

点火能量对天然气空气预混合气层流燃烧的影响

周蓉芳, 魏若男, 周竹杰, 唐安东, 高忠权, 吴筱敏

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 通过改变点火线圈的充电时间,研究了充电时间与天然气空气预混合气点火能量、预混层流燃烧速度及压力和放热率等燃烧特性参数之间的关系. 结果表明:点火能量随充电时间的增加而增大,当充电时间增加到 6 ms 时,点火能量的增加趋势减缓;点火能量能会影响火核的形成和初期火焰的发展,当火核半径发展到 8 mm 时,火焰传播速度不受影响;压力峰值随点火能量的增加逐渐增大且峰值位置提前,当充电时间由 2 ms 增加到 8 ms 时,最大压力峰值增加了 3.8%,峰值提前 8.6 ms 出现,火焰发展期和快速燃烧期分别缩短了 5.2 ms 和 1.7 ms.

关键词: 点火能量;燃烧;火焰传播速度;容弹

中图分类号: TK402 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)07-0021-05

Effect of Ignition Energy on Laminar Burning of Natural Gas-Air Premixed Mixture

ZHOU Rongfang, WEI Ruonan, ZHOU Zhujie, TANG Andong, GAO Zhongquan, WU Xiaomin

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The relations of charging time with ignition energy, premixed laminar burning velocity, and combustion characteristics, such as pressure and heat release rate, of the natural gas-air premixed mixture were studied by changing the ignition coil charging time. The results show that the ignition energy increases almost linearly with the increase in the coil charging time. The ignition energy increases slowly when the charging time increases to 6 ms. The flame initiation and the early development are accelerated because of the increase in ignition energy but ignition energy has no effect on the flame propagation speed after the nuclear radius increases to 8 mm. The peak combustion pressure increases and occurs earlier when charging time increases. When the charging time rises from 2 ms to 8 ms, the maximum peak pressure increases by 3.8% and occurs 8.6 ms in advance, and the flame development period and the rapid combustion period decrease by 5.2 ms and 1.7 ms, respectively.

Keywords: ignition energy; combustion; flame propagation speed; constant volume bomb

点火能量是衡量点火系统性能的一项重要指标,它会影响到发动机的经济性能、动力性能及排放性能等指标,所以不少学者对此展开了研究. Shen 等人^[1]在单缸汽油机上利用高速纹影摄影法研究了点火能量对火焰的生成和初期发展的影响,发现火花塞在跳火过程中的击穿阶段所释放能量有助于加

大火核的初始尺寸,从而加快火焰的形成和初期发展,使得燃烧可在更为稀薄的混合气中进行. Hu 等人^[2]在一台试验用低压缸内直喷(CNG)发动机上研究了点火能量对燃烧特性的影响,发现增大点火能量有助于提高燃烧的稳定性的.

上述研究都是在发动机上进行的,然而发动机

的实际燃烧与传热过程比较复杂,加之各循环燃烧是变化的,要做到控制循环的燃烧条件不变是比较困难的,所以试验结果的可比性不强^[3].发动机的可视化程度不高,实时观察火焰的发展变化不易,为此本文利用定容燃烧弹^[4]和高速纹影摄像装置开展了点火能量对甲烷空气预混合气层流燃烧影响的研究,以期对点火能量影响燃烧性能的研究提供较为全面的参考.

1 试验设计

1.1 试验系统与方案

试验系统如图 1 所示.该系统主要包括定容燃烧弹、混合气配置及供给系统、点火与控制系统、数据测试采集系统.试验容弹内腔为圆柱体,内腔直径为 130 mm,长度为 130 mm;混合气配置及供给系统包括 U 型管压力计、调压阀和抽气机;燃料采用体积分数为 99.99% 的天然气;点火与控制系统包括两套点火线圈点火电极及时序控制电路(本文仅使用了一套点火线圈和点火电极);数据测试采集系统包括记录火焰图片的高速摄像仪和记录压力信号的数据采集仪.高速摄像仪为美国 Redlake 公司生产的 HG-100K 摄像仪,拍摄速度为 10 000 幅/s;数据采集仪为 Yokogawa 公司的 DL750 型数据采集仪;压力传感器为 Kistler 4075A10 型的缸压传感器.

