

DOI: 10.7652/xjtuxb201401004

含氧燃料添加对引燃式天然气发动机 细颗粒排放的影响

周磊^{1,2}, 宁小康¹, 郑瑜¹, 刘亦夫¹, 曾科¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 吉利汽车动力总成研究院, 715336, 浙江宁波)

摘要: 为了降低柴油引燃天然气发动机的颗粒排放,在改装的柴油机上试验研究了含氧燃料碳酸二甲酯(DMC)添加对柴油引燃天然气发动机燃烧和颗粒排放的影响。通过对比分析不同的含氧燃料掺混比下的燃烧参数和颗粒排放特性发现:随着引燃燃料中 DMC 掺混比的增大,引燃燃料中含氧量(氧的质量分数)的不断增加,滞燃期逐渐推迟,初始燃烧放热率峰值增大,初始燃烧期逐渐延长,总燃烧持续期不断缩短;柴油引燃天然气发动机的颗粒排放呈现单峰分布,随着引燃燃料中含氧量的增加,颗粒数量浓度峰值粒径向大颗粒粒径方向移动,颗粒的数量浓度和质量浓度同时减小,当引燃燃料中含氧量达 20% 时,颗粒质量浓度降幅达 70%,颗粒数量浓度降幅达 86%。因此,引燃燃料中添加含氧燃料 DMC 是一种降低柴油引燃天然气发动机颗粒排放的有效方法。

关键词: 含氧燃料;天然气发动机;柴油引燃;颗粒排放

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0019-06

Effect of Adding Oxygenated Fuel on Particles Emissions of Pilot-Ignited Natural Gas Engine

ZHOU Lei^{1,2}, NING Xiaokang¹, ZHENG Yu¹, LIU Yifu¹, ZENG Ke¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Powertrain Research Institute, Gealy Automotive Co. Ltd., Ningbo, Zhejiang 715336, China)

Abstract: In order to reduce particles emissions of diesel pilot-ignited natural gas engines, the combustion and the particles emissions were experimentally investigated on a pilot-ignited natural gas engine using diesel-dimethyl carbonate (DMC) as the pilot fuel, and the corresponding combustion and emissions characteristics were also analyzed. The results show that an increase in the proportion of DMC in the pilot fuel can increase the oxygen content of pilot fuel, extend the ignition delay period, increase the peak of initial combustion rate and initial combustion period, and shorten the total combustion duration. The particle size distribution is all unimodal. With the increase in the oxygen content of pilot fuels, the peak of particle number concentration moves towards the larger particle size, and the particle number concentration and the particle mass concentration decrease simultaneously. The particle number concentration and the particle mass concentration decrease by up to 70% and 86%, respectively, at the oxygenate mass of 20% in pilot mass and a special load. These results indicate that adding DMC to the pilot fuel is an effective method for reducing particles emissions of diesel pilot-ignited natural gas engines.

收稿日期: 2013-03-15。 作者简介: 周磊(1983—),男,博士生;刘亦夫(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家“973 计划”资助项目(2011CB707200)。

网络出版时间: 2013-10-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131017.0814.002.html>

Keywords: oxygenated fuel; natural gas engine; diesel pilot-ignition; particles emission

天然气丰富的储量、良好的抗爆性、低廉的价格被认为是最具前途的发动机代用燃料,随着“页岩气革命”的到来,天然气的价格优势将进一步扩大^[1],这进一步推动了天然气发动机的研究和应用。

天然气以甲烷为主,分子结构中不含 C—C 键,可实现无烟燃烧;天然气中碳氢质量比为 1 : 4,燃用它可大幅降低 CO₂ 排放。天然气拥有较高的辛烷值和良好的抗爆性,可应用于压燃式发动机,以获取更高的燃料转化效率,但其自燃温度较高,难以压燃着火。目前,便捷可行的着火方式是以少量的柴油作为初始着火资源,来引燃预混的天然气空气混合气,实现多点同时着火,即柴油引燃天然气^[2]。这种燃烧方式见效快、成本低,可灵活调节燃料比例,实现匹敌于柴油机的有效热效率,同时大幅降低 NO_x 和碳烟排放^[3-4],因此受到国内外的广泛关注。但是,这种燃烧方式在降低排放颗粒质量的同时却增加了细颗粒(粒径 $D_p \leq 2.5 \mu\text{m}$,即 PM_{2.5})数量的排放,出现了“以颗粒质量换颗粒数量”的现象。

