

DOI: 10.7652/xjtuxb201505001

采用离子电流法的发动机非正常燃烧诊断

高忠权¹, 李春艳¹, 刘兵¹, 黄佐华¹, 富田荣二², 吉山定见³

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 冈山大学机械工程学院, 日本冈山;
3. 北九州大学机械系统工程学院, 日本北九州)

摘要: 为了在线获得发动机工作过程中气缸内的燃烧信息,并对发动机非正常燃烧进行诊断,在一台点燃式汽油机的气缸垫内对称布置 8 个离子电流测量电极,来采集发动机正常燃烧与爆震、失火时气缸内的离子电流信号,经分析比较给出了爆震和失火的诊断依据。结果显示:爆震时,气缸垫内 4 号测量电极测得的离子电流信号的峰值大于 1 μA ,7 号测量电极测得的离子电流信号提前出现且在上止点附近;失火时,5 号、6 号测量电极测得的离子电流很微弱,小于 0.2 μA ,离子电流信号推迟出现且在上止点后 30°~40°之间。该结果可为离子电流法获取点燃式及压燃式发动机气缸内不同位置的信息提供理论依据,且方法简单易行、获得燃烧信息全面,可为实现基于离子电流法的发动机电控系统开发提供实验基础。

关键词: 点燃式汽油机;离子电流法;爆震;失火

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)05-0001-06

Detection of Engine Abnormal Combustion with Ion Current Method

GAO Zhongquan¹, LI Chunyan¹, LIU Bing¹, HUANG Zuohua¹,
EJI Tomita², SADAMI Yoshiyama³

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Department of Mechanical Engineering, University of Kitakyushu, Kitakyushu, Japan;
3. Department of Mechanical System Engineering, Okayama University, Okayama, Japan)

Abstract: To obtain the information about combustion in cylinder, and diagnose the abnormal combustion, abnormal combustion in a spark-ignition engine is experimentally investigated with ion current method. Eight ion current sensors are located symmetrically in the gasket. The ion current signals generating during normal combustion, knock and misfire are collected, and a diagnostic criterion for knock and misfire is established by analyzing the ion current signals. The results show that when knock occurs, the peak of ion current detected by the fourth ion current sensor exceeds 1 μA , and the ion current detected by seventh ion current sensor is advanced to the top dead center (TDC); when misfire occurs, the ion currents detected by the fifth and sixth ion current sensor are very week (less than 0.2 μA), and the appearance of the two ion currents are postponed to 30°-40° CA ATDC.

Keywords: spark-ignition gasoline engine; ion current method; knock; misfire

爆震和失火是火花点火汽油机非正常燃烧的 2 种方式,对发动机爆震和失火进行实时、准确在线监测是实现发动机精确电子控制的重要环节。国内外研究者通常采用压力传感器法检测发动机内 2 种非

正常燃烧状况^[1],但是压力传感器价格昂贵、对测量环境要求苛刻,一般适用于实验室测量。爆震传感器是通过安装在发动机上的振动传感器^[2-3]对燃烧过程中的爆震进行测量的,该方法复杂且无法判断失火情况。

离子电流法是将发动机自有的火花塞作为传感器进行实时在线监测的,测量方法简单、成本低廉、响应性能较好。以火花塞作为电极测量得到的离子电流特征值可表征发动机缸内压力^[4-5]、空燃比^[6]及非正常燃烧^[7-8]信息等。研究表明,离子电流法在测量爆震与失火方面有其局限性^[9-10]:只反映了火花塞附近的局部燃烧情况^[11-13];点火电压上万伏,点火后会在火花塞电极两端形成持续时间较长的振荡感应电动势,由此干扰了离子电流信号;对于非点燃式汽油机,如 HCCI、柴油机等,需要在气缸盖上通过布置电极来采集离子电流信号^[14]。

为突破火花塞测量非正常燃烧的局限性以及更全面地获得缸内燃烧信息,本文在发动机气缸垫内通过对称布置 8 个离子电流测量电极,对汽油机的工作过程进行了离子电流信号采集,同时比较了正常燃烧与爆震、失火工况下气缸垫内离子电流信号的异同,给出了多电极离子电流法诊断爆震和失火的依据,提出了在非火花点火发动机气缸垫内安装离子电流测量电极的新方案,以期为基于离子电流法的发动机测量与控制系统的开发提供实验基础和理论依据。

