

# 掺混生物柴油对STC柴油机最佳切换点的影响

毛进<sup>1</sup>, 唐铭沂<sup>1</sup>, 蔡浩<sup>3</sup>, 高占斌<sup>1,2</sup>, 尹自斌<sup>1,2</sup>

1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 中船动力镇江有限公司, 江苏 镇江 212002)

[摘要] 为了改善掺混生物柴油时相继增压柴油机的燃烧及排放性能, 研究柴油与生物柴油不同掺混比对相继增压柴油机1台增压器(1TC)与2台增压器(2TC)的最佳切换点的影响。配制不同掺混比例的生物柴油, 实测在不同负荷下, 生物柴油以体积掺混比分别为0%、5%、10%、15%、20%和25%时, 柴油机最高燃烧压力、增压压力、涡轮前排温和燃油消耗率等数据, 分析柴油机各项性能参数的变化, 并按照经济性最优原则, 找到1TC与2TC最佳切换点范围。实验结果表明: 当掺混5%、10%、15%、20%和25%的生物柴油, 相继增压柴油机在10%~40%负荷时, 1TC的最高燃烧压力、增压压力、涡轮前排气温度以及燃油消耗率明显优于2TC; 而在50%负荷时, 1TC的燃油消耗率远超过2TC, 柴油机经济性能下降; 随着生物柴油掺混比增加, 相继增压系统柴油机1TC~2TC最佳切换点略微前移; 当掺混比至25%时, 1TC与2TC最佳切换点为40%负荷。该研究对推进生物柴油在柴油机上的实际应用提供实验基础。

[关键词] 相继增压柴油机; 生物柴油; 动力性; 经济性; 最佳切换点

[中图分类号] TK428.9

## The Effect of Blended Biodiesel on the Optimal Switching Point of STC Diesel Engine

MAO Jin<sup>1</sup>, TANG Mingyi<sup>1</sup>, CAI Hao<sup>3</sup>, GAO Zhanbin<sup>1,2</sup>, YIN Zibin<sup>1,2</sup>

1. Marine Engineering College, Jimei University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Xiamen 361021, China;
3. CSSC Zhenjiang Co., Ltd., Zhenjiang 212002, China)

**Abstract:** To improve the combustion and emission of successive supercharged diesel engines when blending biodiesels, the effect of different blending ratios of diesel and biodiesels on the optimal switching point of one supercharger (1TC) and two superchargers (2TC) of successive supercharged diesel engines was investigated, biodiesels with different mixing ratios was prepared and blended at 0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 25% by volume. Tests were conducted under different loads, and the maximum combustion pressure, supercharging pressure, turbo front temperature and fuel consumption rate of diesel engine were analyzed. The changes of various performance parameters of diesel engine were also investigated, and the optimal switching point range of 1TC and 2TC was determined as per the principle of economic optimization. The experimental results show that the maximum combustion pressure, booster pressure, pre-turbine exhaust temperature and

[收稿日期] 2022-02-15

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2019J01705; 2018J01491; 2018J01499)

[作者简介] 毛进(1998—), 男, 硕士生, 从事轮机工程研究。通信作者: 高占斌(1971—), 男, 教授, 博士, 硕导, 从事热能动力装置节能与减排技术研究。Email: zbgao@jmu.edu.cn

fuel consumption of 1TC are obviously better than those of 2TC when the biodiesel is blended with 5%, 10%, 15%, 20% and 25% and the turbocharged diesel engine is charged at 10%–40% load. At 50% load, the fuel consumption rate of 1TC is much higher than that of 2TC, but the economic performance of diesel engine decreases. With the increase of biodiesel blending ratio, the optimum switching point of 1TC–2TC of diesel engine in successive supercharging system moves forward slightly. The optimal switching point between 1TC and 2TC is 40% load when blending ratio to 25%. The research provides an important experimental basis for advancing the practical application of biodiesel in diesel engines.

