

不同烃族组分柴油对压燃式内燃机燃烧和排放的影响

黄志雄¹, 吴洋亦¹, 张子路¹, 王文杰¹, 张晓腾¹, 徐林勋², 孙兴玉², 尹博², 刘海峰¹

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072; 2. 山东京博新能源控股发展有限公司, 山东滨州 256500)

Effect of Different Hydrocarbon Group Components on the Combustion and Emissions of Compression Ignition Internal Combustion Engines

HUANG Zhixiong¹, WU Yangyi¹, ZHANG Zilu¹, WANG Wenjie¹, ZHANG Xiaoteng¹, XU
Linxun², SUN Xingyu², YIN Bo², LIU Haifeng¹

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Shangdong
Chambroad New Energy Holding Development Co., Ltd, Binzhou 256500, China)

Abstract: The test was conducted on a 6-cylinder four stroke, turbocharged and intercooled heavy-duty diesel engine that met the China VI emission standards. In this experiment, based on Chambroad Petrochemical diesel, the design and preparation of diesel with different hydrocarbon group compositions (alkanes, cycloalkanes, and aromatics) were carried out according to the currently available China VI diesel fuel, Beijing 6b diesel fuel, and world fuel standards or recommended values. While maintaining consistent engine conditions, the impacts on the performance of diesel engines were studied. The fuel prepared in the experiment met the Beijing 6b standard. The results showed that the six Chambroad test fuels had little difference in the combustion process in the cylinder compared to the commercially available 0 # and -20 # diesel, and B1 # and B5 # had greater effectiveness in the effective work. B1 #, B3 #, and B6 # test fuels had the better stability. Under the full load operating conditions, in the first part, the quality fuel consumption of -20 # diesel fuel was the lowest, while the volume fuel consumption of B2 # test fuel was the lowest, with a maximum decrease of 1.3% compared to -20 # diesel fuel. In the second part, B5 # test fuel had the lowest quality fuel consumption, with a maximum decrease of 1.7%. In terms of volumetric fuel consumption, 0 # diesel fuel was the lowest. Under the WHSC test cycle, the effective fuel consumption of B5 # and B6 # were relatively low, with decreases of 0.49% and 0.19% compared with 0 # diesel fuel, respectively. In terms of emissions, the weighted NO_x emissions of B4 # and B6 # were relatively low, with a maximum decrease of 9.62%. The soot emissions of B5 # were relatively low, with a decrease of 22.73% compared to 0 #. Under the constant speed test cycle, the effective fuel consumption of B5 # and B6 # were relatively low, with a maximum decrease of 1.39%. The weighted NO_x emissions of B5 # and B6 # were relatively low, with a maximum decrease of 8.09%. The weighted soot emissions of B1 # and B4 # were relatively low, with a decrease of 34.64% and 36.36%, respectively.

摘要: 通过在一台满足国VI排放法规的 6 缸四冲程、增压中冷重型柴油机上进行试验。本次试验中以京博石化柴油为基础, 根据当前国 6 柴油, 京 6b 和世界燃油规范三个标准或建议数值, 进行不同烃族组成(链烷烃、环烷烃和芳烃)柴油的设计配伍, 在保持发动机条件一致的情况下, 研究其对柴油机使用性能的影响。试验中配制燃油均满足京 6b 标准。结果表明, 六种京博油品相比于市售的-20#和 0#柴油在缸内燃烧过程中差异不大, B1#和 B5#做功的有效性大。B1#、B3#和 B6#油品稳定性最好。外特性工况下, 第一部分, -20#油品的质量油耗率最低, B2#

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金委叶企孙联合基金(U2241262);

作者简介: 黄志雄(1999-), 男, 博士生, 主要研究方向为碳中和在压燃内燃机上的应用, E-mail: 2021201160@tju.com;

刘海峰(联系人), E-mail: haifengliu@tju.edu.cn.

