

DOI: 10.7652/xjtuxb201303007

排气再循环下柴油引燃天然气发动机 循环变动特性研究

孙璐, 刘亦夫, 周磊, 曾科

(西安交通大学内燃机研究所, 701149, 西安)

摘要: 在柴油引燃天然气发动机上开展了结合排气再循环(EGR)的循环变动特性研究,分析了不同 EGR 率和引燃油量下的循环变动规律。结果表明:在给定的引燃油量下,随着 EGR 率的增加,燃烧循环变动增强,缸内平均最大压力和平均指示压力下降,缸内最大压力和平均指示压力与缸内最大压力对应的曲轴转角之间的相关性减弱;引入 EGR,缸内最大压力升高率减小,与曲轴转角之间的相关性减弱,燃烧速率下降;EGR 率与循环变动系数呈非线性关系。输出扭矩不同,引燃油量对循环变动特性的影响不同,低负荷下过高和过低的引燃油量均会使得缸内平均指示压力循环变动加剧,负荷升高时引燃油量对循环变动系数的影响不太明显。

关键词: 发动机;柴油;天然气;引燃;循环变动

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)03-0036-06

Cycle-by-Cycle Variations of a Diesel Pilot-Ignited Natural Gas Engine with Exhaust Gas Recirculation

SUN Lu, LIU Yifu, ZHOU Lei, ZENG Ke

(Institute of Internal Combustion Engine, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Cycle-by-cycle variations of a pilot-ignited natural gas engine with EGR(exhaust gas recirculation) were examined. The effects of EGR ratio and pilot diesel quantity on cyclic variation characteristics were analyzed. The results show that when the cycle-by-cycle variations increase, the maximum average pressure decreases, and the indicated mean effective pressure decreases with an increase in the EGR ratio at a given pilot diesel quantity. Moreover, the weak interdependence occurs between the parameters above and their corresponding crank angles with an increase in the EGR ratio. The use of the EGR leads to the decrease in the burning rate and the maximum rate of pressure rise drops with the increase in the EGR ratio. The cycle-by-cycle variations change nonlinearly with the EGR ratio. At different loads, the pilot quantity has different influence on the cycle-by-cycle variations. Over-high or over-low pilot diesel quantity increases the cycle-by-cycle variations at the low load. The effect of the pilot quantity on the cycle-by-cycle variations is slight when the load is high.

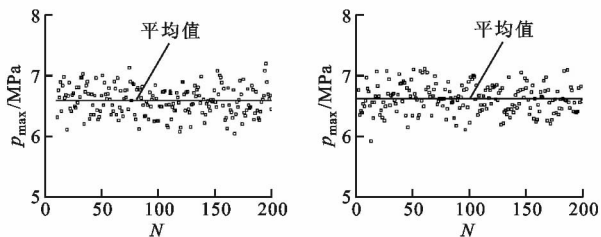
Keywords: engine; diesel; natural gas; pilot; cycle-by-cycle variation

天然气作为一种清洁能源,储量丰富,抗爆性、排放性好,价格低廉,已在车用发动机上广泛应用。

收稿日期: 2012-07-03。 作者简介: 孙璐(1986—),女,博士生;刘亦夫(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB707200)。

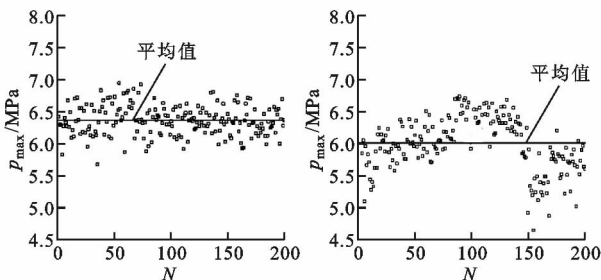
网络出版时间: 2012-12-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121210.1008.004.html>



