

废气再循环对燃用生物柴油发动机排放的影响

楼狄明, 徐 宁, 谭丕强, 胡志远

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于一台匹配冷却废气再循环系统(EGR)的轻型高压共轨柴油机, 试验研究了 EGR 与主喷正时对燃用生物柴油发动机排放特性的影响。结果表明: 外特性下, 燃用生物柴油后, 发动机的氮氧化物(NO_x)排放明显增加, 而总碳氢化合物(THC)排放和超细颗粒排放数量浓度都明显降低。在转速为 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的 25% 负荷下, 随着 EGR 率的增加, NO_x 排放、超细颗粒总数量浓度都明显减少, THC 排放以及燃油消耗率都降低, 而随着主喷的滞后, NO_x 排放和超细颗粒总数量浓度也明显减少, 但燃油消耗率和 THC 排放却增加; 在 50% 负荷, 随着 EGR 率的增大和主喷的滞后, NO_x 排放和超细颗粒总数量浓度也明显减少, 但 THC 排放和燃油消耗率都增加; 主喷正时对超细颗粒数量的影响相对较小。综合考虑排放和燃油经济性, 在 25% 负荷时采用较大 EGR 率(26%)和较早主喷(提前 7.7° 曲轴转角)方案, 而在 50% 负荷时采用中等 EGR 率(18%)和较早主喷(提前 6.3° 曲轴转角)方案。

关键词: 生物柴油; 废气再循环; 主喷正时; 排放特性

中图分类号: TK427

文献标志码: A

Effects of EGR on Emission Characteristics of Low-Duty Engine Fueled with Biodiesel

LOU Diming, XU Ning, TAN Piqiang, HU Zhiyuan

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on a common rail diesel engine with cooling EGR and fueled with biodiesel, an experiment about the coupled effects of EGR and main injection time on engine emissions characteristics was conducted. The results show that at full load, the NO_x emission increases, but THC emission and ultra particulate concentration decrease when the engine is fueled with biodiesel. At a load of 25% and a speed of $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, when the EGR rate increases, NO_x emission, ultra-particulate concentration, THC emission and BSFC (brake specific fuel consumption) decrease. However,

with the main injection time retarded, NO_x emission and ultra-particulate concentration also decrease, but THC emission and BSFC increase. At a load of 25%, with the EGR rate increasing and main injection time retarded, NO_x emission, ultra-particulate concentration decrease, but THC emission and BSFC increase. The effect of main injection time on ultra-particulate concentration is not so significant. Considering both emission and BSFC, at a load of 25%, a 26% of EGR and a main injection time of 7.7° CA BTDC are chosen. At a load of 50%, a 18% of EGR and a main injection time of 6.3° CA BTDC are chosen.

Key words: biodiesel; exhaust gas recirculation (EGR); main inject time; emission characteristics

生物柴油作为一种替代燃料, 与石化柴油相比, 生命周期中 CO_2 净排放量少^[1], 对解决日益严重的化石燃料短缺和温室气体的控制等问题意义重大^[2]。近年来国内外也开展了大量生物柴油在柴油机上应用的研究^[3-6], 证明了生物柴油作为替代燃料的可行性。生物柴油在中国也慢慢从研究探索阶段走向推广应用阶段, 按照 2015 年 5 月发布的《加快成品油质量升级工作方案》, 2016 年 1 月 1 日起, 符合国 V 标准的车用柴油(含 B5 生物柴油)也将在中国东部地区 11 个省市全面供应, 生物柴油被正式纳入中国油品目录。

但国内外研究也发现, 柴油机燃用生物柴油后, NO_x 排放会有所增加^[4-6], 需要通过其他手段来加以控制^[7]。而废气再循环(EGR)是目前降低轻型柴油机 NO_x 排放的最有效的技术手段之一, 且其成本相对选择性催化还原系统(SCR)较低。研究发现 EGR 率的增加可以很好地抑制 NO_x 的排放, 但同时也会使 HC(碳氢化合物)、CO 排放以及碳烟的排放增加^[7-8], 其中碳烟中的吸附有多种具有不同程度的诱

收稿日期: 2015-03-18

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA111720)

第一作者: 楼狄明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为柴油机的结构与性能优化。

E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

变和致癌作用有机物质的超细颗粒可以通过人体的呼吸直达肺部并沉积下来,对人体健康极为不利,且微粒尺寸相对微粒质量危害更严重^[9-10],需要对超细颗粒排放的数量加以控制。