油品的体积燃油消耗率最低,相比于-20#油品最大降幅为 1.3%;第二部分,B5#油品的质量燃油消耗率最低,最大降幅为 1.7%,体积燃油消耗率方面是 0#油品最低。WHSC 测试循环下,B5#和 B6#有效燃油消耗率较低,相比于 0#柴油降幅分别为 0.49%和 0.19%,排放方面,B4#和 B6#的加权 NO_x 排放较低,最大降幅为 9.62%,B5#油品的碳烟排放数值较小,相比于 0#油品降幅为 22.73%;恒定转速测试循环下,B5#和 B6#有效燃油消耗率较低,最大降幅为 1.39%,B5#和 B6#的加权 NO_x 排放较低,最大降幅为 8.09%,B1#和 B4#油品的加权碳烟排放较低,降幅分别为 34.64%和 36.36%。

关键词: 柴油机; 烃族组分; 动力性; 燃烧; 排放; 测试循环

Key words: diesel engine; hydrocarbon group components; power; combustion; emissions; test cycle
中图分类号: TK427 (请查阅中图分类法第 5 版) 文献标识码: A

0 概述

随着社会生产力的提高,人们环保意识的增强,节约能源、减少污染已成为全球关注的焦点。随着汽车保有量的增加,汽车尾气排放逐渐引起人们的关注。其中,柴油车将排放超过汽车总氮氧化物排放量的 80%和超过 90%的 PM。柴油车的尾气排放已成为主要的污染源之一。内燃机给世界经济带来了巨大的发展,但重型车辆的污染物排放对环境造成了很大的影响。

直喷柴油机具有压缩比高、绝热损失小、抽气损失小、热效率高、动力性能好、可靠性高等特点。广泛应用于汽车、交通、农业、工程机械等领域[1]。随着排放法律法规的日益严格和石油资源的日益紧缺,为了降低柴油机的废气排放,先进燃烧技术[2]、先进喷射策略[3-6]、先进涡轮增压与废气再循环(EGR)系统[7-10]、先进燃烧室几何形状[11]等柴油机技术得到了广泛应用。

同时,柴油油品的质量是影响柴油车排放的关键,继国 6 柴油法规出台后,北京市出台了更为严格的京 6 柴油法规,加严柴油油品质量为大势所趋。目前行业内满足相关标准的产品极少,低排放燃油对目前未满足相关标准的产品替代性举足轻重,具有极大的经济效益和社会效益。2020 年,全国柴油消耗总量 14282.7 万吨,全国大型城市中,北京市柴油消耗总量 112.6 万吨,上海市柴油消耗总量 441.7 万吨,天津市柴油消耗总量 325.1 万吨,各大型城市的柴油市场非常广阔。对于城市用车等低车速车辆,排气温度低,造成大量 PM 形成,DPF 频繁再生,缩短了 DPF 的使用寿命,而从油品上进行改善以减少 PM 排放,有助于防止车辆 DPF 后处理器发生堵塞,DPF 再生周期得到延长,使用寿命显著提高,车辆经济效益得到显著优化。燃油理化性能的优化与先进的发动机技术相结合,有望实现发动机的高热效率和低排放。

有学者研究了十六烷值、芳烃含量、蒸馏温度、粘度等燃料特性对燃烧和排放特性的影响[12-18]。其中物理性质影响燃油的喷射、雾化和蒸发,从而影响燃油与空气的混合过程;另外,化学性质影响气缸内工质的化学反应动力学,从而影响气缸内的燃烧过程[19]。可以看出,大部分研究对柴油烃族组分的研究集中在芳烃含量,部分研究提出了芳烃含量的上限,与芳烃的广泛研究相比,柴油中的其他烃族成分对排放的影响规律则鲜有报道。因此,本次试验中以京博石化柴油为基础,根据当前国 6 柴油,京 6b 和世界燃油规范三个标准或建议数值,进行不同烃族组成(链烷烃、环烷烃和芳烃)柴油的设计配伍,研究其对柴油机使用性能的影响。试验中配制燃油均满足京 6b 标准。