试验首先根据分压定律按所需的当量空燃比在容弹中配置均匀的混合气,可用电感放电方式点燃混合气,利用数据采集仪进行压力信号采样,同时触发高速摄像仪记录火焰发展纹影.试验条件为:天然气与空气的混合空燃比为当量空燃比,温度为 285 K,预混压力为 0.1 MPa.

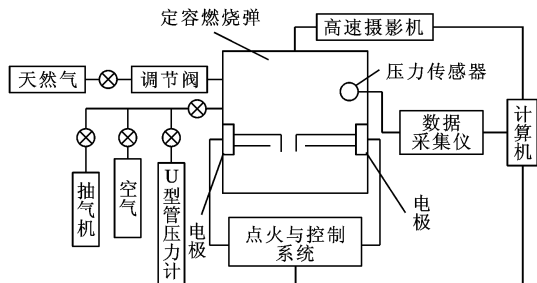


图 1 试验系统

1.2 点火系统设计原理

对于电感储能式点火系统,在点火线圈参数和

其他外部条件不变的情况下,点火能量的大小主要取决于点火线圈储存的能量,即

$$E = \frac{1}{2} L_1 I_p^2 \quad (1)$$

式中: L_1 为初级线圈电感; I_p 为初级线圈断开电流,

$$I_p = \frac{U}{R_1} (1 - e^{-\frac{R_1}{L_1} T}) \quad (2)$$

其中: R_1 为初级回路的电阻; U 为蓄电池电压; T 为充电时间.

由式(1)和式(2)可知,在点火线圈参数 L_1 和电路参数 R_1 、 U 确定之后,改变线圈的充电时间就可改变初级线圈的断开电流,从而达到改变点火能量的目的.

本文设计了一种时序控制电路,用来改变线圈的充电时间,使得线圈充电时间可以在 2 ms~8 ms 之间变化.

2 试验结果与分析

2.1 线圈充电时间对点火能量的影响

首先通过调节点火控制电路来改变线圈的充电时间(2 ms~8 ms),然后使用高速数据采集仪采集典型的点火电压和点火电流,采集频率为 5 MHz.试验中,在点火回路串入 1 Ω 电阻,其可将随时间变化的电流转化为电阻两端的电压,再用高压探头通过测量电阻的端电压来获取点火电流 $i(t)$,通过测量点火电极的端电压来获取点火电压 $u(t)$,测量结果如图 2 所示.