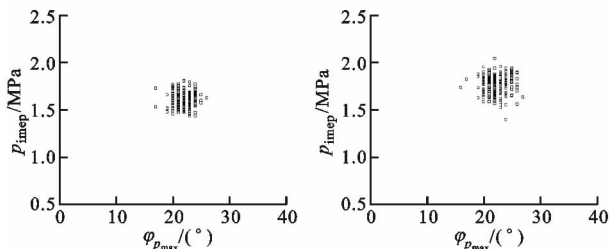
(a) EGR 为 0

(b) EGR 为 5%



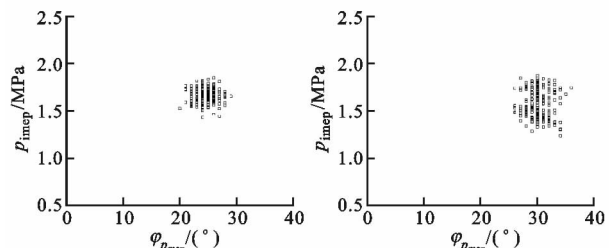
(c) EGR 为 15%

(d) EGR 为 25%

图 2 不同 EGR 率下缸内最高压力随 N 的变化

(a) EGR 为 0

(b) EGR 为 5%

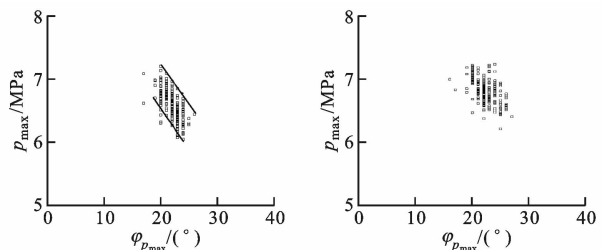


(c) EGR 为 15%

(d) EGR 为 25%

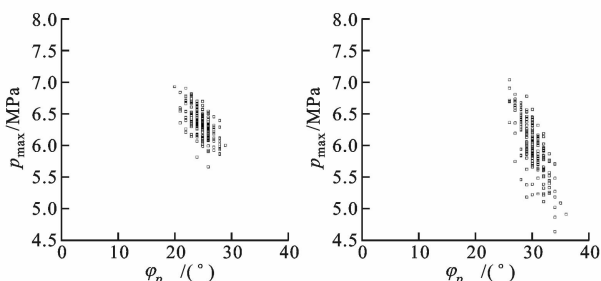
图 4 不同 EGR 率下 p_{im} 与 $\varphi_{p_{max}}$ 的关系

降、单位体积内燃料和氧气量下降所致。当 EGR 率达到 25% 时, p_{max} 的平均值降低为未引入 EGR 时的 90%, 可见降低幅度并不是很大。图 3、图 4 分别为不同 EGR 率下 p_{max} 和平均指示压力 p_{im} 与最大压力对应的曲轴转角 $\varphi_{p_{max}}$ 之间的关系。由图 3 和图 4 可以看出, 当 EGR 率为 0 时, p_{max} 和 p_{im} 与 $\varphi_{p_{max}}$ 的分布较为集中, 较大的 p_{max} 和 p_{im} 对应的 $\varphi_{p_{max}}$ 较小。这是因为燃烧速率较快, 缸内压力较早



(a) EGR 为 0

(b) EGR 为 5%



(c) EGR 为 15%

(d) EGR 为 25%

图 3 不同 EGR 率下 p_{max} 与 $\varphi_{p_{max}}$ 的关系

达到 p_{max} , 也就是 p_{max} 越接近压缩上止点。引入 EGR 后, p_{max} 和 p_{im} 与 $\varphi_{p_{max}}$ 之间的相关性减弱, $\varphi_{p_{max}}$ 分布分散, 分布区域扩大, 这一现象随 EGR 率的增大更加明显。随着 EGR 率的增加, $\varphi_{p_{max}}$ 增大, p_{max} 远离压缩上止点。这是因为天然气在燃烧前生成了一系列的自由基和易燃中间产物, 当它们的浓度达到一定程度时天然气才会着火^[7]。这些自由基和易燃中间产物的生成速率随温度的降低而减小, 当 EGR 率增大时, 天然气燃烧前缸内温度降低, 天然气的燃烧速率降低, $\varphi_{p_{max}}$ 增大。当 EGR 率达到 25% 时, p_{max} 和 $\varphi_{p_{max}}$ 出现了回钩型分布的趋势, 但并不明显, 这与点燃式天然气发动机具有一定的相似性^[6-10]。