通过提高柴油品质,减少主要污染物的排放,储备未来近零多环芳烃和低芳烃组分燃油的发动机排放和性能参数,为加工工艺和燃油复配的升级提供技术牵引和支撑,为实现节能减排和国家“碳中和、碳达峰”的目标贡献力量。

1 试验装置与研究方法

1.1 试验装置

试验在一台六缸、四冲程重型柴油机上进行,单级涡轮增压,电控高压共轨燃油喷射系统。发动机参数如表 1 所示,试验台架示意图如图 1 所示。试验台架系统包括重型柴油机、水力测功机、进排气系统、缸内压力采集系统、排放测试系统。缸内压力数据采集系统包括压力传感器(Kistler 6125C, Switzerland)、电荷放大器和数据采集系统。以 0.5 度曲轴转角(°CA)为增量,在各工况点连续测量 100 个循环的压力数据。通过建立单区放热模型并假设空气和燃料混合物和缸内温度是均匀的来分析缸内压力数据,通过 Woschni 传热模型获得传热系数。通过排气分析仪(HORIBA MEXA 7100DEGR, Japan)进行气体排放测量,CO 和 CO₂ 排放通过不分光红外分析仪(NDIR, Non-Dispersive Infrared

Analyzer) 测量, NO_x 排放通过化学发光分析法 (CLD, Chemical Lumi-nescence Detector) 测量, HC 排放通过加热氢火焰离子分析法 (FID, Flame Ionization Detector), 非常规排放, 例如甲醇甲醛排放通过 FTIR 测量。

试验过程中冷却水温度控制在 85±2 °C, 机油温度控制在 110±2 °C, 每个测试点待发动机运行状况稳定数分钟后记录数据。仪器的测量精度如表 2 所示。

表 1 发动机参数

Table 1 Engine specifications

项目	参数
发动机类型	直列六缸, 每缸四气门, 水冷, 增压中冷
缸径×行程/mm	110×135
连杆长度/mm	130
排量/L	7.7
压缩比	21.5
燃烧室型式	缩口 ω 型
标定功率/kW	230 (2200 r/min)
最大转矩/(N·m)	1350 (1200-1700 r/min)
电控燃油系统	BOSCH 第二代高压共轨

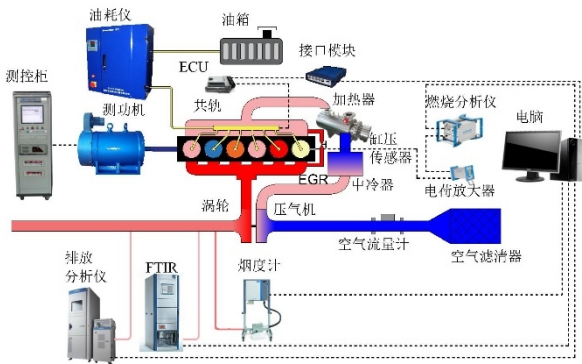


图 1 试验台架示意图

Figure 1 Schematic of test bench arrangement

表 2 测量仪器精度

Table 2 Uncertainties of the measurement instruments

测量仪器	精度
排气分析仪 (HORIBA 7100DEGR)	1×10 ⁻⁶
烟度计 (AVL 415S)	0.001 FSN
缸内压力传感器 (Kistler 6125C)	-16 pC/bar
空气流量计 (ToCeil 120N80)	0.1 m ³ /h
油耗仪 (AVL 733S)	0.01 kg/h

