

DOI: 10.7652/xjtuxb201703006

聚甲氧基二甲醚及其高比例掺混柴油混合燃料 发动机燃烧与排放的试验研究

谢萌, 马志杰, 王全红, 刘建超, 刘圣华
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为研究聚甲氧基二甲醚(PODE)及其高比例掺混柴油混合燃料对发动机燃烧与排放的影响,在一台高压油泵柱塞直径加大的云内动力 2102QB 柴油机上开展了柴油、PODE 及 30%、50% 质量比掺混柴油混合燃料的燃烧与排放试验研究。发动机燃用纯 PODE 时排气无烟,相对于柴油,其有效热效率最高提升 9.67%,并使总未燃碳氢(THC)和 CO 排放分别降低了 50%及 60%,而 NO_x 排放增加不超过 10%,因此 PODE 可以单独作为柴油的替代燃料。30%、50%掺混时发动机经济性略有提升,同时排气烟度及 CO、THC 排放均有较大幅度的改善。缸压分析燃烧过程显示,柴油中添加 PODE 后燃烧性能改善,滞燃期和燃烧持续期略微缩短,发动机的有效热效率提高。研究结果还表明,PODE 与柴油按质量比 30%掺混,可以显著降低排气烟度和有害气体排放,而不需要改变发动机的燃油供给系统。

关键词: 聚甲氧基二甲醚;柴油机;燃烧;排放

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)03-0032-06

Investigation of Engine Combustion and Emission Performance Fuelled with Neat PODE and PODE/Diesel Blend

XIE Meng, MA Zhijie, WANG Quanhong, LIU Jianchao, LIU Shenghua
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the combustion and emission performance of neat polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE) and PODE/diesel blends, experiments are conducted in a modified diesel engine. It is found that compared with diesel, neat PODE leads to a smokeless operation to heightens the thermal efficiency by 9.67% under full-load conditions. NO_x emission increases less than 10%, while the emissions of THC and CO are lowered by 50% and 60%, the neat PODE can thus be used alone instead of diesel in modified diesel engines. The engine running on 30% PODE/diesel and 50% PODE/diesel can obtain better thermal efficiency and lower emissions than pure diesel. Analyzing cylinder pressure, it is found that adding PODE decreases ignition delay and improves combustion processes in the engine cylinder. The results also indicate that low fraction adding of PODE (30%) into diesel can be used directly in diesel engines without modification for the supply system structure.

Keywords: polyoxymethylene dimethyl ethers; diesel engine; combustion; emission

柴油机含氧燃料一直是内燃机清洁替代燃料的研究重点,对于常见的含氧替代燃料包括醇类、醚类和酯类等的研究表明,柴油机颗粒物(PM)的排放随着含氧量的增加而下降,其他方面的性能随着含氧替代燃料的化学结构、挥发性的不同而不同^[1-2]。醇类燃料以甲醇、乙醇和丁醇为代表,但甲醇和乙醇在柴油中溶解性很差,却能与水以任意比例互溶,易造成掺混燃料的相分离,丁醇的互溶性较好,但其应用受制于来源和低的十六烷值^[3]。脂肪酸甲酯(FAME)生物柴油为酯类生物替代燃料的代表,具有十六烷值和含氧量高、不含硫等特点,但其稳定性和低温流动性较差,只能与石化柴油低比例掺混使用^[4]。醚类燃料的研究目前集中在二甲醚(DME)和二甲氧基甲烷(DMM,别名亚甲基二甲醚、甲缩醛)上,DME的主要问题是常温下为气态,DMM的主要问题是十六烷值低且润滑性较差^[5]。上述典型含氧燃料中除一定比例的 FAME 可直接应用外,其他含氧替代燃料很难在没有改造的柴油机上直接应用。

聚甲氧基二甲醚(PODE)的分子式为 $\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_3$,其中 $n=1$ 时为 DMM,故 PODE 也常缩写成 DMM_n 。表 1 列出了部分可作为柴油机替代燃料的 PODE 的理化特性,其兼具含氧量高和十六烷值高的特点。常温 20℃ 下 PODE 为液态,可以任意比例与柴油互溶^[6],是柴油机较为理想的替代燃料。

