

静止、流动空-燃混合气的高能点火研究

陈超, 赵罡, 何立明
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:在脉冲爆震发动机的实际应用中,高能点火相对于传统的点火方式有利于减少延迟时间、上升时间,缩短爆燃向爆震的转变距离。实验结果显示对于静止混合气延迟时间通常可以减少3倍,对于流动混合气(0.35 kg/s)延迟时间减少超过4倍,并且可以得到其他一些性能上的提高。进一步实验证明,如果反应物的化学当量比合适,则存在一个与其最适应的点火能量可以使爆燃向爆震的转变距离最小。

关键词:脉冲爆震发动机;延迟时间;上升时间;高能点火装置

中图分类号: V231.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)06-0004-03

脉冲爆震发动机作为一种利用间歇式或脉冲式爆震波产生推力的新概念发动机,具有循环热效率高、结构简单、制造成本低、重量轻、推重比大等优点,避免了现有发动机在可测量性、工作范围、效率及成本上的限制,被认为是本世纪航天航空运输领域最有发展前途的推力概念^[1]。像汽车发动机一样,脉冲爆震发动机每个工作循环都要点火。在爆震管长度以内火焰要经历由爆燃向爆震的转变(DDT)才能利用爆震波生成的高温、高压气体来产生推力。并且为了提供连续推力,单管脉冲爆震发动机要求工作频率达到100 Hz,要求起爆系统点火能量和火花频率可调。传统的低能点火方式,层流火焰要依据传播机制经过一系列变化变成湍流火焰,这是构成爆燃向爆震转变时间的最主要部分^[2]。而利用高能点火系统可以在较短的时间内更有效地产生湍流火焰,从而缩短由爆燃向爆震转变的距离和时间。本文中的实验结果证实了这一观点。

1 实验

1.1 点火脉冲能量

用于产生高能点火的试验装置主要由达林顿管控制的电子点火器组成,点火脉冲是由计算机通过板卡发出,频率调节由程序控制十分方便。点火电路原理见文献[3]。

本实验的点火电路在设计时以达林顿管替代传统的机械式断路器触点,可以减少触点火花,改善点火性能、点火能量;在火花塞积炭时仍有较强的跳火能力。达林顿管的高增益以及极高的通断速度可以使点火线圈产生高电压、并且短周期的电子脉冲可以创造出一个适于火花放电的强电场。通常为了获得理想的初始放电火花,在一般大气条件下需要外部电场强度的数量级不小于10 kV/cm,并且脉冲电压的上升率不小于1 kV/ns。在本实验中,点火脉冲的幅值可达30 kV-80 kV,每个脉冲可释放能量100 mJ-600 mJ。

1.2 实验情况介绍

本实验模型是一个直径30 mm,长1750 mm的圆柱形不锈钢管,混合室封闭端分布有供气口,沿着管身向爆震室开口端间隔分布着压力传感器用来测量燃烧过程中的气体压力。实验中采用汽车火花塞来点火(0.8 mm的火花塞间隙),实验数据由计算机自动采集保存。

为了方便地描述燃烧情况,定义2个时间:延迟时间和上升时间。延迟时间指的是从 $t=0$ 到压力达到

收稿日期:2005-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50276070)。

作者简介:陈超(1978-),男,河南新乡人,博士生,主要从事脉冲爆震发动机实验和仿真计算研究;

何立明(1959-),男,浙江上虞人,教授,博士生导师,主要从事推进系统气动热理论等研究。

峰值压力的10%所经历的时间;上升时间指的是压力从峰值压力的10%上升到90%所经历的时间。测试流动的乙烯/空气混合气点火情况,实验装置见图1。预掺混的乙烯/空气混合气从起爆室头部封闭端注入,一个铝制的收敛/扩散型喉部放置在起爆室后用以限制并保持起爆室当地气流速度小于15 m/s,这一措施可以使起爆室压力增加至725 kPa。起爆室内初始混合气温度通过使用电子加热器可以在280 K-400 K范围内变化。在起爆室中部安装了一个高频响应压力传感器用以测量初始压力和燃烧过程中压力的增长情况。为了缩短爆燃向爆震的转变距离(DDT)在爆震室内使用了螺旋装置,见图1。

