

DOI: 10.7652/xjtuxb201705005

柴油引燃直线氢内燃机稀薄燃烧特性研究

杨振中^{1,2}, 秦朝举^{1,2}, 张卫正², 原彦鹏², 宋立业²

(1. 华北水利水电大学机械学院, 450045, 郑州; 2. 北京理工大学机械与车辆学院, 100081, 北京)

摘要: 直线氢内燃机特殊的自由活塞运动导致了较低的燃烧反应速率和放热等容程度。为减少燃烧时间损失, 提高能量利用效率, 在一台直线氢内燃机中尝试应用了引燃稀薄燃烧技术。首先通过原理试验验证了引燃稀薄燃烧技术的可行性, 然后采用一种耦合活塞运动的迭代计算方法对柴油引燃直线氢燃料内燃机燃烧性能和运行特点进行了模拟研究。结果表明: 采用引燃燃烧技术, 有助于提高直线氢内燃机的燃烧速度, 减小放热时间损失, 增加指示效率。相对于传统点燃燃烧, 引燃技术能够提高直线氢内燃机活塞往复运动频率和压缩比, 增加直线氢内燃机输出功率, 但是引燃燃烧会轻微加重直线氢内燃机的 NO_x 污染物排放。

关键词: 直线氢内燃机; 稀薄燃烧; 引燃; 燃烧速率; 活塞运动

中图分类号: TK441 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)05-0031-06

Diesel Pilot-Ignited Lean Combustion Characteristics of a Linear Hydrogen Engine

YANG Zhenzhong^{1,2}, QIN Zhaoju^{1,2}, ZHANG Weizheng², YUAN Yanpeng², SONG Liye²

(1. School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The special free piston motion of linear hydrogen engines results in slow combustion rate and low heat release around the top dead center. To improve the combustion rate and linear engine efficiency, the diesel pilot-ignition technology was introduced in a linear hydrogen engine to accelerate the heat release rate. A principle experiment was performed to validate the feasibility of the diesel pilot-ignition technology for linear hydrogen engines with variable compression ratio, and iterative computation was conducted to describe the main combustion characteristics and operation performances of the linear hydrogen engine. The results show that the diesel pilot-ignition technology is helpful to improve the combustion rate and engine efficiency and reduce the combustion loss. Compared with the traditional spark-ignition technology, the diesel pilot-ignition technology can enhance the linear hydrogen engine's speed, compression ratio and piston motion stroke, leading to increased output power of the linear engine. However, a slightly increased pollutant product NO_x is also found with this technology.

Keywords: linear hydrogen engine; lean combustion; pilot-ignition; combustion rate; piston motion

收稿日期: 2016-10-22。 作者简介: 杨振中(1957—), 男, 博士, 教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076046); 河南省高等学校重点科研资助项目(15A470017); 河南省科技创新杰出人才资助项目(154200510020); 河南省科技攻关资助项目(172102210052)。

网络出版时间: 2017-02-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170228.0809.006.html>

直线内燃机是一种无曲柄连杆机构的新型发动机,其活塞运动不受机械机构的限制,可以实现变压缩比运行,具有燃料适应性强、机械损失小、输出功率灵活等优点,已经引起了国内外诸多研究机构的重视^[1-2]。

