

DOI: 10.7652/xjtuxb201401002

双电极点火时间间隔对天然气-空气 预混合气层流燃烧的影响

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

(1. 西安科技大学机械工程学院, 710054, 西安; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在定容燃烧弹中对天然气-空气预混合气双电极点火进行了研究, 分析了双电极在不同空燃比和预混压力下的 4 种点火时间间隔对混合气燃烧特性的影响。结果表明: 增加点火时间间隔可以促进燃烧, 加速火焰传播, 使容弹内燃烧压力峰值、已燃区工质温度峰值略有上升, 瞬时放热率峰值升高, 各峰值位置提前, 火焰发展期和快速燃烧期缩短, 在稀薄燃烧或预混压力较小等不稳定着火、燃烧的情况下这种规律更显著, 点火间隔为 2 ms 时各参数变化最为明显; 点火间隔为 2 ms, 过量空气系数 λ 为 1.3、预混压力为 100 kPa 和 λ 为 1.0、预混压力为 40 kPa 时, 双电极间隔点火的压力峰值出现时间比同时点火分别提前了 45 ms 和 12 ms, 温度峰值出现时间分别提前了 39.8 ms 和 11.8 ms, 瞬时放热率峰值分别增加了 33.3% 和 71.2%, 且峰值出现时间分别提前了 32.3 ms 和 19.8 ms, 火焰发展期分别缩短了 14.6 ms 和 12 ms, 快速燃烧期分别缩短了 16.6 ms 和 9.8 ms。

关键词: 双电极点火; 点火时间间隔; 燃烧; 定容燃烧弹

中图分类号: TK402 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0007-06

Effects of Dual Electrode Ignition Time Interval on Laminar Burning of Nature Gas-Air Premixed Mixtures

WEI Ruonan^{1,2}, ZHOU Rongfang², ZHOU Zhuojie², LIU Jie², GAO Zhongquan², WU Xiaomin²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

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

Abstract: Engine dual electrode ignition was studied in a constant bomb, and the relationship between the time interval of the dual electrode ignition and the combustion characteristic parameters of nature gas-air premixed gas was analyzed. The results show that increasing the dual electrode ignition time interval would promote the combustion, accelerate flame propagation, increase the bomb combustion peak pressure and peak temperature of burned zone slightly, increase the peak value of instantaneous heat release rate significantly, advance each peak position significantly, and shorten the flame development period and the rapid combustion period. This was clearer under lean burning or unstable combustion conditions due to low premixed pressure. The combustion parameters at the ignition interval of 2 ms changed most obviously. When the time interval of dual electrode ignition was 2 ms, λ was 1.3, the premixed pressure was 100 kPa and λ was 1, the premixed pressure was 40 kPa, compared with those of the simultaneous ignition

收稿日期: 2013-03-04。 作者简介: 魏若男(1978—), 女, 博士生; 吴筱敏(通信作者), 女, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176150); 陕西省教育厅专项科研计划资助项目(2010JK689); 美国通用 GM 公司资助项目; 西安科技大学培育基金资助项目(2009018)。

网络出版时间: 2013-10-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131017.0827.014.html>

following results are respectively obtained: the dual electrode interval ignition peak pressure positions occurred 45 ms and 12 ms in advance; the temperature peak positions occurred 39.8 ms and 11.8 ms in advance; the peak values of the instantaneous heat release rate increased by 33.3% and 71.2% and the peak positions occurred 32.3 ms and 19.8 ms in advance; the flame development durations decreased by 14.6 ms and 12 ms, and the rapid combustion duration dropped by 16.6 ms and 9.8 ms.

Keywords: dual electrode ignition; ignition time interval; combustion; constant volume bomb

发动机点火对发动机燃烧特性、动力性、工作稳定性、经济性及排放性具有着重要影响。发动机内均质混合气点火方式分为多点点火和多次点火,其中多点点火又分多点同时点火和多点间隔点火。研究发现:多点点火方式能促进混合气大面积燃烧,接近定容燃烧过程,使发动机热效率大幅提升,在稀薄混合气中燃烧可以有效降低 NO_x 排放和燃烧粗暴性^[1];多次点火能提高点火可靠性。双火花塞发动机的平均有效压力、最高爆发压力、热效率均高于单火花塞发动机^[2-3];双火花塞点火有利于火焰快速发展,燃烧速率和燃烧稀限提高^[4],有助于在汽油机冷起动工况下快速点燃,以改善电喷汽油机冷起动及冷态怠速过程的排放特性^[5];多次点火能防止发动机在怠速、稀燃或是空燃比不当时出现失火现象^[6]。

