

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.001

氢气定容燃烧模拟实验装置设计与应用*

刘兴华 樊志强 酒建刚 王汝维

(北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081)

【摘要】 设计了氢气定容燃烧模拟实验装置,利用纹影法在此装置中进行了无隔板和带隔板条件下的氢气空气预混合物燃烧特性研究。结果表明,该装置可模拟氢气、空气预混合物的自燃。本文实验条件下,无隔板实验中,球形火焰两端出现两股火焰;氢气空气预混合物的自燃首先发生在球形火焰前锋与两侧壁面的夹角区域。带隔板实验中,2种方案都可实现自燃;其中第2种方案可有效阻断火焰从上燃烧室传播到下燃烧室,进而实现自燃。

关键词: 定容燃烧弹 氢气 自燃 隔板

中图分类号: TK46 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0001-04

Hydrogen Fueled Constant Volume Combustion Simulation Apparatus

Liu Xinghua Fan Zhiqiang Jiu Jian'gang Wang Ruwei

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract

A hydrogen fueled constant volume combustion simulation apparatus was designed. By means of Schlieren method, combustion characteristics of hydrogen-air pre-mixture were studied in the apparatus on the condition of no adaptor and built-in one. The result showed that it was able to simulate the auto-ignition of the pre-mixture. Under the experimental conditions, there was a jet of flames on both sides of the spherical flame respectively in the test with no adaptor; the auto-ignition of unburned gas appeared firstly in the angle between the spherical flame front and the chamber wall. In the test with built-in adaptor, it could achieve auto-ignition through both plans. The second plan can effectively prevent the flame propagation from the upper chamber to the lower one, and the unburned gas was auto-ignited.

Key words Constant volume combustion bomb, Hydrogen, Auto-ignition, Adaptor

引言

内燃机缸内燃烧过程的改善是节能减排的重要途径^[1]。燃料自燃会导致爆震、早燃,从而降低内燃机的稳定性和安全性,使其无法正常工作。因此,研究燃料的自燃十分必要。氢内燃机中也存在爆震、早燃等非正常燃烧^[2]。模拟实验是揭示缸内燃烧过程机理的有效手段。目前,内燃机燃烧模拟系统主要有定容燃烧弹、快速压缩机等类型。定容燃烧弹因具有结构简单、成本低等优点而获得了较为广泛的应用^[3]。燃料自燃必须满足一定的压力、温度条件,但是通过对定容燃烧弹直接加压、加温从而

引起燃料自燃,实际操作起来不太可能。因此需要通过其他手段在定容燃烧弹中满足燃料的自燃条件,以实现其自燃。本文设计一种氢气空气定容燃烧实验装置,并利用纹影法在此装置中分别进行无隔板和带隔板条件下的氢气、空气预混合物燃烧特性研究。

1 实验装置设计

图1所示为定容燃烧弹实验系统示意图。通过隔热材料,定容燃烧弹被固定在基座上以方便调节纹影光路。燃烧室前后的相对面上分别安装厚度为50 mm的光学石英玻璃视窗,为火焰的纹影成像提供光学通道。定容燃烧弹上部中心位置装有火花

收稿日期:2011-04-15 修回日期:2011-05-31

* 国家自然科学基金资助项目(50976014)

作者简介:刘兴华,副教授,博士生导师,主要从事内燃机燃烧及其电控技术研究,E-mail:lxh@bit.edu.cn

塞,以实现点火。通过控制氢气、空气的分压来配制不同浓度的预混合物。采用真空泵将燃烧后的废气排出。采用内置在内壁中的电加热棒实现对燃烧弹初始温度的控制。采用 kistler6125B 非水冷型压力传感器、电荷放大器、记忆示波器,采集燃烧弹中的压力。点火信号上升沿为记忆示波器压力信号采集零点;点火信号下降沿为高速摄影仪第 1 幅图像对应时刻,该时刻亦为点火时刻。点火脉宽为 3 ms。利用高速摄影仪记录燃烧室内的火焰发展情况。

