

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.004

# 供油系统对二甲醚发动机燃烧循环变动的影响\*

张强<sup>1</sup> 李娜<sup>1,2</sup> 张纪元<sup>3</sup> 李国祥<sup>1</sup>

(1. 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061; 2. 济南大学机械工程学院, 济南 250022;

3. 潍柴动力股份有限公司, 潍坊 261001)

**摘要:** 通过采集分析二甲醚发动机示功图, 试验研究了喷射系统参数和低压供油系统参数对二甲醚发动机燃烧循环变动的的影响。结果表明: 增大喷孔直径可以减小燃烧循环变动, 高速时喷孔直径对燃烧循环变动的的影响较低速时更显著; 增大喷油器的开启压力, 低速时燃烧循环变动增大, 高速时则反之; 发动机负荷增加, 燃烧循环变动减弱; 供油提前角从 BTDC 6°CA 提前到 BTDC 13°CA 后, 燃烧循环变动系数呈先增大后减小的趋势; 增加低压供油系统储能器的体积可以有效控制燃烧循环变动。

**关键词:** 二甲醚发动机 供油系统 燃烧循环变动

中图分类号: TK46<sup>+</sup>4; TK421<sup>+</sup>.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)01-0017-04

## Effect of Fuel Supply System on Cyclical Combustion Variation of DME Engine

Zhang Qiang<sup>1</sup> Li Na<sup>1,2</sup> Zhang Jiyuan<sup>3</sup> Li Guoxiang<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

2. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China

3. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261001, China)

**Abstract:** The indicator diagram was collected to study the effect of injector parameters and low pressure fuel supply system on cyclical combustion variation of DME as engine. The experimental results showed that the cyclical combustion variation of the DME engine decreased when the nozzle diameter hole diameter was increased. The influence of the nozzle hole on the cyclical combustion variation for the DME engine at high speed was more significant than that of low speed. The cyclical combustion variation increased when the opening pressure of the oil injector was increased at low speed, however it showed the opposite changing trend at high speed. The cyclical combustion variation decreased when the load of the engine was increased. The cyclical combustion variation coefficient showed a trend of first increase and then decrease when the fuel supply advance angle was advanced from BTDC 6°CA to BTDC 13°CA. The cyclical combustion variation could be controlled effectively by adding the volume of the accumulator of the low pressure fuel supply system.

**Key words:** DME engine Fuel supply system Cyclical combustion variation

### 引言

二甲醚是一种较为理想的压燃式发动机代用燃料, 成为能源多元化和降低大气污染的一种有效途径。国内外研究机构和学者对二甲醚发动机进行了

较为深入的研究, 取得了高效低排放的效果<sup>[1-6]</sup>。

但作为车用燃料, 二甲醚和柴油相比也存在诸多需要解决的问题, 例如二甲醚发动机燃烧循环变动的问题。由于二甲醚含氧量高导致其热值低, 放出同样的热量较柴油喷射量大和喷射持续期长; 二

收稿日期: 2011-11-11 修回日期: 2012-05-22

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA111721)、山东省自主创新成果转化重大专项(2008ZHZX1B0503)和重庆市科技攻关计划资助项目(2008GG0094)

作者简介: 张强, 讲师, 博士, 主要从事新能源发动机研究, E-mail: sduzhangqiang@sdu.edu.cn

甲醚的弹性模量低,且随温度的变化而变化,在喷油系统中二甲醚的压缩性通常是柴油的24倍;二甲醚的汽化温度高,且温度较高时部分溶解到二甲醚中的空气析出会造成空穴现象。上述原因导致二甲醚发动机循环喷射量的波动和燃烧过程的波动较柴油机大。燃烧循环变动是反映发动机工作过程中各个循环之间一致性的重要参数,直接影响到发动机的动力性、经济性、排放性和运转稳定性等参数。

以一台6缸增压中冷发动机为研究对象,采用不同的喷孔直径、喷油器开启压力、供油提前角和低压供油系统参数研究燃烧过程,采集不同工况下的缸内压力数据,通过分析示功图研究影响二甲醚发动机燃烧循环变动的因素。

