

文章编号: CSTAM2014-P19-0026

脉冲爆轰发动机外流场研究

喻江^{1,2}, 王春², 姜宗林², 陈琪¹

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京, 100044; 2. 中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

摘要: 采用横截面为矩形的爆轰管对脉冲爆轰发动机进行实验和数值研究。在爆轰管中充满化学当量比的氢氧预混气体, 采用底端点火, 对爆轰管内氢氧爆轰过程和管外流场进行对称数值模拟, 并采用高速照相纹影技术研究爆轰管外的流场特性。实验和数值计算分别得到爆轰管外流场的纹影和数值图像, 形象描述爆轰管的外流场变化。在爆轰波溢出爆轰管后, 随着可燃混合气的减少, 爆轰波的强度逐渐衰减并解耦为激波和爆轰产物。

关键词: 脉冲爆轰发动机; 爆轰波; 激波; 纹影技术

中图分类号: O381

文献标识码: A

0 引言

脉冲爆轰发动机 (Pulse Detonation Engine, PDE) 是不同于常规推进系统的新型推进系统模型。由于爆轰燃烧具有反应快、热循环效率高等优点, 因此采用爆轰燃烧的PDE理论上具有很高的性能。PDE的热力过程中爆轰的速度非常快, 可达几千米每秒, 能够产生很高的能量密度, 进而得到很大的推重比, 爆轰过程是近似等容燃烧过程, 热循环效率比较高, 另外其结构简单, 成本低, 可通过调节循环频率以适应较宽的飞行马赫数范围。因此国内外对PDE进行了大量的实验和数值研究, 包括发动机的燃料与氧化剂的供给、起爆方式、爆燃转爆轰过程、喷管对PDE推力的影响以及内外流场的变化规律等^[1~3]。

在爆轰波传出爆轰管后, 会产生稀疏波向管内传播, 导致管内的压力下降。爆轰管出口处的复杂流场会导致管内压力的振荡, 从而影响PDE的推力性能。因此, 研究爆轰管内外流场的变化规律对脉

冲爆轰发动机性能的提高有重要的意义。Zhang^[4]等通过数值模拟, 对爆轰管出口复杂的流场进行了研究, 预测了悬吊激波的存在, 但缺少相关实验验证。于陆军^[5]等采用高速阴影摄像技术对爆轰波溢出爆轰管后的流场进行研究, 得出了比较清晰的实验阴影图像和计算阴影图像。

本文采用实验和数值计算的方法对脉冲爆轰发动机的内外流场进行研究。采用立式爆轰管, 并利用高速纹影照相技术以获得管外流场的爆轰波、引导激波和爆轰产物的清晰图像。另外采用氢氧基元反应模型以及NND^[6]有限差分格式对上述过程进行数值模拟。根据实验和数值计算的结果详细的说明了爆轰管外流场的变化规律。

1 实验系统

实验采用双管道并联爆轰管, 由两个内圆形腔并列合并而成, 长度500mm, 垂直安装在固定支架上。点火器安装在爆轰管的底部, 采用点火能量和功率比较高的爆轰点火装置进行点火, 如图1所示。

收稿日期: 2014年06月 ; 修订日期: 2014年06月

基金项目: 国家自然科学基金 (NO.51376021)

作者简介: 喻江 (1989-), 男, 河南省, 硕士研究生, 主要从事脉冲爆轰发动机; E-mail: 12121415@bjtu.edu.cn

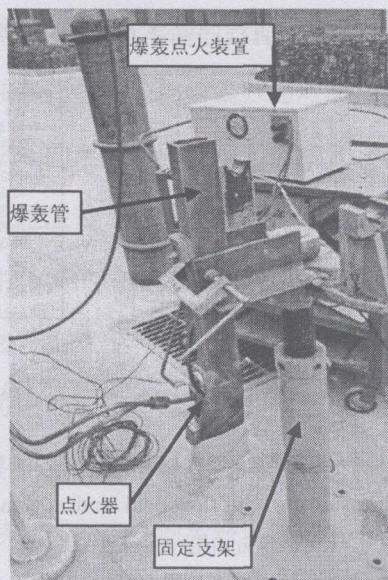


图1 爆轰管与点火器的布置

Fig.1 The arrangement of detonation tube and the igniter

图2为高速纹影系统示意图,以观察爆轰波传播到爆轰管外的变化规律。该纹影系统由氙灯光源、两个凹面反射镜和高速相机等组成。氙灯光源置于左边凹面镜的焦点处,发出的光经左边凹面镜反射后形成平行光,穿过爆轰管外流场,再经右边凹面镜反射后汇聚在其焦点上,在次焦点上放置刀口,在高速相机内成像,从而得到反映爆轰管外流场的纹影图像。采用Photron高速摄像机,最大帧率为500000fps,实验中高速相机的参数设置是帧率为10000fps,分辨率为768×512。高速摄像系统由脉冲爆轰控制仪来触发。