图 2 所示为定容燃烧弹 (constant volume

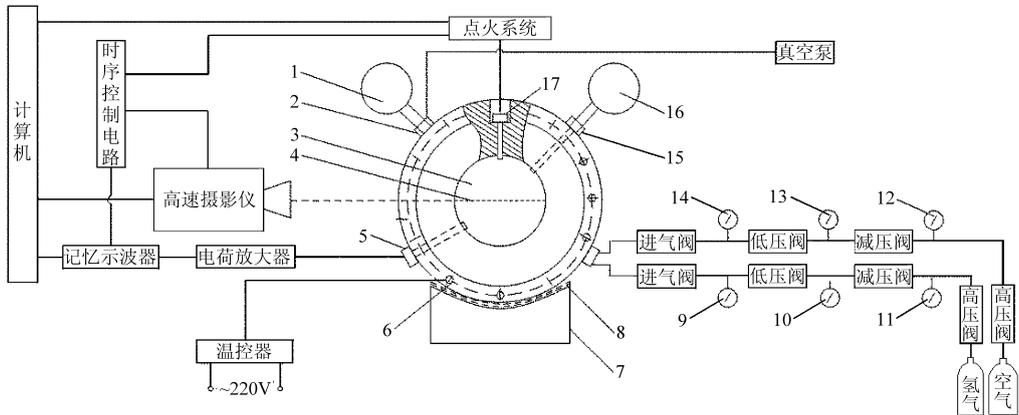


图 1 定容燃烧弹实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CVCB test system

1. 稳态压力表 2. 排气阀 3. 燃烧腔 4. 横隔板 5. 压力传感器 6. 电加热棒 7. 底座 8. 隔热材料 9、14. 精密压力表
10、13. 低压表 11、12. 高压表 15. 上燃烧室温度传感器 16. 真空表 17. 火花塞

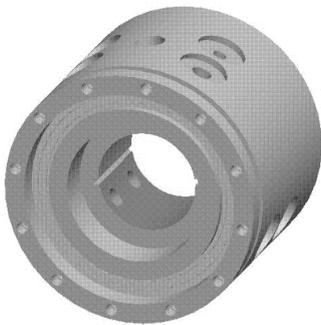


图 2 CVCB 本体

Fig. 2 Body of CVCB

凹槽塞条面向燃烧室一侧为同燃烧室半径相同的圆弧面。在定容燃烧弹本体凹槽内插入凹槽塞条,燃烧室变为完整的圆柱形。

氢气具有宽广的可燃范围。不同初始条件下,氢气、空气预混合物在圆柱形燃烧室中并不一定能实现自燃。因此,本文采用加装横隔板的方式进一步促进预混合物自燃。CVCB 本体中加装横隔板,可使整个燃烧室分为上、下两个燃烧室,通过上燃烧室燃烧后产生的高压来实现下燃烧室预混合物自燃。为此,加装的横隔板必须可以阻碍火焰从上燃烧室传播到下燃烧室,同时还需使上燃烧室预混合物燃烧后产生的高压顺利传播到下燃烧室。

combustion bomb,简称 CVCB) 本体。其由 45 碳素钢制成,外形尺寸 $\phi 257 \text{ mm} \times 208 \text{ mm}$,内部为 $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱形燃烧室。本体上主要安装 CVCB 前后端盖(都含有视窗)、空气进气阀(右下前端)、氢气进气阀(右下后端)、压力传感器(左下前端)、下燃烧室温度传感器(左下后端)、真空表(右上前端)、上燃烧室温度传感器(右上后端)、压力表(左上前端)、排气阀(左上后端)、火花塞(中部)、内嵌的电加热棒等。本体内部有凹槽,用以安放凹槽塞条和横隔板。

可燃混合物可以通过一热源点燃,而且如果火焰传播所需要的热平衡条件能够得到满足,这种点燃后的可燃混合物就能导致火焰传播^[4]。依照这一原理,只需增加传热损失,打破火焰传播的热平衡条件,就可阻止火焰蔓延。通过在横隔板上设置多个通孔,扩大火焰和通道壁的接触面积,强化传热,提高火焰的热量损失,就可延缓、阻止火焰向下燃烧室传播。此即火焰的淬熄原理。本文设计了含有 $M \times N$ 个通孔的横隔板,在加强横隔板阻火性能的同时,保持其良好的通气性。