## 1 试验装置与数据评价准则

### 1.1 试验装置

二甲醚发动机适合城市公交车和市间物流车上使用,本研究以道依茨226B型增压中冷公交车用发动机为研究对象。相关文献研究表明:采用5孔喷油器时二甲醚发动机的性能较好<sup>[7-8]</sup>,在原柴油机喷油器基础上设计3种直径的喷孔 $5-\phi 0.36\text{ mm}$ 、 $5-\phi 0.37\text{ mm}$ 和 $5-\phi 0.38\text{ mm}$ ,研究高压供油系统参数及低压系统对二甲醚发动机燃烧循环变动的的影响。表1为试验发动机的主要技术参数。图1为试验台架布置图,试验过程中低压系统的二甲醚压力维持在1.5 MPa左右。

表1 试验发动机技术参数  
Tab.1 Parameters of test engine

参数	数值
型式	直列、六缸、水冷、增压中冷、缸内直喷
缸径×行程/mm×mm	105×120
总排量/L	6.234
压缩比	18
额定功率/kW	155
额定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	2300
最大扭矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	780

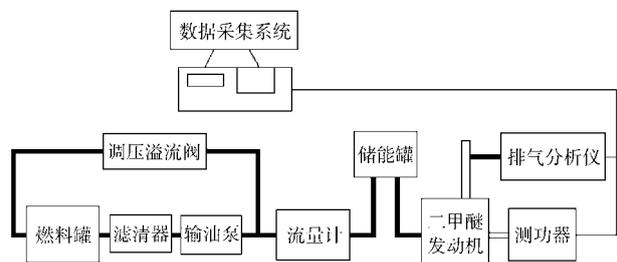


图1 试验台架布置图

Fig.1 Layout of test-bed

### 1.2 数据评价准则

文献[9~10]采用压力峰值的循环变动作为评价参数,得到了误差较小的结果。本文利用压力峰值的循环变动系数对二甲醚发动机的燃烧循环变动进行分析。定义峰值压力循环变动系数为

$$V_{pz} = \frac{\sigma_{pz}}{\bar{p}_z} \times 100\% \quad (1)$$

$$\sigma_{pz} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (p_{zk} - \bar{p}_z)^2} \quad (2)$$

式中  $\sigma_{pz}$ ——峰值压力标准偏差

$p_{zk}$ —— $k$ 点峰值压力,MPa

$\bar{p}_z$ ——峰值压力平均值,MPa

本研究在 $0.5^\circ\text{CA}$ 间隔范围内连续采集发动机100个循环的示功图对燃烧循环变动进行分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 喷孔直径对燃烧循环变动的的影响

图2比较了喷孔直径对峰值压力循环变动系数的影响。其中喷油器的头部大小、压力室容积、喷孔空间分布位置相同,喷油器开启压力为16 MPa,静态供油提前角分别为BTDC  $11^\circ\text{CA}$ 和BTDC  $13^\circ\text{CA}$ 。可见,在不同外特性转速工况下,采用大孔径喷油时,试验发动机的燃烧循环变动较小孔径的小,高速时喷孔直径对燃烧循环变动的的影响较低速时更

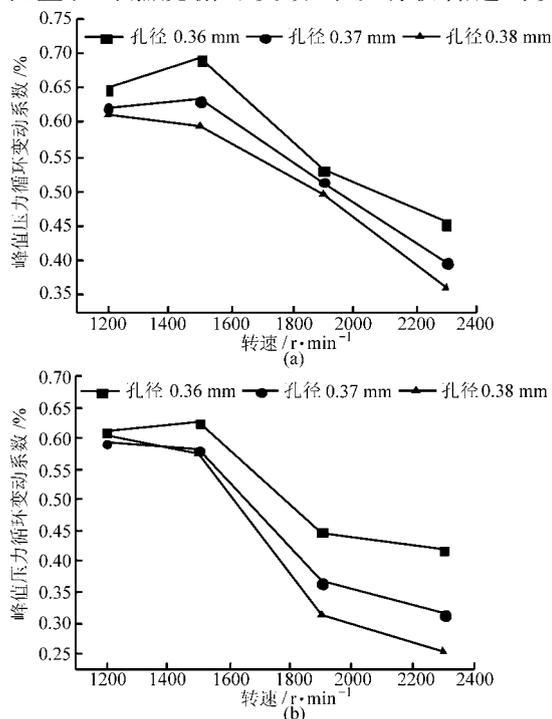


图2 喷孔直径对燃烧循环变动的的影响

Fig.2 Effect of nozzle hole diameter on cyclical combustion variation

(a) 供油提前角 BTDC  $11^\circ\text{CA}$  (b) 供油提前角 BTDC  $13^\circ\text{CA}$

显著。

分析其原因为:压燃式发动机燃烧循环变动的主要因素包括燃油喷射量的循环变动和燃料雾化、燃烧过程的循环变动。由于二甲醚燃料的可压缩性是柴油的 24 倍,因此二甲醚在高压系统内的压力波动较柴油大,燃油喷射量的循环变动较柴油高,导致喷射量波动增大的因素均使发动机的燃烧循环波动增大。相同转速下,采用小孔径喷嘴时,高压油管内压力增大大,二甲醚压缩率增大也大,导致燃油喷射量的循环变动增大。