1 实验装置及方法

实验在日本冈山大学 Heat Power 实验室的四缸汽油发动机上进行。图 1 给出了多电极实验系统示意,整个实验系统由四缸发动机、尾气组分分析仪、电机、测功机、数字采集仪和进气压力控制仪组成。传感器采用了曲轴相位传感器、进气管压力传

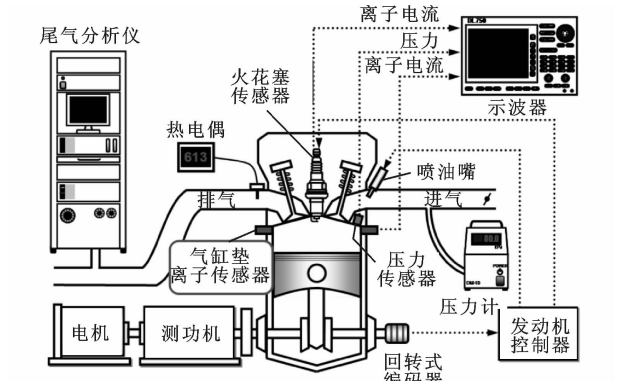


图 1 多电极实验系统示意

感器与控制器、进气与排气温度传感器、氧传感器、气缸内燃烧压力传感器和冷却水温传感器。发动机配套电控系统可以用来调整进气压力、点火提前角、空燃比等参数。表 1 给出了 HH368Q 发动机主要结构与性能参数。

表 1 HH368Q 发动机主要结构与性能参数

参数	数值	参数	数值
缸径/mm	87.5	最大转速/ $r \cdot \min^{-1}$	7 000
行程/mm	83.1	气缸垫厚度/mm	0.5
排量/L	1.998	气缸垫直径/mm	89
压缩比	10.0	缸径行程比	1.05

图 2 给出了多电极离子电流测量系统示意。该系统由日本内山工业公司(Uchiyama Manufacturing Corp.)和钻石电气制造公司(Diamond Electric Mfg.)提供。系统中的电极是安装在气缸垫的 8 个片状电极,每个电极与一个直流电源(偏置电压为 12 V)和一个电阻($R_G = 100 \text{ k}\Omega$)连接且接地,8 个离子电流信号分别从 8 个 R_G 的两端获取。以火花塞作为测量电极的系统测量线路从火花塞正极引出,连接偏置电源,测量电阻($R_P = 100 \text{ k}\Omega$)与发动机机体连接,离子电流信号从电阻 R_P 两端获取。8 个气缸垫内的电极与火花塞共同作为传感器,来采集燃烧过程中发动机缸内产生的离子电流信号。

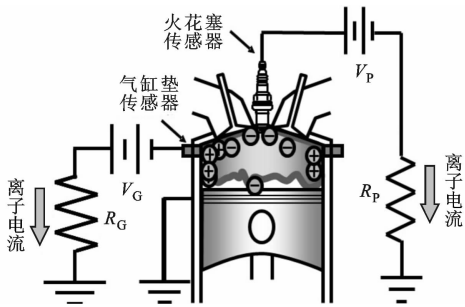
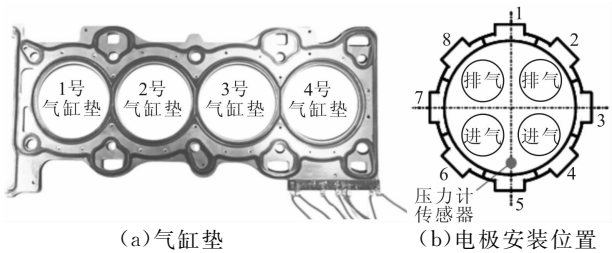


图 2 多电极离子电流测量系统示意

图 3 给出了测量电极布置示意图。图中 8 个测量电极安装在四缸机的第 4 个气缸缸垫内,缸垫为高绝缘材料。火花塞位于气缸中心,8 个相同的电

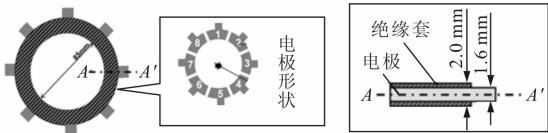


(a) 气缸垫 (b) 电极安装位置

图 3 测量电极布置示意

极布置在气缸垫中。如图 3a 所示,每个电极的线路由气缸的一侧引出,之后接入测量电路;如图 3b 所示,编号 1~8 的 8 个电极围绕气缸四周均匀布置,以保障获取气缸各个方向的燃烧信息,压力传感器布置在 2 个进气门之间。