国内外已经研究通过协调喷油策略和 EGR 来控制燃用石化柴油发动机的排放^[7,9-12],在生物柴油方面,Qi 等^[13]研究了主喷正时和 EGR 率对燃用大豆油制生物柴油燃烧和排放的影响,发现随着 EGR 率的增大,燃油消耗率和烟度排放都略有增加,NO_x 排放则明显降低,随着主喷的滞后,燃油消耗率略微增加,NO_x 排放则明显降低,烟度排放则基本不变。Qi 等^[14]的研究则发现主喷正时对 CO,HC 排放的影响不明显,而 NO_x 排放则随着主喷的滞后明显减小,而随着 EGR 率的增大,CO 和 HC 排放明显增加,NO_x 排放则明显减少,超细颗粒数量浓度也因为废气回流导致聚并作用增加而明显增加。这些都证明在合理的 EGR 率和喷油策略组合下能同时实现在保证动力性经济性的同时,降低相关排放,但这些研究多针对较低喷油压力的重型柴油机。而对燃用生物柴油的轻型柴油发动机,也需针对性地探究 EGR 及喷油参数对其 NO_x 排放和颗粒排放的影响,这对于更好控制燃用生物柴油发动机的排放很有意义^[7]。

1 试验装置及方案

试验燃料包括生物柴油(B100)以及国 V 柴油(D100),其理化特性对比如表 1 所示。可见生物柴油具有密度较小,运动黏度较大、冷滤点高、十六烷值略高、热值较低、含氧量较高等特点。

试验对象为一台排量为 2.5 L 的涡轮增压直列四缸高压共轨柴油机。最大扭矩 330 N·m,对应转速为 2 200 r·min⁻¹,额定功率为 100 kW。使用 Horiba OBS 2000 车载排放分析仪进行 NO_x 及 THC 等气态排放测试,使用 TSI 3090 EEPS 发动机排气粒径分析仪进行超细颗粒粒径分布特性进行测试,其检测粒径范围是 5.6~560.0 nm,包含两种形

表 1 试验用油理化特性

项目	D100	B100
密度@20 °C/(kg·m ⁻³)	821.9	877.3
运动黏度@20 °C/(mm ² ·s ⁻¹)	4.535	6.028
闪点/°C	92.0	>100.0
冷滤点/°C	-34	+4
凝点/°C	-45	+2
十六烷值	52.3	53.4
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	43.96	39.82
碳质量分数/%	86.12	76.04
氢质量分数/%	13.84	12.34
氧质量分数/%	0.35	11.57

态的颗粒:核态颗粒(粒径范围 5~50 nm),主要为在尾气稀释和冷却过程中,挥发性有机化合物和硫酸盐因冷凝成核作用形成的颗粒;聚积态颗粒(粒径范围 50~1 000 nm)^[9-10],主要包括在燃烧过程中形成的碳黑颗粒,也包括其表面吸附的一些挥发性物质^[12]。试验系统具体布置如图 1 所示。

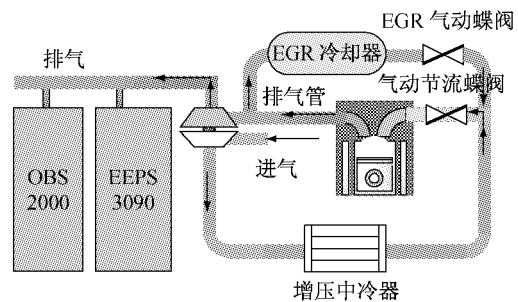


图 1 试验系统布置图

Fig.1 Layout of experiment system

首先进行了轻型柴油机燃用生物柴油和国 V 柴油的排放对比试验。研究表明,一般在中低负荷时使用较大 EGR 率,而在高负荷时为保证动力性经济性不受太大影响,一般不使用 EGR^[15-16]。因此研究只围绕常用的最大转矩转速 2 200 r·min⁻¹ 的 25% 和 50% 负荷两个工况,以原机标定参数为基础,分别设计了针对 EGR 率和主喷正时两个因素的多水平全因子试验,重点研究 EGR 耦合主喷正时对燃用生物柴油轻型柴油机排放特性的影响,试验工况点具体参数如表 2 所示,主喷正时单位为提前上止点(BTDC)的曲轴转角(CA)度数。

表 2 试验工况点分布及特性

Tab.2 Distribution and characteristics of test operating point

工况	转速/(r·min ⁻¹)	负荷/%	EGR 率/%	喷油压力/MPa	主喷提前角/(°)	循环喷油量/mg
1	2 200	25	8,14 ¹⁾ ,20,26,33	108	4.7,5.7,6.7 ¹⁾ ,7.7,8.7	17.6
2	2 200	50	12,18,23 ¹⁾ ,28	110	3.3,4.3,5.3 ¹⁾ ,6.3,7.3	31.9

1) 代表原机。

2 试验结果及分析

2.1 燃用生物柴油对发动机排放的影响

图2为燃用生物柴油对发动机 NO_x 排放和THC排放的影响.从图中可以看出,燃用生物柴油后相对燃用国V柴油,外特性下, NO_x 排放平均增加了16.5%,而THC排放则平均降低了21.6%.这主要是因为生物柴油分子内含氧,导致燃烧比较充分^[5].