针对柴油引燃天然气发动机细颗粒排放的问题,作者曾提出采用热废气再循环(EGR)方法来降低颗粒排放^[5],但采用该方法将引起颗粒质量浓度小幅增加,而相关的研究表明,在柴油中添加部分种类的含氧燃料(含氧添加剂)能够大幅降低柴油机碳烟排放^[6-9]。碳酸二甲酯(DMC)含氧量(氧的质量分数)高达 53.3%,无毒、无腐蚀性、不易挥发,常温下可与柴油互溶^[7],燃用柴油-DMC 无需硬件修改,生产成本较低,具有能改善缸内燃烧、大幅降低碳烟排放等优点,被认为是一种良好的含氧添加剂。有关 DMC 对柴油机细颗粒排放影响的研究较少,Cheung 等发现,柴油中添加 DMC 有助于降低柴油机细颗粒的排放^[10]。柴油机与柴油引燃天然气发动机在燃料种类、燃烧方式和排放特点方面存在差异^[4,11-12],因此本文提出采用添加 DMC 的方法来实现柴油引燃天然气发动机低颗粒排放,并探讨这一方法的可行性和效果。

1 试验装置和方法

1.1 试验设备和燃料

试验用柴油引燃天然气发动机是由单缸柴油机改装而成,在保持原柴油机的基础上添加了一套天然气供给系统,该系统由高压气瓶、加气阀、压缩天然气(CNG)减压装置、CNG 控制步进电机(调节气

量)和天然气空气混合器组成。图 1 为试验台架示意图,发动机主要技术参数如表 1 所示。试验用天然气为陕北天然气,甲烷的体积分数可达 96.6%,柴油采用标准 0 号柴油。

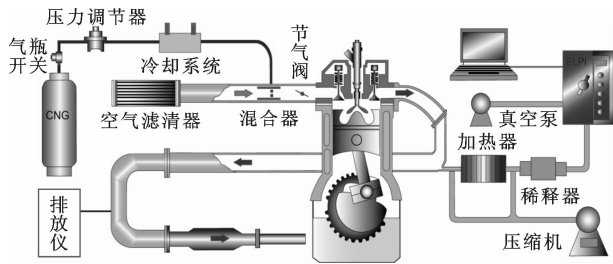


图 1 试验台架示意图

试验所用颗粒分析仪器为芬兰 DEKATI 公司的静电低压撞击器(ELPI),其稀释系统采用两级稀释系统(DI-2003),稀释比为 64 : 1。该仪器可测量粒径分布在 7 nm~10 μm 间的颗粒。ELPI 中的串级冲击式采样器利用颗粒的惯性、按照动力学粒径将颗粒分为 12 级。试验所用的稀释和采样方法可参见文献^[13]。由于柴油引燃天然气发动机的排放颗粒物较小,因此本文主要关注 PM₁($D_p < 1 \mu\text{m}$)的颗粒排放,试验中的采样级数为 1~8。

表 1 发动机技术参数

参数	数值	参数	数值
缸径/mm	100	压缩比	8
冲程/mm	120	喷射压力/MPa	20
额定转速/r · min ⁻¹	2 000	喷射时刻/(°)	10
功率/kW	10		

1.2 试验方案

引燃式天然气发动机的引燃油量和喷射时刻对颗粒排放影响较大,因此在研究 DMC 对柴油引燃天然气的影响之前,需要确定讨论的基础,即基本引燃油量^[3,5]。基本引燃油量是指在仅柴油参与燃烧的情况下,发动机某一固定转速零扭矩输出所需的燃油量,此时柴油燃烧仅用于克服机器本身的损耗,而发动机的动力输出仅依靠增加的天然气量。

通常,增加引燃油量将导致滞燃期缩短,颗粒数量浓度降低,颗粒质量浓度增加;推迟引燃燃料喷射时刻将导致滞燃期缩短,燃烧放热率曲线从单峰向双峰转变^[11],颗粒数量浓度降低,颗粒质量浓度增加。相关的研究表明,柴油机燃用柴油-DMC 混合