表 1 柴油、DMM 与 PODE 的物性^[5]

物性	柴油	DMM	PODE ₂	PODE ₃	PODE ₄
$\rho/\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.83	0.86	0.96	1.024	1.067
十六烷值	≥ 51	29	63	70	90
黏度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	3.16	0.58	0.64	1.05	1.75
$w(\text{O})/\%$	0.05	42.1	45.3	47.1	48.2
熔点/℃		-105	-70	-43	-10
沸点/℃		42	105	156	201

PODE 来源十分广泛,可通过甲醇和甲醛反应得到,甲醇和甲醛反应生成甲缩醛,甲缩醛再与甲醇发生亲核加成反应生成二聚体,二聚体再与甲醇反应生成三聚体,并以此类推^[7]。中国科学院兰州化学物理研究所开发出了以甲醇为原料、离子液体为催化剂、经三聚甲醛合成 $\text{PODE}_{3\sim 8}$ 的技术,建成并投产了全球首套年产万吨 $\text{PODE}_{3\sim 8}$ 的工业生产装置^[8],这使得 PODE 的大规模应用成为可能。

目前,国内外关于 PODE 作为柴油添加剂的研究还比较少。2013 年,Leonardo 等人在一台欧 2 标

准的轻型柴油车上使用掺混体积比 10%PODE 的柴油,可使 PM 质量排放量降低 18%,而燃用纯的 PODE 可使 PM 质量排放量降低 77%,从而达到欧 4 标准^[9]。2014 年,Leonardo 等人又在一台欧 3 轻型柴油机上研究了掺混体积比 7.5%PODE 的柴油的非常规多环芳烃(PAH)排放和颗粒物粒径的分布^[10]。

国内清华大学的王志和北京航空航天的杨皓做过相关研究,但他们只研究了小比例(体积比不超过 20%)PODE 与柴油掺混对柴油机性能的影响^[11-12]。大比例掺混 PODE 或直接使用纯的 PODE 理论上有很大的改善发动机性能的优势,因此,本文选择研究 PODE 及其与柴油高比例掺混对柴油机燃烧与排放性能的影响,为 PODE 作为柴油替代燃料应用提供发动机的试验数据。

1 试验燃料及台架设备

1.1 试验燃料

试验中使用的 4 种燃料由柴油和 PODE 配制而成,其中柴油是在西安市加油站购买的 0 号国 4 标准柴油,PODE 由山东玉皇集团提供,PODE₂、PODE₃、PODE₄ 三者质量比为 2.553:88.9:8.48,实测低热值为 19.6 MJ/kg。PODE 与柴油分别按照质量比 3:7 和 5:5 配制两种燃料,分别命名为 P30 和 P50,而纯柴油及 PODE 分别命名为 P0 和 P100。

1.2 试验台架及设备

试验在经过改装的云内动力 2102QB 型柴油机上完成,2102QB 为立式、两缸、四冲程、强制水冷、自然吸气、直喷式柴油机,技术参数见表 2,其中括号内的柱塞直径为原机参数。由于 PODE 热值低,大比例掺混或使用纯的 PODE 时必须加大供油量,因此将柱塞直径加大。

表 2 发动机主要性能和结构参数

参数	数值
缸径/mm	102
冲程/mm	115
排量/ cm^3	1 880
压缩比	17.5
$2\ 600\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 额定功率/kW	26.1
柱塞直径/mm	10.5(8.5)
喷嘴孔数	4
喷嘴孔径/mm	0.27
供油提前角/(°)	25

图1为试验台架结构。试验中使用的主要测试仪器有:西门子FC300科里奥利式质量流量计,奇石乐7061B型水冷压电晶体式缸压传感器,Horiba MEXA-7100 DEGR 气体分析仪,Horiba MEXA-600S 不透光式烟度计。

