

# EGR与富氢进气对柴油机性能和排放的影响\*

左承基 钱叶剑 徐天玉 谈建

(合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009)

**【摘要】** 试验研究了利用EGR加富氢进气改善ZS195型柴油机性能和排放的可行性,在标定转速下试验研究了不同EGR率、掺氢率对ZS195型柴油机工作过程、排放和经济特性的影响。研究表明:在高负荷工况,当EGR率一定时,随着掺氢率的增加,缸内峰值压力和压力升高率峰值增加。EGR加富氢进气可以降低HC、CO排放量和烟度,但NO<sub>x</sub>排放量有所增加。ZS195型柴油机采用EGR技术后,富氢进气会提高缸内混合气的燃烧速度,改善缸内燃烧质量,发动机的热效率有所增加。

**关键词:** 柴油机 废气再循环 富氢进气 排放

中图分类号: TK46<sup>+</sup>4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)04-0012-04

## Effect of EGR and Intake Hydrogen Enrichment on Performance and Emissions of Automotive Diesel Engine

Zuo Chengji Qian Yejian Xu Tianyu Tan Jian

(School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

### Abstract

This paper presented the feasibility of improving engine performance and pollutant emissions of a ZS195 diesel engine by EGR and intake hydrogen enrichment. At rated speed, the effects of EGR rate and hydrogen addition on the engine performance, pollutant emissions and economic characteristics were experimentally investigated. The results showed that when EGR rate is constant, peak pressure and maximum rate of pressure rise increase with hydrogen addition. The EGR and intake hydrogen enrichment can reduce HC, CO and smoke level, but the NO<sub>x</sub> emission increases. The combustion speed and thermal efficiency increase with the hydrogen addition when EGR technique is adopted.

**Key words** Diesel engine, EGR, Intake hydrogen enrichment, Emission

### 引言

与汽油机相比,柴油机主要排放NO<sub>x</sub>和微粒。发动机研究者采用不同的技术,如燃料改质、可变涡流进气、四气门、涡轮增压、高压喷射、废气再循环及排气后处理等技术措施,来控制柴油机的排放水平<sup>[1-4]</sup>。但受柴油机“NO<sub>x</sub>-微粒”折衷曲线的束缚,从根本上解决上述问题仍是一个技术难题。而且,随着柴油机排放法规的日益严格,柴油机的排放成本必将增加,这会限制柴油机的发展。

目前柴油机主要通过废气再循环(EGR)技术

来降低NO<sub>x</sub>排放量,但是高EGR,意味着新鲜空气量减少,缸内燃烧会恶化,从而导致柴油机经济性下降,碳烟排放增加<sup>[5]</sup>。作为气体燃料,氢气具有燃烧速度快、扩散系数高、着火范围宽、火焰淬熄距离短等特点,柴油机掺氢燃烧会降低碳烟排放量,但NO<sub>x</sub>排放量会增加<sup>[6-9]</sup>。Saravanan N等<sup>[10]</sup>将EGR和掺氢燃烧技术结合起来(文中称为HEGR技术),初步的试验结果证实,HEGR技术能同时降低柴油机的NO<sub>x</sub>和碳烟排放量。当前,柴油机EGR技术已经成熟,随着氢气生产和储存技术的发展,HEGR技术可能会成为突破柴油机排放折衷曲线限制的有效

措施。

国内还未见关于此项技术的报道。因此,本文在 ZS195 型柴油机试验台架上进行 HEGR 技术的试验研究,探讨 HEGR 对柴油机 NO<sub>x</sub> 和碳烟排放的影响。

### 1 试验装置和试验方案

试验选用常柴股份有限公司生产的 ZS195 型柴油机,机型为卧式单缸、水冷、直喷柴油机。其主要技术参数见表 1。试验台架布置见图 1。测试仪器包括:CB366 燃烧分析仪、VS5067-5 气体分析仪和 VAS5069 烟度计及油耗仪等。试验研究转速为 2 000 r/min 时,不同负荷下 HEGR 对 ZS195 型柴油机工作过程和排放性能的影响。