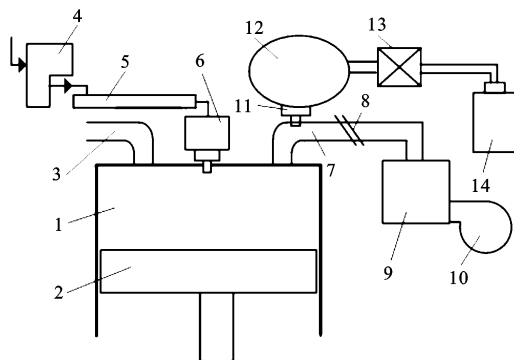
与传统内燃机不同,直线内燃机的运动受多个力作用,其中缸内气体作用力是一个关键影响参数,活塞运动与燃烧相互耦合^[3]。尽管直线内燃机具有诸多优点,但当前研究也发现其燃烧过程存在许多不足。秦朝举等提出了直线内燃机与氢燃料结合的直线氢内燃机的概念,并开展了相关研究,发现直线氢内燃机活塞运动不受约束的特点会降低燃烧放热速度,减小燃烧等容度,增大后燃期放热比例及影响内燃机指示效率^[3]。Feng 等在研究直线柴油机燃烧放热特点时,发现了燃烧持续期长、后燃严重及指示效率低的现象^[4-5]。因此,如何有效避免直线氢内燃机燃烧过程等容度低、燃烧时间损失大的缺点,设计适合其运动特性的燃烧模式,是推进直线氢内燃机技术进步的关键。

柴油引燃技术主要通过应用多点着火的方式,实现加速燃烧的目的^[6-7]。考虑到当前直线氢内燃机燃烧等容度较低的问题和柴油引燃燃烧技术的主要特点,可以发现:在直线氢内燃机中应用柴油引燃技术,不仅可以提高直线氢内燃机的燃烧速度,而且可进一步实现稀薄燃烧、减少 NO_x 排放。为了验证柴油引燃技术在直线氢内燃机中应用的可行性,本文首先在一台可压缩比氢内燃机中对引燃技术展开了原理性验证试验,然后采用一种耦合迭代计算方法对引燃技术的应用进行了模拟研究。

1 柴油引燃氢内燃机试验研究

1.1 试验样机及设备

本文研究所采用的试验样机是一台单缸氢内燃机,它的原型机为 185 型单缸内燃机,设计过程中保留了原型发动机的气缸和活塞组件。在原型机的进气管道上加装 1 套自行设计制造的氢气喷射装置,并采用 DSP 控制系统对喷氢的质量和进行控制,可精确提供目标当量比的预混氢燃料,同时将原型机的供油系统改造为共轨喷油系统,以便提供可控的引燃柴油。试验样机的缸径为 85 mm,额定行程为 90 mm,试验所使用的测试仪器和设备主要包括 DEWETRON 燃烧分析仪、Kistler6052 缸压传感器、RCL-I 型氢气流量计,试验系统原理如图 1 所示。



1:气缸;2:活塞;3:排气道;4:高压油泵;5:共轨管;6:喷油器;
7:进气道;8:电磁阀;9:稳压箱;10:进气泵;11:喷氢器;
12:氢轨;13:限压阀;14:氢源

图 1 试验系统原理

1.2 试验原理与工况

为了研究压缩比变化下柴油引燃直线氢内燃机的燃烧放热特点,本次试验通过增减气缸垫片的方式改变燃烧室的容积,进而复现直线内燃机的压缩比可变的特征。试验时,内燃机的运转频率为 35 Hz,进气稳压箱压力为 1.18×10^5 Pa,氢气纯度(体积分数)为 99.9%,喷氢压力为 0.4 MPa。由于氢内燃机在当量比较大时易出现诸多不正常燃烧现象,本次试验主要研究稀薄燃烧,当量比为 0.3,在活塞距离额定上止点 25 mm 时,通过控制器控制喷氢脉宽,使内燃机进气道中氢燃料的当量比增加到 0.3,引燃柴油喷射信号在距离上止点 1.5 mm 处触发,喷射脉宽为 0.3 ms,共轨管内燃油压力维持在 60 MPa。试验过程中,改变燃烧室容积和喷油信号触发位置,分别测试了压缩比为 14.3、15.4 和 16.8,喷油提前位置为 1、1.5、2 mm 工况下的氢内燃机燃烧性能,并通过燃烧分析仪采集了各个工况条件下内燃机缸压和活塞运动的数据信号。