**Keywords:** successively supercharged diesel engine; biodiesel; power performance; economy; optimum switching point

## 0 引言

目前石油资源日益紧缺<sup>[1]</sup>,以地沟油为原料制备生物柴油,由于原料来源广泛,生产技术成熟,与柴油任意比例掺混不需要添加剂<sup>[2]</sup>,而且燃烧生物柴油能够有效降低硫氧化物(SO<sub>x</sub>)、碳氧化物(CO<sub>x</sub>)和颗粒等污染物排放<sup>[3]</sup>,因此该研究具有广泛的应用前景。王欣等<sup>[4]</sup>研究生物柴油–柴油混合燃料对船用发动机排放特性的影响,发现燃用生物柴油混合物可以使船舶排放性能得到显著改善。由于生物柴油热值一般较柴油低,掺混生物柴油后柴油机动力性能会有所下降<sup>[5]</sup>,而相继增压(sequential turbo charging, STC)技术可有效扩大柴油机的运行范围,提升柴油机的动力性,降低燃油消耗率,减少 Soot 排放<sup>[6]</sup>。但相继增压技术也有不足之处,如控制切入或切出涡轮增压器时,其废气流通截面面积并不连续,截面面积改变量较大,在切换过程中,容易造成缸内进气量不足,影响柴油机正常工作,甚至出现喘振现象<sup>[7]</sup>。低负荷工况下柴油机在2台增压器(2TC)同时工作时,涡轮利用效率也会有所降低,增压效果较差,缸内燃烧性能恶化,故相继增压技术中对于切换点的把控尤为重要<sup>[8]</sup>。本文研究将柴油机改造为相继增压系统后,柴油与生物柴油不同掺混比对相继增压柴油机1台增压器(1TC)与2台增压器(2TC)的最佳切换点的影响<sup>[9]</sup>,分析柴油机缸内最高燃烧压力、中冷后压增压压力、涡轮前排温和燃油消耗率的变化,以经济性最优原则,确定相继增压柴油机最佳切换点范围。

## 1 研究方案

### 1.1 研究对象

本文研究对象是四冲程直喷水冷式 TBD234V6 型柴油机,该柴油机的标定功率为 186 kW,转速为 1500 r/min。对原机进排气管路系统进行改造,将原机单涡轮增压系统改为双涡轮增压系统,并重新设计燃油供给系统。改造后的相继增压系统和供油系统试验平台整体示意图如图 1 所示。

实验所用的测试设备分别有:不透光烟度计(AVL439)用于烟度测试;Test350 烟气分析仪用于排气测试;HZB2000 油耗仪用于测量油耗;DEWE—2010CA 型便携式燃烧分析仪用于燃烧参数测量。

### 1.2 实验方案

推进特性下各负荷对应的柴油机扭矩和转速如表 1 所示。本实验拟定实验燃油为纯柴油(B0)及按体积比分别为 5%(B5)、10%(B10)、15%(B15)、20%(B20)和 25%(B25)配置的生物柴油/柴油混合燃油,利用燃烧分析仪等设备,分别实测在推进特性下,柴油机以 1TC 或 2TC 状态运行时,不同负荷下燃用 B0、B5、B10、B15、B20 和 B25 的最高燃烧压力、增压压力、涡轮前排温和燃油消耗率等数据,通过分析柴油机各项性能参数的变化,探究掺烧生物柴油后对相继增压柴油机最佳切换点范围的影响。其中,因基本增压器转速受最高转速限制,故当实验只使用 1 台基本增压器(1TC)时,柴油机负荷最高运行至 50% 负荷,共有 5 个工况点;2TC 状态下共有 10 个工况点。

