pressure / MPa	Temperature / K	Diameter / mm	Detonation (Yes/ No)	SDT length / mm
1	2	1500	10	Yes	44
2	2	1500	6	No	
3	3	1500	10	Yes	50
4	3	1500	6	Yes	30

x 正方向传播, 较难形成横波(见图 4(b) 和 (c))。在 $t = 16\mu s$ 时, 二次爆震波追上原始激波, 才开始形成横波。在 $t = 23\mu s$ 时, 横波传播到达中心线, 充分发展的爆震波才基本建立。

从上面的分析可以看出, 电火花点火后, 是在包括三波点的碰撞等一系列反射激波的作用下, 才最终形成 CJ 爆震波, 即在脉冲爆震发动机点火过程中, SDT 过程的作用非常重要。利用 SDT 过程可以实现发动机快点火。因此在设计点火装置的时候, 火花塞要尽可能地靠近壁面和拐角, 目的是为了产生高强度的反射激波和横波。同时还要控制反射激波的方向,

使之顺畅地向未燃气体内传播, 才能够起到很好的点火作用。为了验证这一点, 我们模拟了一个较大尺寸爆震管的快点火过程, 爆震管的宽度是 10cm, 这样的宽度同现有的试验研究的管径相近。用了两个相对弱的火花, 参数是 2MPa, 1500K 和直径 6mm, 这两个火花被布置在靠近推力墙角落的位置。图 5 给出了 SDT 过程中的压力等值线图。从图 5 中可以看出, 在一系列反射激波的相互作用下, CJ 爆震波最终建立。

Sinibaldi 等人^[6]通过试验对影响 DDT 距离的参数进行了研究, 例如点火能量、点火位置和混合比。爆震管的长度是 190.5cm, 内直径是 5.72cm, 所用燃料是乙烯-氧气的混合物, 用火花塞点火, 点火能量从 0.1J 到 2.1J 变化。对于满足化学当量比的混合气体, 点火能量是 0.12J, 点火位置在推力墙上, 试验得到的 DDT 距离约为管径的 1.5 倍。他们的试验结果表明, 如果将火花塞放置在离推力墙 1.33 倍管径的位置, DDT 距离会比放置在推力墙上的状态缩短

24%。然而离推力墙的距离有一个极限。如果将火花塞放置在离推力墙 3.1 倍管径的位置,与放置在推力墙上的状态相比,DDT 距离增加 32%,与 1.33 倍管径的位置相比,DDT 距离增加 73%。试验结果表明,

通过调节和控制点火的位置,对 PDEs 的点火有积极意义。本文的结果同他们的试验结果定性相似,证明本文的数值模拟结果是正确的。

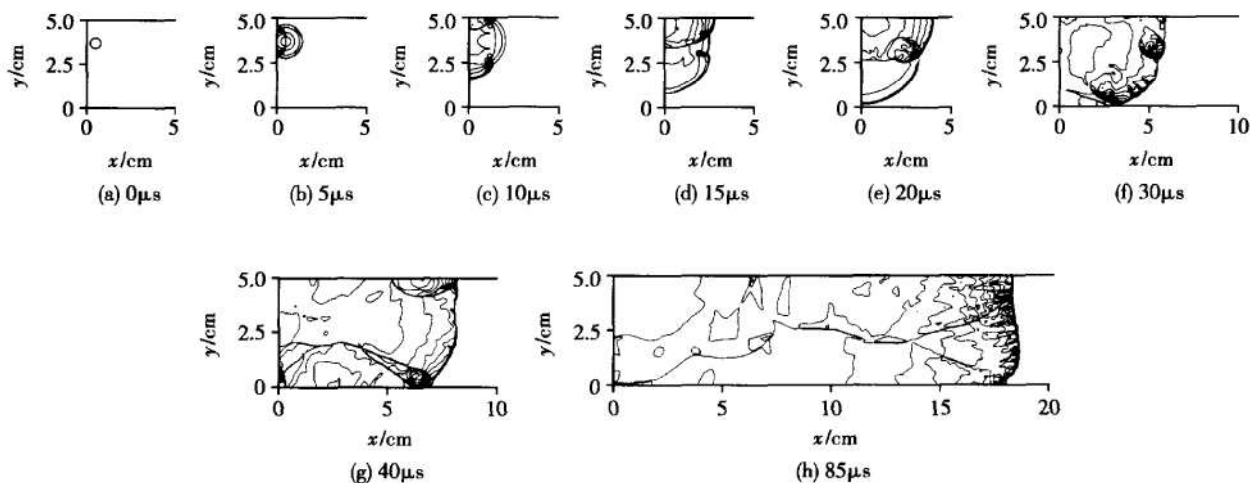


Fig.5 Pressure contours of detonation by two weaker sparks

4 结 论

通过二维数值模拟研究了脉冲爆震发动机的快起爆过程。研究表明,利用激波-爆震波转换过程,可以实现脉冲爆震发动机的快点火。在快点火中,反射激波起到了决定性作用,爆震波是在经过了一系列反射激波的相互作用(包括三波点的相互碰撞)后最终建立的。因此在设计点火装置时,火花塞要尽可能靠近壁面和拐角,以便产生高强度的反射激波。或者用多个火花塞来同时点火,通过相互作用来产生高强度的反射激波。同时还要控制反射激波的传播方向,使之能顺畅地向未燃气体中传播,这样才能起到很好的点火效果。

参考文献:

- [1] Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines[J]. *AIAA Journal*, 2003, 41 (2).
- [2] 严传俊, 范伟, 黄希桥, 等. 新概念脉冲爆震发动机的探索性研究[J]. *自然科学进展*, 2002, 12 (10).
- [3] 韩启祥, 王家骅, 王波. 预混气爆震管中爆燃到爆震转换距离的研究[J]. *推进技术*, 2003, 24 (1). (HAN Qi-xiang, WANG Jia-hua, WANG Bo. Investigation of deflagration to detonation transition distance in a tube with mixture[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(1).)

- [4] Cooper M, Jackson S, Austin J M, et al. Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, 18(5).
- [5] 王春, 司徒明, 韩肇元. 用于爆震引燃的激波聚焦无反应流场数值模拟[J]. *推进技术*, 2003, 24(2). (WANG Chun, SITU Ming, HAN Zhaoyuan. Numerical investigation on cold flowfields of shock focussing for ignition of pulse detonation[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(2).)
- [6] Sinibaldi J O, Brophy C M, Robinson J P. Ignition effects on deflagration to detonation transition distance in gaseous mixtures[R]. *AIAA* 2000-3590.
- [7] Gelfand B E, Khomik S V, Bartenev A M, et al. Detonation and deflagration initiation at the focusing of shock waves in combustible gaseous mixture[J]. *Shock Waves*, 2002, 10: 197~204.
- [8] Oppenheim A K. Dynamic features of combustion[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1985, 315 (1534): 471~508.
- [9] Taki S, Fujiwara T. Numerical analysis of two-dimensional nonsteady detonation[J]. *AIAA Journal*, 1978, 16 (1).
- [10] 刘云峰, 王健平. 有限谱 ENO 格式在爆震波数值模拟中的应用[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23 (4).

(编辑: 朱立影)