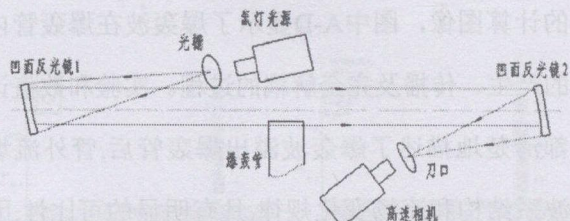


图2 高速纹影系统示意图

Fig. 2 Sketch of high speed schlieren system

实验中向爆轰管内充满化学当量比的氢氧可燃气体,在爆轰管底部进行点火,在管内迅速形成爆

轰。爆轰波由封闭段向开口端传播,从而传出爆轰管,利用高速相机记录爆轰波在管外的流场变化。

2 数值模拟

2.1 控制方程

在气相爆轰波数值模拟中,控制方程为带化学反应源项的欧拉方程。由于爆轰波的传播速度非常快,雷诺数比较大,所以可忽略粘性的影响。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho f_1 \\ \vdots \\ \rho f_i \\ \vdots \\ \rho f_n \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (\rho E + p)u \\ \rho u f_1 \\ \vdots \\ \rho u f_i \\ \vdots \\ \rho u f_n \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv + p \\ \rho v^2 + p \\ (\rho E + p)v \\ \rho v f_1 \\ \vdots \\ \rho v f_i \\ \vdots \\ \rho v f_n \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_1 \\ \vdots \\ \dot{\omega}_i \\ \vdots \\ \dot{\omega}_n \end{bmatrix}$$

其中, ρ 表示混合气体的密度, p 表示混合气体的压力, T 表示混合物的温度, u 和 v 表示 x 和 y 方向的速度。 f_i ($i=1, \dots, i \dots n$) 表示组分 i 的质量分数, E 为混合气体的总能:

$$E = \sum_1^n f_i h_i - p / \rho + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$$

S 表示化学反应源项, $\dot{\omega}$ 为组元的化学反应源项, 由基元化学反应动力学计算:

$$\dot{\omega}_i = W_i \sum_{j=1}^{nr} \left[(v'_{j,i} - v''_{j,i}) (k_{fj} \prod_{l=1}^{ns} [n_l]^{v'_{j,l}} - k_{bj} \prod_{l=1}^{ns} [n_l]^{v''_{j,l}}) \right],$$

$(i=1, 2, \dots, ns)$

其中 W_i 为组分摩尔质量, v' 和 v'' 分别为正向和逆向化学反应计量系数矩阵, $[n_l]$ 为组分 l 的摩尔浓度, k_f 和 k_b 为正向和逆向的化学反应速率系数, 由阿累尼乌斯公式给出:

$$k = A_k T^n e^{(-E_v/R_0 T)}$$

其中, A_k 为前置因子, T 为温度, n 为与温度 T 相关的指数项, E_v 为化学反应的活化能, R_0 为通用气体常数($R_0=8.314\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)。

2.2 计算方法

计算时化学反应模型采用8种组分和20个反应方程 H_2-O_2 基元反应模型, 对流项采用二阶无波动、无自由参数的耗散差分格式(NND)进行离散, 通过minmod限制器捕捉激波间断, 通量分裂采用Steeger-Warming矢通量分裂方法, 时间项利用时间推进法计算。将爆轰管简化为二维对称模型, 计算区域如图3所示。初始时刻在爆轰管内充入化学当量比的氢氧混合气体, 即 $\text{H}_2:\text{O}_2=2:1$, 爆轰管和大气环境处的初始温度 300K , 初始压力 0.1MPa , 为模拟真实充气在爆轰管出口处增加了一段混合气区域。左端点火区域的压力为 1.8MPa , 温度为 3670K 。爆轰管壁面为绝热、无滑移刚性壁面, 外部区域的边界为开口边界。