上述内容多集中在单点点火与多点点火的比较,以及多点同时点火或者单点多次点火方面,相应实验均在发动机上进行。实际中,受循环变动的影响,循环燃烧与传热过程的条件很难控制^[7],实时观察发动机火焰的发展变化比较困难。定容燃烧弹是研究火花点火均质预混燃烧的一种基础和重要的装置,借助它能够方便地研究单一参数的变化对燃烧过程的影响,是对燃烧过程进行基础研究的常用方法^[8]。因此,本文借助高速纹影摄像装置,在定容燃烧弹中对双电极点火进行了研究,并基于准维双区模型^[8]对点火时间间隔与天然气-空气预混合气层流燃烧参数的关系进行了分析。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置

试验装置如图1所示,其由定容燃烧弹、点火控制系统、配气系统、数据采集系统组成。定容燃烧弹内部是直径为130 mm、长为130 mm的圆柱体。点火控制系统由蓄电池、点火开关、点火线圈、两对点火电极和时序控制电路组成,用于控制双电极的点火时刻和间隔。配气系统包括压缩空气、压缩天然气、调压阀、U型管压力计和真空泵,用于可燃混合

气的配比。数据采集系统主要包括压力传感器、数据采集仪和高速摄像机,其中:压力传感器是Kistler生产的7061B型低压绝对压力传感器,采集频率为20 kHz,测压范围为0~25 MPa,误差小于 $\pm 0.3\%$;数据采集仪为Yokogawa公司生产的DL750型采集仪,采样频率为10 MHz;摄像机是美国Redlake公司生产的HG-100K型高速摄像机,拍摄频率为10 kHz。

点火电极的结构示意图如图2所示。两对电极布置在容弹中心位置,两电极之间距离为2 mm。

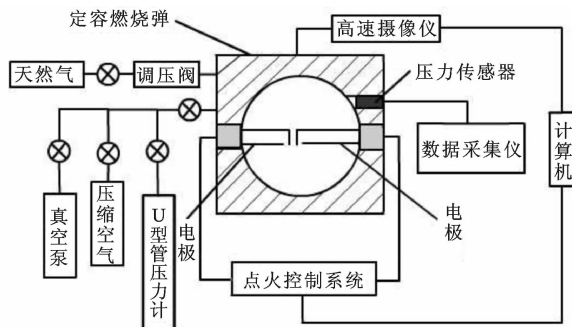


图1 试验装置

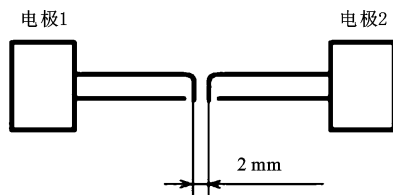


图2 点火电极的结构示意图

1.2 试验方案

试验中时序控制电路通过控制两对电极的点火时刻和点火顺序来实现双电极点火。本文将电极1和电极2同时跳火称为同时点火,将电极1先跳火、电极2后跳火称为间隔点火。试验中分别对同时点火和间隔点火进行了模拟,其中间隔点火时间分别为1、2、3 ms。

两对电极点火时序示意图如图3所示,图中上升沿为点火线圈充电时刻,下降沿为充电结束、火花点火时刻,充电时间均为5 ms。为保证两组点火系

统具有相同的点火能量,两系统选择了相同型号的电子器件、点火线圈、电极和充电时间。试验工况分为两组:保持预混压力(缸内混合气的初始压力) P 为 100 kPa,过量空气系数 λ 从 0.7 变化到 1.3;保持 λ 为 1.0 不变,预混压力从 40 kPa 变化到 100 kPa。