表 1 ZS195 型柴油机的主要技术参数

Tab.1 Specification of ZS195 diesel engine

参数	数值	参数	数值
缸径 × 行程/mm × mm	95 × 115	标定转速/r·min <sup>-1</sup>	2 000
压缩比	17	最大扭矩/N·m	50
标定功率/kW	9	最大扭矩转速/r·min <sup>-1</sup>	1 600

### 2 试验结果分析

#### 2.1 HEGR 对工作过程的影响

图 2 显示了不同负荷下 HEGR 对 ZS195 型柴油机最大爆发压力和最大压力升高率的影响。从图 2a 可以看出,负荷为 6 kW 时,当 EGR 率一定时,

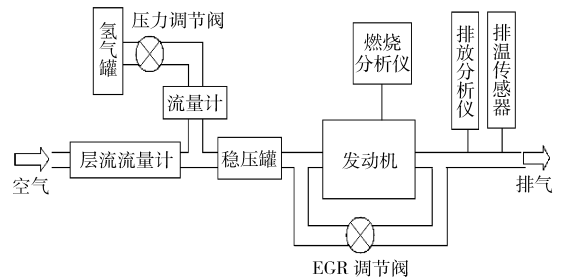


图 1 ZS195 型柴油机 HEGR 试验台架结构简图

Fig.1 Sketch of HEGR test bench

随着掺氢率  $\theta$  的增加,缸内最大爆发压力增加。这是因为:在此负荷下,随着掺氢率的增加,氢气的高燃烧速率和扩散率改善了缸内的燃烧质量,最大爆发压力增加。另外,掺氢燃烧也提高了缸内混合气燃烧速度,燃烧持续期缩短,因此缸内最大压力升高率有所增加。

图 2b、2c 列出了负荷为 7、8 kW 时,HEGR 对缸内最大爆发压力和最大压力升高率的影响。从图可以看出,在负荷和 EGR 率一定时,缸内压力和压力升高率随掺氢率  $\theta$  的变化趋势与负荷为 6 kW 时变化趋势一致,但幅值进一步增加。

图 2d 为负荷 9 kW 下,HEGR 对缸内最大爆发压力和最大压力升高率的影响。从图可以看出,当 EGR 率一定时,掺氢燃烧可以提高缸内最大爆发压力和最大压力升高率,但增加幅度有所减小。这是因为,在此工况下,掺氢燃烧对缸内柴油混合气的空燃比影响不大(柴油供给量大),柴油的滞燃期变化不大,但由于氢气的燃烧速度快,它仍然可以提高预