燃料会延长滞燃期,增加预混燃烧比例^[8,10]。在柴油-DMC 引燃天然气中,为了消弱 DMC 对滞燃期的影响,更好地研究 DMC 在降低颗粒排放方面的潜力,应适当增加引燃油量和推迟喷射时刻。因此,本试验在维持发动机转速 1600 r/min、固定基本引燃油量 8 g/min 和喷射时刻 10°下,通过增加天然气量来实现发动机不同负荷(平均有效压力 0.14、0.28、0.42 MPa)下的稳定运转。试验用燃料为 0 号柴油和 4 种不同掺混比的柴油-DMC 混合燃料,混合燃料中含氧量分别为 0%、5%、10%、15%、20%,分别称为 0% DMC、5% DMC、10% DMC、15% DMC、20% DMC,3 种负荷下 8 g/min 柴油引燃油占总燃料的能量比分别为 31%、22%、16%。随着引燃油量中含氧量从 0%增加至 20%,该引燃油量占总燃料的比例逐渐降低,降幅在 3%之内。当含氧量为 20%时,3 种负荷下引燃油量占总燃料的比例分别为 28%、20%、14%。试验水温 and 润滑油温度分别为 70 ℃和 80 ℃且保持不变。本试验所获数据均为稳态数据。

2 试验结果和分析

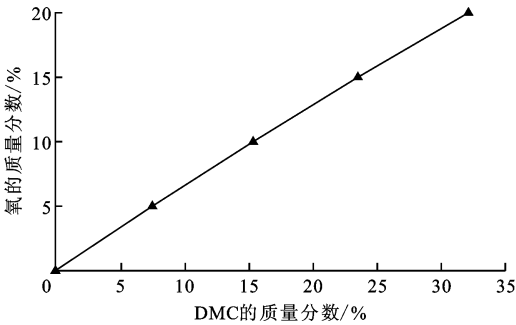
2.1 含氧量对燃烧特性的影响

引燃式天然气发动机的燃烧方式有别于传统柴油机和汽油机^[4,14],对其进行分析将有助于解释和分析颗粒排放特点。

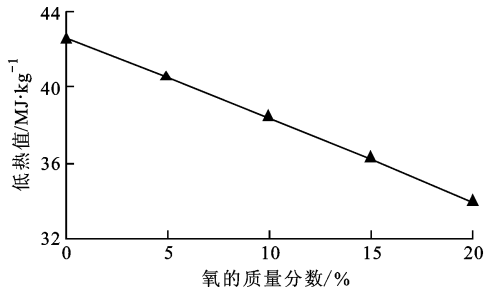
图 2 为引燃燃料的物性(含氧量、低热值、十六烷值、汽化潜热),图 3 为平均有效压力为 0.28 MPa 时含氧量对燃烧放热率的影响。随着引燃燃料中含氧量的增加,滞燃期逐渐延长,初始燃烧放热明显加强,总燃烧持续期不断缩短。这主要是随着引燃燃料中 DMC 比例的增加,引燃燃料的十六烷值逐渐降低(见图 2c),燃料滞燃期延长,相较柴油,DMC 具有较低的黏度和沸点及较高的蒸气压力,使得直喷时液体燃料雾化效果提升,柴油-DMC 与天然气-空气混合气的均匀性增强。

图 4 为引燃燃料中含氧量对最高燃烧温度的影响。引燃燃料中 DMC 的质量分数的增加对缸内最高燃烧温度的影响较小。引燃燃料中含氧量低于 15%时,最高燃烧温度略微增加,其最大增幅约 5%;引燃燃料中含氧量为 20%时,最高燃烧温度略有降低,但仍与引燃燃料中含氧量为 0 时的最高燃烧温度基本持平。其原因是:①引燃燃料中含氧量增加,缸内工质获氧的能力增强(平均有效压力为 0.14 MPa、引燃燃料中含氧量从 0%增加到 20%