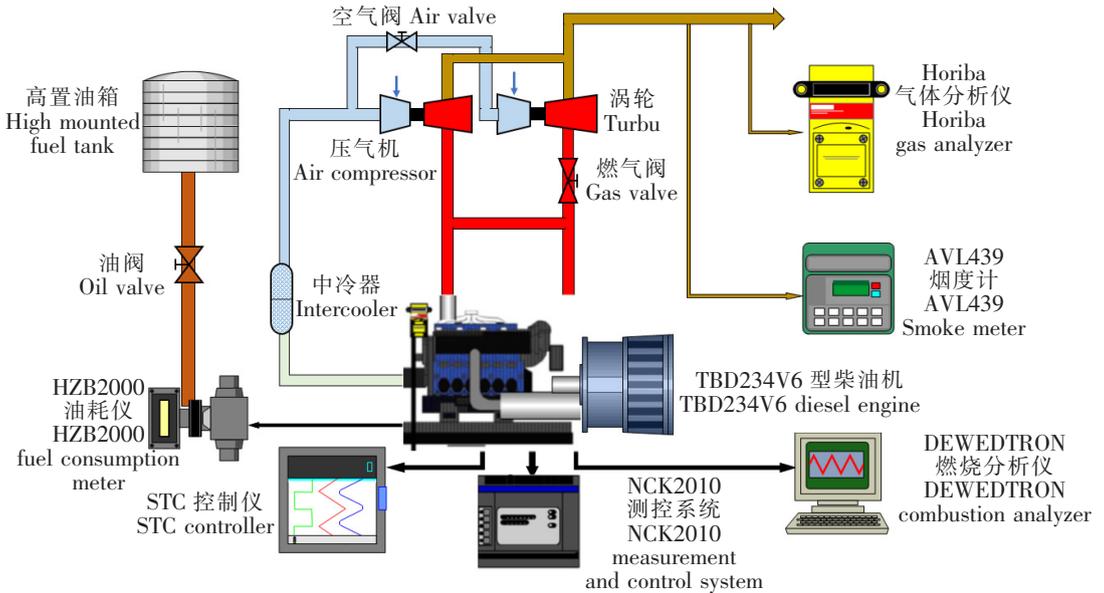


图 1 TBD234V6 型相继增压柴油机试验平台

Fig.1 Test platform TBD234V6 successive supercharged diesel engine

表 1 推进特性下各负荷对应的柴油机转速和扭矩

Tab.1 Diesel engine speed and torque corresponding to each load under propulsion characteristics

负荷 Load/%	转速 Speed/(r · min <sup>-1</sup> )	扭矩 Torque/(N · m)	负荷 Load/%	转速 Speed/(r · min <sup>-1</sup> )	扭矩 Torque/(N · m)
10	696	255	60	1265	842
20	877	405	70	1332	934
30	1004	531	80	1392	1021
40	1105	643	90	1448	1104
50	1191	746	100	1500	1184

## 2 掺混比对相继增压柴油机最佳切换点的影响

### 2.1 对相继增压柴油机最高燃烧压力的影响

相继增压柴油机在 1TC 或 2TC 运行状态, 生物柴油的掺烧比例分别为 B0、B5、B10、B15、B20、B25, 各负荷最高燃烧压力的变化如图 2 所示。