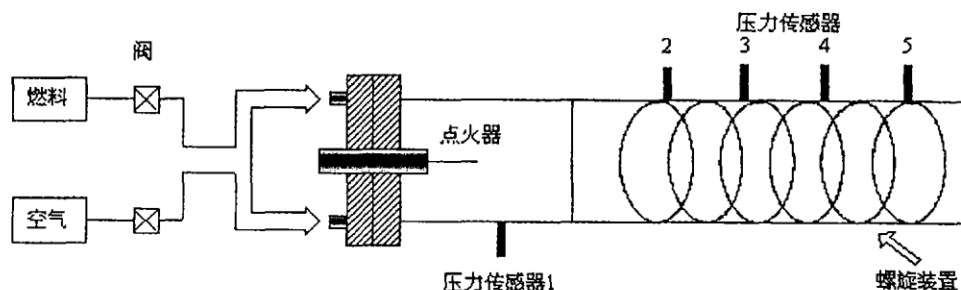


图1 PDE实验模型

为了保证流动实验测量的准确性,乙烯/空气混合气的当量比定为1.44,质量流动率在0.10 kg/s-0.35 kg/s范围内可变,点火能量定为250 mJ。

2 实验结果分析

2.1 静止点火结果

本实验采用乙烯/空气混合气,当量比从0.8到1.4变化,目的是评估在大气压力条件下点火后随着当量比变化延迟时间和上升时间的变化趋势,用以比较低能点火和高能点火对燃烧的影响。

结果表明高能点火(150 mJ)比低能点火(50 mJ)可以使延迟时间和上升时间缩短2至3倍,见图2,这种时间的减少在小当量比情况下尤其明显。此外,这种提高和高的峰值压力可以得到理想的燃烧效率,使燃烧更加完全以减少燃烧产物中的有害物质。

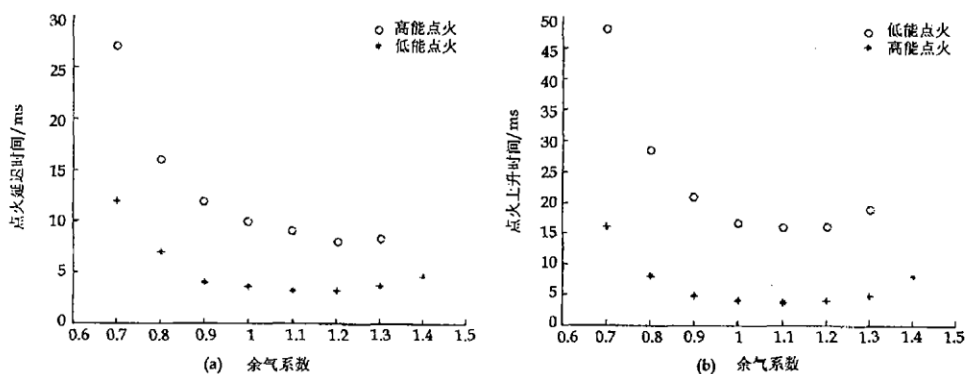


图2 点火能量对点火延迟时间和上升时间的影响曲线

2.2 流动点火结果

本实验采用乙烯/空气混合气,当量比定为1.44,质量流动率定为0.35 kg/s,结果见图3。

从图3中可以观察到的一个重要结论是高能点火情况下的延迟时间对于初始的反应温度并不敏感。由于本次实验完全是模拟实际条件下的工作情况,因此相对低的延迟时间(基本上为2 ms)对于实际应用中的燃气-空气点火系统是很重要的。根据文献[4],通常爆燃向爆震的转变时间仅仅比延迟时间多200 μ s-300 μ s。因此,减少点火延迟时间是很重要的。同时,对于工作频率为100 Hz的爆震发动机来说其每个工作循环只有10 ms,2 ms的点火延迟时间使其工作成为可能,而这一切都要依赖于高能点火系统。

由以上分析可知,高能点火对于减少延迟时间、上升时间、缩短爆燃向爆震的转变距离,甚至提高燃烧效率减少燃烧产物中的有害物质都很有好处。那么点火能量是越高越好吗?显而易见,点火能量提高势必会