图 5 为不同 EGR 率下缸内最大压力升高率 $(dp/d\varphi)_{max}$ 与对应的曲轴转角 $\varphi_{(dp/d\varphi)_{max}}$ 之间的关系。由图 5 可以看出, 未引入 EGR 时, 数据分布较为集中, $(dp/d\varphi)_{max}$ 对应着缸内混合气燃烧的最大放热率, 引入 EGR 后, $(dp/d\varphi)_{max}$ 有所下降。这是因为引入 EGR 后, 缸内火焰传播速度降低, 燃烧持续期延长, 最大放热率降低。随着 EGR 率的增加, $(dp/d\varphi)_{max}$ 与 $\varphi_{(dp/d\varphi)_{max}}$ 的分布呈现逐步分散的趋势; 当 EGR 率达到 25% 时, $(dp/d\varphi)_{max}$ 与 $\varphi_{(dp/d\varphi)_{max}}$ 之间的相关性明显减弱, 少部分 $(dp/d\varphi)_{max}$ 向上止点前移动, 个别循环出现了不完全燃烧的现象^[6]。所以, EGR 率的增加使得循环不完全燃烧增强, 循

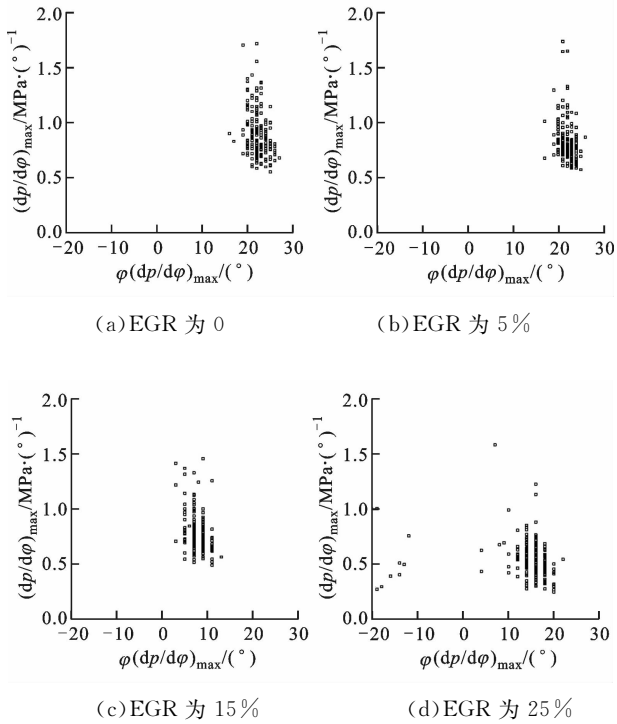


图 5 不同 EGR 率下 $(dp/d\varphi)_{\max}$ 与 $\varphi(dp/d\varphi)_{\max}$ 的关系

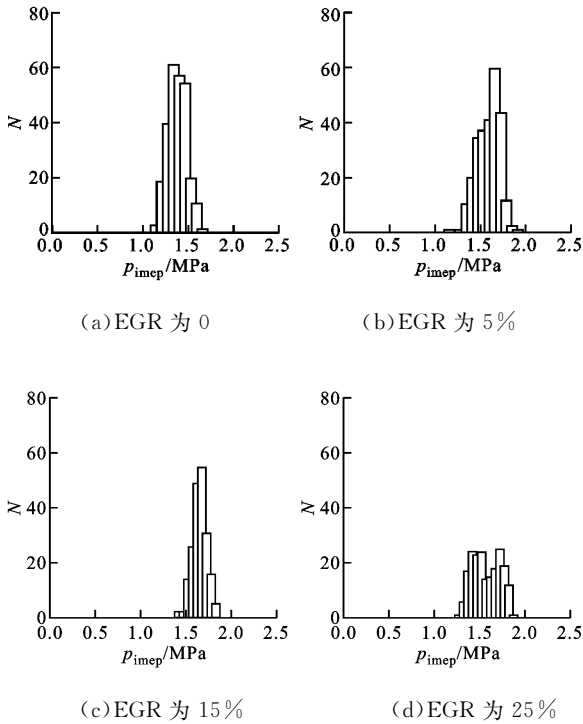


图 6 不同 EGR 率下 p_{imep} 的循环分布

环变动加剧。

2.1.2 平均指示压力下的循环变动 平均指示压力不仅直接关系到发动机的输出功率,而且还包含着与气缸压力变动有关的全部信息,它既能反映车辆的操作性和驾驶的舒适性,又能反映燃烧的稳