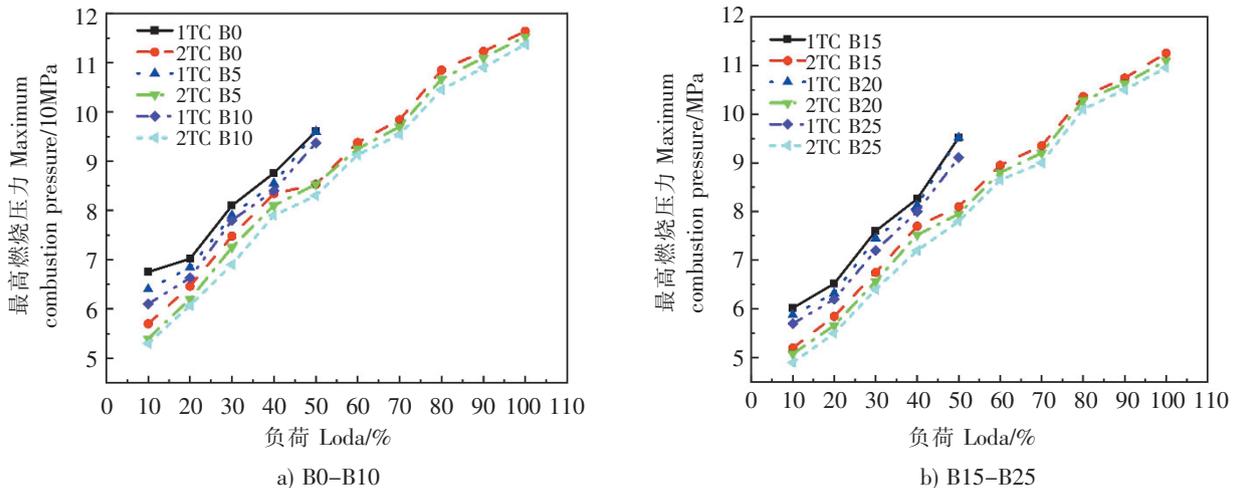


图 2 相继增压柴油机 1TC 或 2TC 缸内最高燃烧压力

Fig. 2 Maximum combustion pressure at 1TC or 2TC for successive supercharged diesel engines

由图2可知,相同掺混比时,增加负荷,最高燃烧压力升高。相继增压柴油机在10%~50%负荷,生物柴油掺混比为B0时,最高燃烧压力1TC明显高于2TC,并且随负荷增加而增加。这主要是由于柴油机在低负荷运行时,废气排放量少,此时受控增压器不工作,废气仅通过基本主增压器排出,带动压气机做功增加,进气量升高,燃烧效果变好<sup>[11]</sup>,最高燃烧压力上升。

随生物柴油掺混比增大,柴油机最高燃烧压力下降,且下降幅度逐渐增大;随着柴油机负荷增大,增大生物柴油掺混比对柴油机最高燃烧压力的影响幅度逐渐减弱。柴油机在10%负荷,1TC状态运行时,掺混比为B25时的最高燃烧压力与B0时相比下降15.5%,而在40%负荷,B25时的最高燃烧压力与B0相比下降8.7%。柴油机在50%~100%负荷,2TC状态运行,增大生物柴油掺混比,缸内最高燃烧压力降低,且下降幅度增大;但随着柴油机负荷的提高,生物柴油掺混比对柴油机最高燃烧压力的影响幅度减小。主要原因是生物柴油热值低于柴油;其次是生物柴油的富氧性,纯柴油不含氧,增大生物柴油掺混比,燃烧室内氧含量升高,会促进燃烧反应。与柴油相比,生物柴油粘性更大,增大生物柴油掺混比,柴油-生物柴油混合燃油粘性上升,燃油雾化效果下降<sup>[12]</sup>。因此,在相同负荷时,增大生物柴油掺混比,柴油机最高燃烧压力降幅增大;而增大负荷,柴油机缸内温度升高,与低负荷相比高负荷更有助于混合燃油的雾化,所以,增大生物柴油掺混比,高负荷时柴油机最高燃烧压力比低负荷时下降的幅度更小。

