

离子电流法在不正常点火中的实验模拟

周竹杰¹, 魏若男^{1,2}, 周蓉芳¹, 唐安东¹, 高忠权¹, 吴筱敏¹

(1. 西安交通大学内燃机研究所, 710049, 西安; 2. 西安科技大学机械工程学院, 710054, 西安)

摘要: 在定容燃烧弹上, 利用离子电流法, 通过测量燃烧过程中的离子电流信号, 对不正常点火进行了检测, 即通过调整两对点火电极之间的间隙和点火时间, 来模拟发动机火花塞和排气门附近的早火和后火等不正常点火情况。结果发现: 不正常点火时, 离子电流波形在形状及幅值上与正常点火时存在较大的差异, 即火花塞电极附近发生早火时, 离子电流波形在主点火信号之前出现了离子电流; 排气门附近发生早火或后火时, 离子电流波形出现了 2 个峰值, 该离子电流第 1 峰值大于正常点火时的第 1 峰值, 第 2 峰值小于正常点火时的第 2 峰值。该结果可为发动机不正常点火检测提供依据, 且方法简单、易行。

关键词: 火花塞; 不正常点火; 离子电流; 定容燃烧弹

中图分类号: TK411 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0043-05

Experimental Simulation on Detection of Abnormal Ignition Using Ionic Current Method

ZHOU Zhujie¹, WEI Ruonan^{1,2}, ZHOU Rongfang¹, TANG Andong¹,
GAO Zhongquan¹, WU Xiaomin¹

(1. Internal Combustion Engine Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: With the ionic current method, the ionic current signal was detected during the combustion process on a constant volume combustion bomb for the detection of the abnormal ignition. Abnormal ignition such as pre-ignition and ignition after the main ignition was simulated by adjusting the distance and the ignition time between two electrodes. The results show that there were large differences between ionic current signals of abnormal ignition and normal ignition signals in the shape and amplitude when the abnormal ignition occurred. When the pre-ignition occurred near the spark plug, the ionic current already appeared before the main ignition signal; when the abnormal ignition occurred near the exhaust valves, the ionic current waveform had two peaks, and the first peak of the ionic current was larger than that at normal ignition and the second peak was lower than that at normal ignition. The results can provide the basis for the detection of abnormal ignition in engines, and the present method is simple and practicable.

Keywords: spark plug; abnormal ignition; ionic current; constant volume combustion bomb

炽热表面常常会出现在点燃式发动机之中(如过热的火花塞绝热体和电极、排气门), 引起发动机的不正常燃烧, 这类不正常点火大致可分为后火和

早火 2 种^[1]。后火一般出现在炽热点温度较低时, 电火花点燃混合气后, 炽热点在火焰传播的过程中会点燃其余混合气; 早火一般出现在炽热点温度较

高时,炽热点在火花塞点火以前点燃混合气。在进气、压缩行程中,由于混合气长期受到炽热表面的加热,所以一经着火,火焰的传播速度较快,压力升高速率较快,压缩行程末期的负功很大,从而加快了火焰温度向气缸壁散热,促进了炽热点温度升高,使得点燃混合气的时间提前(早火)。在多缸汽油机上,一个气缸的早火会引起气缸活塞连杆损坏及气门、火花塞、活塞等零件过热^[1],因此准确检测发动机不正常点火对改善发动机的性能、提高发动机的寿命具有重要的作用。

近年来,离子电流法受到了广泛的关注,该方法是利用汽车发动机自身的火花塞部件作为传感器,外加一个偏置电压,来检测流经火花塞电极之间的离子电流,并用于监测发动机的燃烧过程。离子电流已应用于 HCCI 发动机多点检测和点火控制^[2-4]、空燃比的控制^[5]、爆燃检测^[6-8]、失火控制^[9]等方面,也是国内外学者研究的热点。