1.2 试验燃料

为建立柴油不同族组成 (重点关注多环芳烃和总芳烃) 与发动机排放特性关系, 探明满足京 6b 柴油标准及其更严格标准的燃料理化性质对污染物排放的影响规律 (污染物排放数据基于去除 DOC、DPF、SCR 等后处理器得到), 本次试验中配制不同多环芳烃、总芳烃、链烷烃和环烷烃含量的六种油品, 分析不同烃族组分以及密度、粘度和馏程温度等物理性质对柴油机燃烧和排放的影响, 不同油品的主要特性如表 3 所示。

表 3 京博试验油品的主要特性

Table 3 Main properties of test fuels

序号	B1#	B2#	B3#	B4#	B5#	B6#
十六烷值	52.8	52.4	53.1	55.6	51.4	58.3
运动黏度 (20℃) (mm ² /s)	3.19 2	3.97	3.55 6	3.8	2.9	3.8
凝点(℃)	-47	-22	-28	-27.0	-29.0	-27.0
初馏点 (℃)	186. 8	177. 4	184. 9	186. 4	175. 7	186. 4
10%回收温度(℃)	209. 7	205. 9	209. 9	214. 5	192. 3	214. 5
30%回收温度(℃)	229. 6	233. 7	232. 1	239. 2	208. 6	239. 2
50%回收温度(℃)	252. 2	260. 7	253. 4	255. 8	242. 1	255. 8
90%回收温度(℃)	292. 4	324	310. 8	305. 4	313. 6	305. 4
95%回收温度(℃)	309. 8	339. 2	330. 6	324. 3	324. 3	324. 3
馏出量 (mL)	96.1	96.4	96.2	96.4	96.3	96.4
残留量 (mL)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
密度 (20℃) (kg/m ³)	809. 9	839. 7	829	821. 7	806. 3	821. 7
多环芳烃 (%(m/m))	0.6	4.9	2.6	2.3	2.7	2.3
是否添加十六烷值改进剂	/	是	是	是	/	是

链烷烃 (%(m/m))	54.2	43.0	43.0	48.3	62.5	48.3
环烷烃 (%(m/m))	30.4	34.0	37.0	38.4	15.7	38.4
单环芳 烃 (%(m/m))	14.8	18.1	17.4	11.0	19.1	11.0
二环芳 烃 (%(m/m))	0.5	4.4	2.4	2.1	2.5	2.1
三环芳 烃 (%(m/m))	0.1	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2
多环芳 烃	0.6	4.9	2.6	2.3	2.7	2.3
总芳烃 (%(m/m))	15.4	23.0	20.0	13.3	21.8	13.3
总重量 (%(m/m))	100. 0	100. 0	100. 0	100. 0	100. 0	100. 0

1.3 试验方法

根据 GB14951-2007《汽车节油技术评定方法》、GB18297-2001《汽车发动机性能试验方法》、GB17691-2005《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法》及《重型车用压燃式、气体燃料点燃式发动机排放污染物排放限值及测量方法（北京第 VI 阶段）》试验要求，在国 VI 排放条件下，以市售 0#和-20#柴油作为对比油开展试验，分别研究不同燃料对燃烧特性、外特性工况下的动力性和经济性以及测试循环下的油耗和排放的影响，测试循环采用 WHSC 循环和非道路移动机械用柴油机——恒定转速下工作的柴油机测试循环（以下简称“恒定转速测试循环”），WHSC 循环中的 5 个测试转速分别为 988、1144、1299、1454、1765、2200 r/min，5 个转速下测试的负荷分别为 10%、25%、50%、70%和 100%负荷，发动机冷热怠速工况转速均为 600 r/min。恒定转速测试循环的测试转速为 2200 r/min，测试的负荷分别为 10%、25%、50%、75%和 100%负荷。