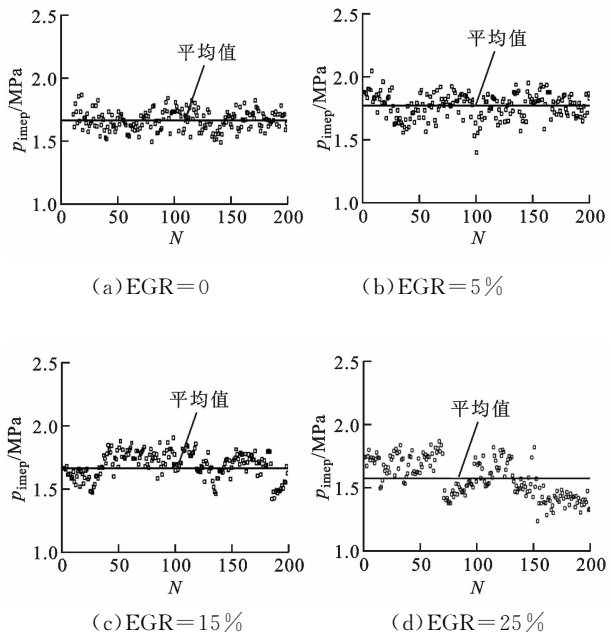


图 7 不同 EGR 率下 p_{imep} 随 N 的变化

性。图 6 和图 7 分别为 2 000 r/min、引燃油流量为 13.5 g/min、供油提前角为 15°、节气门全开时,不同 EGR 率下 p_{imep} 的循环分布及其随 N 的变化。由图 6、图 7 可以看出:当 EGR 率为 0 时, p_{imep} 较大且分布集中,说明此时燃烧较为完全,燃烧效率较高,循环变动较小;随着 EGR 率的增加, p_{imep} 的平均值下降,分布趋于分散;当 EGR 率达到 25% 时, p_{imep} 的平均值降低十分明显。可见,EGR 的引入使得输出功率减小,直接的反应为 p_{imep} 降低,所以引入 EGR 后会导致火焰传播速率下降,循环变动增强。EGR 率较大也会使得混合气的燃烧恶化,燃烧不完全,循环变动增强, p_{imep} 分布分散。

一般认为,平均指示压力循环变动系数超过 10% 时,发动机的转速波动性增强,车辆操作的稳定性受到影响^[6]。图 8 为 2 000 r/min、供油提前角为 15°、引燃油流量为 13.5 g/min、节气门全开时,不同 EGR 率下 $p_{\max}$ 和 p_{imep} 分别对应的循环变动系数。

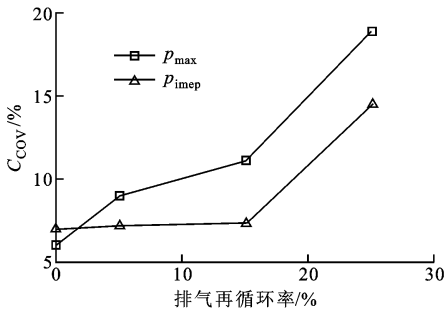


图 8 C_{cov} 随 EGR 率的变化

由图 8 可以看出:EGR 率的增加会导致火焰传播速率降低,燃烧循环变动增强;EGR 率较大时,混合气燃耗恶化,循环变动系数增加得较为显著;在给定工况下,当 EGR 率超过 15%,平均批示压力循环变动系数 $C_{\text{COV}, p_{\text{imep}}}$ 超过 10% 时,循环变动明显增强。

2.2 不同引燃油量下压力相关系数对循环变动的影响

图 9 和图 10 分别为 1600 r/min、供油提前角为 15° 时,不同引燃油流流量下 200 个循环的 p_{max} 平均值和最大压力循环变动系数 $C_{\text{COV}, p_{\text{max}}}$ 随输出转矩 T 的变化。由图 9、图 10 可以看出,在各种负荷下, p_{max} 均随引燃油流量的增加而增大。这是因为随着引燃油流量的增加,缸内的湍流增强,其为天然气的燃烧提供了更多的着火源和着火能量,所以天然气的燃烧速率提高,天然气完全燃烧得以保证^[11]。但是, $C_{\text{COV}, p_{\text{max}}}$ 随引燃油流量的降低而增大,在指定的引燃油流量下,该变动系数随着 T 的增加而小幅增加。