本文在定容燃烧弹上,通过调节火花塞电极和预点火电极之间的距离和点火时刻,来模拟发动机火花塞和排气门的不正常点火,以期发动机不正常点火的检测提供依据。

1 实验装置

图 1 为不正常点火检测的实验系统。实验装置由定容燃烧弹、进排气系统、点火系统、数据采集系统、高速摄像及纹影系统组成。实验中容弹内的压力用水银压力计测量,结合计算值和水银压力计读数来配制 $P_0=100\text{ kPa}$ 、 $T_0=293.15\text{ K}$ 、当量空燃比 $\Phi_a=1.0$ 的混合气。充气完毕的混合气静置 2 min 后再用电感放电式电极点燃,容弹内压力变化用压力传感器测量,离子电流用离子电流测量系统测量,测量数据通过采集仪同步采集和记录,火焰发展的纹影照片用高速摄影仪记录。数据采集仪的采集频率为 10 kHz,摄影机为美国 RED-LAKE 公司生产的 JHG-100 K 高速摄像机,拍摄速度为 10 000 幅/s。

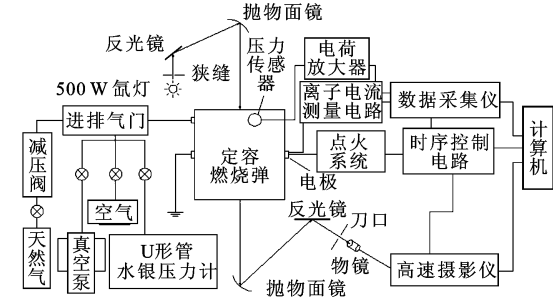


图 1 实验系统布置

实验定容燃烧弹是边长为 220 mm 的正方体,内腔为直径 130 mm、长 130 mm 的圆柱体,具体结构如图 2 所示。容弹两侧面装有圆形石英玻璃窗,视窗直径为 80 mm,其为高速摄影系统提供光学通路。石英玻璃与容弹体之间利用密封橡胶密封。容弹壁面接地,并与火花塞负极相连。

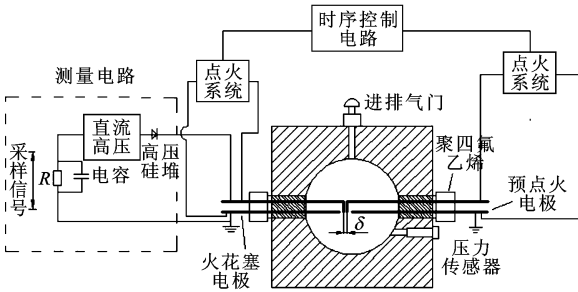


图 2 定容燃烧弹和离子电流检测电路

容弹中心位置上布置了 2 对电极-火花塞电极和预点火电极。火花塞电极作为主点火电极,用于点燃容弹内的可燃混合气,同时还作为测量电极,测量离子电流信号,如图 2 虚框中所示。点火时刻由点火系统控制,该系统主要由蓄电池、点火开关、点火线圈和断电器组成。偏置直流电压 ($U=400\text{ V}$) 加在火花塞电极两端,在火花塞电极之间形成稳定的电场,燃烧产生的离子在电场的作用下定向移动,形成离子电流。点火时的高压用高压硅堆阻断,以防止点火时高压干扰测量电路。预点火电极仅用于点火,并独立于点火系统。

2 组点火系统由时序控制电路控制,即控制 2 对电极的点火时刻和点火顺序。预点火电极先于火花塞电极点火称为早火,反之称为后火。图 3 为早火时间间隔 1 ms 的时序图。为使电火花具有足够的点火能量,点火线圈必须充电。图 3 中上升沿为点火线圈充电时刻,下降沿为充电结束时刻(火花点火时刻)。为了保证 2 对电极具有相同的点火能量,充电时间设置为 5 ms。