由于燃料的淬熄距离比较小,化学当量比时氢气的淬熄距离更是小到 0.64 mm ^[5]。同时,加工更小直径的通孔,所需成本较高。迷宫式密封是机械设计中常用的一种密封方法,其在密封表面设置几个拐弯的通道,形成像迷宫一样的“曲路”,使泄漏的介质在弯曲的通道中产生压力降,不能顺畅通过,进而达到密封效果^[6]。在通孔直径为 0.5 mm 的情况下,氢气空气预混火焰仍可通过横隔板进入下燃烧室。因此,本文利用迷宫式密封原理,进一步加强了横隔板的阻火性能,具体方案如图 3b 所示。应用迷宫式密封原理并未完全将上、下燃烧室分隔开。通过调节其关键零件——螺钉的拧紧力矩,可在保

证良好阻火性能的前提下,使上燃烧室中产生的压力顺利传播到下燃烧室。

图 3 为隔板实物图,设计的两种横隔板外形尺寸均为 $116 \text{ mm} \times 112 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,在横隔板上通孔,为连接上、下燃烧室的通道。横隔板上通孔的数目、布置、孔径大小等,可根据实验需要自行设计选定。

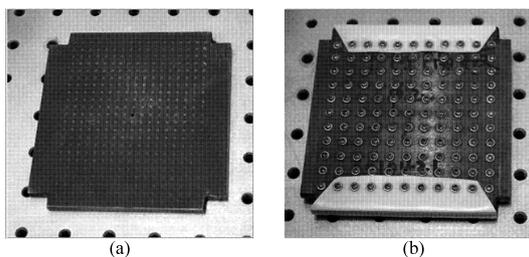


图 3 用于燃料自燃特性研究的横隔板实物图

Fig. 3 Adaptor used for studying the auto-ignition characteristics

(a) 方案 A (b) 方案 B

方案 A 含有 437 (23×19) 个 $\phi 0.5 \text{ mm}$ 的通孔。方案 B 含有 121 (11×11) 个 $\phi 2.2 \text{ mm}$ 的通孔,各通孔加装平垫并用 M2 螺钉穿过,另一端用螺母固定,前后两端包装聚四氟垫片,以在保证石英玻璃处密封前提下保护石英玻璃,螺母的拧紧力矩根据实验需要自行调节。由于火焰前锋以球面向前传播,因此螺母拧紧力矩调节原则是隔板中心螺母拧紧力矩大些,隔板四周螺母拧紧力矩小些,以进一步实现近端阻火、远端过气。

2 实验结果及分析

2.1 无隔板条件下

图 4 为初始压力 0.1 MPa 、初始温度 25°C 、当量比 1、无隔板条件下,容弹内压力、压力变化率随时间的变化曲线。此图中,压力信号在 $t = 0 \text{ ms}$ 时对应第 1 幅纹影图像。压力起初变化缓慢,在 4 ms 开始急剧升高,短时间后压力曲线高频大幅震荡,这种现象与混合物的爆燃相似,即相对于火焰前锋未燃区预混合物的自燃。从图 4 中压力变化率曲线可看到压力开始剧烈波动的时刻。

图 5 为初始压力 0.1 MPa 、初始温度 25°C 、当量比 1、无隔板条件下纹影图像。实验时,高速摄影仪拍摄速度为 $13\,029 \text{ 幅/s}$ 。各纹影图像下的数字代表图像序号。如图所示,燃烧过程中球形火焰两端出现两股火焰(第 53 ~ 55 幅图像),它们加速了未燃区预混合物的燃烧。以球形火焰前锋为界,第 1 ~ 51 幅纹影图像中未燃区无明显火焰,但第 51 幅图像中在球形火焰前锋与柱状燃烧室交界处,球形火焰前锋表面产生变形。第 52 幅图像中两侧变形已经明显且左侧未燃区出现火焰。第 53 幅图像中,两