1.3 试验结果与分析

在不同压缩比工况下,试验获得的原理样机缸内气体压力变化特征如图 2 所示。由图 2 可知,在压缩比为 15.4 的工况下,最高燃烧压力达到 8.2 MPa,且发生在上止点后 8° 处,随着压缩比的增加,最高燃烧压力也增大,且最高燃烧压力出现时间有轻微提前的趋势。这是因为引燃柴油在高压压缩比下滞燃期更短,引燃柴油更早开始燃烧,在高压压缩比下,更高的缸内气体压力和温度也会在一定程度上增加缸内氢燃料的燃烧活性,使得最高燃烧压力提前。

图 3 为不同压缩比下的燃烧放热率。由图 3 可

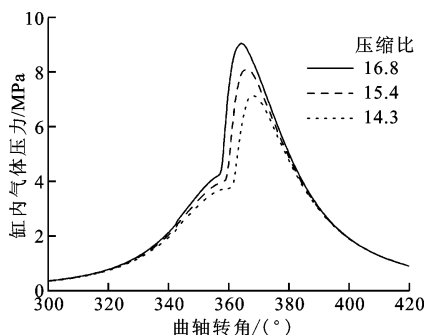


图2 测试的缸内气体压力变化

知,在压缩比为 15.4 工况下柴油引燃氢内燃机的燃烧持续期约为 16° 曲轴转角,相比传统火花点火燃烧持续时间要短,这表明柴油引燃燃烧技术有助于加快氢内燃机燃烧的放热速率,使燃烧发生在上止点附近,提高了燃烧放热等容度,增加了内燃机指示效率。在 3 种不同压缩比下,喷入的柴油均能较好引燃缸内预混氢燃料,且随着压缩比的增加,燃烧持续时间缩短。

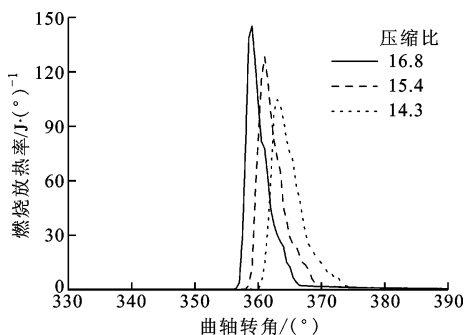


图3 不同压缩比下的燃烧放热率

综上所述,引燃燃烧技术能够应用于氢内燃机稀薄燃烧,且在变压缩比特征下有良好的燃烧放热性能,因此有望在直线氢内燃机中应用。

2 引燃直线氢内燃机仿真模型

本质上,直线氢内燃机属于一种往复式内燃机,其缸内气体流动、燃烧等工作原理与传统内燃机并无差异,但由于直线氢内燃机活塞运动不受机械机构约束,这会导致缸内流动及燃烧呈现不同的性能特点。本文采用耦合活塞运动的多维模拟方法对直线氢内燃机引燃燃烧过程进行仿真研究。

2.1 仿真研究方法

由于活塞运动会影响氢内燃机的气体流动及燃烧过程,因此在模拟柴油引燃直线氢内燃机燃烧过程时需要得到准确的活塞运动轨迹。然而,与传统内燃机不同,直线氢内燃机不具有固定的运动轨迹,

活塞运动是多个力相互作用的结果,其中缸内气体的燃烧压力对活塞运动起着重要作用,活塞运动和燃烧过程是相互耦合影响的^[8]。为了能够获得准确的模拟结果,本文采用一种迭代计算方法^[4]来模拟柴油引燃直线氢内燃机的燃烧过程,仿真研究流程如图4所示。

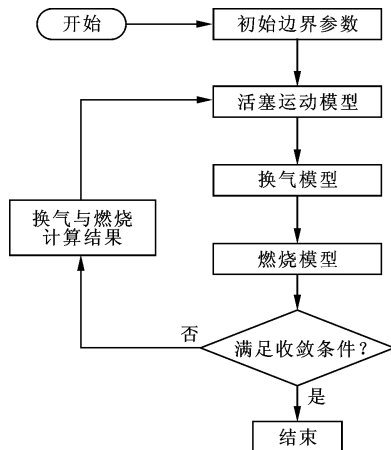


图4 仿真研究流程

2.2 数值计算模型

根据图4所示方法,建立了直线氢内燃机的活塞运动模型、换气模型和燃烧模型。直线氢内燃机的活塞运动模型可描述为^[3]