## 2.2 喷油器开启压力对燃烧循环变动的影响

图 3 比较了开启压力对峰值压力循环变动系数的影响。采用  $5-\phi 0.38$  mm 型式的喷油器,供油提前角分别为 BTDC  $11^{\circ}$ CA 和 BTDC  $13^{\circ}$ CA,喷油器开启压力为 14 MPa、16 MPa 和 18 MPa。可见,在不同外特性转速(1 200 ~ 1 900 r/min)工况下,随着喷油器开启压力的增大发动机的燃烧循环变动增大。随发动机转速的提高喷油器开启压力对燃烧循环变动系数的影响减小。在标定转速 2 300 r/min 时,喷油器开启压力对燃烧循环变动系数的影响与低速时相反,但差别较小。在试验过程中亦发现在低速时发动机较难控制,易出现转速不稳定的现象。

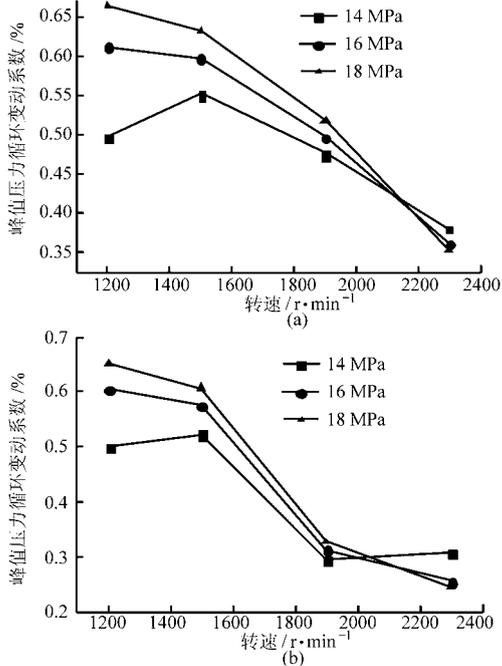


图 3 启喷压力对燃烧循环变动的影响

Fig. 3 Effect of nozzle opening pressure on cyclical combustion variation

(a) 供油提前角 BTDC  $11^{\circ}$ CA (b) 供油提前角 BTDC  $13^{\circ}$ CA

分析其原因为:①发动机转速较低时,随着喷油器开启压力的提高,二甲醚平均喷射压力提高,由于二甲醚可压缩性导致的燃料喷射量的循环差异增大,导致燃烧循环变动随喷射压力的增大而增大。

②循环变动与 DME 低粘度引起的泄漏有关,高速时迷宫效应导致喷油压力相对稳定,泄漏少,循环变动小。③开启压力高,泄漏严重,压力不稳导致循环变动大。④随着发动机转速的提高由循环供油量的差别导致的燃烧循环变动减弱,燃料雾化和燃烧过程对循环变动影响的作用增大,喷射压力的提高可以改善雾化和燃烧效果,因此在转速为 2 300 r/min 时,随喷油器开启压力的增大燃烧循环变动减弱。

## 2.3 发动机负荷对燃烧循环变动的影响

图 4 所示为发动机负荷对峰值压力循环变动系数的影响。采用  $5-\phi 0.38$  mm 型式的喷油器,供油提前角为 BTDC  $11^{\circ}$ CA,喷油器开启压力分别为 14 MPa 和 16 MPa。分析数据可知,在 25% 到 90% 负荷范围内,随发动机负荷的增加燃烧循环变动系数的变化存在差异,但其总体趋势是低负荷时燃烧循环变动较高负荷时大。因为,负荷的增加使得燃空比朝更加易于燃烧的当量比空间移动,发动机的燃烧循环变动减弱。因此,大负荷时燃烧循环变动得到改善。