## 2.2 掺混比对相继增压柴油机增压压力的影响

图3为相继增压柴油机1TC或2TC运行状态时,掺烧不同比例的生物柴油,各负荷增压压力变化曲线。

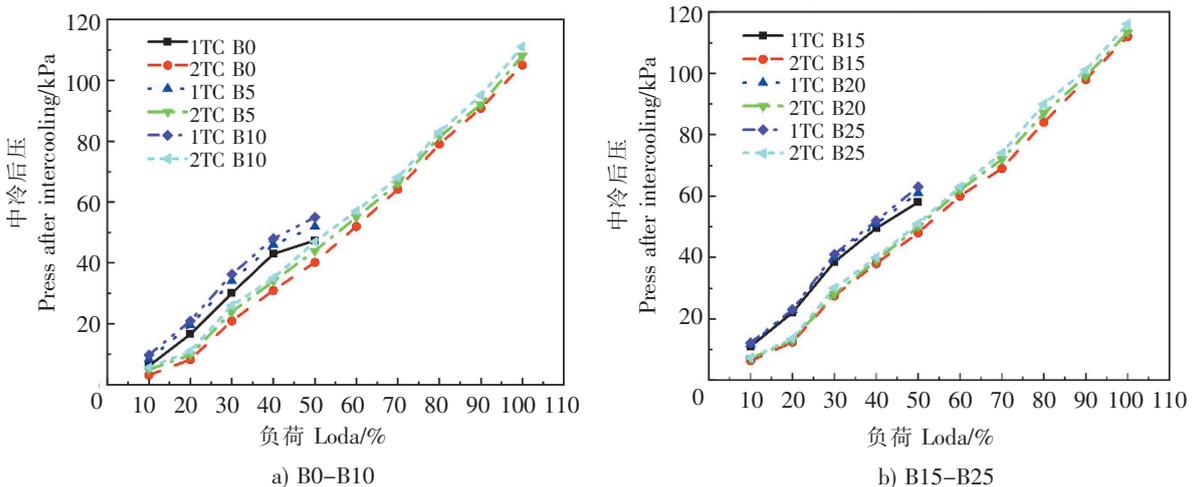


图3 相继增压柴油机1TC或2TC增压压力

Fig.3 Under boost pressure at 1TC or 2TC for successively supercharged diesel engines

由图3可知,在相同生物柴油掺混比下,柴油机增压压力随着负荷的增加而增大,但变化不明显。在10%~50%负荷,1TC状态下,柴油机增压压力明显高于2TC。增压压力升高能够增加气缸内的氧气含量,提高燃烧效率。其原因为:柴油机在低工况运行时,废气排放量少,柴油机若以2TC状态运行,废气流经两个涡轮增压器,涡轮机均分到的废气量不足<sup>[13]</sup>,从而降低了涡轮增压器的工作效率;在1TC状态下运行时,只有一个涡轮增压器工作,六个气缸产生的废气全都供给一个涡轮增压器,涡轮增压器高效率工作,带动压气机做功增加,中冷后压升高,因此,柴油机1TC增压效果更好。

同负荷时,增大生物柴油掺混比,增压压力略微增加,变化幅度很小。随着负荷的增加,增压压力增幅变大,增压压力的提高有助于提高燃烧效果。掺烧生物柴油,增压器增压压力变化的主要原因为:掺混生物柴油,混合燃油氧含量增加,燃烧室内氧气总量升高,碳烟颗粒物等排放降低,废气排放量略为增加;涡轮机带动压气机做功增加,增压压力提高;混合燃油粘性上升,燃油雾化效果变

差, 而负荷增加, 燃烧室内温度升高, 与低负荷相比, 高负荷更有助于混合燃油的雾化. 所以, 增大生物柴油掺混比, 柴油机高负荷的增压压力比低负荷时上升的略为明显; 但掺烧生物柴油后, 整体增压效果变化不明显。