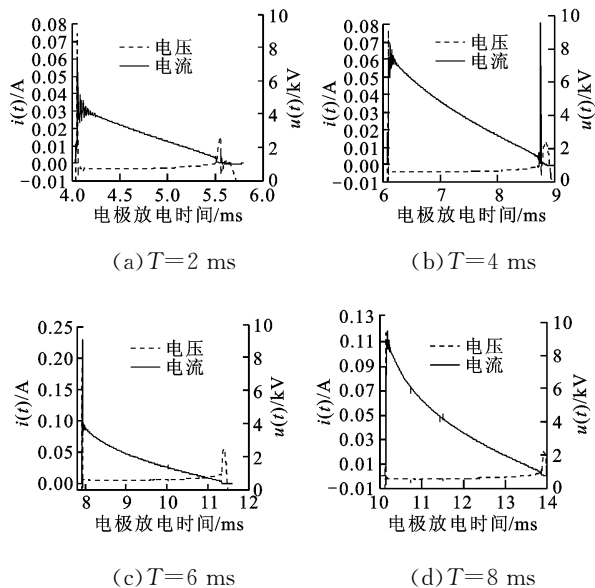


图 2 典型的点火电压和点火电流的变化

点火能量

$$E_{spi} = \int_0^t u(t)i(t)dt \tag{3}$$

式中： $u(t)$ 为点火电压； $i(t)$ 为点火电流。

根据式(3)计算出的点火能量如图 3 所示。从图中可以看出，充电时间与点火能量几乎呈线性关系，当充电时间延长到 6 ms 时，点火能量增幅减缓。

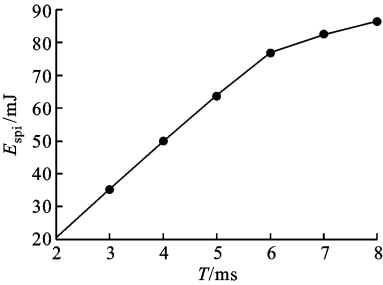


图 3 不同充电时间下的点火能量

2.2 充电时间对火焰传播的影响

对于定容燃烧弹，从点火时刻开始到形成稳定的球形火焰乃至火焰向外传播的整个过程中，只有在未燃区的温度和压力变化范围均很小的情形下，火焰燃烧速率才是待测量的速率。在此范围内，火焰的辐射损失很小，已燃气体经历了一个准定压绝热过程，同时未燃气体近似保持初始状态。当火焰半径小于 25 mm 时，压力变化较小，此时通过测量可以获得球形火焰的层流燃烧速度^[4-8]。

图 4 为甲烷空气预混合气火焰传播的纹影照片，其中包括 T 分别为 2、4、6、8 ms 和火焰传播时间 t 分别为 2、5、10 ms 时的图片。从图中可以看出，在可燃预混合气中点火成功后，火焰呈球形且由已燃区向未燃区扩展，随着充电时间的延长，火核半径增大^[9-10]。

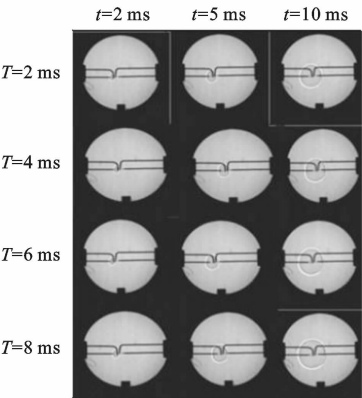


图 4 甲烷空气预混合气火焰传播的纹影照片

图 5 为不同充电时间下火焰半径 r 与 t 的关

系。从图中可以看出， r 与 t 呈现线性变化的关系。当 $t=10$ ms， T 分别为 2、4、6、8 ms 时， r 分别为 19.9、21.0、22.2、23.1 mm， r 最大增幅为 16%。

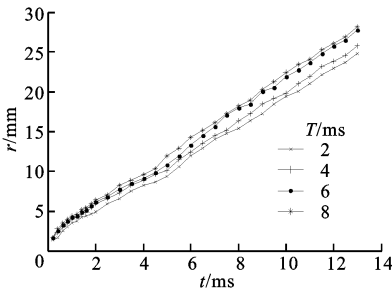


图 5 不同充电时间下 r 与 t 的关系

图 6 为不同充电时间下层流火焰传播速度 S_n 与 r 的关系。从图中可以看出，当 $r<8$ mm 时， S_n 呈现出先减小后平衡的变化趋势。

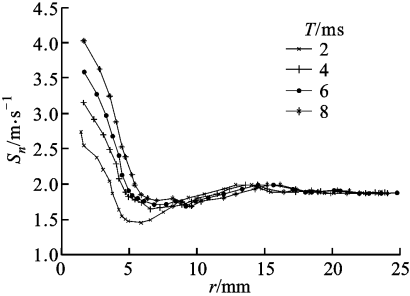


图 6 不同充电时间下 S_n 与 r 的关系

由图 3 可知， T 越大， E_{spi} 越大。随着 T 的增加，即 E_{spi} 的增加， S_n 逐渐增大，当 $r>8$ mm 时， E_{spi} 对 S_n 的影响不大。这是因为，在点火初期，随着火焰的发展，前锋面附近积累了大量的燃烧产物，其抑制了未燃甲烷的燃烧，所以火焰速度有所减慢。但是，随着 E_{spi} 的提高，电极附近单位体积内的活化分子数量增多，其可促进甲烷的燃烧，有利于火焰传播。 $r>8$ mm 时外界压力、温度等因素的影响远远超过 E_{spi} 对 S_n 的影响，此时点火能量的影响可以忽略^[11-12]。