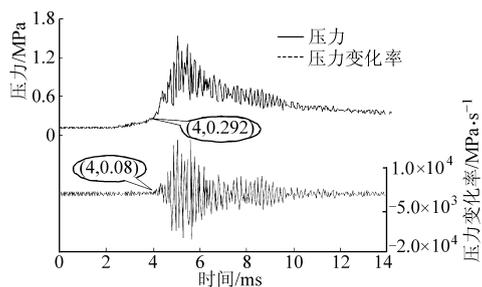


图 4 压力、压力变化率随时间变化曲线

Fig. 4 Change of pressure and pressure change rate with time in the test of no adaptor

侧未燃区出现大面积火焰,该火焰没有明显边界且含有离散性很强的多个起燃点。两股火焰在很短的时间内扫过了未燃区。

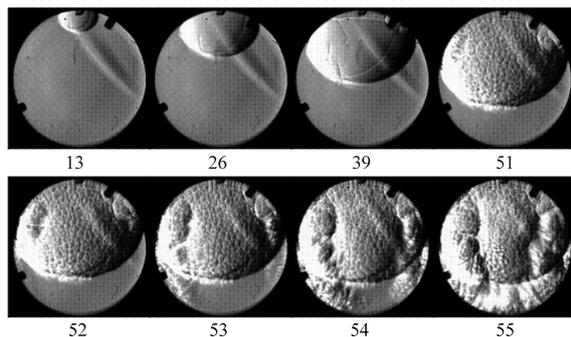


图 5 无隔板条件下实验结果

Fig. 5 Experimental results with no adaptor

由第 52 ~ 55 幅图像可知,两股火焰经历很短时间就完全充满“未燃区域”。只有自燃时的多点燃烧,火焰传播才会如此之快。因此,自燃首先发生在第 52 幅纹影图像的左侧夹角区域。该时刻相对点火信号下降沿为 3.99 ms ,与图 4 压力曲线中压力开始急剧升高时刻相对应。

2.2 带隔板条件下

2.2.1 方案 A

图 6 为初始压力 0.14 MPa 、初始温度 15°C 、当量比 0.952 ,采用方案 A 得到的火焰纹影图像。上燃烧室球形火焰前锋未接触隔板前,预混合物燃烧后产生的高压将上燃烧室的未燃气体压入下燃烧室,因此第 26 ~ 36 幅图像中下燃烧室隔板附近出现气体射流。此射流增强了下燃烧室未燃气体的湍动能。当火焰前锋接触横隔板时,此气体射流开始减弱。由于隔板对火焰传播有一定的阻碍作用,所以当火焰前锋接触横隔板到一定程度时,下燃烧室才出现火焰射流(第 41 ~ 43 幅图像)。其中第 43 幅壁面附近已出现离散的着火点。第 44 幅图像中,下燃烧室未燃气体瞬间大面积燃烧,其速度如此之快,说明第 44 幅图像中亦出现自燃。

由于上燃烧室的火焰已传播到下燃烧室,因此,第 44 幅图像中点燃、自燃并存。化学当量比时氢气

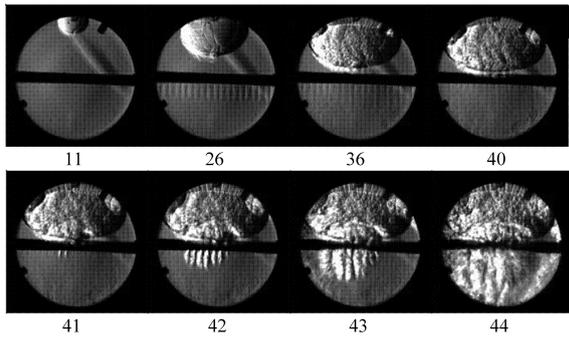


图6 方案A实验结果

Fig.6 Experimental results with plan A

的淬熄距离为 0.64 mm, 而此隔板通孔直径为 0.5 mm。所以本文实验条件下, 通过减小通孔直径难以阻断火焰由上燃烧室向下燃烧室传播。

图7为初始压力 0.14 MPa、初始温度 15℃、当量比 0.952, 采用方案 A 得到的容弹内压力随时间的变化曲线。压力起初变化很小, 在 3.2 ms 开始猛然升高, 之后压力曲线剧烈震荡。图6第43幅纹影图像中出现离散的着火点, 其时刻相对点火时刻为 3.22 ms, 与图7压力曲线中压力开始急剧升高时刻相对应。