试验采用最大转矩转速1 500 r/min和额定转速2 600 r/min下的负荷特性来比较P0、P30、P50、P100这4种燃料的发动机燃烧与排放特性。

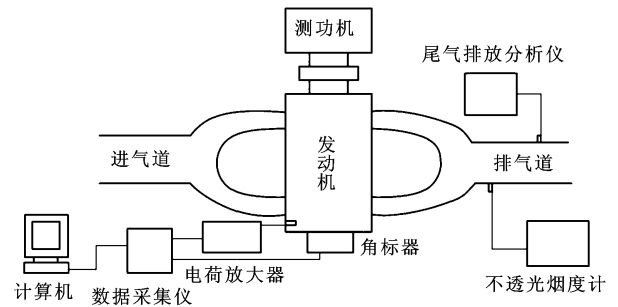


图1 发动机试验台架结构简图

2 PODE对缸内燃烧过程的影响

通过分析采集到的缸内压力,可以获得燃烧过程特性参数变化,掌握PODE对燃烧过程的影响。图2为对应原机最高转矩工况(1 500 r/min,0.675 MPa 平均有效制动压力)下采集到的缸内压力随发动机曲轴转角的变化。在此工况下,发动机燃用柴油时的缸内最高压力在8.7 MPa左右,出现在上止点后7°附近。掺混PODE后,P30、P50和P100的缸内最高压力略有上升,但整体变化不大。

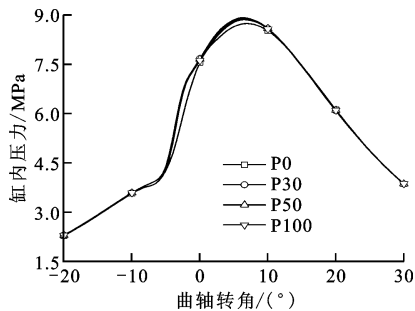
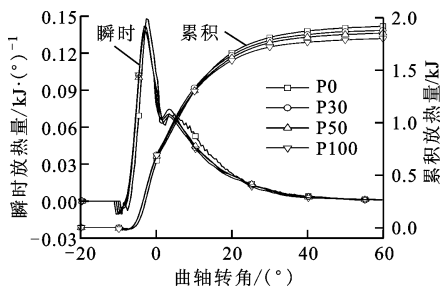


图2 最高转矩工况下缸内压力随曲轴转角的变化

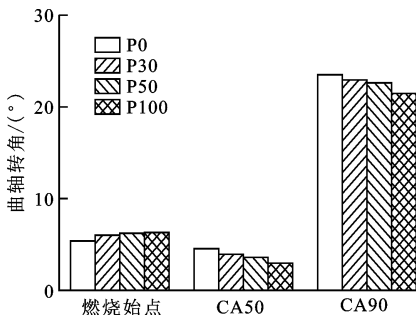
通过对缸内压力的数据处理,可以获得滞燃期、燃烧持续期、放热率等燃烧过程特征参数。图3a为图2工况下的瞬时放热量和累积放热量曲线。由图可见,发动机放热呈现典型的双峰放热模式,第一峰为预混燃烧放热,第二峰为扩散燃烧放热,且预混燃烧放热较多。掺混PODE后,燃烧略微提前,主要由PODE高的十六烷值和良好的蒸发雾化特性引起。掺混PODE后,累积放热量下降,且随着掺混

比例的增加,累积放热量下降量增大。这表明掺混PODE有助于改善有效热效率,该结论将在下文经济性讨论中得到进一步验证。除了以上区别外,4种燃料的放热规律基本一致,表明掺混PODE后对燃烧过程的影响并不显著。