2.3 充电时间对燃烧的影响

图 7 为不同充电时间下的压力变化。因为同步记录压力与火焰传播的过程，所以燃烧时间即为火焰传播时间 t 。从图中可以看出， T 增大，压力曲线的形状及变化趋势基本相同。图 8 为不同充电时间下的压力峰值及其出现的时间 t' 。从图中可以看出， T 对容弹内最大燃烧压力影响较大，当 T 由 2 ms 增加到 8 ms 时，最大压力由 563.4 kPa 增加到 584.8 kPa，增加了 3.8%，燃烧逐渐提前，点火后压力峰值出现的时间由 130.9ms 提前到 122.3ms，

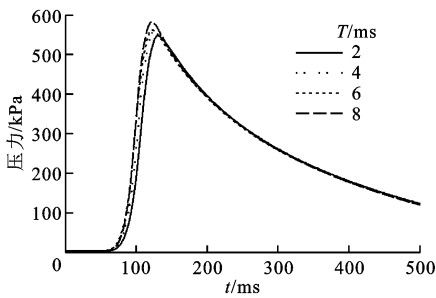


图 7 不同充电时间下的压力变化

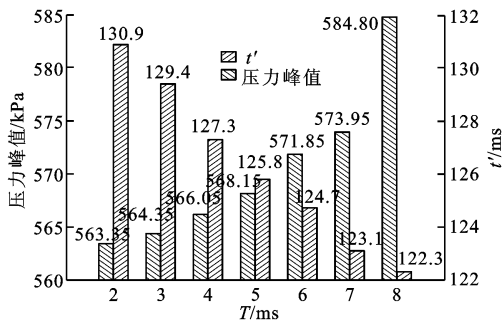


图 8 不同充电时间下的压力峰值及压力峰值出现的时间

提前了 8.6 ms,但是由图 3 中 T 与 E_{spi} 关系可知, T 对压力峰值的影响即是 E_{spi} 对压力峰值的影响. 图 9 为不同充电时间下的燃烧放热率. 从图中可以看出, 定容燃烧弹内燃烧放热率曲线形似传统发动机预混燃烧时的单峰形状, 并未出现扩散燃烧导致的双峰放热现象, 说明定容燃烧弹内火焰传播主要以预混层流为主^[13-14]. 随着 T 的延长, 由 T 与 E_{spi} 的关系可知, E_{spi} 的增加, 初期放热量增大, 放热率最大值由 $15.5 \text{ J} \cdot \text{ms}^{-1}$ 增加到 $16.9 \text{ J} \cdot \text{ms}^{-1}$, 增加了 9.0%, 放热率最大值出现的时间提前, 提前最多的达 7.8 ms.

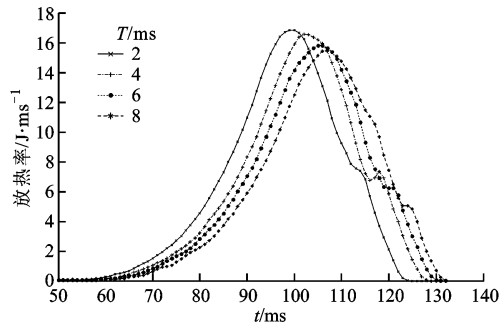


图 9 不同充电时间下的燃烧放热率

图 10 为累积放热率曲线. 按照燃烧学的定义, 从点火到 10% 累积放热率所经历的时间为火焰发展期, 从 10% 累积放热率到 90% 累积放热率所经历的时间为快速燃烧期. 当 T 分别为 2、4、6、8 ms 时,

火焰发展期分别为 32.5、30.8、29、27.3 ms, 缩短的时间最多长达 1.7 ms. 在电极跳火后的 10 ms 内, 累积放热率由 1.1×10^{-2} 增加到 1.3×10^{-2} , 增大了 15%, 这与前面图 5 讨论的火焰半径变化是一致的, 即 T 越大, 同一时刻下的 r 越大, 定容燃烧弹内可燃物质质量分数越大, 累积放热率越高. 由于 T 与 E_{spi} 存在图 3 所示关系, 所以 T 对燃烧的影响即是 E_{spi} 对燃烧的影响.