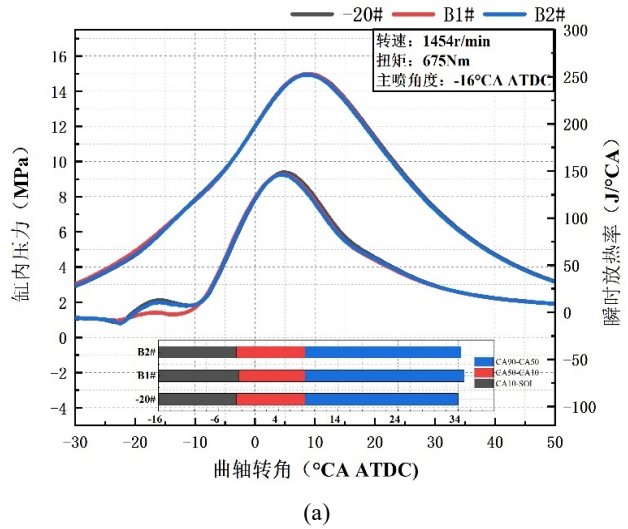
2 结果与分析

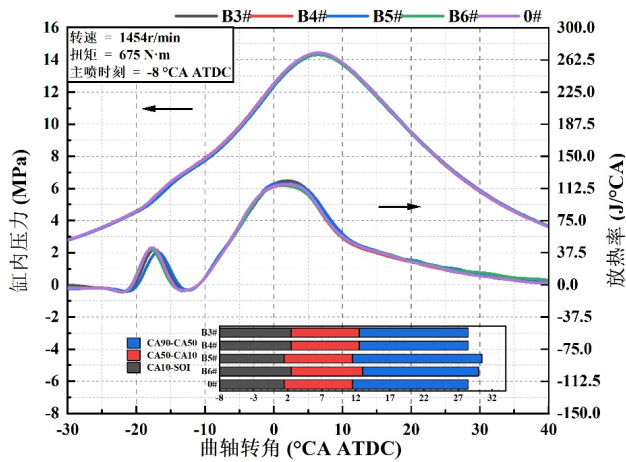
2.1 不同京博油品对燃烧特性的影响

图 2 所示为 B1#-B6#油品和-20#、0#柴油在同一工况下的缸内燃烧压力和放热率曲线。图像下半部分为缸内燃烧的相位图，从主喷正时到释放 10%的总热量（CA10）之间的时间段被称为滞燃期。CA10 到释放 50%总热量的时刻（CA50）之间的时间段被称为速燃期。CA10 到释放 90%总热量的时刻（CA90）之间的时间段称为燃烧持续期。

可以看出，相比于市售的 0#和-20#柴油，京博的六种油品没有明显区别，因此如果将这六种京博油品作为替代应用到现有的柴油机上不需要考虑发动机硬件结构和强度的修改，可以直接进行燃料的转换。

图 3 所示为不同油品在试验中不同爆压数值出现的频度和爆压对应曲轴转角出现的频度。可以看出，在相同的喷油策略下，一百个循环，B1#和 B5#油品的燃烧相位比较靠近上止点，做功的有效性大。燃烧稳定性方面，一百个循环内，B1#、B3#和 B6#油品出现的缸内压力比较集中，稳定性最好。





(b)