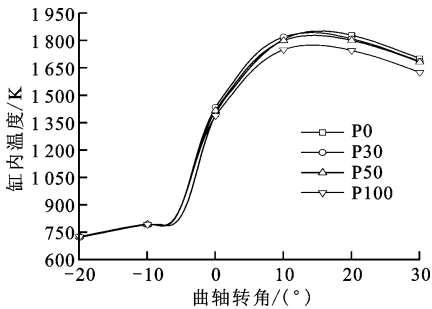
PODE对燃烧过程的影响还可以从燃烧特征时刻进行分析,见图3b,图中燃烧始点定义为累计放热率达到2%的时刻,CA50和CA90点分别为累计放热率达到50%和90%的时刻,燃烧始点对应上止点前,CA50、CA90对应上止点后。由图2b可见,相比于柴油,P30、P50和P100的燃烧始点分别提前0.6°、0.8°和0.9°。PODE含量的增加也使CA50和CA90对应的曲轴转角略微提前1°~2°,表明掺混PODE后燃烧持续期缩短,放热更加集中。



(a)瞬时放热量及累积放热量



(b)燃烧时刻



(c)缸内温度

图3 缸内燃烧放热规律

图3c为图2工况下计算得出的缸内温度变化。由图可见:缸内柴油燃烧的最高温度在1 870 K左

右,P30 和 P50 缸内温度曲线与柴油相当;P100 燃烧时缸内温度比柴油低 60 K 左右,原因是 P100 燃烧时循环供油量大,较大的蒸发吸热量使 P100 开始燃烧前缸内温度已经下降了 40 K 左右。

3 PODE 混合燃料经济性比较

虽然 PODE 能够降低有效燃油消耗率,但这并不能抵消其热值低引起的油耗量增加。图 4、5 分别为 1 500 r/min 和 2 600 r/min 在不同负荷时 4 种燃料消耗率的比较。由图 4a、5a 可知:柴油中添加 PODE 会使油耗增加,添加得越多,油耗增加越明显。

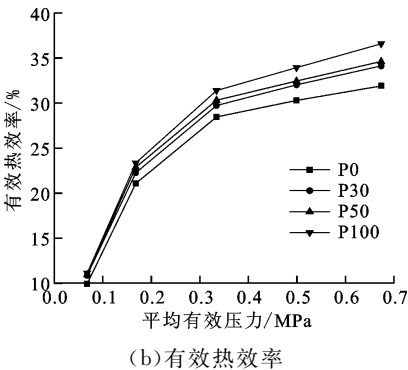
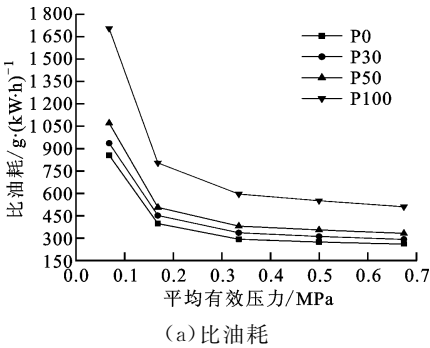


图 4 1 500 r/min 燃油消耗特性比较

在所有工况点上添加 PODE 均能提高有效热效率,添加得越多,提升作用更加明显。例如:在 1 500 r/min、0.674 MPa (BMEP) 时,P30、P50 和 P100 的有效热效率较柴油分别提高 2.23%、2.74% 和 4.70%;在 2 600 r/min、0.571 MPa (BMEP) 时,P30、P50 和 P100 的有效热效率较柴油分别提高 1.5%、3.4% 和 9.67%。这也说明掺混 PODE 在高速、高负荷工况下对有效热效率的提升更加显著。

掺混 PODE 后燃烧持续期缩短,放热更加集中,而较低的缸内温度使得传热损失减小,同时 PODE 的高含氧量又使得燃料燃烧更加完全,综合作用下发动机的有效热效率有所提高。