### 2.3 不同掺混比对相继增压柴油机涡轮前排温的影响

图 4 为相继增压柴油机 1TC 或 2TC 运行状态时, 掺烧不同比例的生物柴油, 各负荷涡轮前排气温度的对比。

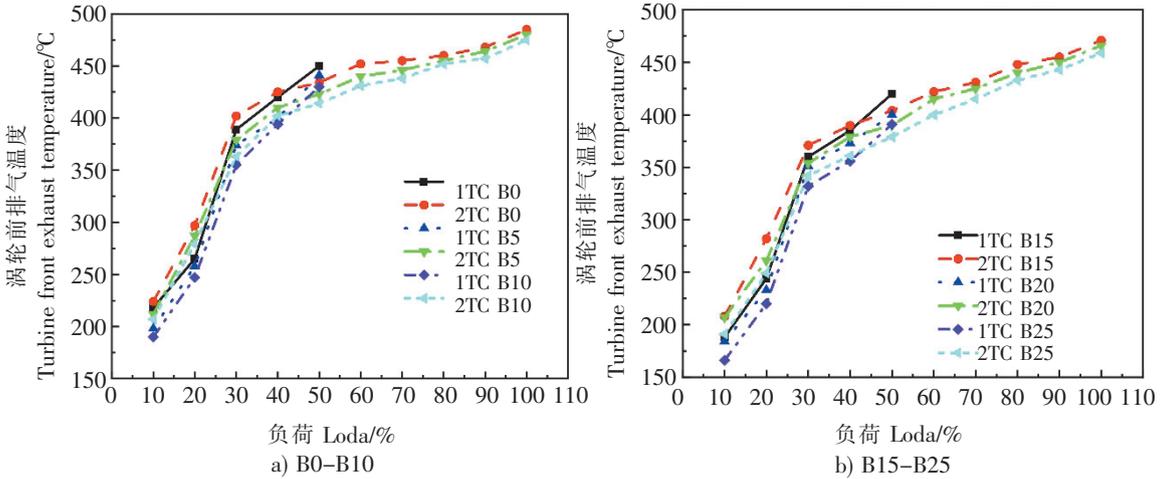


图 4 相继增压柴油机 1TC 或 2TC 涡轮前排气温度

Fig.4 Exhaust temperature before turbo at 1TC or 2TC for successively supercharged diesel engines

由图 4 可知, 相同生物柴油掺混比, 涡轮前排气温度随负荷的增加而升高。柴油机 10%~40% 负荷时, 涡轮前排温 1TC 低于 2TC; 在 50% 负荷时, 涡轮前排温 1TC 高于 2TC。这主要是因为: 改为相继增压系统后, 在 1TC 状态下运行时, 只有一个涡轮增压器工作, 废气流量充足, 带动压气机做功增加, 进气量充足, 多余的空气吸收热量, 涡轮前排气温度随之降低; 在 50% 负荷时, 随着负荷增加, 废气量增加, 排气背压升高, 废气无法全部排出, 出现泵气损失升高, 在推进特性下, 柴油机为保证转速和扭矩, 需要消耗更多的燃油来弥补泵气损失的功, 缸内温度升高, 因而涡轮前排气温度升高。在同负荷下, 增大生物柴油掺混比, 柴油机涡轮前排气温度降低, 但降幅较小, 随着负荷的增加, 柴油机的涡轮前排气温度变化更小<sup>[14]</sup>。

### 2.4 对相继增压柴油机经济性的影响

图 5 为相继增压柴油机掺烧不同比例的生物柴油, 各负荷下燃油消耗率的对比。

由图 5 可知, 在相同生物柴油掺混比下, 增加负荷, 燃油消耗率降低。在 10%~40% 负荷时, 燃油消耗率 1TC 明显低于 2TC; 当柴油机负荷达到 50% 时, 燃油消耗率 1TC 远超过 2TC; 柴油机 2TC 状态运行时, 增加负荷, 燃油消耗率呈下降趋势。主要原因是: 在 10%~40% 负荷, 1TC 状态下, 只有一个涡轮增压器工作, 废气流量充足, 带动压气机做功增加, 进气量充足, 优化燃烧效果, 燃油消耗率下降; 由于基本增压器涡轮流通截面积较小, 当柴油机达到 50% 负荷时, 废气量增加, 排气背压过高, 废气无法全部排出, 导致泵气损失增加; 在推进特性下, 柴油机为保证转速和扭矩, 需要消耗更多的燃油来弥补泵气损失的功; 其次, 涡轮增压器转速过高, 进气压力升高, 并且随着进气压力的大幅上升, 燃烧室过量空气系数升高, 使空燃比上升, 火焰传播不充分和断火等现象影响燃烧效果, 较大或较小的空燃比都会使燃油消耗率升高。