图2 不同油品在1454转/分的50%负荷下的燃烧特性

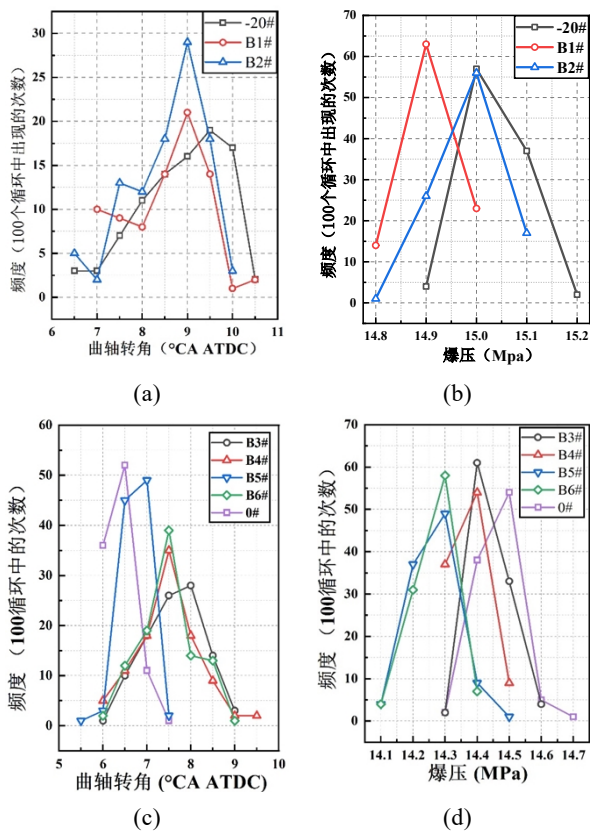


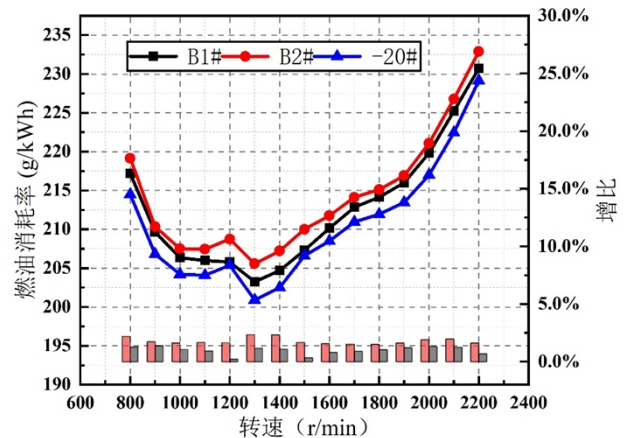
图3 不同油品在1454转/分的50%负荷下的燃烧稳定性

2.2 不同京博油品对质量燃油消耗率和体积燃油消耗率的影响

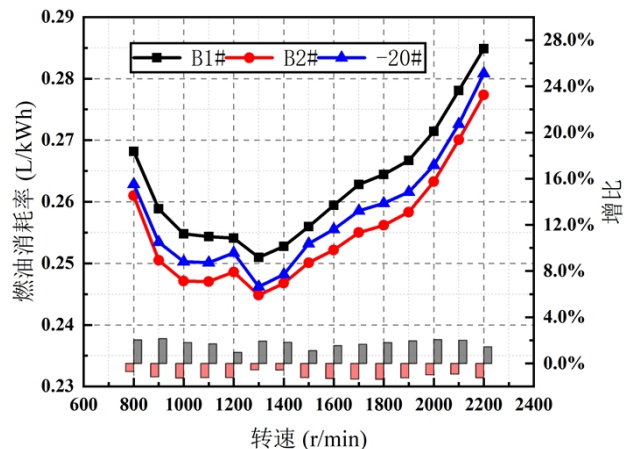
有效燃油消耗率方面,从图4中可以看出,八种油品均在外特性曲线的1200 r/min-1400 r/min转速区间有效燃油消耗率最低。第一部分三个油品中,-20#油品的质量燃油消耗率最低,B2#油品的最高。这主要是因为B2#的密度较大,柴油机喷射量的控制主要通过柴油喷射体积的控制,柴油密度增加,喷射进缸内的燃油质量也随之增加,所以B2#的质量油耗比较高。在中等转速范围内,B1#油品的质

量燃油消耗率与-20#油品接近。在低转速和高转速下,B1#和B2#油品的油耗率接近,明显高于-20#油品。第一部分三个油品中,B2#油品的体积燃油消耗率最低,相比于-20#油品最大降幅为1.3%,B1#油品的最高。在中低转速下,B2#油品的体积燃油消耗率与-20#油品降幅较小;在高转速下降幅相对较大。在全部外特性工况下,B1#油品的体积油耗率均明显高于-20#油品。