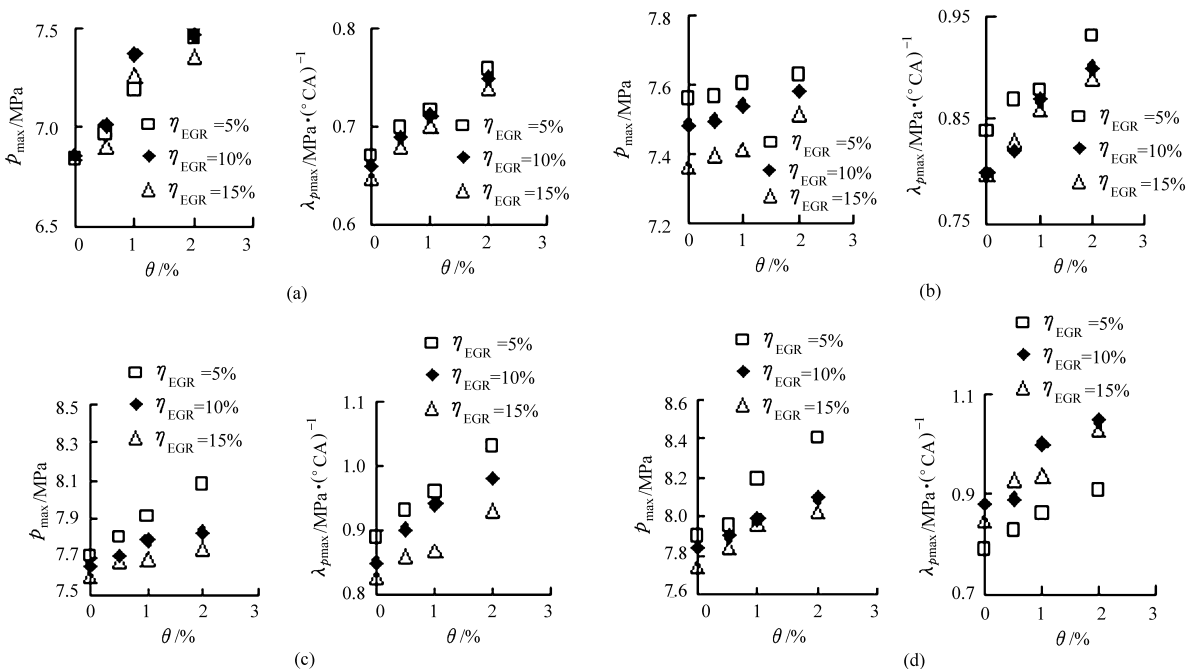


图 2 HEGR 对 ZS195 型柴油机工作过程的影响

Fig.2 Effect of HEGR on process of ZS195 diesel engine

(a) 6 kW (b) 7 kW (c) 8 kW (d) 9 kW

混燃烧的燃烧速度,因此最大爆发压力和压力升高率峰值也增加,而且出现的位置也有所提前。

## 2.2 HEGR 对排放性的影响

图3列出了2000 r/min时,不同负荷下 HEGR 对 ZS195 型柴油机排放特性的影响( $s$  为不透光度)。可以看出,在不同负荷下,当 EGR 率确定后,HC、CO 排放量和烟度会随着掺氢率  $\theta$  的增加而降低。分析原因可知:虽然采用 EGR 技术后,缸内的残余废气量增多,但引入氢气后,由于氢气的火焰传播速度快、淬熄距离小,而且作为气体燃料,氢气与缸内混合气混合均匀,因此极大改善了缸内燃烧质

量,增加了缸内温度,增强了缸内氧化气氛,抵消了 EGR 技术对 HC、CO 排放和烟度的不利影响,所以 HC、CO 排放量和烟度下降。另外,掺氢燃烧也会增加缸内 OH 基浓度,有利于 CO 的氧化。

一般来说,柴油机采用 EGR 技术可以降低  $\text{NO}_x$  排放,但烟度排放会增加。但从图中不透光度表征的烟度可以看出,在各个负荷下 ZS195 型柴油机采用 EGR 技术后,可以用掺氢燃烧来降低烟度排放,这是因为:采用 EGR 技术虽然会恶化缸内混合气燃烧质量,不过掺氢燃烧后,氢气燃烧速度快、扩散系数大和混合均匀等特点,能极大改善缸内燃烧质量,