使点火装置变得昂贵、复杂。因此,做一个补充实验来研究点火能量、余气系数和爆燃向爆震转变距离三者之间的关系。

反应物仍然选择乙烯和氧气,由文献[5]可知在化学当量比附近这两种反应物的爆燃向爆震转变距离小于 30 cm,点火位置见图 2,点火能量从 0.05 J - 2 J 可变,余气系数从 0.5 - 2 可变,结果见图 4,它表示了爆燃向爆震转变距离随着余气系数和点火能量的变化情况。

从图 4 可以看出爆震波形成最佳条件为余气系数在 1.3 左右,点火能量约为 0.2 J,此时 DDT 距离最小。这说明如果化学当量比合适,则存在一个与其最适应的点火能量可以使 DDT 距离最小,点火能量更高的话虽然不会产生坏的影响但会造成浪费,没有必要。

3 结论

从本文对静止、流动空-燃混合气的高能点火研究,可以得出这样的结论:高能点火对于减少延迟时间、上升时间、缩短爆燃向爆震的转变距离,甚至提高燃烧效率减少燃烧产物中的有害物质都很有好处;但点火能量并不是越高越好,点火能量提高则点火系统会变得复杂昂贵,造成浪费。实际情况是如果反应物的化学当量比合适,则存在一个与其最适应的点火能量可以使 DDT 距离最小。

如何根据不同反应物的化学当量比,准确、有效地确定与其相适应的点火能量是下一步解决的问题。

参考文献:

- [1] 范伟. 两相脉冲爆震发动机的模型实验与研究[D]. 西安:西北工业大学,1998.
- [2] 肯尼斯 K K. 燃烧原理[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1991.
- [3] 陈永刚,何立明. 基于特征线的脉冲爆震发动机性能估算与结构参数设计[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2005,6(3):2-3.
- [4] Wang Fei. Transient Plasma Ignition of Quiescent and Flowing Air Fuel Mixtures [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005,33(2):118-120.
- [5] John P Robinson. Influence Of Ignition Energy, Ignition Location, And Stoichiometry On The Deflagration - To - Detonation Distance In A Pulse Detonation Engine[D]. Naval Salt Lake City USA; Postgraduate School Master Thesis,2000

(编辑:姚树峰)

Investigation on High Energy Ignition of Quiescent and Flowing Air / Fuel Mixtures

CHEN Chao, ZHAO Gang, HE Li - ming

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China)

Abstract: In the use of pulse detonation engine (PDE), using high-energy ignition device, as compared with the traditional methods, is favorable to the reduction in delay time, rise time and deflagration to detonation distance. The experiment shows reduction in delay to ignition by factors of typically 3 in quiescence to more than 4 in a flowing PDE, and other enhancements in performance. And the further experiment shows that if the equivalent ratio of reactants is appropriate, there will be an optimum ignition energy that can make the DDT the shortest.

Key words: pulse detonation engine; delay time; rise time; high-energy ignition device

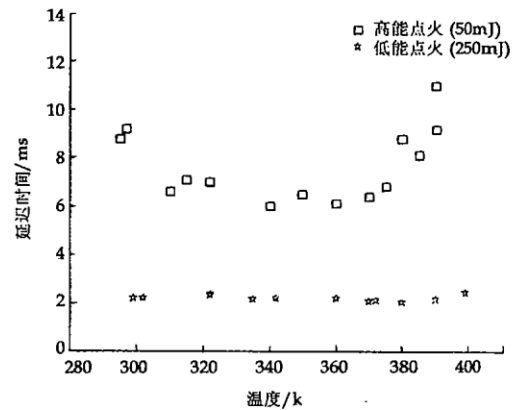


图3 流动混合气中点火能量对点火延迟时间的影响曲线

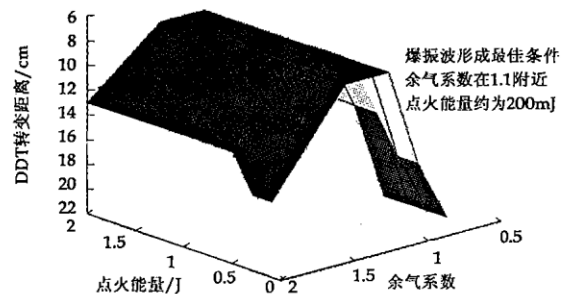


图4 DDT随余气系数和点火能量变化关系图