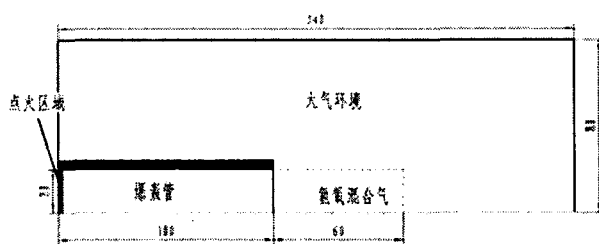


图3 计算区域示意图

Fig.3 Sketch of the area of calculation

3 结果及分析

图4是不同时刻爆轰管轴线上内外流场的压力曲线, 图5是 $t=33.7\mu\text{s}$ 时爆轰管轴线上内外流场的温度曲线。由图上可以得出数值模拟爆轰的最高压力约为 2.4MPa , 爆轰波的传播速度约为 2827m/s , 最高温度约为 3700K 。上述数据与C-J爆轰理论值基本

一致, 由此认为数值程序基本可靠。

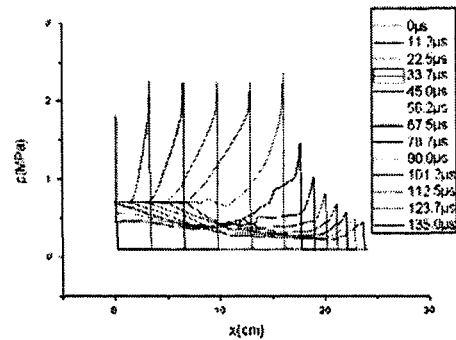


图4 不同时刻爆轰管轴线上内外流场的压力曲线

Fig.4 The pressure curve of flow field on the detonation tube axis at different time

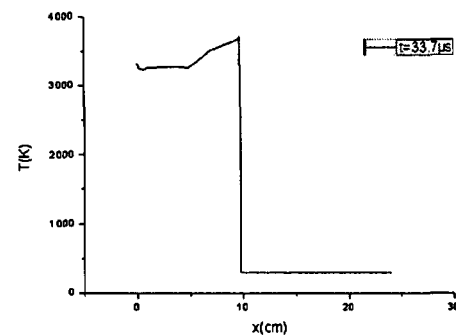


图5 $t=33.7\mu\text{s}$ 时爆轰管轴线上内外流场的温度曲线

Fig.5 The temperature curve of flow field on the detonation tube axis at $33.7\mu\text{s}$

图6为脉冲爆轰发动机单循环爆轰管出口流场随时间变化的纹影图像, 从图A-D每幅图时间间隔为 0.1ms 。实验结果显示了爆轰管出口处从混合气充入、爆轰波的传播及完全解耦的非定常过程的流动。图7则为单循环脉冲爆轰发动机爆轰管内外流场变化的计算图像, 图中A-D显示了爆轰波在爆轰管内外的产生、传播及完全解耦的过程。实验和数值计算都清楚地描述了爆轰波溢出爆轰管后, 管外流场的波系结构和流场变化规律, 具有明显的可比性, 因此进一步验证了计算的可靠性。

从上述结果可以得出爆轰波在充满氢氧混合气体的爆轰管内部传播时, 外流场比较稳定; 爆轰波刚传播出爆轰管出口处时, 由于氢氧混合气体比较

充足, 爆轰波还比较强烈, 在爆轰波的传播过程未发生激波和化学反应的解耦; 随着爆轰波在爆轰管外三维空间的继续传播并进入纯空气区域, 在展向方向上发生激波与燃烧的解耦, 爆轰波退化为在空气介质中传播的惰性激波和波后诱导的燃烧流场, 惰性激波在空气中传播逐渐减弱。在流向方向上由于存在可燃混合气体, 激波和化学反应解耦较慢, 燃烧放热仍能支持前导激波的高速传播。在纯空气介质区域, 爆轰产生的激波以很高的速度向四周传播, 爆轰产物则以比较缓慢的速度传播。