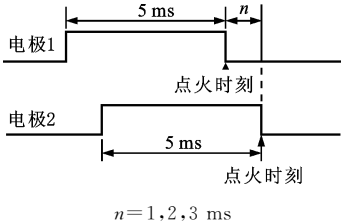
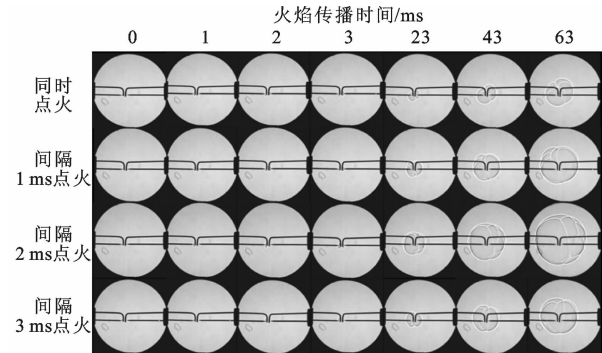


图 3 点火时序示意图

2 试验结果与分析

2.1 试验的纹影照片

预混压力为 100 kPa、 λ 为 1.3,4 种点火方式下相对同时点火的火焰传播时间分别为 1、2、3、23、43、63 ms 时由试验拍摄到的典型火核发展过程的纹影照片如图 4 所示。从图 4 可以看出,电极 1 和电极 2 跳火后,2 个火核分别呈向外扩展的球形,当 2 个火核重叠后,整个火核也近似呈向外扩展的球形。由图 4 还可以看出,在同一时刻的 4 种点火条件下,近似球形的火焰传播半径从小到大依次为:同时点火—间隔 1 ms 点火—间隔 2 ms 点火—间隔 3 ms 点火,间隔 2 ms 点火的火核发展速度最快,半径最大。双电极同时点火时,火核生成后同时向未燃区传递,两相迎火焰前锋面很快重叠在一起互相干涉,火焰传播面积缩小,燃烧速度变慢。双电极间隔点火后,火焰传播初期 2 个火核形成的火焰面相对独立,相迎火焰前锋面重叠面积较小,互相干扰较小,火焰传播速度较快,直到点火间隔 2 ms 时达到最快。双电极间隔点火下,进一步增加点火时间



火焰传播时间为 0 时是电极 1 跳火时刻

图 4 火焰传播纹影照片

间隔,第 2 次点火的火核在还未充分发展就已经与第 1 次点火火焰前锋面相遇,对火焰传播发展的促进作用降低,效果接近单次点火,由此火焰传播速度降低。

2.2 双电极点火对燃烧的影响

2.2.1 双电极点火对燃烧压力的影响 预混压力为 100 kPa、 λ 为 1.3,4 种点火方式下双电极点火时的燃烧压力曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,4 种点火方式下的曲线形状及趋势大致相同。

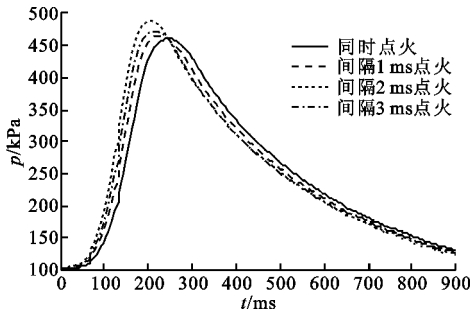


图 5 4 种点火方式下燃烧压力曲线

不同 λ 和预混压力在 4 种点火方式下,双电极点火时的燃烧压力峰值及其出现时间如图 6、7 所示。从图 6、7 可以看出:相同 λ 和预混压力下,燃烧压力峰值在间隔点火时比同时点火时略有增加,随着点火间隔的增加,燃烧压力峰值逐渐增大且提前出现;当点火间隔为 2 ms 时,燃烧压力峰值最大且最早出现,随着点火间隔的继续增大,压力峰值下降并推迟出现。总体来看:燃烧压力峰值在混合气较稀时受点火间隔影响较大;燃烧压力峰值位置在混合气较稀或预混压力比较小时受点火间隔影响显著;间隔点火时燃烧压力峰值位置比同时点火时提前,间隔 2 ms 点火时提前最多。从图 6、7 还可看出:当 λ 为 1.3、预混压力为 100 kPa 以及 λ 为 1.0、预混压力为 40 kPa 时,间隔 2 ms 点火的压力峰值出现时间比同时点火分别提前了 45 ms 和 12 ms。