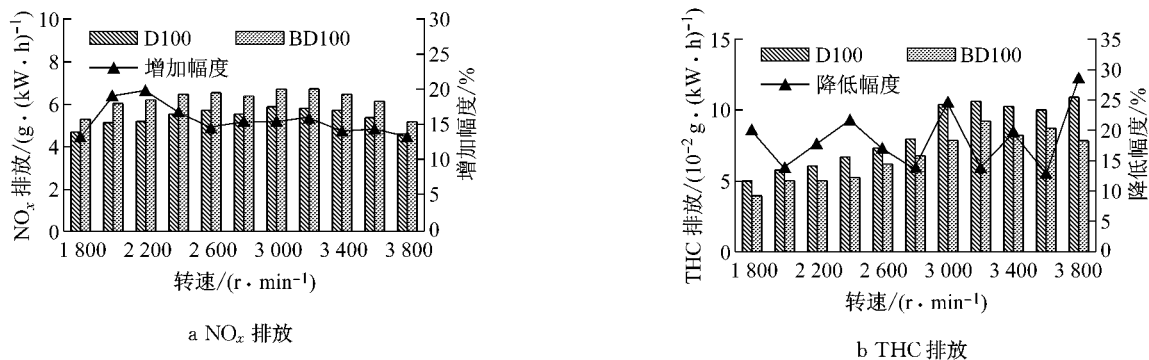


图2 外特性下燃用生物柴油对发动机 NO_x 和THC排放的影响

Fig.2 Effects of biodiesel on NO_x and THC emissions at WOT

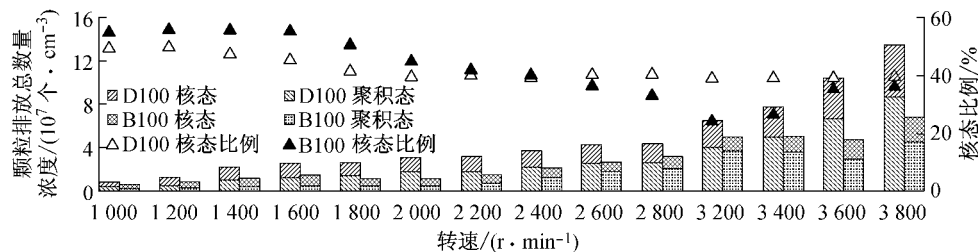


图3 外特性下生物柴油对超细颗粒排放总数量浓度的影响

Fig.3 Effects of biodiesel on ultra-particulate concentration at WOT

2.2 EGR与主喷正时对 NO_x 排放的影响

图4为EGR与主喷正时对燃用生物柴油轻型柴油机 NO_x 排放的影响.

从图中可以看出,各负荷下,随着EGR率的增大和主喷正时的滞后, NO_x 排放都明显降低.其中,在25%负荷下,EGR率为33%时相对为8%时, NO_x 排放平均降低了60.9%;50%负荷下,EGR率为28%时相对为12%时,平均分别降低了85.5%.这主要是因为废气回流后,缸内氧气浓度减少且 NO_x 生成反应过程中生成物浓度增加,导致反应向减少 NO_x 方向进行.在25%负荷下,主喷提前角为 4.7° 曲轴转角时相对 8.7° 曲轴转角时, NO_x 排放平均分别降低了28.0%;50%负荷下,主喷提前角为 3.3° 曲轴转角时相对为 7.3° 曲轴转角时, NO_x 排放

图3为燃用纯生物柴油对包括核态和聚积态的超细颗粒排放总数量浓度和核态颗粒数量浓度所占总数量浓度比例的影响.从图3可见,外特性下,燃用纯生物柴油后,超细颗粒排放总数量浓度降低,平均下降了43%;核态颗粒和聚积态颗粒数量浓度也都降低,平均降幅分别为45.6%和40.9%;核态颗粒数量浓度所占比例在转速小于 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的中低转速时低于国V柴油,而在转速高于 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时却高于国V柴油.