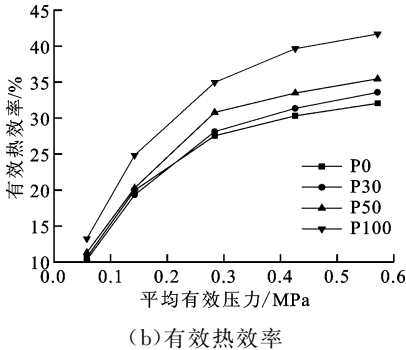
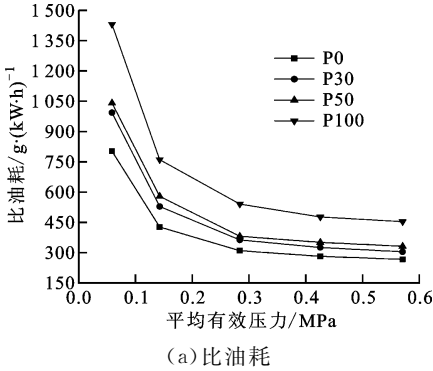


图 5 2 600 r/min 燃油消耗特性比较

4 PODE 对发动机排放的影响

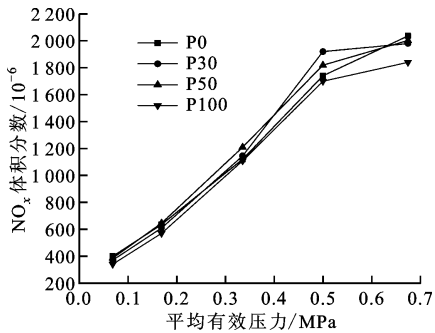
4.1 PODE 对 NO_x 排放的影响

图 6 为 4 种燃料在 1 500 r/min 和 2 600 r/min 工况下的 NO_x 排放情况。可以看出,2 600 r/min 工况下 NO_x 排放整体上要比 1 500 r/min 工况低,原因是 2 600 r/min 下反应时间短。与柴油相比,2 600 r/min 下掺混 PODE 后 NO_x 排放略微升高,1 500 r/min 下掺混 PODE 后 NO_x 排放基本不变。

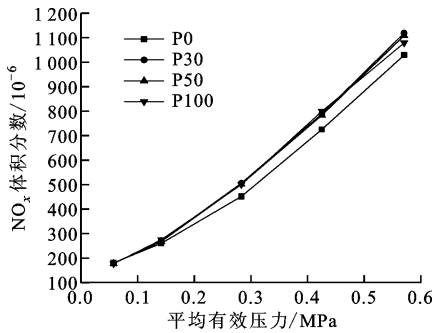
产生 NO_x 的条件是高温、富氧及一定反应时间。掺混 PODE 后燃烧温度略微下降,这将导致 NO_x 排放降低,同时掺混 PODE 得越多,燃烧的高温区域含氧量越多,这将引起 NO_x 排放增加。在 1 500 r/min 转速下,反应时间足够长,以上两种影响同时发挥作用,最终表现为 4 种 PODE 掺混的 NO_x 排放大致相同,而在 2 600 r/min 转速下,反应时间缩短,此时掺混 PODE 引起的含氧量增多占主导作用,从而使 NO_x 排放略微增加。

4.2 PODE 对排气烟度的影响

图 7 为 1 500 r/min 和 2 600 r/min 工况下,4 种燃料对排气不透光度的影响。由图可知:柴油排气烟度主要在高负荷工况下产生,此时掺混质量分数为 30%PODE 在 1 500 r/min 和 2 600 r/min 工况下的排气烟度分别降低 94.6% 和 88.1%,而纯