在同负荷下增大生物柴油掺混比, 柴油机油耗率上升。在 1TC, 10% 负荷时, 生物柴油掺混比分别为 B0、B5、B10、B15、B20、B25 时, 燃油消耗率与 B0 相比依次升高 2.1%、2.7%、3.7%、5.2%、6.5%。在 2TC, 100% 负荷时, 增大生物柴油掺混比, 燃油消耗率与 B0 相比平均升高 3.8%。

增加负荷,生物柴油掺混比对柴油机油耗率影响减小。其主要由于:与柴油相比,生物柴油粘性更大,掺混生物柴油后混合燃油粘性增大,燃油雾化效果变差,油气混合质量下降,增加负荷后,缸内温度升高,与低负荷相比高负荷更有助于柴油-生物柴油混合燃油的雾化,燃烧效果提高,所以,随着生物柴油掺混比增加,柴油机高负荷时燃油消耗率比低负荷时下降的幅度更小。

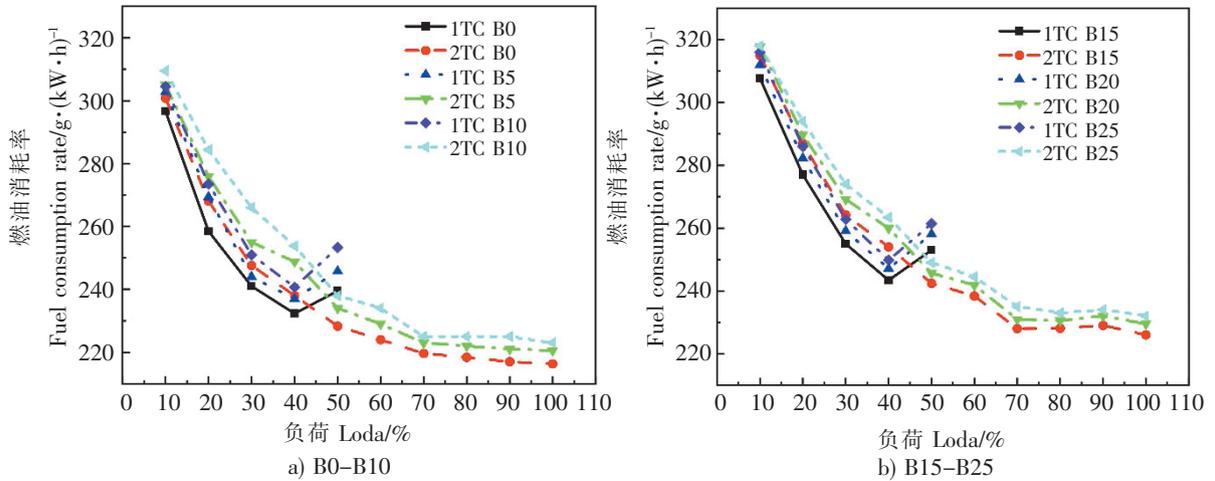


图5 相继增压柴油机 1TC 或 2TC 燃油消耗率

Fig.5 Fuel consumption rate at 1TC or 2TC for successively supercharged diesel engines

在使用相继增压技术提高柴油机工作性能的同时,也需要考虑柴油机的经济性,因此综合考虑柴油机的动力性、增压压力、涡轮增压器的工作状况和效率,以及增压器受最高转速的限制等因素,并按照经济性最优原则,最终根据线性计算,选择40%~45%负荷作为相继增压系统1TC与2TC最佳切换点<sup>[15]</sup>的范围,柴油机纯柴油燃烧时1TC与2TC最佳切换点为45%负荷,而增大生物柴油掺混比,相继增压系统1TC与2TC最佳切换点逐渐前移,B25时1TC与2TC最佳切换点为40%负荷,与B0相比,负荷提前了5%。