平均分别降低了30.9%.这主要是因为主喷滞后使得滞燃期缩短,预混合燃烧比例降低,燃烧重心后移,扩散燃烧相对缓和,扩散燃烧火焰面处温度降低.可见,通过调整EGR率和调整主喷正时降低 NO_x 排放的效果都比较明显,但调整前者相对更加明显.

2.3 EGR与主喷正时对超细颗粒排放数量特性的影响

图5和图6分别为EGR与主喷正时对燃用生物柴油轻型柴油机超细颗粒排放总数量浓度及超细颗粒排放数量浓度粒径分布的影响.从图5中可以看出,各负荷下,超细颗粒排放数量浓度,随着EGR率的增大,都明显降低,而随着主喷的滞后,只是略有降低.其中25%负荷下,EGR率为33%时相对为

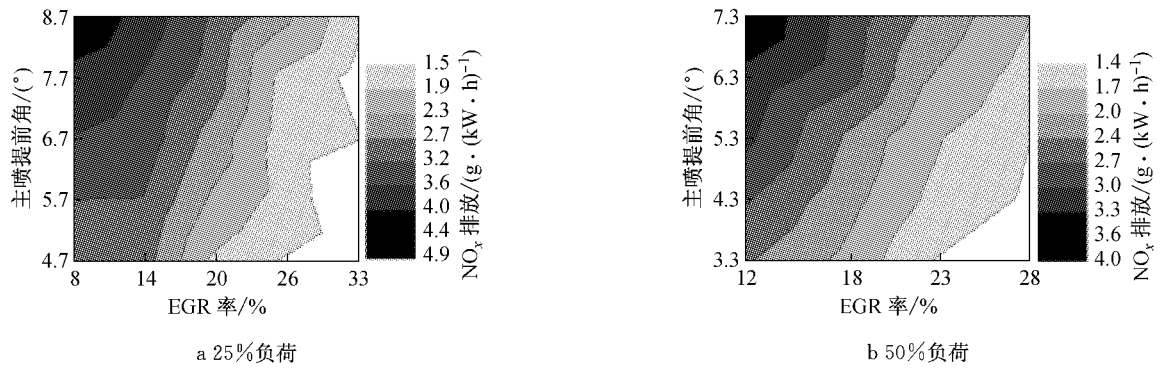


图 4 EGR 与主喷正时对 NO_x 排放的影响

Fig. 4 Effects of EGR and main injection time on NO_x emission

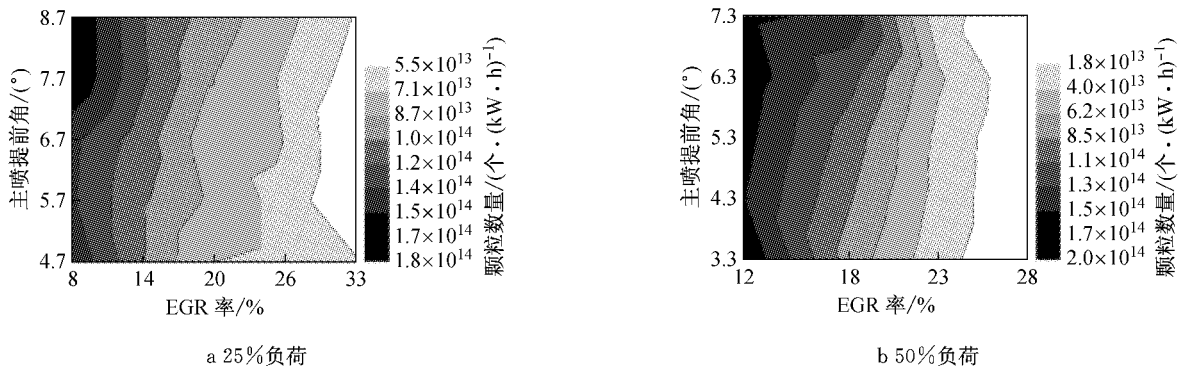


图 5 EGR 与主喷正时对超细颗粒排放总数量的影响

Fig. 5 Effects of EGR and main injection time on total ultra-particulate

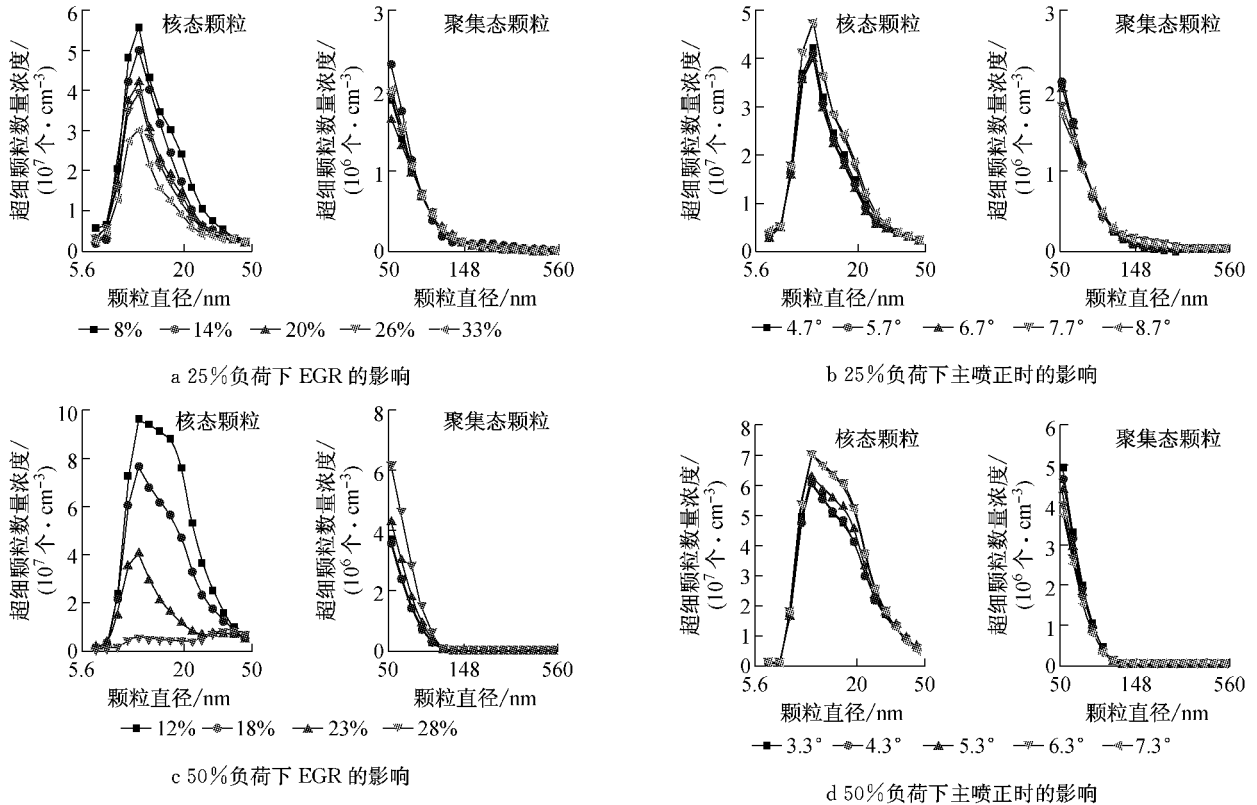


图 6 EGR 与主喷正时对超细颗粒数量浓度粒径分布的影响