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_p + F_L - F_f \quad (1)$$

式中: m 为活塞组件质量; x 为活塞运动位移; t 为时间; F_p 为缸内气体作用力; F_L 为负载力; F_f 为摩擦力。

本文运用一维模拟工具 GT-power 对换气过程进行模拟,以便为燃烧模型的计算提供初始进气压力和温度等参数。建立换气模型时,将活塞运动结果作为进、排气门开闭的依据,跟随活塞运动分别模拟换气过程的各个阶段,并将计算结果传递到燃烧模型。

建立柴油引燃直线氢内燃机的燃烧放热模型是研究的关键。首先,根据原理样机几何结构和换气结束时的活塞位置,将缸内封闭气体空间进行网格划分,整个封闭气体空间被划分成 34 268 个六面体计算网格;然后,利用等效曲轴转角概念,将计算的活塞运动数据制作为可读取的文件,并将其导入到多维 CFD 模拟软件 AVL_Fire 中建立封闭气体空间的体积变化过程;最后,将换气计算结果作为边界条件,对相关控制方程和燃烧模型进行数值求解。仿真研究中采用相关火焰模型来描述燃烧, NO_x 排

放的生成和氧化过程遵循扩展的 Zeldovich 机理。另外,在数值计算过程中动量方程差分格式采用二阶精度的 MINIMOD Relaxed 格式,且连续方程为中心差分格式,能量等方程使用迎风格式^[3,8-10]。

2.3 模型有效性校验

利用上述迭代计算方法和数值模型,保持活塞运动,且喷射时刻等边界参数与试验工况一样,计算了不同压缩比下柴油引燃氢内燃机的燃烧性能。图 5 对比了计算和试验所得的缸内压力和燃烧放热率,可知试验和模拟结果具有相似的变化趋势。另外,从缸内气体压力曲线对比来看,计算结果和试验数据也呈现良好的一致性,整体数据对比偏差较小,计算和试验数据最大误差在 6% 以内。因此,所建模型和所用迭代计算方法能够较好地预测柴油引燃直线氢内燃机的燃烧性能。

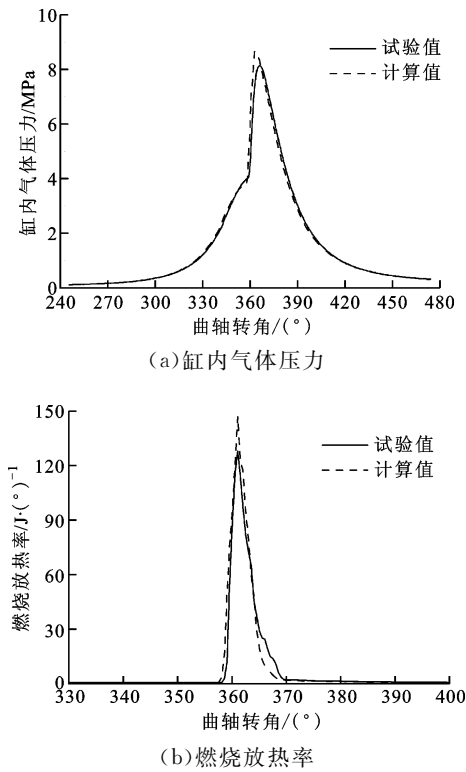


图 5 模型校验结果

3 柴油引燃直线氢内燃机燃烧特性

为了清晰揭示柴油引燃技术在直线氢内燃机中的应用特点,对比研究了柴油引燃和传统火花点燃在直线氢内燃机中的应用特点,两种燃烧方式的计算边界条件如表 1 所示。由于柴油引燃额外增加了缸内燃料,因此在模拟火花点燃时额外增加等热量的氢燃料,以保证两种燃烧模式在相同的燃料能量下进行。