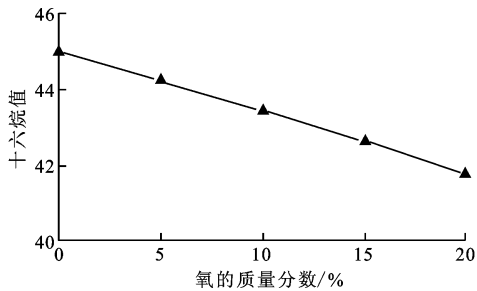
时,过量空气系数由 2.8 增至 3.2),燃料充分燃烧,所以缸内燃烧温度升高;②滞燃期延长,缸内工质混合均匀性提高,初始着火点数量增多,着火位置分布更广,所以缸内燃烧温度升高;③引燃燃料中 DMC 比例增加,引燃燃料的汽化潜热增大(见图 2d),燃烧过程中燃料吸热增加,缸内燃烧温度降低,但由于 DMC 占总燃料的比例较小,因此汽化潜热的增加对



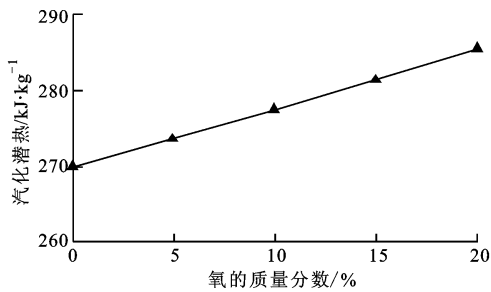
(a) 含氧量



(b) 低热值



(c) 十六烷值



(d) 汽化潜热

图 2 引燃燃料的物性

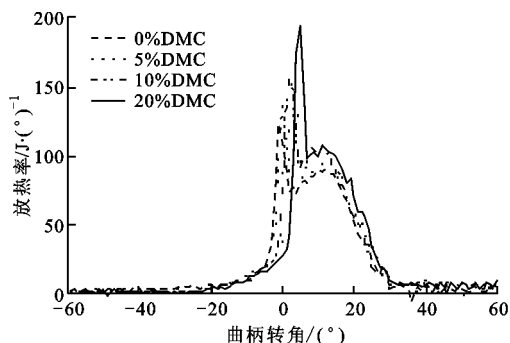


图3 平均有效压力为 0.28 MPa 时含氧量对燃烧放热率的影响

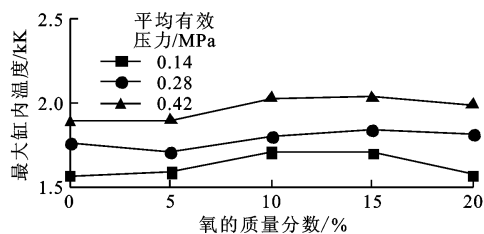


图4 引燃燃料中含氧量对最高燃烧温度的影响

降低缸温的影响有限;④滞燃期延长,燃烧始点推后,燃烧主体进入膨胀行程,相较于 0%DMC,20%DMC 的滞燃期推迟约 8° (见图 3),此时燃烧主体完全进入膨胀行程,燃烧温度开始下降。在上述因素的共同作用下,缸内最高燃烧温度的变化较小。

2.2 含氧量对颗粒排放的影响

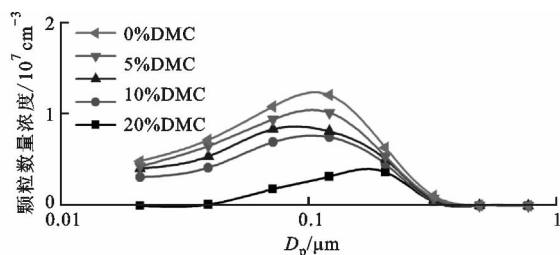
图 5、6 分别展示了含氧量对柴油引燃天然气发动机排放的颗粒数量浓度和质量浓度的影响。发动机排放的颗粒数量浓度和质量浓度均呈现单峰分布,数量浓度峰值粒径在 100 nm 附近,质量浓度峰值粒径在 200 nm 附近。随着引燃燃料中含氧量的增加,排放的颗粒数量浓度和质量浓度同时降低,无论是核模态颗粒($D_p < 50$ nm)还是积聚模态颗粒($50 \text{ nm} < D_p < 1\ 000$ nm),均随含氧量的增加而降低。在 0.42 MPa 的平均有效缸内压力下,PM1 颗粒数量浓度降幅最高达 86%,颗粒质量浓度降幅可达 70%,可见随着负荷的增加,颗粒粒径逐渐增大(见图 5)。