4 结论

本文通过高速纹影照相系统记录了爆轰波传出爆轰管后, 管外流场的发展变化, 并结合数值计算得出爆轰波在爆轰管内的传播及其衰减过程。进一步验证了爆轰波为化学反应的强耦合, 脉冲爆轰发动机排气过程伴随着激波和化学反应的解耦现象。研究表明利用纹影系统可直接描述管外的流场变化, 爆轰管外流场的理解和把握对提高脉冲爆轰发动机的性能具有重要的意义。

参考文献

- [1] Wang C., Jiang Z. L., Numerical simulation on Pulse Detonation Propulsion. In: 24th International Symposium on Shock Waves.
- [2] EIDELMAN S., GROSSMANN W., Pulsed detonation engine experimental and theoretical review, [R]. AIAA Paper, 1992-3168.
- [3] 姜宗林. 爆轰推进概念与机理研究-新型发动机研究热点. 世界科技研究与进展. 2001, 23 (4): 25-31.
- [4] 于陆军, 范宝春, 董刚等. 单循环脉冲爆轰发动机内外流场的动力学结构. 空气动力学学报, 2007, 25(3): 357-361.
- [5] Zhang Zengchan, Yu STJohn, He Hao, et al., Direct calculations of plume dynamics of a pulse detonation engine by the space time CE/SE method. AIAA, 2001-3614, 2001.
- [6] 张涵信, 无波动、无自由参数的耗散差分格式, 空气动力学学报, 1988, 2: 12-19.

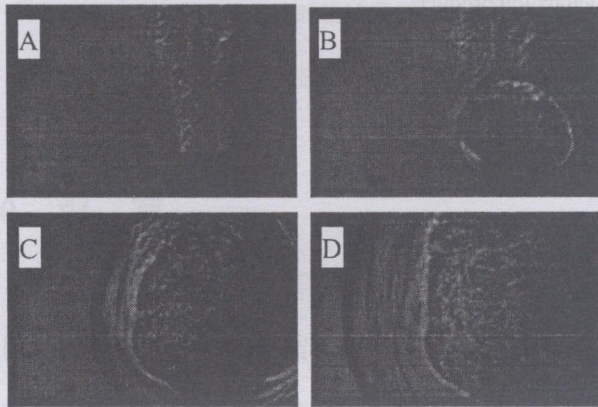


图6 单循环PDE出口爆轰波的演变过程

Fig.6 The evolution of detonation wave in the experiments

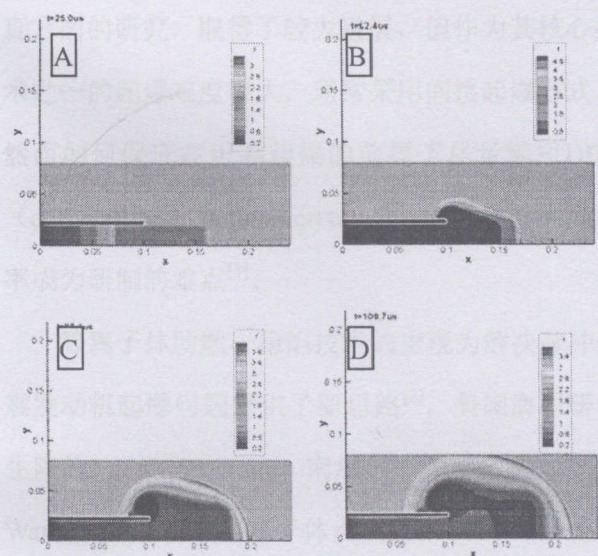


图7 单循环PDE爆轰波的演变过程

Fig.7 Numerical simulation of the evolution of detonation wave in the experiments

Investigations on external flow field of Pulse Detonation Engine

YUJIANG^{1,2}, WANGCHUN², JIANGZONGLIN², CHENQI¹

(1. *School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China* ;

2. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: The experimental and numerical studies on the characteristics of detonation tube flow field were conducted on a pulse detonation engine, which consists of a detonation tube with rectangular cross section filling with explosive hydrogen premixed gas. Numerical calculation simulates the process of detonation and the external flow field of detonation tube with symmetric model and with central ignition at the tube end. To observe the external flow field of detonation tube, we used high speed photography schlieren technology in the experiments. The results of experiments and numerical calculation completely described the similar change of the detonation tube flow field. After detonation wave exhausts the detonation tube, the strength of the detonation wave gradually becomes weaken and the detonation wave gradually decouples to shock wave and detonation products.

Key words: pulse detonation engine ,detonation wave ,shock wave , Schlieren technique