表 1 计算边界条件

边界参数	引燃模式	点燃模式
喷油(点火)位置/(°)	164	164
氢/空当量比	0.3	0.31
引燃柴油量/mg	1.5	
活塞组件质量/kg	5.3	5.3
外部负载/(N·s·m ⁻¹)	365	365
换气压力/(10 ⁵ Pa)	1.25	1.25
换气温度/K	298	298
缸壁温度/K	500	500

3.1 缸内燃烧性能

按照图 4 所示的迭代计算方法,模拟所得引燃、点燃模式下直线氢内燃机缸内气体压力变化如图 6 所示。由图 6 可知,柴油引燃的最高燃烧压力显著大于火花点燃所得的最高燃烧压力,且在上止点附近,引燃导致的最高燃烧压力维持时间更长。由图 6b 可知,在燃料开始燃烧之前两种模式的缸内压力差异较小,燃烧开始后引燃导致的压力升高率峰值达到 1.5 MPa/(°),且明显大于点燃燃烧产生的最高压力升高率,这会加重直线氢内燃机的工作强度。

引燃、点燃模式导致的直线氢内燃机缸内气体

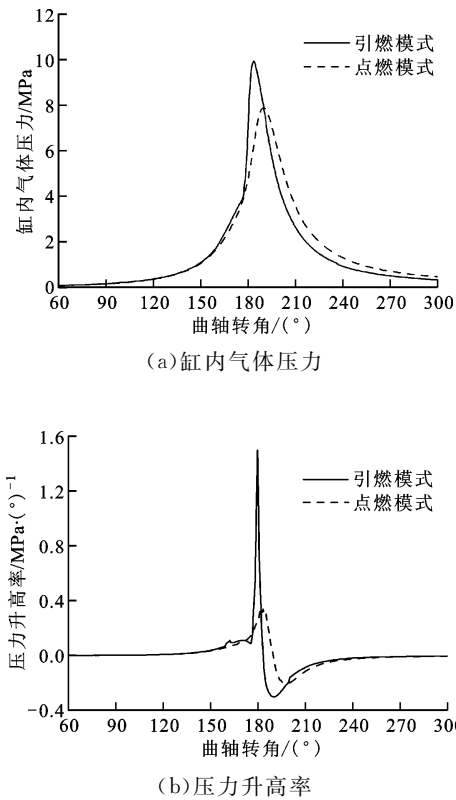


图 6 缸内气体压力变化比较

温度变化曲线如图7所示。由图7可知,在上止点附近引燃燃烧导致的缸内气体平均温度明显高于火花点燃的结果,但是在膨胀行程中后期,点燃产生更高的缸内气体温度,两种燃烧模式的最高燃烧温度相差132 K。

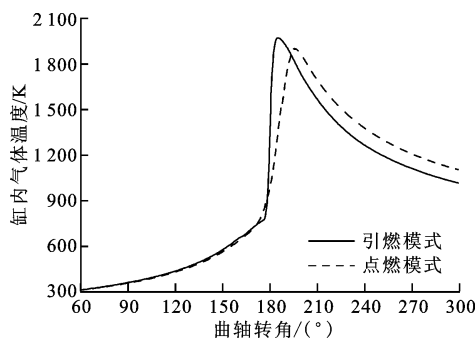


图7 缸内气体平均温度比较

两种燃烧模式生成的 NO_x 污染物变化曲线如图8所示。由图8可知,燃烧结束后,两种燃烧模式下直线氢内燃机 NO_x 产物的质量分数相差不大,点燃燃烧产生的 NO_x 产物占缸内总质量的0.45%,引燃产生的 NO_x 产物质量分数为0.54%,点燃燃烧模式在控制排放方面具有轻微的优势。