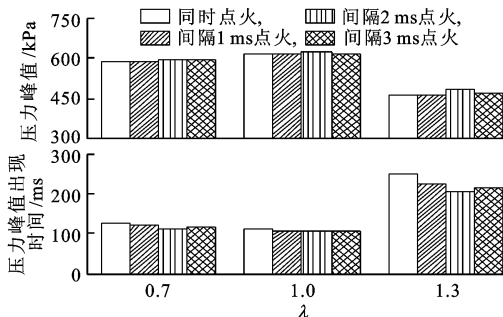


图 6 不同 λ 下燃烧压力峰值及位置

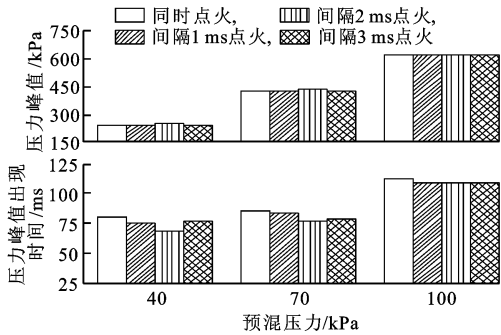


图 7 不同预混压力下燃烧压力峰值及位置

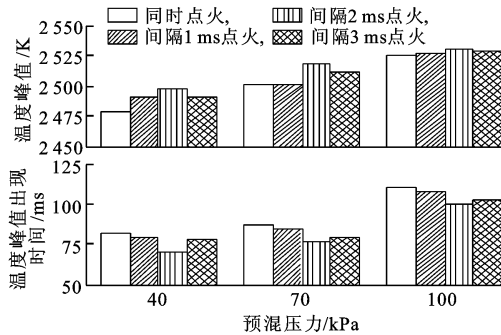


图 10 不同预混压力下已燃区工质温度峰值及位置

2.2.2 双电极点火对已燃区工质温度的影响 预混压力为 100 kPa, λ 为 1.3, 4 种点火方式下由准维双区模型计算得到的双电极点火已燃区工质温度 T 曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出, 不同点火方式下工质温度曲线的形状及趋势基本相同。

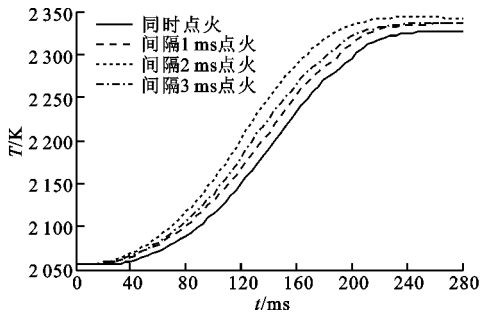


图 8 4 种火方式下已燃区工质温度曲线

不同 λ 和预混压力在 4 种点火方式下, 双电极点火的已燃区工质温度峰值及其出现时间如图 9、10 所示。从图 9、10 可以看出: 在相同的 λ 或预混压力下, 温度峰值在间隔点火时比同时点火时略有增加, 间隔 2 ms 点火时达到最大, 但总体来看, 点火间隔对温度峰值影响不大, 所以不会增加 NO_x 的排放; 点火间隔对温度峰值出现的时间影响较大, 间隔点火时温度峰值出现的时间比同时点火时提前, 在间隔 2 ms 点火时提前最多。以上规律在混合气较

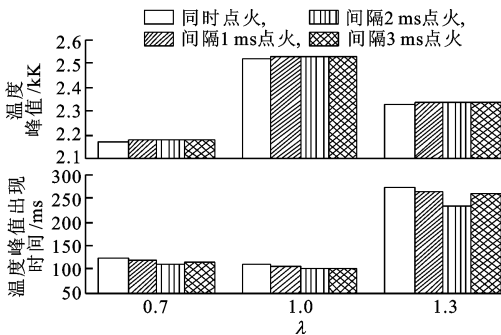


图 9 不同 λ 下已燃区工质温度峰值及位置

稀或预混压力较小时更为显著。从图 9、10 还可以看出: 当 λ 为 1.3、预混压力为 100 kPa 和 λ 为 1.0、预混压力为 40 kPa 时, 间隔 2 ms 点火的温度峰值出现时间比同时点火分别提前了 39.8 ms 和 11.8 ms。这种现象是由于已燃区工质温度与燃料物化特性、燃烧效率、火焰面积等因素有关, 而试验中除了点火间隔外, 工质及其配比等其他条件不变, 所以已燃区工质温度峰值大小的变化不明显, 而峰值位置出现的时间变化较大, 特别在混合气较稀或预混压力较低时, 间隔 2 ms 点火对燃烧的促进作用更显著, 从而会导致这种变化更明显。