Fig. 6 Effects of EGR and main injection time on distribution of ultra-particulate concentration

8%时的颗粒排放数量浓度平均减少了 62.7%，而主喷提前 4.7° 曲轴转角时相对提前 8.7° 曲轴转角减少了 13.3%；50%负荷下，对应 EGR 率为 28%时相对为 12%时，减少了 87.3%，而主喷提前角为 3.3° 曲轴转角时相对为 7.3° 曲轴转角时，减少了 17.6%。可见，喷油正时对超细颗粒排放数量的影响相对较小。各负荷下，随着 EGR 率增大和主喷滞后，超细颗粒总数的减少都主要是由核态颗粒数量的减少引起的，如图 6 所示。

从图 6 中还可以看出，各负荷下，聚集态颗粒数量浓度所占比例很小，而核态颗粒数量浓度所占总颗粒数量浓度比例很高，其中在 25% 负荷时高达 95%~98%，50% 负荷时达 76%~99%，这主要是因为中低负荷时，空燃比较大，高温缺氧生成的碳烟少，聚并成聚集态颗粒较少。随着 EGR 率的增大，在 25% 负荷时，核态颗粒数量浓度在对应粒径范围内都较明显增大，而聚集态颗粒数量浓度也呈增大趋势，但不明显；而在 50% 负荷时，核态颗粒数量浓度对应粒径范围内都明显减小，聚集态颗粒数量浓度也明显增大。核态颗粒数量浓度减小主要是因为 EGR 率增大后，排气温度升高，如图 7 所示。核态颗粒形成过程中冷凝成核作用减弱而氧化作用加强，同时进气温度也升高，滞燃期变短，使柴油雾化更好，燃烧过程挥发性高分子有机物生成减少。而聚集