图 4a 给出了 8 个测量电极与火花塞测量电极的相对位置及电极形状,每个电极“凸”型片状电极,材料为 SUS33 型号钢;图 4b 给出了图 4a 中 3 号电极 AA' 线位置剖面,电极上下为绝缘的气缸垫,发动机气缸垫与电极的总厚度为 2 mm,其中电极厚度为 1.6 mm,2 个绝缘层总厚度为 0.4 mm。



(a) 电极的相对位置与形状 (b) 3 号电极 AA' 线位置剖面
图 4 测量电极几何结构示意图

2 测量结果分析

2.1 发动机爆震测量

图 5 给出了当量空燃比下转速为 1 500 r/min、进气压力为 100 kPa、点火于上止点前 25°时,爆震(第 43 个循环测得)的压力曲线和火花塞电极测得的离子电流情况。可以看出,压力和火花塞离子电

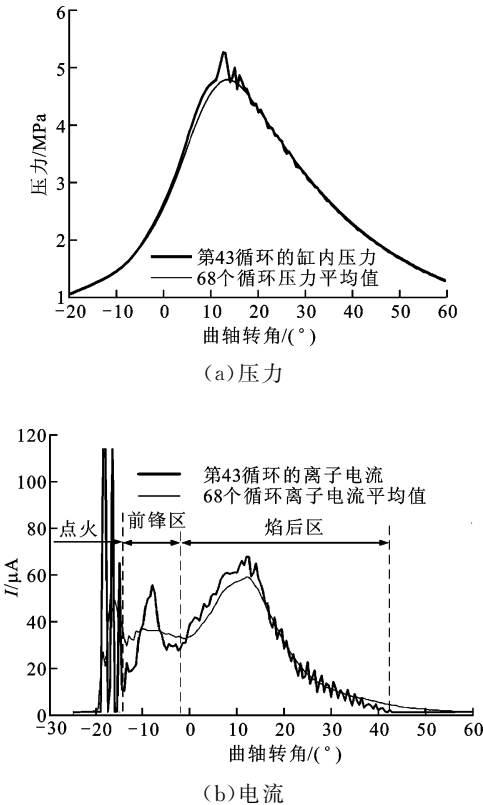


图 5 爆震时压力与离子电流信号

流均出现明显的高频波动。这是爆震发生在缸内火焰燃烧后期,爆震时伴随着较强的压力波动^[15],从而引起缸内离子振荡,而一定的高频信号又会叠加在离子电流的后焰区(区域划分依据见文献[7]),造成后焰区离子电流振荡。

图 6 给出了图 5 工况下爆震(第 43 循环测得)与正常燃烧(第 36 循环测得)时 8 个电极测得的离子电流曲线。由于 8 个电极远离点火电极,每个测量电极测得的离子电流均避免了点火信号的干扰,且与火花塞附近火核形成过程无关,因此离子电流信号只呈现出了一个峰值。可以看出:爆震时 4 号测量电极测得的离子电流峰值非常大,大于 1 μA;6 号测量电极测得的离子电流信号出现在上止点后大约 5°;7 号测量电极测得的离子电流信号出现在上止点附近。这是因为,末端混合气自燃时的离子浓度高于正常燃烧时火焰前锋面内的离子浓度,所以爆震发生时 4 号电极测得的电流峰值非常高。爆震主要是火焰在到达壁面之前加热了壁面附近的末端混合气,引起了壁面附近的混合气自燃,而壁面附近混合气自燃会产生大量的带电粒子,因此自燃时安装在气缸垫内的 6 号、7 号测量电极会提早检测到离子电流信号,该信号的出现时刻早于从点火中心发展的火焰到达气缸壁面的时刻。