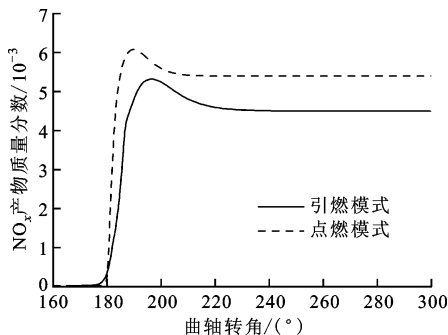
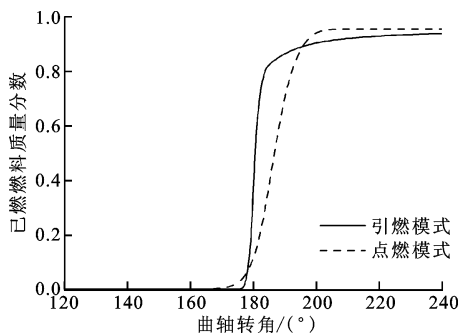


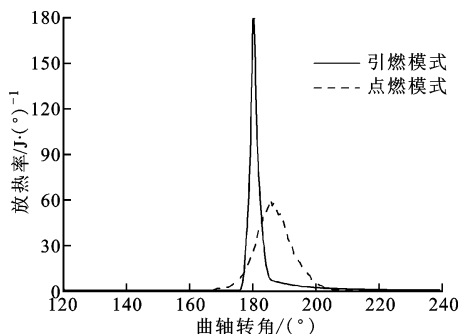
图8 NO_x 排放物对比

3.2 燃烧放热过程

在相同点火(喷油)提前位置下,引燃、点燃模式产生的直线氢内燃机已燃燃料质量分数和放热率如图9所示。由图9可知,引燃燃烧持续时间明显短于点燃持续期,约80%的燃料在上止点附近完成燃烧,燃烧放热等容程度较点燃模式得到提升,从而验证了引燃燃烧提高直线氢内燃机燃烧等容度的结论。由图9b可知:点燃燃烧放热率变化缓慢,且持续时间较长;在上止点附近点燃燃烧放热率均低于引燃燃烧放热率;引燃的放热率峰值高达178 J/(°),点燃的放热率峰值则为57 J/(°),因此可近似认为引燃的燃烧速度是点燃时的3倍,引燃技术加快了燃烧放热过程。



(a) 已燃燃料质量分数



(b) 燃烧放热率

图9 已燃燃料质量分数和放热率

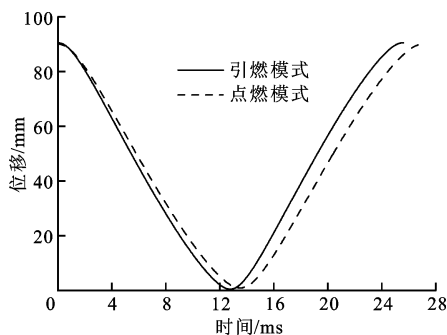
3.3 引燃对内燃机性能的影响

计算结果已经验证了引燃技术能够加快直线氢内燃机燃烧放热过程,提高燃烧等容程度。这主要是由于引燃类似于多点着火,大面积的高温柴油火焰能够充分引燃周围的稀薄混合气,有利于降低后燃程度,提高发动机效率。

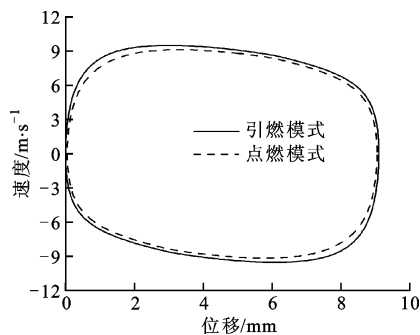
与传统内燃机不同,由于直线内燃机燃烧过程与运动过程相互耦合,因此引燃燃烧也会直线氢内燃机运动过程产生影响。引燃和点燃模式的直线氢内燃机活塞运动对比如图10所示,可见在相同输入燃料能量情况下,由于提高了燃烧放热效率,导致内燃机运转频率得到了提升,且活塞运动行程也略微大于点燃燃烧结果,即导致直线氢内燃机压缩比也略高于点燃工况,引燃燃烧还加快了活塞往复速度,有助于提高内燃机输出功率。计算表明,引燃的内燃机指示效率为40.3%,点燃的效率为35.4%,指示效率得到了明显改善。