核模态的颗粒成因相对较复杂,通常认为是燃烧室内的一次碳粒(初级颗粒),以及硫酸或者 HC 等前体物在排放稀释过程中成核形成的二次颗粒物^[15]。积聚模态颗粒主要是柴油或者润滑油经过不完全燃烧产生的一次碳粒($D_p \approx 2$ nm)聚积成团,并凝结吸附 HC 或者硫化物等挥发、半挥发物形成的^[16]。

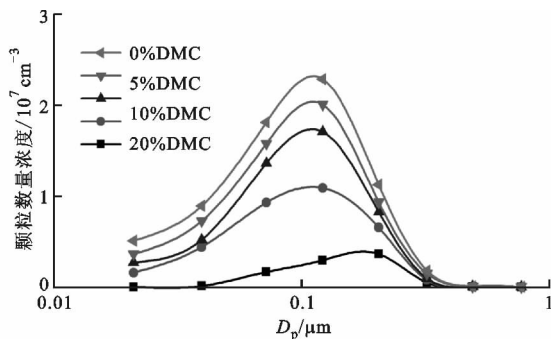
根据柴油机颗粒生成历程^[17],在燃烧初期颗粒

已经形成,其生成、生长、氧化过程是颗粒生成作用和颗粒氧化作用相互竞争的过程。颗粒的大小、数量和质量与燃料种类及着火前混合物的均匀性(预混率)密切相关。因正庚烷的物理化学特性接近柴油,黄等人研究发现,随着正庚烷预混率的提高,核模态颗粒数量浓度逐渐升高,积聚模态颗粒数量浓度逐渐降低^[18]。姚等人对含氧燃料甲醇-柴油(中低预混率或替代率)研究发现,随着甲醇-柴油的预混率提高,核模态和积聚模态的颗粒数量浓度、质量浓度降低^[19]。

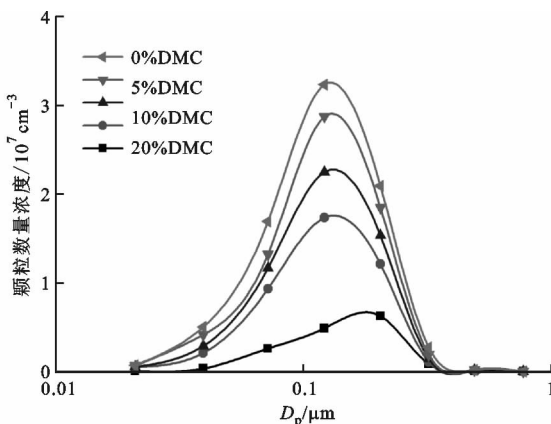
对于柴油-DMC 引燃天然气发动机,随着引燃燃料中 DMC 比例的增加,核模态和积聚模态的颗