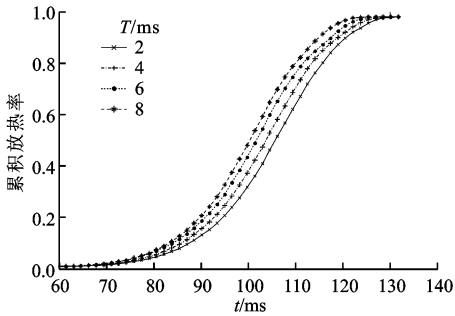


图 10 不同充电时间下的累积放热率

3 结 论

- (1) 点火能量随着充电时间的延长而增大, 但当充电时间增加到 6 ms 时, 能量增加幅度减小.
- (2) 点火能量可加快火核的形成和初期火焰的发展. 当火核半径发展到 8 mm 时, 充电时间, 即点火能量对火焰传播速度的影响很小.
- (3) 压力峰值随着点火能量的增加逐渐增大, 且峰值出现时间提前. 随点火能量的增加, 初期放热量增大, 最大放热率出现的时间提前, 火焰发展期和快速燃烧期缩短. 当充电时间由 2 ms 增加到 8 ms 时, 最大压力增大了 3.8%, 压力峰值提前了 8.6 ms 出现, 火焰发展期和快速燃烧期分别缩短了 5.2 ms 和 1.7 ms.

参考文献:

[1] SHEN Huixian, JANG Deming. Effects of spark energy on the flame ignition and early development in a spark ignition engine[J]. Combustion and Flame, 1993, 11(1): 17-22.

[2] 胡春明, 赵文锋, 刘娜, 等. 点火能量对 CN 低压直喷发动机燃烧特性的影响[J]. 拖拉机与农用运输车, 2010, 37(3): 46-49.

HU Chunming, ZHAO Wenfeng, LIU Na, et al. Effects of ignition energy on combustion characteristics of a low pressure CNG engine[J]. Tractor & Farm Transporter, 2010, 37(3): 46-49.