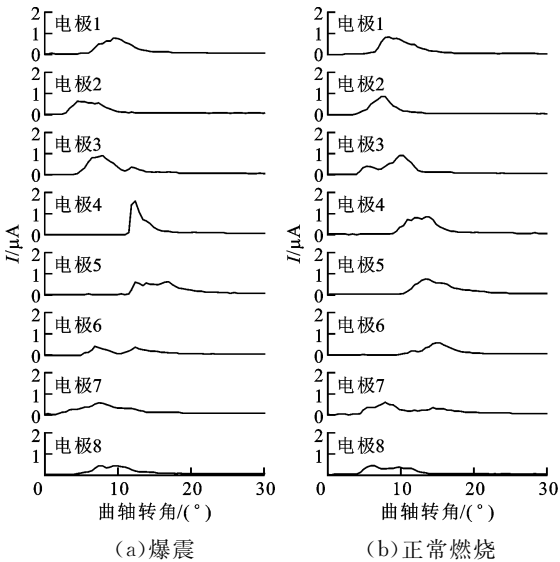


图 6 爆震与正常燃烧时多电极的离子电流曲线

图 7 为图 6 工况下 8 个测量电极测得的离子电流出现、达到峰值和结束时的 3 个特征时间的雷达图。离子电流信号由火焰前锋面与电极接触而产生,由于火焰前锋面中含有大量的化学离子化产生的带电粒子,所以当火焰前锋面接触电极时,带电粒子被电极吸收而产生离子电流。随着火焰与电极接

触面积的增加,越来越多的离子被电极吸收,信号逐渐增大,因此根据布置在气缸垫内的测量电极测得的离子电流信号可以获知这8个电极在对应方向上的火焰发展信息。可以看出,8个测量电极测得的3个特征时间呈非对称分布,表明火焰是以非对称的形式发展,同时可以观察到,爆震时离子电流信号在径向上发生了明显的变化。6号、7号测量电极测得的离子电流信号的出现时刻早于正常燃烧时的出现时刻,其他测量电极测得的只发生了细微的变化,因此爆震时测得的离子电流信号出现时刻的雷达图没有正常燃烧时的饱满;3号、4号、6号测量电极测得的离子电流信号的峰值时刻与其出现时刻的时间差小于正常燃烧时的时间差,显然峰值时刻紧随出现时刻,说明爆震时燃料燃烧更快,其加速了火焰峰值时刻的到来;7号测量电极测得的离子电流信号的结束时刻明显早于正常燃烧时的结束时刻,说明爆震时未燃混合气会迅速燃烧完毕,燃烧持续时间比正常燃烧短。

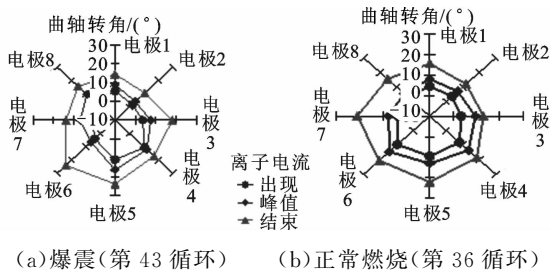


图7 图6工况下多电极离子电流特征时间

图8给出了随机抽取的4组爆震时多电极法测得的离子电流曲线。可以看出,爆震时4号测量电极测得的离子电流的峰值均大于 $1\mu\text{A}$,7号测量电极测得的离子电流信号提早出现且在上止点附近。此结果进一步验证了本文发动机爆震判断依据的可行性。

2.2 发动机失火测量

图9给出了发动机在转速为 1500 r/min 、过量空气系数为1.2、进气压力为 80 kPa 、点火时刻于上止点前 20° 时,失火(第25循环测得)的离子电流和压力曲线。可以看出,与正常燃烧相比,失火时压力曲线与火花塞离子电流曲线均明显偏低。失火时,燃料燃烧不充分,气缸内压力远小于正常燃烧时的压力,燃气产生的离子浓度远低于正常燃烧时的离子浓度,从而造成测量电极吸收到的离子数量大幅减少。