(a) 平均有效压力为 0.14 MPa

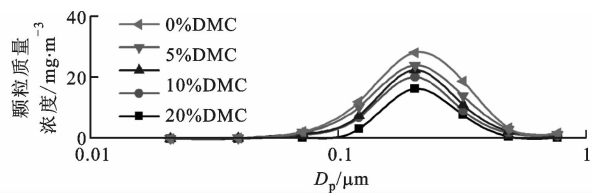


(b) 平均有效压力为 0.28 MPa

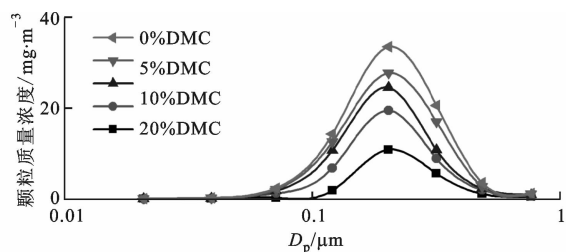


(c) 平均有效压力为 0.42 MPa

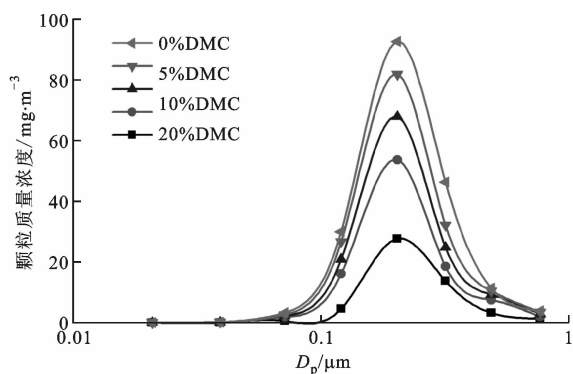
图5 含氧量对柴油引燃天然气发动机排放的颗粒数量浓度的影响



(a) 平均有效压力为 0.14 MPa



(b) 平均有效压力为 0.28 MPa



(c) 平均有效压力为 0.42 MPa

图 6 含氧量对柴油引燃天然气发动机排放的颗粒质量浓度的影响

粒数量浓度和质量浓度同时降低。其主要原因有以下几个方面:①引燃燃料中 DMC 比例增加,滞燃期延长(见图 3),缸内工质混合均匀性增强,燃料充分燃烧,一次碳粒(颗粒先导物)生成量减少,一次碳粒积聚成团生成积聚模态颗粒和成核形成核模态颗粒的数量降低;②DMC 比例增加,引燃燃料中含氧量增大,缸内工质获氧的能力增强,颗粒的氧化作用加强,颗粒数量降低;③引燃燃料中含氧量增至 20% 时,引燃燃料占总燃料的比例出现了 2% 的降幅,预混率小幅提升,总燃料的含碳量小幅降低。上述原因加之 DMC 不含 C—C 键,这些有利因素在一定程度上抑制了颗粒的生成。

3 结 论

本试验研究了含氧燃料中 DMC 的添加对引燃式天然气发动机燃烧和颗粒排放的影响。研究发

现,随着引燃燃料中含氧量的增加,滞燃期逐渐延长,初始燃烧放热率提高,总燃烧期逐渐缩短。

柴油引燃天然气发动机排放的颗粒数量浓度和质量浓度均呈现单峰分布。颗粒数量浓度峰值粒径在 100 nm 附近,质量浓度峰值粒径在 200 nm 附近。随着引燃燃料中含氧量的增加,颗粒数量浓度和质量浓度同时降低。当引燃燃料中含氧量为 20% 时,颗粒数量浓度降幅最高达 86%,颗粒质量浓度降幅最高达 70%。因此,引燃柴油中添加 DMC 是一种降低柴油引燃天然气发动机排放颗粒数量浓度和质量浓度的有效方法。

参考文献:

- [1] BP Company. BP statistical review of world energy [EB/OL]. [2013-02-20]. http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2012.pdf. 2012. 7.
- [2] SRINIVASAN K K, KRISHNAN S R, MIDKIFF K C. Improving low load combustion, stability and emissions in pilot-ignited natural gas engines [J]. Proceedings of IMechE; Part D Journal of Automobile Engineering, 2006, 220(2): 229-239.
- [3] PAPAGIANNAKIS R G, HOUNTALAS D T. Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(18/19): 2971-2987.
- [4] 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): 7-12.
YAO Chunde, LIU Zengyong, GAO Cangqin. Mechanism on distribution of pilot fuel spray and compressing ignition in premixed natural gas engine ignited by pilot diesel [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(1): 7-12.
- [5] ZHOU L, LIU Y, SUN L, et al. Effect of hot exhaust gas recirculation on the combustion characteristics and particles emissions of a pilot-ignited natural gas engine, SAE 2013-01-1341 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2013.
- [6] LU X C, YANG J G, ZHANG W G, et al. Improving the combustion and emissions of direct injection compression ignition engines using oxygenated fuel additives combined with a cetane number improver [J]. Energy & Fuels, 2005, 19(5): 1879-1888.