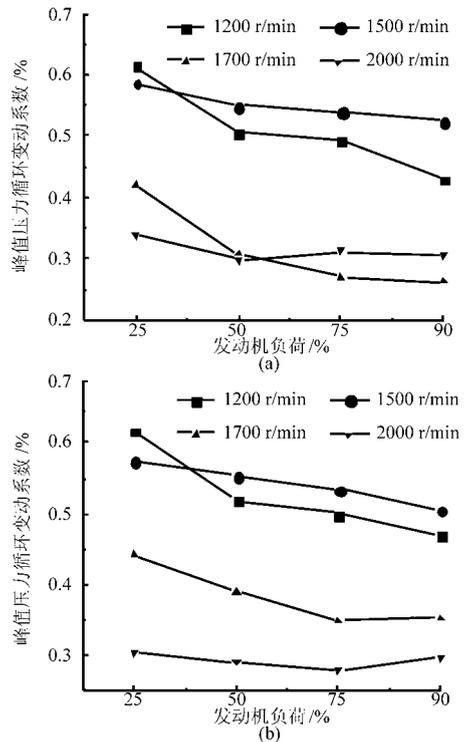


图 4 负荷对燃烧循环变动的影响

Fig. 4 Effect of engine load on cyclical combustion variation

(a) 开启压力 14 MPa (b) 开启压力 16 MPa

## 2.4 供油提前角对燃烧循环变动的影响

图 5 所示为供油提前角对峰值压力循环变动系数的影响。采用  $5-\phi 0.38$  mm 型式的喷油器,喷油器开启压力为 16 MPa。可见,在不同外特性转速工况下,低速时循环变动绝对值大,变化相对值小。高速时供油提前角对燃烧循环变动的影响较低速时显

著。静态供油提前角从 BTDC  $6^\circ\text{CA}$  提前到 BTDC  $11^\circ\text{CA}$  后燃烧循环变动系数增大;从 BTDC  $11^\circ\text{CA}$  提前到 BTDC  $13^\circ\text{CA}$  时,燃烧循环变动系数变小。

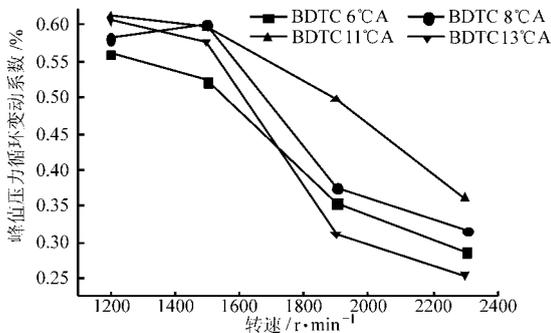


图5 供油提前角对燃烧循环变动的影响

Fig.5 Effect of fuel supply advance angle on cyclical combustion variation

发动机转速较低时,循环变动的绝对值大,但不同供油提前角变化的相对值小。这是因为低速时燃料喷射速率慢,雾化、燃烧的时间较充分,供油提前角对燃烧循环变动的影响较高速时小。

供油提前角改变后直接影响到滞燃期和滞燃期内的喷油量,随着供油提前角的增大滞燃期变长,预混燃烧的燃料增多,预混燃烧的差异导致燃烧循环变动增大。因此供油提前角从 BTDC  $6^\circ\text{CA}$  提前到 BTDC  $11^\circ\text{CA}$  后燃烧循环变动增大。

随着供油提前角继续增大,燃料喷射的背压和温度降低,缸内气流运动等因素对雾化和燃烧的影响减弱。因此供油提前角从 BTDC  $11^\circ\text{CA}$  提前到 BTDC  $13^\circ\text{CA}$  后燃烧循环变动减小。

## 2.5 低压供油系统对循环变动的影响

图6所示为低压供油系统对二甲醚发动机燃烧循环变动的影响。二甲醚低压供油系统的管路由燃料罐、滤清器、溢流调压阀和储能器组成。

试验过程中发动机低速时转速波动较大,工况

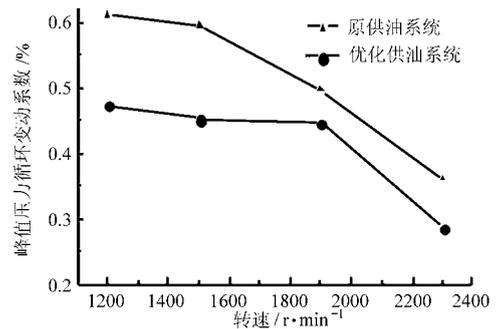


图6 低压供油系统对燃烧循环变动的影响

Fig.6 Effect of low pressure fuel supply system on cyclical combustion variation

较难稳定。因为二甲醚的可压缩性和融入空气的析出现象导致低压供油系统的压力也存在较大波动,直接影响到高压油泵的供油均匀性。对低压供油系统的储能罐体积进行优化设计并对喷油器回油进行冷却后,发动机的燃烧循环波动得到改善。