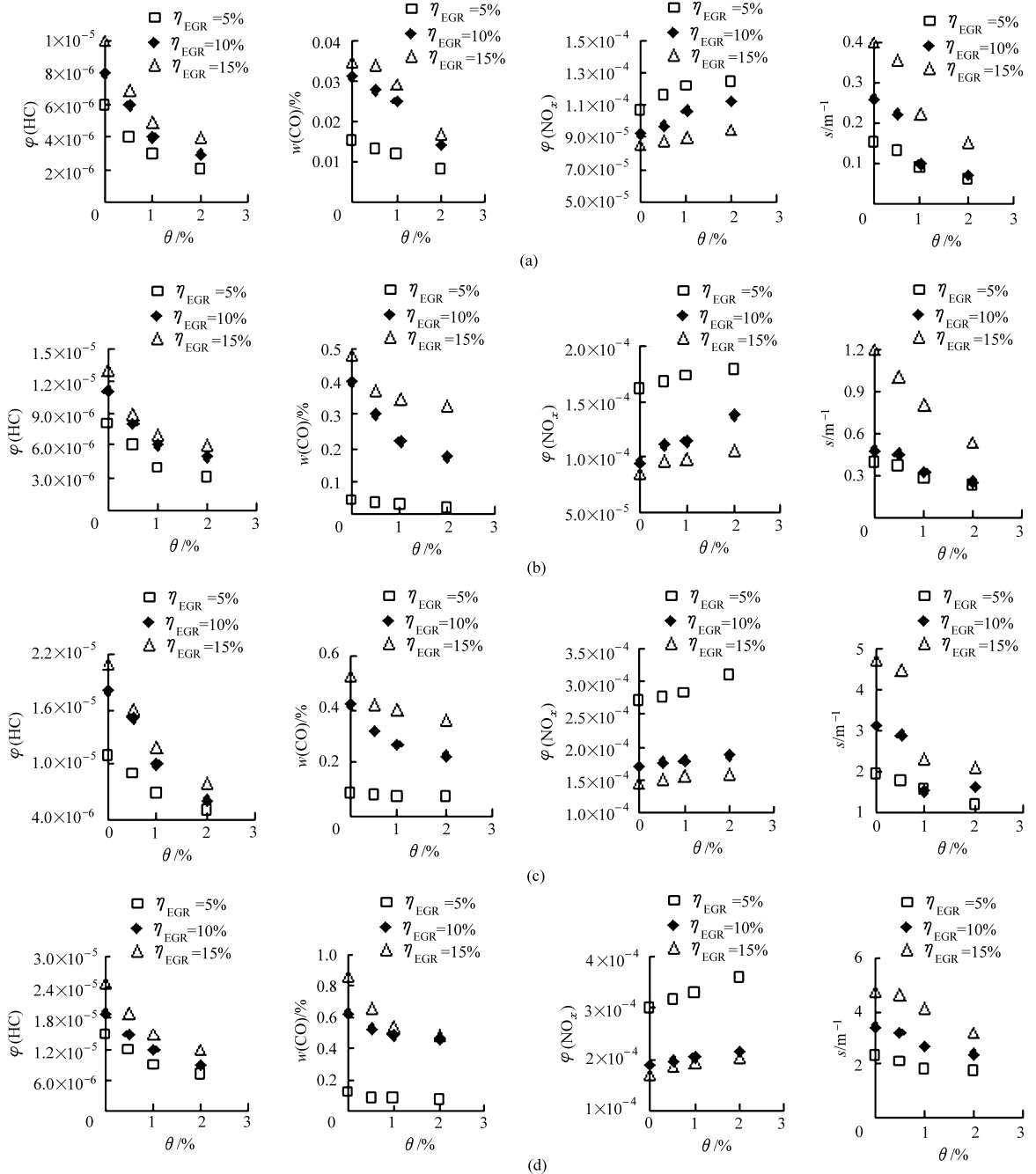


图3 HEGR 对 ZS195 型柴油机排放的影响

Fig.3 Effect of HEGR on emissions of ZS195 engine

(a) 6 kW (b) 7 kW (c) 8 kW (d) 9 kW

减少了缸内混合气不均匀程度,因此烟度排放得到改善。所以,可以通过合理组合 HEGR 比例使  $\text{NO}_x$  排放量和烟度同时得到降低。

另外,从图还可以看出,当 EGR 率一定时,随着掺氢率  $\theta$  的增加,ZS195 型柴油机的  $\text{NO}_x$  排放量有所增加。这是因为,掺氢燃烧会增加缸内峰值压力和温度,有利于  $\text{NO}_x$  生成。不过,氢气能点燃大空燃比的混合气,且燃烧速度快,还可通过稀薄燃烧和推迟喷油来降低  $\text{NO}_x$  排放量。