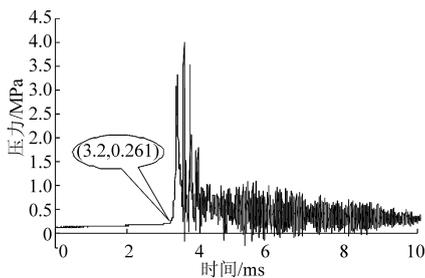


图7 方案A压力随时间变化曲线

Fig.7 Change of pressure with time by adopting plan A

2.2.2 方案 B

图8为初始压力 0.24 MPa、初始温度 25℃、当量比 1.7, 采用方案 B 得到的火焰纹影图像。此方案中, 当火焰前锋与横隔板接触时, 火焰并没有向下燃烧室继续传播, 而是持续扩大与横隔板的接触面积, 期间下燃烧室并无气体射流。由于螺栓和垫片的阻碍作用, 此时隔板近似为“实板”。这导致上燃

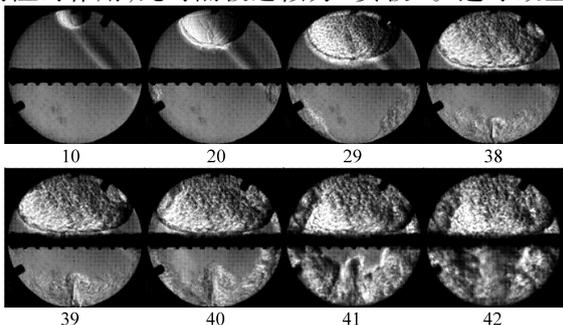


图8 方案B实验结果

Fig.8 Experimental results of plan B

烧室内的温度压力急剧升高, 而下燃烧室并没有火焰出现, 如第39幅纹影图像所示。但是, 该隔板又具有一定的通气性, 进而使得上燃烧室的未燃气经由隔板两端压入下燃烧室。两股气体高速流动, 在下燃烧室底部相撞, 因此在下燃烧室底部出现冲向隔板的模糊突起。该模糊部分为具有一定温度、经过一定前期反应的预混合物, 该部分与周围气体有一定的密度差, 因此纹影图像中会显示该突起。

第40幅纹影图像中, 上燃烧室两端形成的火焰并没有在隔板附近明显堆积。但此时下燃烧室右上角已出现火焰。由“实板”的阻燃性可知, 下燃烧室预混合物的燃烧并不是由上燃烧室的火焰导致。由于氢氧预混合物在小通道中的高速流动会引起其自燃^[7], 因此, 下燃烧室预混合物燃烧首先从隔板两端开始。同时, 燃烧前, 下燃烧室中模糊部分的预混合物经历了一系列前期反应, 进而导致局部燃烧瞬间转变为大面积爆燃(第41、42幅图像)。此为单纯的自燃。

图9为初始压力 0.24 MPa、初始温度 25℃、当量比 1.7, 采用方案 B 得到的容弹内压力随时间的变化曲线。压力经历一段变化很小的时期后, 在 3.0 ms 急剧升高, 之后压力曲线同样出现剧烈震荡。第40幅纹影图像中出现着火点, 其时刻相对点火时刻为 2.99 ms, 与图9压力曲线中压力开始急剧升高时刻相对应。

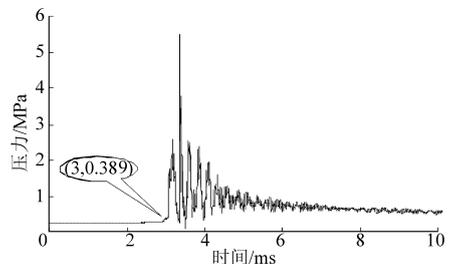


图9 方案B压力随时间变化曲线

Fig.9 Change of pressure with time by adopting plan B

3 结论

(1) 该实验装置可直观地模拟氢气、空气预混合物的自燃。

(2) 本文实验条件下, 无隔板实验中, 球形火焰两端出现两股火焰; 可从纹影图像和压力两方面确定自燃发生的起始位置和起始时刻, 氢气、空气预混合物的自燃首先发生在球形火焰前锋与两侧壁面的夹角区域。