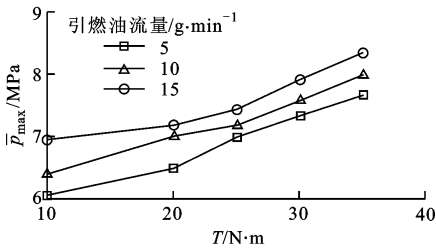


图 9 不同引燃油流量下 p_{max} 平均值随 T 的变化

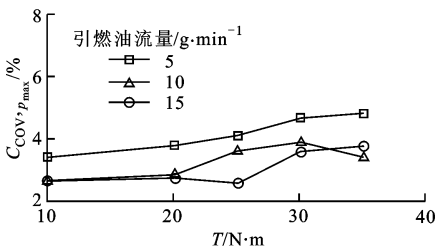
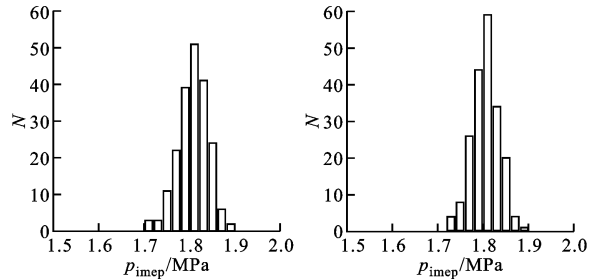


图 10 不同引燃油流量下 $C_{\text{COV}, p_{\text{max}}}$ 随 T 的变化

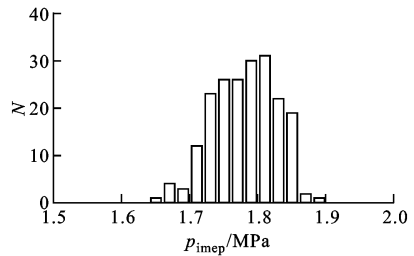
图 11 为 1600 r/min、供油提前角为 15°、不同引燃油量、节气门全开时,200 个循环的 p_{imep} 的分布。由图 11 可以看出,随着引燃油流量的提高, p_{imep} 的平均值基本没有变化,但是最大引燃油流量下 p_{imep} 的分布趋于分散。

图 12 为不同引燃油流量下 200 个循环的 $C_{\text{COV}, p_{\text{imep}}}$ 随 T 的变化。由图 12 可以看出,在较低负荷下,过大和过小的引燃油流量均会导致 $C_{\text{COV}, p_{\text{imep}}}$ 增大,但是随着 T 的增加,即输出负荷的增大,引燃

油流量对该变动系数的影响并不明显。当节气门全开、引燃油流量最大时,该变动系数比 2 个较小引燃油流量下的有所增加,但增幅并不大。 $C_{\text{COV}, p_{\text{imep}}}$ 变化与图 11 的变化趋势相对应, $C_{\text{COV}, p_{\text{imep}}}$ 随 T 的增大略微降低, p_{imep} 分布趋于分散。



(a) 引燃油流量为 5 g/min (b) 引燃油流量为 10 g/min



(c) 引燃油流量为 15 g/min

图 11 不同引燃油流量下 p_{imep} 的分布

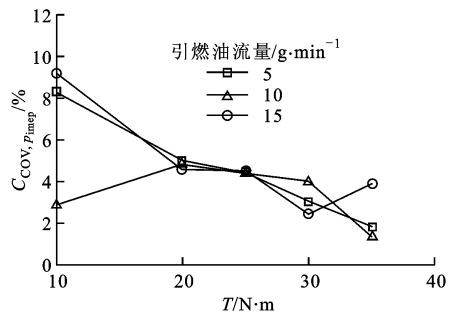


图 12 不同引燃油流量下 $C_{\text{COV}, p_{\text{imep}}}$ 随 T 的变化

3 结 论

本文通过对一台由 TY1100 柴油发动机改装而成的柴油引燃天然气发动机燃烧循环变动特性的研究,得出如下结论。

引燃油流量一定,随着 EGR 率的增加,缸内最大压力的平均值减小且循环变动增强, p_{max} 和 p_{imep} 与 $\varphi_{p_{\text{max}}}$ 的相关性减弱,当 EGR 率增大到一定程度时,相关性减弱十分明显; $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ 随着 EGR 率的增加而减小, $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ 与 $\varphi_{p_{\text{max}}}$ 的分布随着 EGR 率的增加而有所分散,少部分 $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ 向上止点

前移动;当 EGR 率达到 25% 时,个别不完全燃烧出现。

引燃油流量一定,随着 EGR 率的增加, p_{imep} 平均值下降, p_{imep} 分布趋于分散,循环变动增强。

EGR 率对 p_{max} 和 $C_{COV,p_{imep}}$ 的影响是非线性的,当 EGR 率低于 15% 时, $C_{COV,p_{imep}}$ 比较小,且变化不明显;当 EGR 率继续增加时, $C_{COV,p_{imep}}$ 明显增大, $C_{COV,p_{imep}}$ 超过 10% 时缸内燃烧恶化。