态颗粒数量浓度略有增大，主要是因为 EGR 率增大后，缸内氧气浓度下降，高温缺氧区域扩大，碳烟颗粒增多，聚并而成的聚集态颗粒也增多，且在中负荷时，缸内含氧量本身较低，所以由氧浓度下降引起聚集态颗粒数量增多的趋势就更明显。而随着喷油正时的滞后，核态颗粒数量浓度也有所减少，聚集态颗粒也呈增多趋势，这主要是因为主喷正时滞后，滞燃期变短，扩散燃烧比例提高，油滴雾化时间变短，生成的高分子有机物减少，而高温缺氧形成的碳烟颗粒反而增加。但主喷正时滞后相对 EGR 率对超细颗粒排放数量的影响不明显，这主要是因为喷油正时对排气温度影响不大，颗粒后续氧化作用没有加强。

2.4 EGR 与主喷正时对 THC 排放的影响

图 8 为 EGR 与主喷正时对燃用生物柴油轻型柴油机 THC 排放的影响。从图 8 可以看出，EGR 率对 THC 排放的影响在中低负荷时表现不同，在 25% 负荷时，随着 EGR 率的增大，THC 排放呈减少趋势；而在 50% 负荷时，却呈增加趋势。这主要是因为低负荷时，缸内富氧，EGR 率增大对空燃比影响较小，而使其进气温度增加进而导致着火极限范围扩大的趋势较明显；但在中负荷时，EGR 率增大引起氧气浓度下降恶化燃烧的趋势突显。而随着喷油正时的滞后，THC 排在 25% 和 50% 负荷下都增加，这主要是因为主喷滞后，滞燃期变短，扩散燃

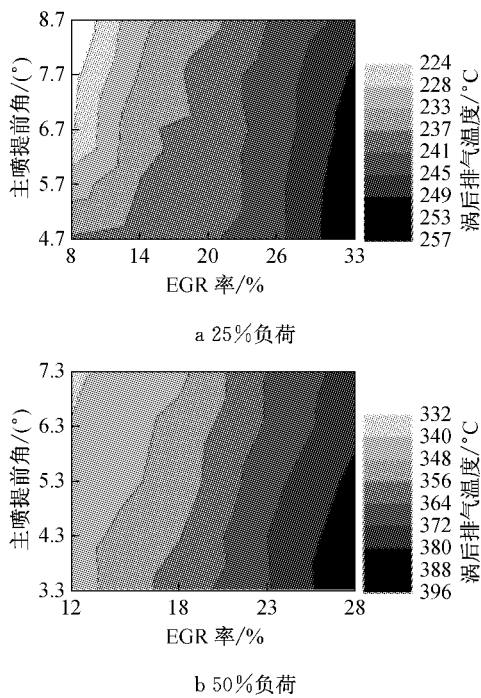


图 7 EGR 与主喷正时对排气温度的影响
Fig.7 Effects of EGR and main injection time on exhaust temperature

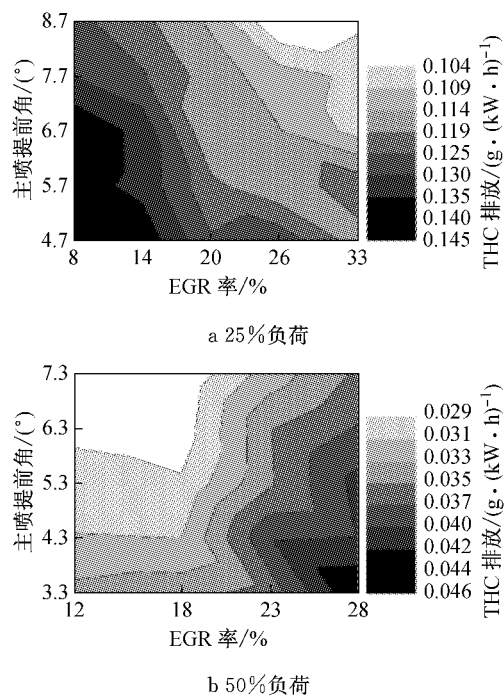


图 8 EGR 与主喷正时对 THC 排放的影响
Fig.8 Effects of EGR and main injection time on THC emission

烧比例降低.

2.5 EGR 与主喷正时对燃油经济性的影响

图 9 为 EGR 与主喷正时对燃用生物柴油轻型柴油机燃油消耗率的影响. 从图 9 可以看出, EGR 率对燃油经济性的影响在中低负荷时表现也不同, 在 25% 负荷时, 随着 EGR 率的增大, 燃油消耗率减小; 而在 50% 负荷时却增加. 这主要是因为低负荷时, 废气回流量增大后, 导致进气温度增加, 进而使得燃油雾化效果变好, 燃烧更充分, 而中负荷缸内空燃比本身就较小, 废气回流使缸内氧气含量进一步减少, 燃烧不充分, 热效率降低. 而随着喷油正时的滞后, 燃油消耗率在 25% 和 50% 负荷下都增加.