图10和11分别给出了图9工况下失火(第25循环测得)和正常燃烧(第35循环测得)时的多电极

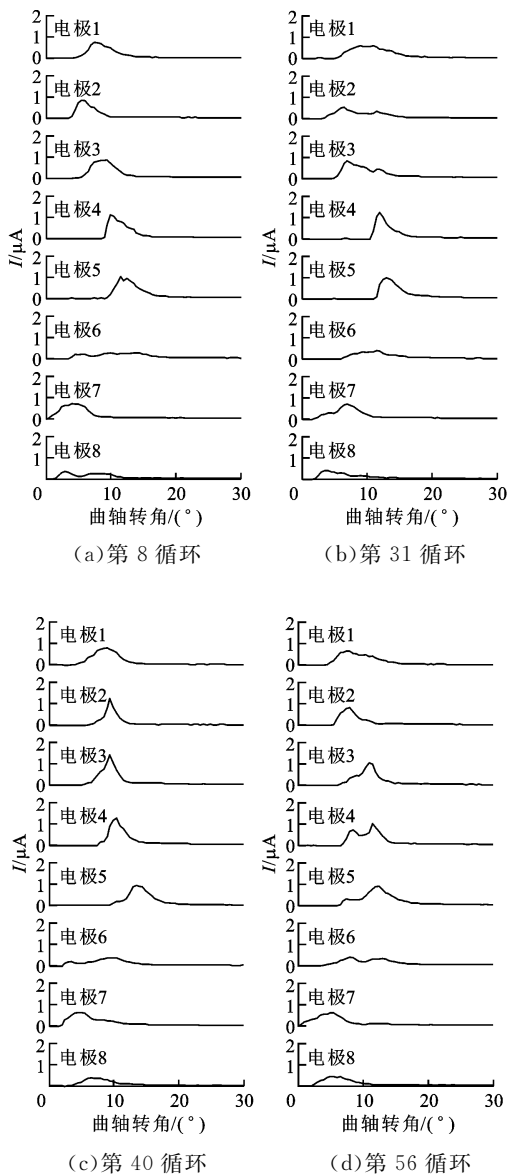


图8 爆震时多电极的离子电流

离子电流信号。可以看出,失火时5号、6号、7号测量电极测得的离子电流十分微弱,接近0,离子电流信号很晚出现,甚至于上止点后 40° 。这是由于进气门附近温度比排气门附近低,进气门附近的低温混合气不容易着火而发生不完全燃烧甚至不燃烧^[16-17],因此进气门附近(5号、6号、7号测量电极附近)气体容易发生失火,燃烧推后且燃烧产生的离子数量较少,从而造成上述电极较晚才检测到离子电流信号,且信号微弱甚至为0。

图11为8个电极测得的离子电流特征时间的雷达图。可以看出,失火时离子电流信号在径向上发生了明显的变化:8个电极附近的离子电流信号出现时刻均晚于正常燃烧时的出现时刻,尤其是1号、5号、6号、7号、8号测量电极所测出现时刻均晚

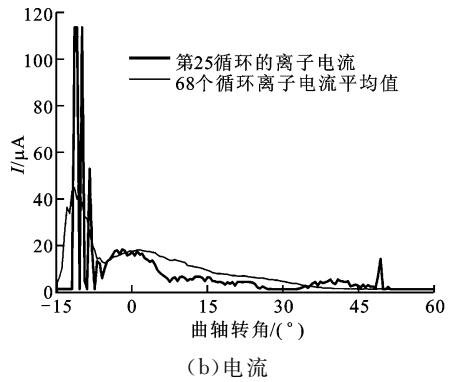
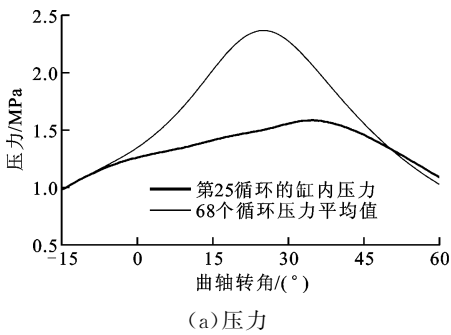