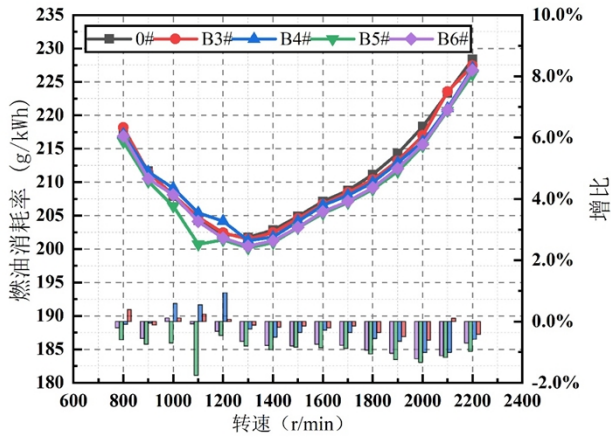
第二部分五个油品中,B5#油品的质量燃油消耗率最低,原因与前文分析类似,B5#的密度是五种油品中最小的,0#和B3#油品的质量燃油消耗率较高;B5#油品相比于0#油品最大降幅为1.7%。在低转速下,除B5#油品外,其余三种京博油品与0#油品油耗率基本相当。在中高转速下,四种京博油品的油耗率均低于0#油品,其中B5#与B6#油品较低。体积油耗方面,0#油品的体积燃油消耗率最低,B5#油品的最高。在低转速下,四种京博油品的体积油耗率均明显高于0#油品。在中高转速下,B3#和B5#油品的体积油耗率明显高于0#油品,B4#和B6#油品与0#油品相当,甚至在2000 r/min附近B6#油品的体积油耗率低于0#油品,最大降幅为0.33%。