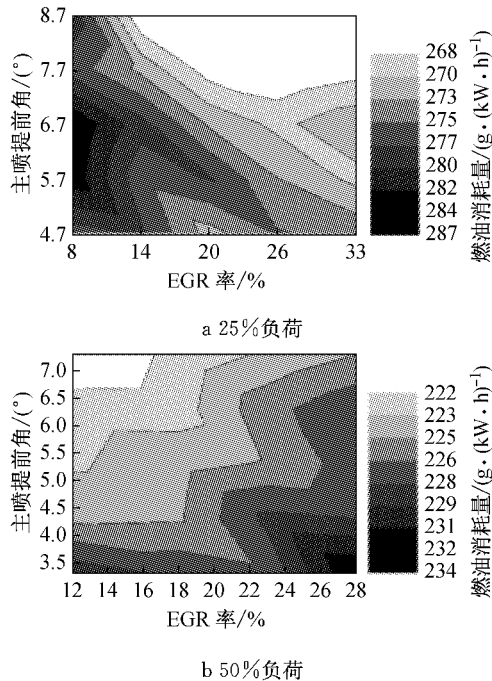


图 9 EGR 与主喷正时对燃油消耗率的影响
Fig.9 Effects of EGR and main injection time on BSFC

2.6 以发动机综合性能为目标的 EGR 率和主喷正时参数优化

建立了综合考虑发动机燃油经济性和排放的发动机优化方程, 如下式:

$$Z_{aim} = \max \left[\sum_{i=1}^4 \eta_i Z_i \right] \quad (1)$$

式中: Z_i ($i=1, 2, 3, 4$) 和 η_i 分别代表各 EGR 率和主喷正时组合策略下相对原机策略下, 燃油消耗率、 NO_x 排放、超细颗粒排放总数量和 THC 排放降低百分比经过标准分数标准化后的结果以及其加权系数. 因为 THC 排放本身很低, 所以加权系数为 0, 其他加权系数都取 1. 优化结果如图 10 所示. 在 25%

负荷时, 选用较大 EGR 率 (26%) 和较早主喷 (7.7° 曲轴转角), 可以使燃油消耗率、 NO_x 排放、超细颗粒排放数量浓度和 THC 排放都降低; 在 50% 负荷时, 选择中等 EGR 率 (18%) 和较早主喷 (6.3° 曲轴转角), 尽管 NO_x 排放和超细颗粒排放数量浓度增加, 但燃油经济性会大大改善.

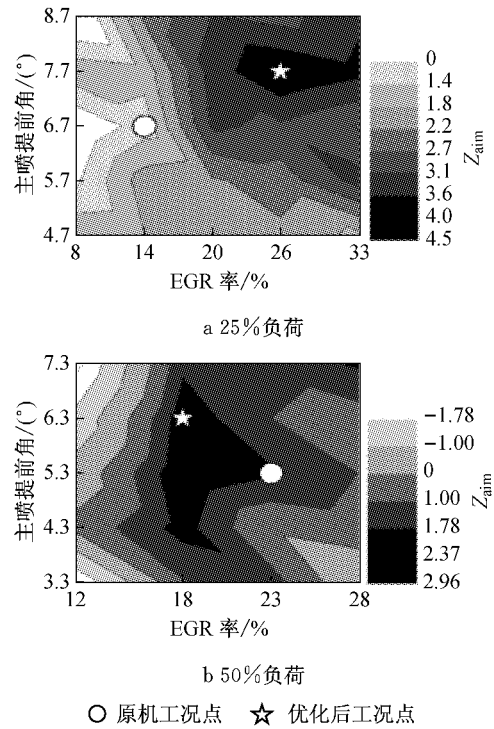


图 10 优化结果
Fig.10 Optimization results

3 结论

(1) 燃用生物柴油后, 外特性下, 发动机的 NO_x 排放平均增加了 16.5%, 而 THC 排放平均降低了 21.6%, 核态颗粒、聚积态颗粒排放数量浓度以及超细颗粒排放总数量浓度都明显降低, 平均分别降低了 45.6%, 40.9% 和 43%.