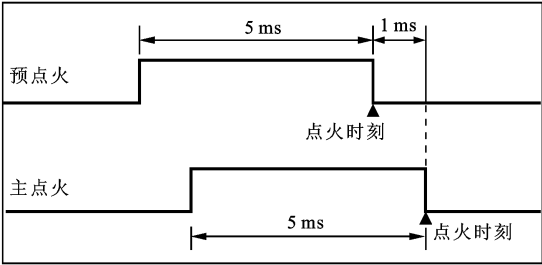


图 3 点火时序图

2 实验结果分析

2.1 正常点火时离子电流波形

实验测得的正常点火时的离子电流、压力波形及其对应的纹影照片如图4所示,该离子电流波形分为火花点火期、火焰前锋期和焰后期3个阶段^[6]。火花点火期出现了一个明显的主点火信号(图4中标记为1的时刻),其幅值较高。火焰前锋期初期离子电流较小,其值约为 $20\text{ }\mu\text{A}$,见图4中纹影照片2,该时刻火焰半径较小,容弹内的压力、温度较低,离子浓度较低,因此离子电流较小。随着燃烧的进行,离子浓度逐渐增大且明显上升,离子电流的波形出现了一个小峰值 $I_{1\max}$ (图4中标记为3的时刻),其幅值大约为 $80\text{ }\mu\text{A}$ 。从图4中的纹影照片3看出,此时火焰前锋面到达容弹壁面,由于容弹壁面和火花塞负极均接地,因此离子通过壁面形成了离子电流。焰后期离子电流迅速增大,在 60 ms 时刻又出现了一个峰值 $I_{2\max}$,幅值大于 $250\text{ }\mu\text{A}$,从图4中的纹影照片4看出,照片开始变黑,说明此时化学反应基本结束。但是,受燃料燃烧放热的影响,定容燃烧弹内的压力和温度迅速升高,使得原本电离能(9.25 eV)较低的 NO 在高温、高压下发生热电离,生成的 NO^+ 浓度逐渐增大并达到最大值^[10],所以焰后期离子电流波形再次出现峰值。

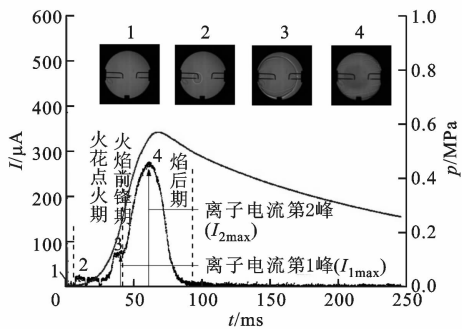


图4 正常点火时离子电流和压力波形及其对应的纹影照片(包含3个阶段)

2.2 近壁面的不正常点火

火花塞电极和预点火电极间距 $\delta=30\text{ mm}$,早火时间间隔 $\Delta t=1\text{ ms}$,后火时间间隔 $\Delta t=2\text{ ms}$ 。图5为离子电流波形和对应点纹影照片。主点火时刻为 0 ms 时,早火的预点火时刻在 0 ms 之前,后火的预点火时刻在 0 ms 之后。图5中标记为1、2、3的纹影照片分别对应 5 ms 时刻火焰前锋期离子电流、离子电流第1峰和离子电流第2峰。从图5可以看出,不论早火还是后火,对应的离子电流波形均出现

了火花点火期、火焰前锋期和焰后期3个阶段,不正常点火时火焰前锋期和焰后期的离子电流波形与正常点火时的异同点在于:不正常点火时火焰前锋期初期离子电流较小,与正常点火时相似,如图5纹影照片1所示,此时火焰半径较小,火花塞电极附近的火焰半径基本相同,但是纹影照片1的早火中预点火电极附近的火焰半径稍大,纹影照片1的后火中预点火电极附近的火焰半径较小;随着燃烧的发展,不正常点火时火焰前锋期离子电流迅速增加,达到了一个明显的峰值,幅值约为 $200\text{ }\mu\text{A}$,明显大于正常点火,该峰值的火焰前锋面发展到了容弹壁面,与壁面的接触面积明显大于正常点火,因此通过壁面形成的离子电流更大,表现为离子电流信号出现了明显的峰值 $I_{1\max}$;在焰后期,不正常点火时离子电流出现了第2个峰值,该峰值比正常点火时小,这是由于早火和后火造成火焰与燃烧室壁接触面更大,接触时间提前,热量通过壁面散失得更多,因此不正常点火时焰后期容弹内的温度要低于正常点火,焰后期内产生的 NO^+ 浓度减小^[10],离子电流第2峰值相应减小。