2.2.3 双电极点火对瞬时放热率的影响 预混压力为 100 kPa, λ 为 1.3, 4 种点火方式下双电极点火的瞬时放热率曲线, 以及不同 λ 和预混压力下瞬时放热率峰值及其出现时间如图 11、12、13 所示。从图 11~13 可以看出, 4 种点火方式下瞬时放热率曲线的形状及变化趋势基本相同, 呈单峰形状, 表明容弹内以预混层流燃烧为主^[9]。瞬时放热率峰值及其位置的变化趋势与燃烧压力及温度的变化趋势类似。从图 11~13 还可以看出: 当 λ 为 1.3、预混压力为 100 kPa 和 λ 为 1.0、预混压力为 40 kPa 时, 间隔 2 ms 点火的瞬时放热率峰值比同时点火分别增加了 33.3% 和 71.2%, 峰值出现时间提前了 32.3 ms 和 19.8 ms, 这也说明了双电极间隔点火对燃烧有

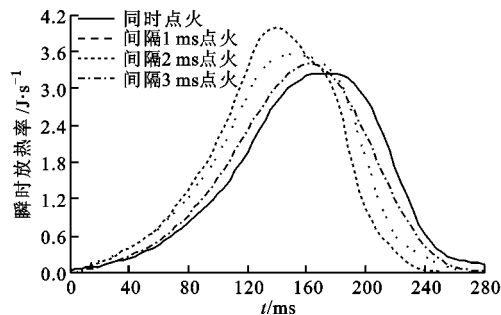


图 11 4 种点火方式下瞬时放热率曲线

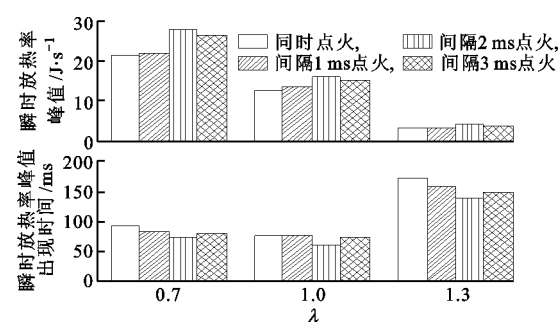


图 12 不同 λ 下瞬时放热率峰值及位置

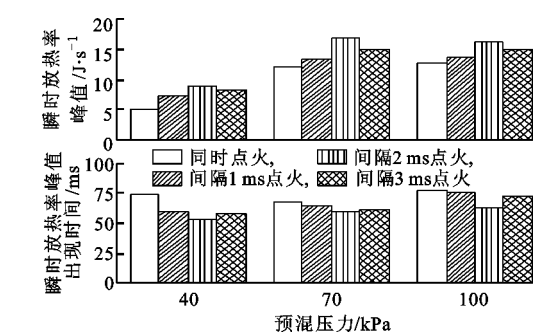


图 13 不同预混压力下瞬时放热率峰值及位置

促进作用,可以加速燃烧,提高燃烧效率。

2.2.4 双电极点火对累积放热率的影响 预混压力为 100 kPa, λ 为 1.3, 4 种点火方式下双电极点火的累积放热率曲线如图 14 所示。从图 14 可以看出,4 种点火方式下累积放热率的曲线形状及变化趋势基本相同。