随着引燃油流量的增加,相同 T 下 p_{max} 增加, $C_{COV,p_{max}}$ 减小;在低输出扭矩下 p_{imep} 受引燃油流量的影响较大,过高和过低的引燃油流量均会导致 $C_{COV,p_{imep}}$ 增大;随着 T 的增加,引燃油流量对 $C_{COV,p_{imep}}$ 的影响不明显。

参考文献:

- [1] 姚春德,刘增勇,高昌卿. 柴油引燃预混天然气准均质压燃着火过程的研究 [J]. 内燃机学报, 2003, 21(1): 8-12.
YAO Chunde, LIU Zengyong, GAO Changqing. Study on HCCI of pre-mixed natural gas ignited by pilot diesel [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(1): 8-12.
- [2] SRINIVASAN K K, KRISHNAN S R, MIDKIFF K C. Improving low load combustion, stability, and emissions in pilot-ignited natural gas engines [J]. Automobile Engineering, 2006, 20(D): 229-239.
- [3] MCTAGGART-COWAN G P, BUSHE W K. A supercharged heavy-duty diesel single-cylinder research engine for high-pressure direct injection of natural gas [J]. International Journal of Engine Research, 2003, 4(4): 315-330.
- [4] YAO Chunde, YAO Guangtao, SONG Jin'ou, et al. A theoretical study on the realization of QHCCI in a pre-mixed natural gas engine ignited by pilot diesel fuel [J]. Automotive Engineering, 2005, 27(2): 168-171.
- [5] 林志强,苏万华. 柴油引燃式天然气发动机最佳引燃柴油量及过量空气系数浓限、稀限的研究 [J]. 内燃机学报, 2002, 20(6): 505-510.
LIN Zhiqiang, SU Wanhua. A study on determination of amount of pilot injection and rich and lean boundaries of premixed CNG/air mixture for a CNG/diesel dual fuel engine [J]. Transactions of CSICE, 2002, 20(6): 505-510.
- [6] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1988.
- [7] 刘亮欣,黄佐华,蒋德明,等. 天然气缸内直喷发动

机燃烧循环变动特性研究 [J]. 内燃机学报, 2005, 23(1): 18-27.

LIU Liangxin, HUANG Zuohua, JIANG Deming, et al. Study on cycle-by-cycle variations in a direct injection natural gas engine [J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(1): 18-27.

- [8] BEN L, CHARNAY G, TRUGUEST R. Influence of air/fuel ratio on cyclic variation and exhaust emission in natural gas SI engine, SAE 992901 [R]. Washington DC, USA: SAE, 1999.
- [9] 李兴虎,蒋德明,沈惠贤. 火花点火发动机压力循环变动的评价方法研究 [J]. 内燃机学报, 2000, 18(2): 171-174.

LI Xinghu, JIANG Deming, SHEN Huixian. Study on evaluated methods of pressure cyclic variation in spark ignition engines [J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(2): 171-174.

- [10] HUANG Bin, HU Erjiang, HUANG Zuohua, et al. Cycle-by-cycle variations in a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(19): 8405-8414.
- [11] 林志强,苏万华,万国强. 柴油引燃天然气发动机着火特性及其影响因素的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(3): 234-238.

LIN Zhiqiang, SU Wanhua, WAN Guoqiang. Study on characteristics of ignition and misfire in the diesel/natural gas dual fuel engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9(3): 234-238.

[本刊相关文献链接]

- 何联格,左正兴,向建华. 气缸盖冷却水腔内两相流动沸腾传热仿真研究. 2013,47(1):21-26.
- 高广新,袁竹林,周阿朋,等. 二甲醚发动机燃料供给系统偶件间隙泄漏测量. 2012,46(11):12-16.
- 赵伟,舒歌群,张韦,等. 富氧燃烧对柴油机低温燃烧反应机理影响的数值分析. 2012,46(3):69-74.
- 盛新堂,高广新,吴国伟,等. 二甲醚发动机燃料喷射过程及其影响因素研究. 2012,46(1):9-12.
- 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.
- 吴东垠,仝利娟,姚季,等. 乳化剂和分散相含量对乳化液黏度的影响. 2010,44(11):6-11.
- 汪映. 二甲醚中巴客车生命周期分析研. 2010,44(1):5-8.
- 朱瑞军,王锡斌,冉帆,等. EGR 和冷 EGR 对柴油机燃烧和排放的影响. 2009,43(9):23-26.

(编辑 苗凌)