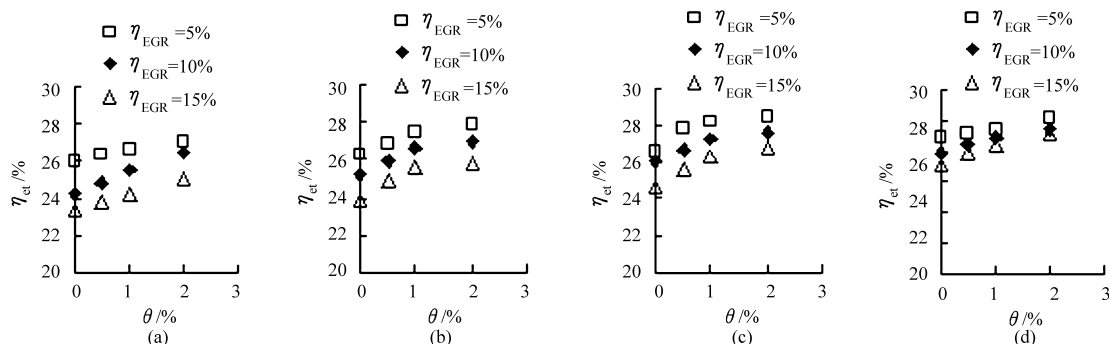


图4 HEGR对ZS195型柴油机效率的影响

Fig. 4 Effect of HEGR on thermal efficiency of ZS195 engine

(a) 6 kW (b) 7 kW (c) 8 kW (d) 9 kW

### 3 结论

(1) ZS195 型柴油机使用 HEGR 技术后,当 EGR 率一定时,随着掺氢率的增加,最大爆发压力和压力升高率峰值都有所增加。

(2) ZS195 型柴油机使用 HEGR 技术后,能同

### 2.3 HEGR 对经济性的影响

图4显示了在2000 r/min时,不同负荷下 HEGR 对 ZS195 型柴油机热效率的影响。从图可以看出,ZS195 型柴油机采用 EGR 技术后,有效热效率会随之降低,但随着掺氢率  $\theta$  的增加,发动机的有效热效率  $\eta_{et}$  有所增加。原因是氢气的加入改善了缸内燃烧过程,因此使有效热效率增加,抵消了 EGR 降低有效热效率的作用,使 HEGR 柴油机的实际有效热效率略有上升。

时降低 HC 和 CO 排放量,当 EGR 率一定时,随着掺氢率的增加,烟度下降而  $\text{NO}_x$  排放量增加。

(3) ZS195 型柴油机采用 HEGR 技术后, $\text{NO}_x$  和烟度可同时得到降低,并使发动机的实际有效热效率略有改善。

### 参 考 文 献

- 刘忠长,刘巽俊,张兆合. 进气涡流对车用直喷式柴油机瞬态工况下微粒排放的影响[J]. 内燃机学报, 2000, 18(2): 153~155.  
Liu Zhongchang, Liu Xunjun, Zhang Zhaohe. Effect of intake swirl on particulate emission from an automotive D. I. diesel engine under transient operating conditions[J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(2): 153~155. (in Chinese)
- 高松,肖福明,王立柱,等. 柴油机排气微粒袋滤系统的改进与试验[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 35~38.  
Gao Song, Xiao Fuming, Wang Lizhu, et al. Improvement of a bag filter system for dust emission from a diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 35~38. (in Chinese)
- 王忠恕,刘忠长,郭永田,等. 柴油机瞬态工况下微粒排放特性及影响因素[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 19~22.  
Wang Zhongshu, Liu Zhongchang, Guo Yongtian, et al. Particulate emission characteristics and its influencing factors under transient operating condition of a diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 19~22. (in Chinese)
- 王桂华,刘云岗,李国祥. 废气冷却对柴油机微粒组分的影响[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 8~12.  
Wang Guihua, Liu Yungang, Li Guoxiang. Effect of diesel exhaust temperature on particulate fractions of emission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 8~12. (in Chinese)
- Ming Zheng, Graham T, Gary J. Diesel engine exhaust gas recirculation-a review on advanced and novel concepts[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(6): 883~900.
- Senthil M, Ramesh A, Nagalingam B. Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(10): 1143~1154.