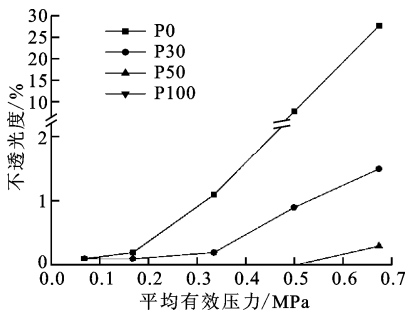


(a) 1 500 r/min

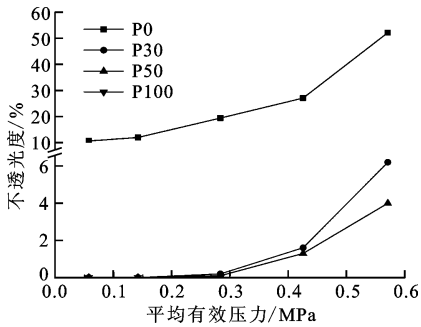


(b) 2 600 r/min

图 6 PODE 对 NO_x 排放的影响



(a) 1 500 r/min



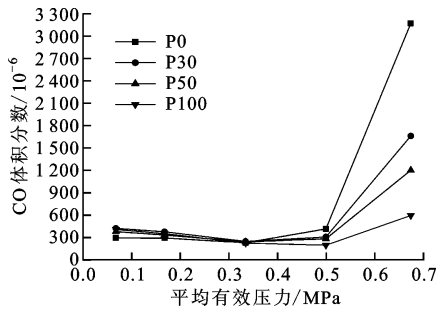
(b) 2 600 r/min

图 7 PODE 对排气不透光度的影响

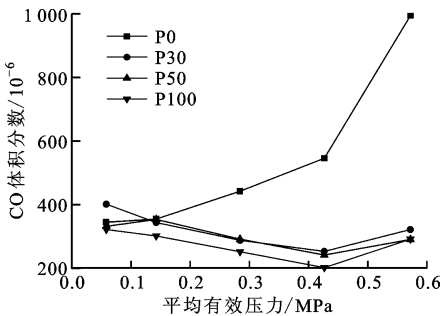
PODE 的排气烟度趋于 0。燃料含氧将大大改善柴油机扩散燃烧过程中偏浓区域的燃烧状况,PODE 分子均为碳氧键相连,燃烧过程中不会产生碳烟,这两方面的因素均使掺混 PODE 后发动机的排气烟度得到极大改善。

4.3 PODE 对 CO 排放的影响

图 8 为 2 种转速下的 CO 排放情况。可以看出:低速、中小负荷下 4 种燃料的 CO 排放相差不大,而低速全负荷时 P30、P50、P100 能使 CO 排放分别降低 47.5%、61.9%和 81.0%;高速、小负荷下 4 种燃料的 CO 排放也相差不大,而在高速、中高负荷下掺混质量分数为 30%的 PODE 可使 CO 排放平均降低 50%。



(a) 1 500 r/min



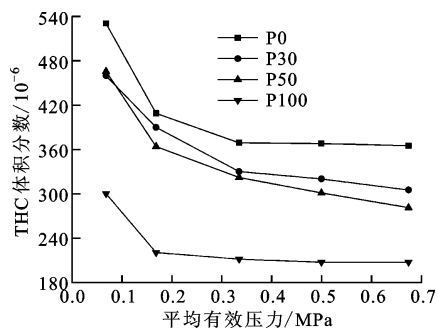
(b) 2 600 r/min

图 8 PODE 对 CO 排放的影响

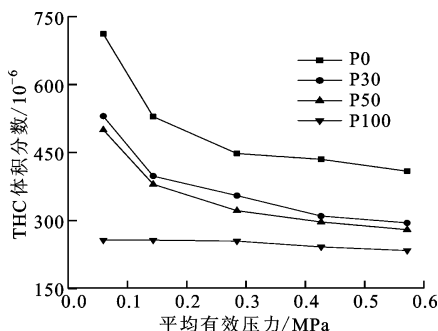
CO 排放是燃烧反应缺少氧气或反应温度较低造成的。在柴油机燃烧过程中,宏观过量空气系数非常大,所以柴油机的 CO 排放并不大,但当负荷较高时,扩散燃烧致使燃烧过程中缺氧,导致 CO 排放量迅速增大。PODE 自身含氧,添加 PODE 后改善了燃烧室中扩散燃烧时局部缺氧区域的燃烧状况,从而减少了 CO 排放量。

4.4 PODE 对 THC 排放的影响

图 9 为 2 种转速下的 THC 排放情况。由图可知:在小负荷下 THC 生成量较多,添加 PODE 之后能降低 THC 排放;PODE 的 THC 排放保持在一个较低的水平,大概为柴油的 1/2。柴油机的 THC 排放主要来自于喷油油束外围形成的过稀混合气,加入 PODE 后十六烷值增大,着火性能提高,滞燃期缩短,过稀混合区域减小,从而降低了 THC 排放。