因此,离子电流的波形可作为判断近壁面不正常点火的依据:不正常点火时离子电流的第1峰值 $I_{1\max}$ 大于正常点火时的第1峰值($100\text{ }\mu\text{A}$),或者不正常点火时离子电流的第2峰值 $I_{2\max}$ 小于正常点火时的第2峰值($250\text{ }\mu\text{A}$)。

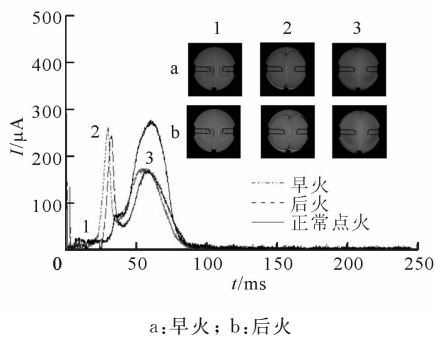


图5 不正常点火时离子电流波形及其对应的纹影照片

2.3 火花塞附近的预点火

火花塞电极和预点火电极的间距 $\delta=2\text{ mm}$,2个点火电极之间的点火时间间隔 Δt 从 1 ms 变化到 13 ms ,变化间隔为 1 ms 。图6为正常点火时离子电流波形及其对应的纹影照片,该离子电流波形只包含了火花点火期和火焰前锋期2个阶段。从图6可以看出: 0 ms 时刻为火花塞电极点火时刻,此时离子电流波形中出现了明显的脉冲信号;火焰前锋期离子电流大约出现在点火后 5 ms 左右,离子电流

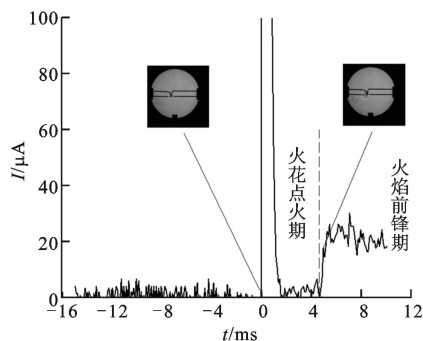


图 6 正常点火时离子电流波形及其对应的纹影照片(包含 2 个阶段)

大小与上述正常点火时相似,约为 $20 \mu\text{A}$ 。

图 7 为 $\Delta t=1 \text{ ms}$ 时早火离子电流波形及其对应的纹影照片。从图 7 可以看出,在主点火信号之前的 1 ms 左右出现了明显的脉冲信号,该信号是预点火信号。由于预点火电极跳火时产生了大量的电子,高速电子在运动到火花塞电极附近时与周围的分子碰撞而发生电离,产生带电粒子^[11],这些带电粒子在电场的作用下定向移动,从而形成了离子电流。由于预点火电极跳火作用的时间很短,所以预点火信号呈现出一个小的脉冲信号。在预点火后的 1 ms ,火花塞电极跳火,跳火后 5 ms 左右开始出现明显的离子电流,其值与正常点火时相似,约为 $20 \mu\text{A}$ 。