- [7] ZHAO X, REN M, LIU Z. Critical solubility of dimethyl ether diesel fuel and dimethyl carbonate diesel fuel [J]. *Fuel*, 2005, 84(18): 2380-2383.
- [8] HUANG Z H, JIANG D M, ZENG K, et al. Combustion characteristics and heat release analysis of a direct injection compression ignition engine fuelled with diesel-dimethyl carbonate blends [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part D Journal of Automobile Engineering*, 2003, 217(D7): 595-605.
- [9] ARTECONI A, MAZZARINI A, DI NICOLA G. Emissions from ethers and organic carbonate fuel additives; a review [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2011, 221(1/2/3/4): 405-423.
- [10] CHEUNG C S, ZHU R J, HUANG Z H. Investigation on the gaseous and particulate emissions of a compression ignition engine fueled with diesel-dimethyl carbonate blends [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(3): 523-529.
- [11] ISHIYAMA T, KANG J, OZAWA Y, et al. Improvement of performance and reduction of exhaust emissions by pilot-fuel-injection control in a lean-burning natural-gas dual-fuel engine [J]. *SAE International Journal of Fuels Lubrication*, 2011, 5(1): 243-253.
- [12] AZIMOV U, TOMITA E, KAWAHARA N, et al. Premixed mixture ignition in the end-gas region (PREMIER) combustion in a natural gas dual-fuel engine: operating range and exhaust emissions [J]. *International Journal of Engine Research*, 2011, 12(5): 484-497.
- [13] TSOLAKIS A, HERNANDEZ J J, MEGARITIS A, et al. Dual fuel diesel engine operation using H_2 . effect on particulate emissions [J]. *Energy & Fuels*, 2005, 19(2): 418-425.
- [14] 林志强, 苏万华, 王国祥. 柴油引燃天然气发动机着火特性及其影响因素的研究 [J]. *燃烧科学与技术*, 2003, 9(3): 234-238.
- LIN Zhiqiang, SU Wanhua, WANG Guoxiang. Study of 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.
- [15] KITTELSON D B. Engines and nanoparticles: a review [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, 29(5/6): 575-588.
- [16] SCHNEIDER J, HOCK N, WEIMER S, et al. Nucleation particles in diesel exhaust: composition inferred from in situ mass spectrometric analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(16): 6153-6161.
- [17] LI Z, SONG C L, SONG J O, et al. Evolution of the nanostructure, fractal dimension and size of in-cylinder soot during diesel combustion process [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(8): 1624-1630.
- [18] 刘炜, 黄震. 不同燃烧模式下正庚烷燃烧发动机排气超细颗粒特性 [J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(6): 837-841.
- LIU Wei, HUANG Zhen. Effects of combustion modes on exhaust particle size distributions from a diesel engine fueled with n-Heptane [J]. *Transactions of CSICE*, 2003, 45(6): 837-841.
- [19] 姚春德, 张志辉, 张丰顺. 柴油甲醇组合燃烧发动机的微粒排放及催化转化特性 [J]. *内燃机学报*, 2010, 28(6): 494-499.
- YAO Chunde, ZHANG Zhihui, ZHANG Fengshun. Emissions and oxidation characteristics of particulate from a diesel/methanol compound combustion engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2010, 28(6): 494-499.

[本刊相关文献链接]

- 孙璐, 刘亦夫, 周磊, 等. 排气再循环下柴油引燃天然气发动机循环变动特性研究. 2013, 47(3): 36-41. [doi:10.7652/xjtuxb201303007]
- 刘亦夫, 刘兵, 刘亮, 等. 天然气缸内直喷发动机在不同喷射和点火时刻下的排放与燃烧特性. 2011, 45(5): 12-16. [doi:10.7652/xjtuxb201105003]
- 姜雪, 胡二江, 巩静, 等. 天然气掺氢配合废气再循环发动机的性能及排放研究. 2009, 43(5): 18-21. [doi:10.7652/xjtuxb200905004]
- 王婕, 黄佐华, 刘兵. 天然气掺氢配合废气再循环发动机燃烧过程的数值模拟. 2009, 43(5): 22-25. [doi:10.7652/xjtuxb200905005]
- 魏衍举, 汪文瑞, 黄瑾, 等. 柴油机颗粒物可溶有机组分来源研究. 2013, 43(5): 6-11. [doi:10.7652/xjtuxb201305002]
- 刘兵, 黄佐华, 曾科, 等. 天然气掺氢火花点火式发动机排放性能研究. 2008, 42(2): 243-247. [doi:10.7652/xjtuxb200802026]

(编辑 苗凌)