(a) 1 500 r/min



(b) 2 600 r/min

图9 PODE对THC排放的影响

5 结 论

在一台柱塞直径加大的柴油机上进行了PODE及其与柴油高比例掺混的混合燃料发动机试验研究,测量并比较了P0、P30、P50及P100的燃烧、尾气排放、烟度排放及油耗,结论如下。

(1)在增大循环供油量后,柴油机可以使用纯PODE作为燃料,这样有效热效率最高提升了9.67%,并且排气无烟。同时,PODE燃料发动机的THC和CO排放量相对于柴油分别降低了约50%、60%,而 NO_x 排放量增加不超过10%。

(2)P50的经济性及排放性略微优于P30,两者相差不大,当PODE小比例掺混时可以不改变发动机的供油系统,同时能够获得较好的碳烟、CO及总THC的减排效果。

(3)柴油中添加PODE后,发动机的缸内燃烧过程改善,滞燃期和燃烧持续期缩短,燃烧放热迅速,发动机的有效热效率提高。

参考文献:

- [1] 蒋德明,黄佐华. 内燃机替代燃料燃烧学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007:234-231.
- [2] WANG J X, WU F J, XIAO J H, et al. Oxygenated blend design and its effects on reducing diesel particu-

late emissions [J]. Fuel, 2009, 88: 2037-2045.

- [3] 焦纬洲,许承骋,刘有智,等. 醇类柴油研究进展[J]. 石油学报:石油加工,2014,30(5):945-956.
JIAO Weizhou, XU Chengchi, LIU Youzhi, et al. Research advances in diesel-alcohol blends [J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 2014, 30(5): 945-956.
- [4] ATABANI A E, SILITONGA A S, BADRUDDIN I A, et al. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16: 2070-2093.
- [5] BURGER J, SIEGERT M, STRÖFER E, et al. Poly (oxymethylene) dimethyl ethers as components of tailored diesel fuel: properties, synthesis and purification concepts [J]. Fuel, 2011, 89: 3315-3319.
- [6] 肖潇,郑轶,王云芳,等. 聚甲氧基二甲醚(PODE)与柴油的互溶性研究[J]. 柴油机,2015,37(3):24-28.
XIAO Xiao, ZHENG Yi, WANG Yunfang, et al. Research on compatibility of PODE and diesel fuel [J]. Diesel Engine, 2015, 37(3): 24-28.
- [7] 张建强,唐斌,刘殿华,等. 聚甲氧基二甲醚合成研究现状[J]. 煤化工,2013(1):41-43.
ZHANG Jianqiang, TANG Bin, LIU Dianhua, et al. Research progress of polyoxymethylene dimethyl ethers synthesis [J]. Coal Chemical Industry, 2013(1): 41-43.
- [8] 《天然气化工》编辑部. 全球首套万吨级新型柴油添加剂聚甲醛二甲醚装置投产[EB/OL]. [2016-05-01]. <http://d.wanfangdata.com.cn/periodical/trqhg201304010>.
- [9] PELLEGRINI L, MARCHIONNA M, PATRINI R, et al. Emission performance of neat and blended polyoxymethylene dimethyl ethers in an old light-duty diesel car: 2013-01-1035 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2013.
- [10] PELLEGRINI L, PATRINI R, MARCHIONNA M, et al. Effect of PODE blend on PAH emissions and particulate size distribution from an in-use light-duty diesel engine: 2014-01-1951 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2014.
- [11] 王志,刘浩业,张俊,等. 聚甲氧基二甲醚与柴油混合燃料的燃烧与排放特性[J]. 汽车安全与节能学报,2015,6(2):191-197.
WANG Zhi, LIU Haoye, ZHANG Jun, et al. Combustion and emission characteristics of diesel engines fuelled by polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE_n)

(下转第140页)