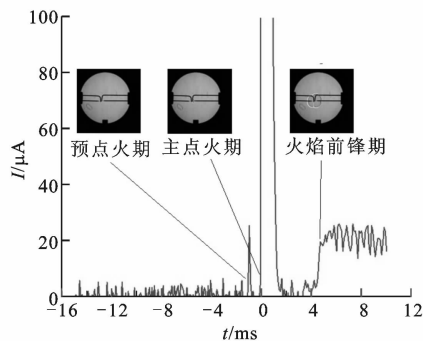


图 7 $\Delta t=1 \text{ ms}$ 时早火离子电流波形及其对应的纹影照片

图 8 为 $\Delta t=6 \text{ ms}$ 时早火离子电流波形及其对应的纹影照片。从图 8 可以看出,在主点火前约 6 ms 出现了预点火信号,在主点火前约 1 ms 出现了离子电流信号。如图 8 中预点火火焰前锋期照片所示,火焰前锋期刚好发展到火花塞电极处,燃烧产生的大量离子在电场的作用下定向移动,从而产生离子电流,该预点火的火焰前锋期离子电流值在 $20 \mu\text{A}$ 左右。在 0 ms 时刻,火花塞电极跳火,跳火

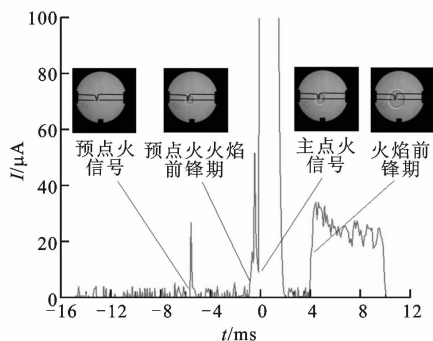


图 8 $\Delta t=6 \text{ ms}$ 时早火离子电流波形及其对应的纹影照片

后 5 ms 左右出现了离子电流。

图 9 为 $\Delta t=11 \text{ ms}$ 时早火离子电流波形及其对应的纹影照片。从图 9 可以看出,早火时 $\Delta t=11 \text{ ms}$ 的离子电流波形与图 8 相似,即在主点火前 11 ms 左右出现了预点火信号,预点火后约 5 ms (主点火信号前 6 ms) 出现了预点火火焰前锋期离子电流信号,该信号出现的时间比图 8 有所提前。

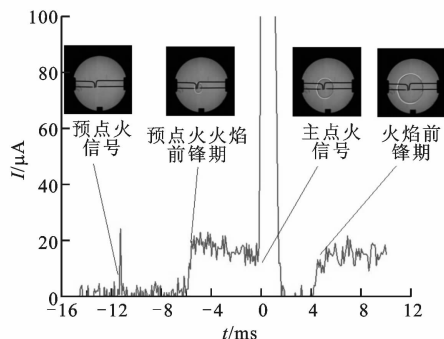


图 9 $\Delta t=11 \text{ ms}$ 时早火离子电流波形及其对应的纹影照片

从图 7~图 9 可以看出,在主点火前存在明显的预点火信号。受数据采集仪频率的限制,预点火信号幅值变化无规律,但明显大于实验的干扰信号,即 $I_{2\text{max}} \geq 15 \mu\text{A}$ 。早火时 Δt 从 1 ms 到 5 ms 的离子电流波形均出现了与图 6 中相似的情况,即在主点火前只出现预点火信号。早火时 Δt 从 6 ms 到 13 ms 的离子电流波形情况相似,即在主点火前不仅出现了预点火信号,而且出现了预点火火焰前锋期离子电流。图 10 为不同 Δt ($\Delta t \geq 6 \text{ ms}$) 下从预点火火焰前锋期离子电流出现时刻到火花塞电极点火时刻的时间。从图 10 可以看出, $\Delta t > 5 \text{ ms}$ 时,在火花塞电极点火前均检测到离子电流,随着 Δt 的增加,预点火火焰前锋期离子电流出现的时间逐渐延长。因此,在主点火之前出现离子电流 $I \geq 15 \mu\text{A}$

即可判断早火发生。若出现的离子电流仅为预点火脉冲信号,则早火时 $\Delta t \leq 5$ ms;若出现的信号既包括预点火脉冲信号,又包括预点火火焰前锋期离子电流,则早火时 $\Delta t > 5$ ms。