- 8 Chepil W S. The effect of synthetic conditioners on some phases of soil structure and erodibility by wind[J]. Soil Science Society of America Journal, 1954,18(4):386~391.
- 9 张春梅,刘荣厚,易维明,等. 玉米秸秆等离子体热裂解液化实验[J]. 农业机械学报,2009,40(8):96~99.  
Zhang Chunmei, Liu Ronghou, Yi Weiming, et al. Experiment on plasma pyrolysis of corn stalk for liquid fuel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(8):96~99. (in Chinese)
- 10 Lee S H, Teramoto Yoshikuni, Shiraishi Nobuo. Resol-type phenolic resin from liquefied phenolated wood and its application to phenolic foam[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 84(3):468~472.
- 11 Mehmet H A, Mehmet A B. Liquefaction of grapevine cane waster and its application to phenol-formaldehyde type adhesive[J]. Industrial Crops and Products, 2006, 24(2):171~176.
- 12 傅深渊,余仁广,杜波,等. 竹材残液液化及其液化产物胶粘剂的制备[J]. 林产工业,2004,31(3):35~38.  
Fu Shenyuan, Yu Renguang, Du Bo, et al. Liquefaction of bamboo and preparation of liquefied bamboo adhesive[J]. China Forest Products Industry, 2004, 31(3):35~38. (in Chinese)
- 13 Kurimoto Y, Takeda M, Doi S, et al. Network structures and thermal properties of polyurethane films prepared from liquefied wood[J]. Bioresource Technology, 2001,77(1):33~40.
- 14 戈进杰,徐江涛,张志楠. 基于天然聚多糖的环境友好材料(Ⅱ)麻纤维和芦苇纤维多元醇的生物降解聚氨酯[J]. 化学学报,2002,60(4):732~736.  
Ge Jinjie, Xu Jiangtao, Zhang Zhinan. Environmental-friendly materials based on natural polysaccharides(Ⅱ)——biodegradable polyurethane foams from biomass polyols of banknote paper and pulp paper[J]. Acta Chemical Sinica, 2002, 60(4):732~736. (in Chinese)
- 15 戈进杰,张志楠,徐江涛. 基于玉米棒的环境友好材料的研究(Ⅱ)以玉米棒为原料的聚氨酯的合成及生物降解性[J]. 高分子材料科学与工程,2003,19(4):177~180.  
Ge Jinjie, Zhang Zhinan, Xu Jiangtao. Studies on the biodegradable materials based on corn-cob(Ⅱ) preparation and biodegradation of PU foam from corn-cob[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2003, 19(4):177~180. (in Chinese)
- 16 Wang T P, Zhang L H, Mao Z H, et al. Mechanical properties of polyurethane foams prepared from liquefied corn stover with PAPI[J]. Bioresource Technology, 2008,99(7):2265~2268.
- 17 王体朋,毛志怀,梁凌云,等. 发泡剂对玉米秸秆基聚氨酯泡沫性能影响[J]. 农业工程学报,2009,25(1):185~188.  
Wang Tipeng, Mao Zhihui, Liang Lingyun, et al. Effects of blowing agent on the properties of polyurethane foams based on corn stover[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1):185~188. (in Chinese)
- 18 Breslin V T. Degradation of starch-plastic composites in a municipal solid waste landfill[J]. Journal of Polymers and the Environment, 1993,1(2):127~141.
- 19 Chepil W S. Wind credibility of fields[J]. Soil and Water Conservation, 1959,14(5):214~219.

(上接第15页)

- 7 吕兴才,张武高,黄震. 燃料设计改善发动机燃烧和排放的研究(2)—对柴油机燃烧与排放影响的分析[J]. 内燃机学报, 2004, 22(3):210~215.  
Lü Xingcai, Zhang Wugao, Huang Zhen. Fuel design concept for improvement of the engine combustion and emissions (2)—effect of fuel design concept on heat release rate and emissions of diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2004, 22(3):210~215. (in Chinese)
- 8 Saravanan N, Nagarajan G, Narayanasamy S. An experimental investigation on DI diesel engine with hydrogen fuel[J]. Renewable Energy, 2008, 33(3):415~421.
- 9 Masood M, Mehdi S, Reddy P. Experimental investigations on a hydrogen-diesel dual fuel engine at different compression ratios[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(2):572~578.
- 10 Saravanan N, Nagarajan G, Kalaiselvan K, et al. An experimental investigation on hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation technique[J]. Renewable Energy, 2008, 33(3):422~427.