图 9 失火时压力与离子电流

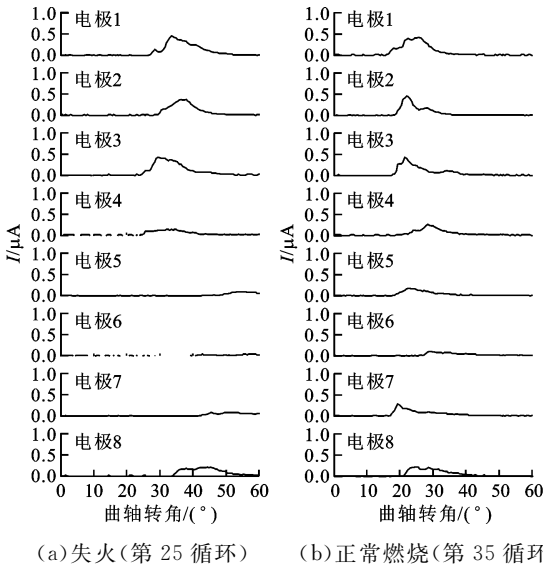


图 10 失火与正常燃烧时多电极的离子电流

于正常燃烧时的出现时刻(于上止点后 10°以上);6 号测量电极测得的离子电流信号的峰值时刻与其出现时刻的时间差远大于正常燃烧时的时间差,这是由于失火时燃烧不连贯,燃烧缓慢,从而导致峰值时刻推迟;6 号、7 号测量电极测得的离子电流持续时间远大于正常燃烧的持续时间,说明失火具有间断性,因此失火时测得的离子电流结束时刻的雷达图没有正常燃烧时饱满。总之,失火时 6 号测量电极的特征时间最为明显。

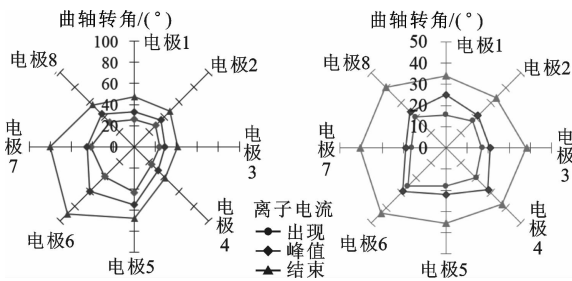


图 11 图 9 工况下多电极离子电流特征时间

图 12 给出了随机抽取的 4 组失火时多电极测得的离子电流。可以看出,失火时 5 号、6 号测量电极测得的离子电流十分微弱,小于 0.2 μA ,离子电流信号很晚出现且在上止点后 30°~40°之间。该结果进一步验证了本文发动机失火判断依据的可行性。

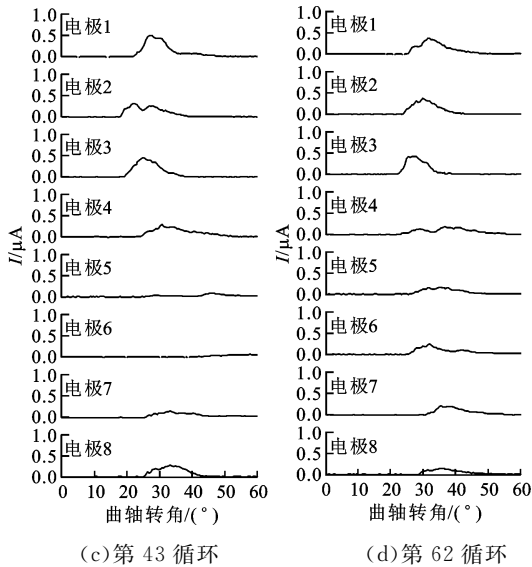
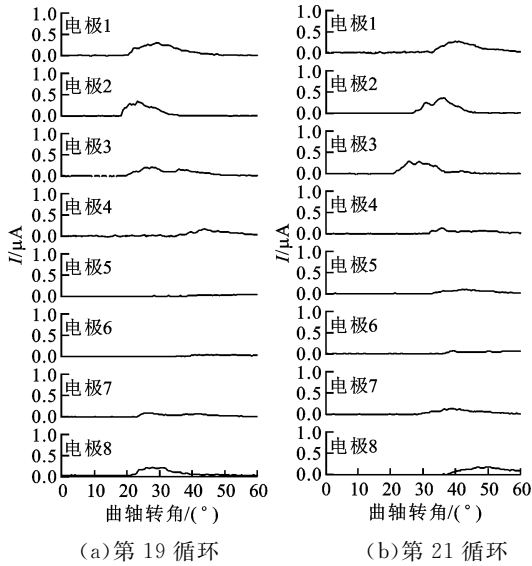


图 12 失火时多电极的离子电流

3 结 论

(1)将离子电流测量电极布置在发动机气缸垫内,由此测得的离子电流能够避免点火信号的干扰,且能成功获取发动机缸内多个位置的燃烧信息;利用多电极离子电流法可检测发动机的爆震、失火,该方法简单可行。