(3) 本文实验条件下, 带隔板实验中, 两种方案都可实现自燃; 其中第2种方案可有效阻断火焰从上燃烧室传播到下燃烧室, 同时实现自燃。

(下转第9页)

参 考 文 献

- 1 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 2 Myoungjin Kim, Sihun Lee, Wootae Kim. Tumble flow measurements using three different methods and its effects on fuel economy and emissions[C]. SAE Paper 2006-01-3345, 2006.
- 3 Ricardo. Steady state flow bench port performance measurement and analysis techniques[R]. Report DP93/0704, 1993.
- 4 胡春明,郑振鑫. 汽油机缸内滚流运动的评价研究[J]. 车用发动机,2009(3):15~19.
Hu Chunming, Zheng Zhenxin. Evaluation of gasoline engine in 2-cylinder tumble motion[J]. Vehicle Engine, 2009(3): 15~19. (in Chinese)
- 5 Stone C R, Ladommatos N. The measurement and analysis of swirl in steady flow[C]. SAE Paper 921642, 1992.
- 6 Bensler H, Kapitzka L, Raposo J, et al. A new experimental method for determining port generated swirl flow[C]. SAE Paper 2002-01-2846, 2002.
- 7 王健,刘德新,刘书亮,等. 四气门汽油机进气道流动特性的稳流试验研究[J]. 内燃机学报,2004,22(2):182~186.
Wang Jian, Liu Dexin, Liu Shuliang, et al. Study of steady measurements on intake port flow characteristics in a four-valve gasoline engine[J]. Transactions of CSICE,2004,22(2):182~186. (in Chinese)
- 8 刘书亮,冯洪庆,王天友,等. 四气门火花点火发动机气缸内的滚流运动[J]. 燃烧科学与技术,2004,10(2):181~186.
Liu Shuliang, Feng Hongqing, Wang Tianyou, et al. Tumble motion in the cylinder of the 4-valve spark ignition engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004,10(2):181~186. (in Chinese)
- 9 刘德新,李丹,冯洪庆,等. 四气门汽油机进气道气流运动的三维数值模拟研究[J]. 内燃机工程,2006,27(2):36~38.
Liu Dexin, Li Dan, Feng Hongqing, et al. Study of three-dimensional numerical simulation for air flows in intake port of four-valve gasoline engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2006,27(2): 36~38. (in Chinese)
- 10 任立红,舒歌群,张宝欢,等. 可变进气道发动机性能试验及分析研究[J]. 内燃机工程,2010,31(1):8~12.
Ren Lihong, Shu Gequn, Zhang Baohuan, et al. Research on performance of variable intake system of motorcycle engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010,31(1): 8~12. (in Chinese)
- 11 Xu H. Some critical technical issue on the steady flow testing of cylinder heads[C]. SAE Paper 2001-01-1308, 2001.

~~~~~  
(上接第4页)

## 参 考 文 献

- 1 周龙宝,刘巽俊,高宗英. 内燃机学[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2003.
- 2 White C M, Steeper R R, Lutz A E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006,31(10): 1292~1305.
- 3 张红光,郑轶,郑国勇,等. 采用汽油作燃料的内置横隔板定容燃烧室的开发与试验[J]. 兵工学报,2009,30(5):622~627.  
Zhang Hongguang, Zheng Yi, Zheng Guoyong, et al. Development and test of the gasoline fueled constant volume combustion chamber with built-in adaptor [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(5): 622~627. (in Chinese)
- 4 威廉斯 F A. 燃烧理论[M]. 2版. 北京:科学出版社,1990.
- 5 Drell I L, Bells F E. Survey of hydrogen combustion properties[R]. NACA Report 1383, 1958.
- 6 李良军. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
- 7 Golub V V, Baklanov D I, Bazhenova T V, et al. Experimental and numerical investigation of hydrogen gas auto-ignition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(14): 5946~5953.