### 3 结论

对改造后的TBD234V6型相继增压柴油机进行掺混生物柴油燃烧实验,研究掺烧不同比例的生物柴油对相继增压系统柴油机性能的影响。

1) 相同生物柴油掺混比时,在10%~40%负荷时,1TC的最高燃烧压力、增压压力、涡轮前排气温度以及燃油消耗率明显优于2TC;而在50%负荷时,1TC的燃油消耗率远超过2TC;1TC时柴油机动力性能提升,经济性能下降。

2) 燃烧纯柴油时,1TC与2TC最佳切换点为45%负荷时;而增大生物柴油掺混比,1TC与2TC最佳切换点逐渐前移,掺混比为25%时,1TC与2TC最佳切换点为40%负荷时,与纯柴油相比,负荷提前了5%。

3) 燃用生物柴油,结合相继增压技术,能够改善柴油机低负荷时的动力性和排放性,保证柴油机在低负荷运行时,掺混一定比例的生物柴油,也不会降低柴油机的动力性。

### [参考文献]

- [1] DONG X, PENG L, XIAO Y Y. Process optimization, exergy efficiency, and life cycle energy consumption - GHG emissions of the propane - to - propylene with/without hydrogen production process [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 367: 133024.
- [2] 高占斌, 王彬彬, 高敬博, 等. 掺混生物柴油对相继增压柴油机燃烧性能的影响 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(4): 791 - 796.

- [3] 杨捷波, 王彬彬, 高占斌, 等. 掺烧生物柴油耦合 EGR 对柴油机性能的影响及优化 [J]. 船舶工程, 2022, 44(1): 15-22, 75.
- [4] 王欣, 江国和, 吴刚. 船用发动机应用生物柴油排放特性研究进展 [J]. 应用化工, 2022, 51(5): 1389-1395, 1402.
- [5] 王彬彬, 高敬博, 杨捷波, 等. 掺烧生物柴油耦合进气道加湿对柴油机燃烧及排放性能的影响 [J]. 船舶工程, 2021, 43(3): 1-7.
- [6] 祖象欢, 杨传雷, 王贺春, 等. 相继增压柴油机废气再循环性能评估及最优决策 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6): 150-156.
- [7] MOHAMMAD A, MOHAMMAD G R, NANJAPPA A, et al. The potential of utilising papaya seed oil and stone fruit kernel oil as non-edible feedstock for biodiesel production in australia-a review [J]. Energy Reports, 2019, 5: 135-142.
- [8] EMILENE C L, EDUARDO E, PAULO R S, et al. A simple, rapid and low cost reversed-phase dispersive liquid-liquid microextraction for the determination of Na, K, Ca And Mg in biodiesel [J]. Talanta, 2019, 199: 1141-1150.
- [9] 胡志远, 谭丕强, 楼狄明. 共轨柴油机燃用麻疯树制生物柴油的环境排放特性 [J]. 内燃机工程, 2011, 32(4): 65-71.
- [10] 王尚鹏, 高占斌, 尹自斌, 等. 船用柴油机 STC 系统设计与试验研究 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(19): 139-143.
- [11] ARUN RAVI VARMA, UMAIR AHMED, MARKUS KLEIN, et al. Effects of turbulent length scale on the bending effect of turbulent burning velocity in premixed turbulent combustion [J]. Combustion and Flame, 2021, 233: 111569.
- [12] NURUL HANIM RAZAK, HASLEND A HASHIM, NOR ALAFIZA YUNUS, et al. Reducing diesel exhaust emissions by optimisation of alcohol oxygenates blend with diesel/biodiesel [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 316: 128090.
- [13] 凌旭, 黄守辉, 官庆武, 等. 废气涡轮增压器瞬态喘振机理及影响因素分析 [J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(1): 36-41.
- [14] 高占斌, 王银燕, 胡松. 相继增压对某型柴油机性能影响及喷油参数再优化 [J]. 船舶工程, 2015, 37(8): 17-20.
- [15] 张鑫华. 柴油机米勒循环与相继增压系统的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)