4 结 论

本文针对不受约束的活塞运动带来的直线氢内燃机燃烧放热缓慢、等容度低的特点,尝试采用引燃燃烧的方法提高其燃烧反应速率,通过运用耦合活塞运动过程的迭代研究方法对直线氢内燃机采用引



(a) 活塞位移



(b) 活塞速度

图10 两种引燃模式的活塞运动对比

燃燃烧技术后的工作性能进行了数值模拟,对比分析了引燃和传统点燃燃烧技术在直线氢内燃机中的应用特点。所得结论如下:

(1) 采用引燃燃烧技术,有助于提高直线氢内燃机燃烧反应速度,提高燃烧放热等容程度,增加直线氢内燃机指示效率;

(2) 相对于点燃,引燃能够提高直线氢内燃机活塞往复运转频率和行程,增加内燃机输出功率;

(3) 相对于点燃,引燃导致的缸内最高燃烧压力和温度均较高,但在 NO_x 排放方面存在轻微的不足。

参考文献:

- [1] HUNG N, LIM O. A review of free-piston linear engines [J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 78-97.
 - [2] XIAO J, LI Q, HUANG Z. Motion characteristic of a free piston linear engine [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1288-1294.
 - [3] 秦朝举, 杨振中, 高玉国, 等. 基于耦合动力学的直线氢内燃机工作特性研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(10): 93-97.
- QIN Zhaoju, YANG Zhenzhong, GAO Yuguang, et al. Coupled dynamic modeling of performance characteris-

tics in linear hydrogen engine [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 42(10): 93-97.

- [4] YUAN C, XU J, HE Y. Performance characteristics analysis of a hydrogen fueled free-piston engine generator [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(4): 3259-3271.
- [5] FENG H, GUO C, YUAN C, et al. Research on combustion process of a free piston diesel linear generator [J]. *Applied Energy*, 2016, 161: 395-403.
- [6] 刘杰, 张欣, 杨福源, 等. 引燃油量对柴油引燃天然气发动机燃烧特性的影响 [J]. *汽车工程*, 2015, 37(4): 375-379.
- LIU Jie, ZHANG Xin, YANG Fuyuan, et al. Effects of pilot fuel quantity on the combustion characteristics of a diesel pilot ignition CNG engine [J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(4): 375-379.
- [7] 李伟峰, 刘忠长, 王忠恕, 等. 引燃柴油量和当量比对双燃料发动机低负荷燃烧的影响 [J]. *内燃机学报*, 2015, 33(6): 481-489.
- LI Weifeng, LIU Zhongchang, WANG Zhongshu, et al. Effects of pilot diesel amount and equivalence ratio on the combustion of a dual fuel engine under lower loads [J]. *Transactions of CSICE*, 2015, 33(6): 481-489.
- [8] 袁晨恒, 冯慧华, 王梦秋, 等. 自由活塞汽油直线发电机燃烧过程特性 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 45(1): 127-132.
- YUAN Chenheng, FENG Huihua, WANG Mengqiu, et al. Combustion characteristics of free-piston gasoline engine for linear alternator [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(1): 127-132.
- [9] 李云清, 成传松, 刘宾, 等. 改善 495 汽油机燃烧性能的分析研究 [J]. *内燃机工程*, 2010, 31(3): 52-56.
- LIU Yunqing, CHENG Chuansong, LIU Bin, et al. Investigation of improving combustion performance of model 495 gasoline engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2010, 31(3): 52-56.
- [10] YANG Zhenzhong, WANG Lijun, ZHANG Qingbo, et al. Research on optimum method to eliminate back-fire of hydrogen internal combustion engines based on combining postponing ignition timing with water injection of intake manifold [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(17), 12868-12878.

(编辑 赵炜 苗凌)