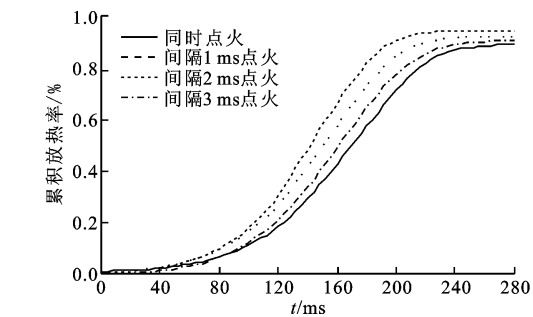


图 14 4 种点火方式下累积放热率曲线

根据燃烧学定义,分别将从点火到 10% 累积放热率和从 10% 到 90% 累积放热率所经历的时间定义为火焰发展期和快速燃烧期^[10]。不同 λ 和预混压力在 4 种点火方式下的火焰发展期和快速燃烧期如图 15、16 所示。从图 15、16 可以看出:当 λ 和预混压力一定时,间隔点火的火焰发展期和快速燃烧期比同时点火时要短,间隔 2 ms 点火时燃烧速度最快,混合气越稀或预混压力越低时,这种规律越明显。从图 15、16 还可以看出:当 λ 为 1.3、预混压力

为 100 kPa 和 λ 为 1.0、预混压力为 40 kPa 时,间隔 2 ms 点火的火焰发展期比同时点火时分别缩短了 14.6 ms 和 12 ms,快速燃烧期分别缩短了 16.6 ms 和 9.8 ms,这表明双电极间隔点火可以削弱 2 个火核的相互干扰,提高火焰传播的稳定性和发展速度,加快整个过程的燃烧速度。

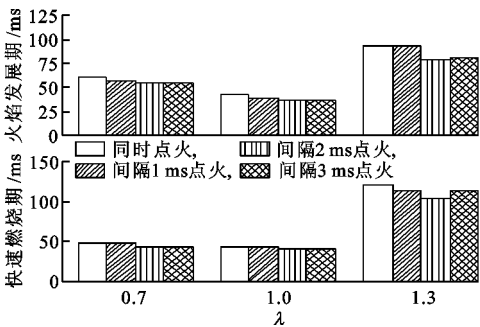


图 15 不同 λ 下火焰发展期和快速燃烧期

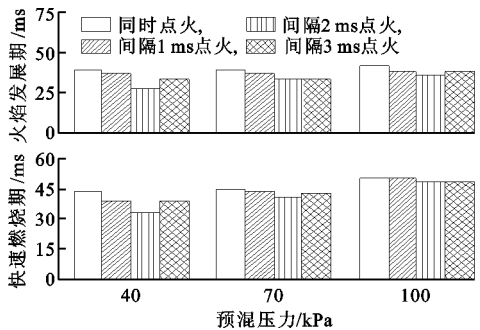


图 16 不同预混压力下火焰发展期和快速燃烧期

3 结 论

- (1) 双电极间隔点火可以降低 2 个火核之间的相互干扰,提高火焰传播的稳定性和燃烧速度,本试验条件下点火间隔为 2 ms 时火焰传播速度最快。
- (2) 双电极间隔点火比同时点火在燃烧压力峰值、温度峰值上略有增加,在瞬时放热率峰值上明显增加,在峰值出现位置上提前,间隔 2 ms 点火时变化最为明显。

- (3) 在混合气较稀或预混压力较小等着火、燃烧不稳定的情况下,双电极间隔点火可以促进燃烧,加快火焰传播速度。在间隔 2 ms 点火时, λ 为 1.3、预混压力为 100 kPa 和 λ 为 1.0、预混压力为 40 kPa,二者相对于同时点火的压力峰值出现时间分别提前了 45 ms 和 12 ms,温度峰值出现时间分别提前了 39.8 ms 和 11.8 ms,瞬时放热率峰值分别增加了 33.3% 和 71.2%,且峰值出现时间提前了 32.3 ms 和 19.8 ms,火焰发展期分别缩短了 14.6 ms 和

12 ms,快速燃烧期分别缩短了16.6 ms和9.8 ms。

参考文献:

- [1] 蒋德明, 陈长佑, 杨嘉林, 等. 高等车用内燃机原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 88-129.
- [2] ALTIN I, SEZER I, BILGIN A. Effects of the stroke/bore ratio on the performance parameters of a dual-spark-ignition (DSI) engine [J]. *Energy and Fuels*, 2009, 23(4): 1825-1831.
- [3] 夏怀成, 安子军, 孙泽, 等. 双火花塞发动机性能的仿真分析 [J]. *机械设计*, 2012, 29(5): 76-79.
XIA Huaicheng, AN Zijun, SUN Ze, et al. Simulation analysis of dual-spark plug engine performance [J]. *Journal of Machine Design*, 2012, 29(5): 76-79.
- [4] 曲大为, 李君, 高莹, 等. 点火模式对增压稀燃 LPG 发动机燃烧特性的影响 [J]. *汽车工程*, 2011, 33(6): 477-481.
QU Dawei, LI Jun, GAO Ying, et al. Effects of different ignition modes on the combustion characteristics of a turbocharging lean burn LPG engine [J]. *Automotive Engineering*, 2011, 33(6): 477-481.
- [5] 胡春明, 刘娜, 宋玺娟, 等. 电喷汽油机冷启动及冷态怠速的排放控制 [J]. *天津大学学报*, 2008, 41(5): 576-582.
HU Chunming, LIU Na, SONG Xijuan, et al. Emissions control of cold starting and idling of gasoline engines with EFI [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(5): 576-582.
- [6] 邵千钧, 何文华, 卫忠星, 等. 多次点火提高 LPG 发动机点火可靠性的研究 [J]. *内燃机工程*, 2005, 26(4): 59-62.
SHAO Qianjun, HE Wenhua, WEI Zhongxing, et al. Study of multi-time ignition improving ignition reliability of LPG-fueled engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine*, 2005, 26(4): 59-62.
- [7] HUANG Z H, ZHANG Y, ZENG K, et al. Natural gas-hydrogen-air premixed mixture combustion with a constant volume bomb [J]. *Energy and Fuels*, 2007, 21(2): 692-698.
- [8] 马凡华. 预混湍流燃烧的基础研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
- [9] 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.
- [10] 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]

- 张猛, 王金华, 谢永亮, 等. $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$ 预混湍流火焰前锋面结构探测. 2013, 47(11): 14-18. [doi: 10. 7652/xjtuxb201311003]
- 王金华, 张猛, 谢永亮, 等. 合成气纯氧高压预混湍流火焰结构研究. 2013, 47(10): 87-90. [doi: 10. 7652/xjtuxb201310015]
- 孟祥文, 杨星, 康婵, 等. 直流电场对预混 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 火焰传播特性影响的试验研究. 2013, 47(7): 13-17. [doi: 10. 7652/xjtuxb201307003]
- 李东昌, 汪映, 孟庆斌, 等. 二甲醚预混比对预混压燃发动机性能影响的试验研究. 2013, 47(3): 48-52. [doi: 10. 7652/xjtuxb201303009]
- 唐安东, 孟祥文, 周蓉芳, 等. 非均匀电场对火焰传播速率的影响. 2012, 46(9): 16-20. [doi: 10. 7652/xjtuxb201209004]
- 周蓉芳, 魏若男, 周竹杰, 等. 点火能量对天然气空气预混混合气层流燃烧的影响. 2012, 46(7): 21-25. [doi: 10. 7652/xjtuxb201207005]
- 汪映, 郭振祥, 周杰. 预混充量压缩着火和直接喷射对发动机性能影响研究. 2011, 45(3): 44-47. [doi: 10. 7652/xjtuxb201103008]
- 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. [doi: 10. 7652/xjtuxb200909007]
- 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. [doi: 10. 7652/xjtuxb200905006]
- 李本正, 官艳峰, 刘圣滑, 等. 甲醇缸内直喷发动机的燃烧特性. 2008, 42(11): 1372-1376. [doi: 10. 7652/xjtuxb200811012]
- 汪映, 李维, 朱威, 等. 燃烧与供油系统参数对二甲醚发动机热效率的影响. 2008, 42(5): 528-531. [doi: 10. 7652/xjtuxb200805004]
- 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. [doi: 10. 7652/xjtuxb200805007]
- 王利军, 宋睿智, 邹洪波, 等. 甲醇柴油双燃料发动机甲醇掺烧比例的正交试验研究. 2007, 41(11): 1284-1287. [doi: 10. 7652/xjtuxb200711008]
- 王利军, 邹洪波, 宋睿智, 等. 引燃油量对甲醇柴油双燃料发动机燃烧特性的影响. 2007, 41(5): 517-520. [doi: 10. 7652/xjtuxb200705003]
- 任泰安, 张长富, 蒋庄德. 微内燃机点火和燃烧中微尺寸效应的研究. 2007, 41(7): 776-779. [doi: 10. 7652/xjtuxb200707005]

(编辑 苗凌)