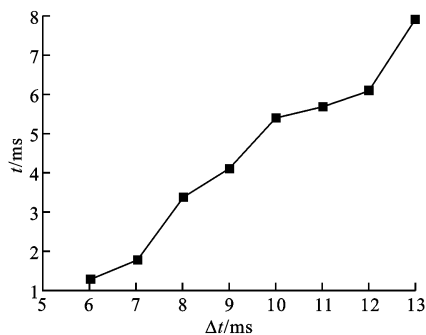


图10 不同 Δt 下从预点火火焰前锋期离子电流出现的时刻到火花塞电极点火时刻的时间

3 结 论

(1)用火花塞作为传感器可以检测出火花塞和近壁面的不正常点火信号,该方法准确、直观、简便、易行。

(2)若在主点火信号前出现离子电流 $I \geq 15 \mu\text{A}$ 的情况,可以判断火花塞电极附近为早火。

(3)近壁面发生不正常点火时的判断依据:离子电流波形明显存在2个峰值,离子电流第1峰值 $I_{1\max}$ 大于正常点火时的第1峰值 ($100 \mu\text{A}$),或者离子电流第2峰值 $I_{2\max}$ 小于正常点火时的第2峰值 ($250 \mu\text{A}$)。

参考文献:

- [1] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] VRESSNER A, STRANDH P, HULTQVIST A, et al. Multiple point ion current diagnostics in an HCCI engine, SAE 2004-01-0934 [R]. Washington DC, USA; SAE, 2004.
- [3] ATTARD P, MICALLEF J. Ion current combustion technology for controlled auto-ignition gasoline engines [J]. International Journal of Engine Research, 2007, 8: 429.
- [4] TANAKA T, NARAHARA K, TABATA M, et al. Ion current measurement in a homogeneous charge compression ignition engine[J]. International Journal of Engine Research, 2005, 6: 453.
- [5] WU Xiaomin, LI Kang, JIANG Deming. Investigation of air-fuel ratio control using ionic current signal [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers; Part D Journal of Automobile Engineering, 2007,

221(9): 1139-1148.

- [6] SUN Yueguo, YUAN Zhaocheng, LI Liying, et al. Research on the changing regularity of ionic current and cylinder pressure when the gasoline engine knocks [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 130/131/132/133/134: 361-364.
- [7] WANG Ying, ZHOU Longbao. Investigation of the detection of knock and misfire of a spark ignition engine with the ionic current method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part D Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(7): 617-621.
- [8] SUN Yueguo, YUAN Zhaocheng, LI Shiyu, et al. An investigation on the relationship between engine knock and amplitude characteristics of spark plug's ionic current signals [C]// International Conference on Electric Information and Control Engineering. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2011: 5683-5686.
- [9] 张栖玉. 基于离子电流积分信号的 HCCI 失火控制 [J]. 汽车工程, 2011, 33(10): 10.
ZHANG Yuqi. HCCI misfire control based on ion current integral signal [J]. Automotive Engineering, 2011, 33(10): 10.
- [10] 邢建国. 火花塞离子电流信号及其在发动机检测和控制中的应用 [J]. 内燃机工程, 2001, 22(3): 10.
XING Jianguo. Spark plug gap ion current and its application in engine diagnosis and control [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2001, 22(3): 10.
- [11] 李建文. 点燃式发动机火花塞离子电流特性及其应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.

【本刊相关文献链接】

周蓉芳,魏若男,周竹杰,等. 点火能量对天然气空气预混合气层燃烧的影响. 2012, 46(7): 21-25.
刘德新,刘斌. 二次喷油优化直喷汽油机冷启动排放特性的研究. 2012, 46(1): 13-18.
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,曾科. 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.
魏衍举,刘圣华,刘方杰,等. 甲醇汽油发动机醇醛排放特性及其影响因素研究. 2011, 45(1): 1-4.
高辉,吴筱敏,高忠权,等. 盲源分离法在火花塞离子电流信号分离中的应用. 2010, 44(1): 22-26.

(编辑 苗凌)