(2)应用多电极离子电流法诊断爆震时,4号测量电极测得的离子电流的峰值大于 $1\mu\text{A}$,7号测量电极测得的离子电流信号提早出现,且在上止点附近,此时可以判定发动机发生爆震。

(3)应用多电极离子电流法诊断失火时,若5号、6号测量电极测得的离子电流十分微弱,小于 $0.2\mu\text{A}$,离子电流信号很晚出现且在上止点后 $30^\circ\sim 40^\circ$ 之间,此时可以判定发动机发生失火。

参考文献:

- [1] CHEN L, LI T, YIN T, et al. A predictive model for knock onset in spark-ignition engines with cooled EGR [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 87 (11): 946-955.
- [2] 宋雄. 压电式爆震传感器的研究及设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [3] 彭生辉. 内燃机爆震与爆震传感器的性能研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [4] OGATA K. Investigation of robustness control for practical use of gasoline HCCI engine: an investigation of a detecting technology of conditions of HCCI using an ion current sensor, SAE 2014-01-1279 [R]. Washington DC, USA, SAE, 2014.
- [5] 魏若男, 高辉, 吴筱敏, 等. 应用离子电流信号计算发动机缸内压力 [J]. *内燃机工程*, 2013, 34(5): 13-17.
WEI Ruonan, GAO Hui, WU Xiaomin, et al. Application of ion current signals in engine in-cylinder pressure calculation [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2013, 34(5): 13-17.
- [6] WU X, LI K, JIANG D. Investigation of air-fuel ratio control using ionic current signal [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part D Journal of Automobile Engineering*, 2007, 221(9): 1139-1146.
- [7] FRANKE A, REINMANN R, LARSSON A. The role of the electrodes for the ionization sensor signal, SAE 2003-01-0714 [R]. Washington DC, USA, SAE, 2003.
- [8] 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 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42 (1): 36-40.
GAO Zhongquan, WU Xiaomin, XIANG Wang, et al. Experimental study on influence of electrode geometrical parameters on ionization current [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(1): 36-40.
- [9] SUN Y, YUAN Z, LI S, et al. An investigation on the relationship between engine knock and amplitude characteristics of spark plug's ionic current signals [C]//2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 5683-5686.
- [10] 钟新宝, 成志名, 刘琼, 等. 基于火花塞离子电流信号点燃式发动机早燃状态的检测 [J]. *邵阳学院学报: 自然科学版*, 2013, 10(3): 34-38.
ZHONG Xinbao, CHENG Zhiming, LIU Qiong, et al. Preignition state detection of spark ignition engine based on spark plug ion current [J]. *Journal of Shaoyang University: Natural Science Edition*, 2013, 10 (3): 34-38.
- [11] ZHENG S, ZHANG X, SHEN Z. Study on cycle-by-cycle variations of ion current integral and pressure in spark ignition engine [C]//2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 3404-3407.
- [12] 吴召明, 谢辉, 许振忠. SI/HCCI 双燃烧模式汽油机火花塞离子电流检测装置的研究 [J]. *小型内燃机与摩托车*, 2007, 36(2): 52-54.
WU Zhaoming, XIE Hui, XU Zhenzhong. Investigation of ion current detection technology on SI/HCCI dual-mode combustion gasoline engines [J]. *Small Internal Combustion Engine and Motorcycle*, 2007, 36 (2): 52-54.
- [13] GAO Z, WU X, HUANG Z, et al. The interdependency between the maximal pressure and ion current in a spark-ignition engine [J]. *International Journal of Engine Research*, 2013, 14(4): 320-332.
- [14] YOSHIYAMA S, TOMITA, E, TABUCHI N, et al. Detection of flame propagation pattern in a spark ignition engine using gasket ion sensor, SAE 2004-01-1919 [R]. Washington DC, USA, SAE, 2004.
- [15] 李继军, 顾笑映, 武得钰, 等. 一种基于缸内压力波检测的汽油机爆震控制系统 [J]. *西安交通大学学报*, 1997, 31(5): 42-46.
LI Jijun, GU Xiaoying, WU Deyu, et al. Experimental study on a knock control system for gasoline engine

(下转第15页)