- [3] HUANG Zuohua, ZHANG Yong, ZENG Ke, et al. Natural gas-hydrogen-air premixed mixture combustion with a constant volume bomb [J]. *Energy and Fuels*, 2007, 21(2): 692-698.
 - [4] 马凡华, 蒋德明, 曾科, 等. 容弹实验装置的混合气配制及点火系统 [J]. *汽车技术*, 2000(6): 17-19.
MA Fanhua, JIANG Deming, ZENG Ke, et al. Mixture gas preparation and ignition system of the constant volume combustion bomb experimental device [J]. *Automobile Technology*, 2000(6): 17-19.
 - [5] HU Erjiang, HUANG Zuohua, HE Jiajia, et al. Measurements of laminar burning velocities and onset of cellular instabilities of methane-hydrogen-air flames at elevated pressures and temperatures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(13): 5574-5584.
 - [6] BRADLEY D, HICKS R A, LAWES M, et al. The Measurement of laminar velocities and Markstein numbers for iso-octane-n-heptane-air mixtures at elevated temperatures and pressures in an explosion bomb [J]. *Combustion and Flame*, 1998, 115(1/2): 126-144.
 - [7] HUANG Zuohua, ZHANG Yong, ZENG Ke, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 146(11,2): 302-311.
 - [8] HU Erjiang, HUANG Zhuohua, LIU Bing, et al. Experimental investigation on performance and emissions of a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 27(5): 528-539.
 - [9] VAN MAAREN A, THUNG D S, GOEY L P H. Measurement of flame temperature and adiabatic burning velocity of methane/air mixture [J]. *Combustion Science and Technology*, 1994, 96(4/6): 327-344.
 - [10] HUANG Zuohua, ZHANG Yong, WANG Qian, et al. Study on flame propagation characteristics of natural gas-hydrogen-air mixtures [J]. *Energy and Fuels*, 2006, 24(6): 2385-2390.
 - [11] 张红光, 王道静, 刘凯, 等. 车用电控发动机点火能量测试系统的开发 [J]. *北京工业大学学报*, 2011, 37(5): 748-752.
ZHANG Hongguang, WANG Daojing, LIU Kai, et al. Development of spark energy measurement system for electronic-controlled automotive engine [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2011, 37(5): 748-752.
 - [12] 赵中煜, 孙柏刚, 鲁冯杰, 等. 氢内燃机点火能量的试验研究 [J]. *车用发动机*, 2009, 184(5): 69-71.
ZHAO Zhongyu, SUN Baigang, LU Fengjie, et al. An experimental study on the ignition energy of hydrogen internal combustion engine [J]. *Vehicle Engine*, 2009, 184(5): 69-71.
 - [13] 蒋德明. 火花点火发动机的燃烧 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
 - [14] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 262-294.
- [本刊相关文献链接]**
- 刘亦夫, 刘兵, 曾科, 等. 缸内直喷天然气/氢气混合燃料配合废气再循环的性能与排放. 2011, 45(7): 4-8.
- 刘亦夫, 刘兵, 刘亮, 等. 天然气缸内直喷发动机在不同喷射和点火时刻下的排放与燃烧特性. 2011, 45(5): 12-16.
- 林林. 中国部分城市太阳能蒸汽热发电系统性能分析. 2010, 44(5): 26-30.
- 周满, 厉彦忠, 谭宏博, 等. 液化天然气冷藏车冷量回收理论与稳态实验研究. 2010, 44(3): 105-109.
- 赵敏, 厉彦忠. 丙烷预冷混合制冷剂液化流程中原料气与制冷剂匹配研究. 2010, 44(2): 108-112.
- 冉帆, 王锡斌, 朱瑞军, 等. 甲醇空气预混层流燃烧的简化化学反应动力学机理. 2009, 43(9): 27-31.
- 姜雪, 胡二江, 巩静, 等. 天然气掺氢配合废气再循环发动机的性能及排放研究. 2009, 43(5): 18-21.
- 王婕, 黄佐华, 刘兵. 天然气掺氢配合废气再循环发动机燃烧过程的数值模拟. 2009, 43(5): 22-25.
- 巩静, 金春, 姜雪, 等. 高辛烷值燃料-空气预混层流燃烧特性研究. 2009, 43(5): 26-30.
- 杜建伟, 唐翠萍, 樊栓狮, 等. Span20 促进甲烷水合物生成的实验研究. 2008, 42(9): 1165-1168.
- 陈万生, 王锡斌, 杨宁, 等. 液化石油气-氢气-空气层流燃烧特性的研究. 2008, 42(9): 1081-1085.
- 陈亘, 陈朝阳, 黄佐华, 等. 二甲醚-氢气-空气混合气预混燃烧的实验研究. 2008, 42(5): 542-545.
- 唐翠萍, 杜建伟, 梁德青, 等. 天然气水合物新型动力学抑制剂抑制性能研究. 2008, 42(3): 333-336.
- 刘兵, 黄佐华, 曾科, 等. 天然气掺氢火花点火式发动机排放性能研究. 2008, 42(2): 243-247.
- 高忠权, 吴筱敏, 向往, 等. 电极几何参数对离子电流影响的试验研究. 2008, 42(1): 36-40.
- 燕娜, 厉彦忠, 脱瀚斐. 基于液化天然气冷量的液体空分新流程. 2007, 41(1): 122-124.

(编辑 苗凌)