## 3 结论

(1) 随喷孔直径和负荷的增大,二甲醚发动机的燃烧循环变动减弱,高速时喷孔直径对燃烧循环变动的影响较低速时更显著。

(2) 在转速 1200 ~ 1900 r/min 范围内,随着喷油器开启压力的增大燃烧循环变动增大。额定转速 2300 r/min 时,随喷油器开启压力的增大燃烧循环变动减小。

(3) 供油提前角从 BTDC  $6^\circ\text{CA}$  提前到 BTDC  $11^\circ\text{CA}$ ,燃烧循环变动逐渐增强;从 BTDC  $11^\circ\text{CA}$  提前到 BTDC  $13^\circ\text{CA}$ ,燃烧循环变动减弱。

(4) 低压供油系统的稳定性,对二甲醚发动机的燃烧循环影响较大,二甲醚供油系统中应在高压油泵端安装储能罐并对回油二甲醚进行冷却,以削弱低压管路内二甲醚波动的影响。

## 参 考 文 献

- 1 吴君华,黄震,乔信起,等. 废气再循环对增压二甲醚发动机性能和排放影响的试验研究[J]. 内燃机学报, 2008,26(2): 147 ~ 152.  
Wu Junhua, Huang Zhen, Qiao Xinqi, et al. Experimental study of EGR on performance and emissions of a turbocharged DME engine[J]. Transactions of CSICE, 2008,26(2):147 ~ 152. (in Chinese)
- 2 宋睿智,李珂,刘圣华,等. 深度废气再循环对二甲醚发动机性能及排放的影响[J]. 西安交通大学学报, 2009,43(11):7 ~ 11.  
Song Ruizhi, Li Ke, Liu Shenghua, et al. Influences of ultra-high exhaust gas recirculation on performance and emission characteristics of a dimethyl ether engine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009,43(11):7 ~ 11. (in Chinese)
- 3 Cipolat D. Analysis of energy release and NO<sub>x</sub> emissions of a CI engine fuelled on diesel and DME [J]. Applied Thermal Engineering, 2007,27(11 ~ 12):2 095 ~ 2 103.
- 4 Myung Yoon Kim, Seung Hyun Yoon, Bong Woo Ryu, et al. Combustion and emission characteristics of DME as an alternative fuel for compression ignition engines with a high pressure injection system[J]. Fuel,2008,87(12):2 779 ~ 2 786.
- 5 Zhou Longbao, Wang Ying. Experimental study on exhaust emissions from a multi-cylinder DME engine operating with EGR and oxidation catalyst[J]. Applied Thermal Engineering, 2008,28(13):1 589 ~ 1 595.