(2) 在 $2200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的 25% 和 50% 负荷下, 随着 EGR 率的增加和主喷正时的滞后, NO_x 排放都明显减少, 超细颗粒排放总数量也都明显减少, 但主喷滞后对超细颗粒总数量浓度变化的影响相对较小.

(3) 随着 EGR 率的增大, 在 25% 负荷时, THC 排放和燃油消耗率都降低, 但在 50% 负荷时都增加; 而随着主喷正时的滞后, THC 排放和燃油消耗率在 25% 和 50% 两个负荷下都增加.

(4) 综合考虑排放和燃油经济性, 在 25% 负荷

时采用较大 EGR 率(26%)和较早主喷提前(7.7°曲轴转角)方案,而在 50%负荷时采用中等 EGR 率(18%)和较早主喷(6.3°曲轴转角)方案。

参考文献:

- [1] Sheehan J, Camobreco V, Duffield J, *et al.* An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles[R]. San Francisco: National Renewable Energy Laboratory, 2000.
- [2] 吴伟光, 仇焕广, 徐志刚. 生物柴油发展现状、影响与展望[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 298.
WU Weiguang, QIU Huangang, XU Zhigang. Biodiesel development: Current status, potential impacts and perspectives [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 25(3): 298.
- [3] Lin Y F, Wu Y P, Chang C T. Combustion characteristics of waste-oil produced bio-diesel/diesel fuel blends [J]. Fuel, 2007, 86: 1772.
- [4] 楼狄明, 石健, 赵杰, 等. 共轨柴油机燃用不同配比生物柴油的性能与排放特性[J]. 内燃机工程, 2009, 30(6): 21.
LOU Diming, SHI Jian, ZHAO Jie, *et al.* Performance and emission characteristics of a common rail diesel engine fuelled with different proportion bio-Diesel blends [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(6): 21.
- [5] ZHANG Xusheng, GAO Guanghai, LI Liguang, *et al.* Characteristics of combustion and emissions in a DI engine fueled with biodiesel blends from soybean oil [C]//SAE. Shanghai: SAE International, 2008; 2008-01-1832.
- [6] Lapuert A, Armasa O, Fernande J R. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emission [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(2):198.
- [7] Kawano D, Ishii H, Goto Y, *et al.* Effect of exhaust gas recirculation on exhaust emissions from diesel engines fuelled with biodiesel[C]//SAE. Naples: SAE International, 2007: 2007-24-0128.
- [8] 陈群, 刘巽俊, 李骏, 等. CA498 车用柴油机 EGR 的试验研究[J]. 内燃机学报, 2001,19(6): 557.
CHEN Qun, LIU Xunjun, LI Jun, *et al.* Experimental study on automotive diesel engine with EGR [J]. Transactions of CSIC, 2001, 19(6): 557.
- [9] 陈峰. 废气再循环对柴油机燃烧和排放影响的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
CHEN Feng. Experimental research of effects of EGR of diesel on combustion characteristics and emissions [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [10] 周黎鹏. 喷油策略和废气再循环对柴油机燃烧与颗粒排放的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
ZHOU Lipeng. Effects of injection strategies and EGR of diesel engine on combustion characteristics and particulate matter emissions [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [11] Dronmiou N, Lejeune M, Balloul I, *et al.* Combination of high EGR rates and multiple injection strategies to reduce pollutant emissions[C]//SAE. San Antonio: SAE International, 2005: 2005-01-3726.
- [12] Niemi S A, Paanu T P J, Laurén M J. Effect of injection timing, EGR and EGR cooling on the exhaust particle number and size distribution of an off-road diesel engine[C]//SAE. Toulouse: SAE International, 2005: 2005-01-3726.
- [13] Qi D H, Leick M, Liu Y, *et al.* Effect of EGR and injection timing on combustion and emission characteristics of split injection strategy DI-diesel engine fueled with biodiesel[J]. Fuel, 2011, 90(5): 1884.
- [14] QI Donghui, Lee Chia-Fon, LIN Yili, *et al.* Effect of injection parameters and EGR on the particle size distributions and exhaust emissions for diesel and biodiesel fuels in CRDI engine [C]//SAE. Detroit: SAE International, 2014: 2014-01-1612.
- [15] Zelenka P, Egert M, Cartellieri W. Ways to meet future emission standards with diesel engine powered sport utility vehicles (SUV) [C]//SAE. Detroit: SAE International, 2000: 2000-01-0181.
- [16] 杨帅, 李秀元, 应启夏, 等. EGR 率对柴油机排放特性影响的试验[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 29.
YANG Shuai, LI Xiuyuan, YING Qijia, *et al.* EGR rates optimization rule and experimental study about influence of EGR rates on diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 29.