- 5 Steinberg M, Cheng H. Modern and prospective technologies for hydrogen production from fossil fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1989, 14(3): 797 ~ 820.
- 6 Wang S, Ji C, Zhang B. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark-ignited ethanol engine at idle and stoichiometric conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(17): 9 205 ~ 9 213.
- 7 Ji C, Wang S. Combustion and emissions characteristics of a hybrid hydrogen gasoline engine under various loads and lean conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 35(11): 5 714 ~ 5 722.
- 8 Tsolakis A, Megaritis A, Wyszynski M. Low temperature exhaust gas fuel reforming of diesel fuel[J]. Fuel, 2004, 83: 1 837 ~ 1 845.
- 9 Tsolakis A, Megaritis A. Catalytic exhaust gas fuel reforming for diesel engines-effects of water addition on hydrogen production and fuel conversion efficiency[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29(13): 1 409 ~ 1 419.
- 10 马凡华, 汪俊君, 程伟, 等. 不同掺氢比的 HCNG 燃料对天然气发动机怠速性能影响研究[J]. 内燃机学报, 2008, 26(4): 296 ~ 301.  
Ma Fanhua, Wang Junjun, Cheng Wei, et al. Influence of hydrogen ratio on idle performance of natural gas-hydrogen fuelled engine[J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(4): 296 ~ 301. (in Chinese)
- 11 闫浩, 纪常伟, 汪硕峰. 汽油/氢发动机燃烧特性试验与仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 6 ~ 9.  
Yan Hao, Ji Changwei, Wang Shuofeng. Experiment and simulation on combustion characteristics of a four cylinder SI engine fueled with hydrogen and gasoline[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 6 ~ 9. (in Chinese)
- 12 王宇, 马凡华, 刘海全, 等. 火花点火天然气掺氢发动机稀燃极限的影响因素[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 9 ~ 13.  
Wang Yu, Ma Fanhua, Liu Haiquan, et al. Influence factors of the lean operation limit for a spark ignition hydrogen enriched natural gas engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 9 ~ 13. (in Chinese)
- 13 Liu B, Huang Z H, Zeng K, et al. Experimental study on emissions of a spark-ignition engine fueled with natural gas hydrogen blends[J]. Energy and Fuels, 2008, 22(1): 273 ~ 277.
- 14 Ji C W, Wang S F. Effect of hydrogen addition on the idle performance of a spark ignited gasoline engine at stoichiometric condition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(8): 3 546 ~ 3 556.
- 15 王倩, 徐新, 郭芳林, 等. 乙醇重整制氢催化剂的国内研究进展[J]. 中外能源, 2008(2): 23 ~ 29.  
Wang Qian, Xu Xin, Guo Fanglin, et al. Domestic research progress in catalyst for hydrogen manufacture from ethanol reforming [J]. Sino-Global Energy, 2008(2): 23 ~ 29. (in Chinese)
- 16 Lima S, Silva A, Cruzei, et al. H<sub>2</sub> production through steam reforming of ethanol over Pt/ZrO<sub>2</sub>, Pt/CeO<sub>2</sub> and Pt/CeZrO<sub>2</sub> catalysts [J]. Catalysis Today, 2008, 138(3~4): 162 ~ 168.
- 17 余立挺, 马建新. CuZnAlZr 催化剂上甲醇氧化水蒸气重整制氢 I. 催化剂组成的优化[J]. 催化学报, 2004, 25(7): 523 ~ 528.  
Yu Lingting, Ma Jianxin. Investigation on oxidative steam reforming of methanol over CuZnAlZr catalyst I. Optimization of catalyst formulation[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2004, 25(7): 523 ~ 528. (in Chinese)
- 18 汪硕峰, 纪常伟, 焦磊, 等. 混氢改善汽油机低怠速性能研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 22 ~ 26.  
Wang Shuofeng, Ji Changwei, Jiao Lei, et al. Effect of hydrogen addition on improving low idle speed performance of SI engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 22 ~ 26. (in Chinese)
- 19 Profeti L P R, Dias J A C, Assaf J M, et al. EM. Hydrogen production by steam reforming of ethanol over Ni-based catalysts promoted with noble metals[J]. Journal of Power Sources, 2009, 190(2): 525 ~ 533.
- 20 Conte E, Boulouchos K. Influence of hydrogen-rich-gas addition on combustion, pollutant formation and efficiency of an IC-SI engine[C]. SAE Paper 2004-01-0972, 2004.

(上接第 20 页)

- 6 Kazuhiro Hayashida, Toshio Mogi, Kenji Magai, et al. Growth characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in dimethylether diffusion flame[J]. Fuel, 2011, 90(2): 493 ~ 498.
- 7 Tsuchiya T, Sato Y. Development of DME engine for heavy-duty truck[C]. SAE Paper 2006-01-0052, 2006.
- 8 Yu J, Bae C. Dimethyl ether (DME) spray characteristics compared to diesel in a common-rail fuel injection system[J]. Proc. IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(12): 1 135 ~ 1 144.
- 9 吕兴才, 吉丽斌, 马骏骏, 等. 正庚烷均质压燃过程的燃烧稳定性和循环变动的研究[J]. 内燃机工程, 2007, 28(6): 1 ~ 6.  
Lü Xingcai, Ji Libin, Ma Junjun, et al. Study of combustion stabilities and cycle-to-cycle variations of n-heptane homogenous charge combustion ignition (HCCI) combustion[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(6): 1 ~ 6. (in Chinese)
- 10 石磊, 崔毅, 邓康耀. 柴油燃料 HCCI 燃烧的稳定性研究[J]. 内燃机学报, 2005, 23(3): 244 ~ 249.  
Shi Lei, Cui Yi, Deng Kangyao. Study on stability of HCCI combustion operating with diesel[J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(3): 244 ~ 249. (in Chinese)