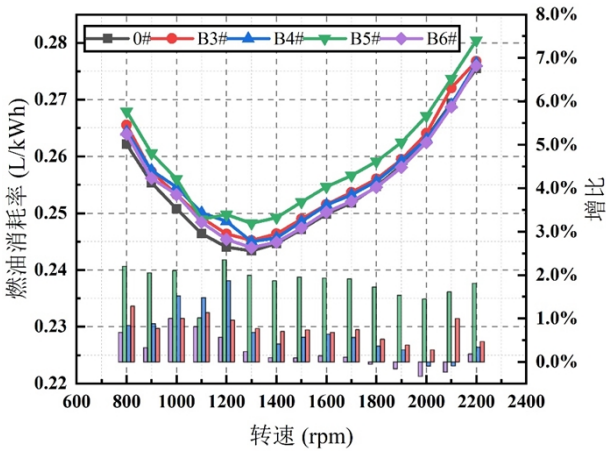
(a) 第一部分三种油品的质量油耗率



(b) 第一部分三种油品的体积油耗率



(c) 第二部分五种油品的质量油耗率



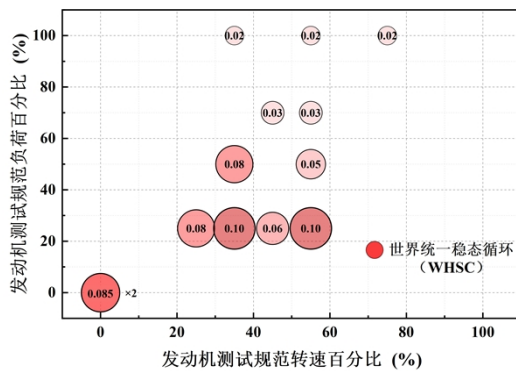
(d) 第二部分五种油品的体积油耗率

图4 不同油品在外特性工况下的有效燃油消耗率

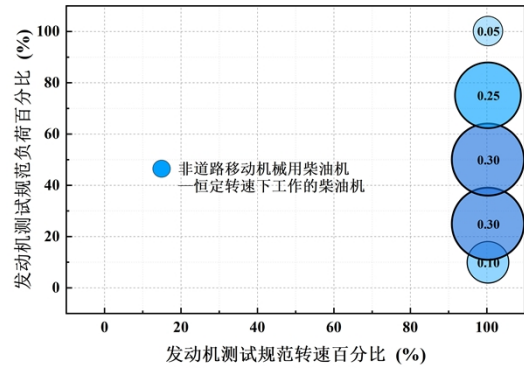
2. 3 不同京博油品对不同测试循环的影响

本节主要从 WHSC 循环和恒定转速测试循环中讨论不同种类油品对柴油机经济性和排放特性的影响。

图5为两个不同测试循环的工况加权系数示意图。



(a) WHSC 测试循环

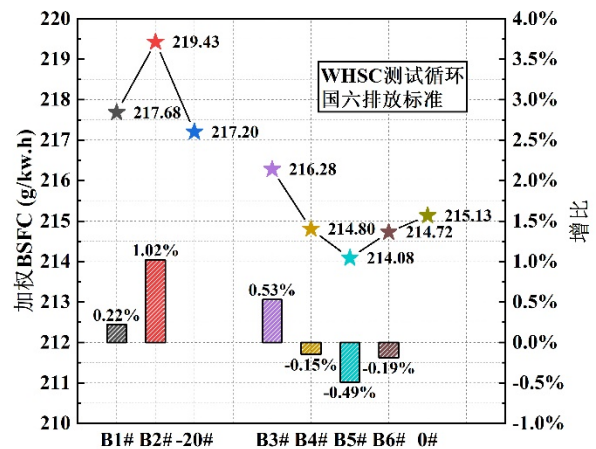


(b) 恒定转速测试循环

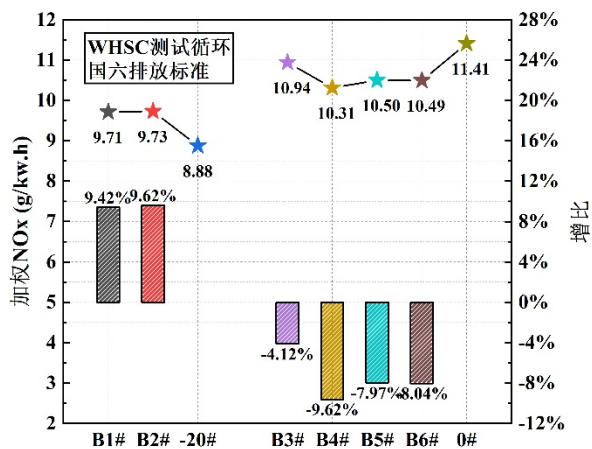
图5 不同测试循环示意图

图6为不同油品在 WHSC 测试循环下的油耗率和加权比排放，第一部分-20#油品的加权油耗率最低，B2#最高，B1#和 B2#油品相比于-20#油品分别升高了 0.22%和 1.02%；第二部分 B5#油品的加权油耗率最低，低于 0#油品，B3#油品最高，B5#油品相比于 0#油品降低了 0.49%。

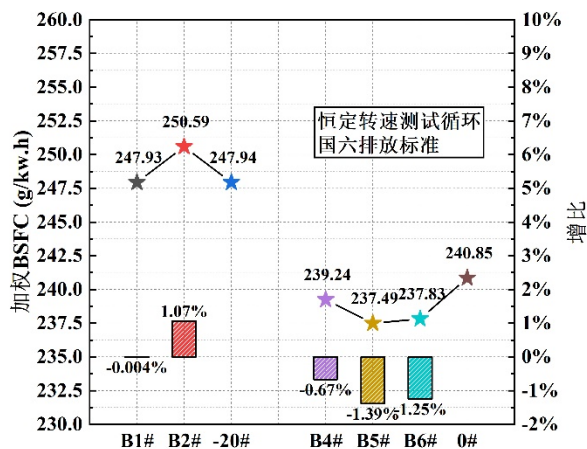
NO_x 排放方面，第一部分-20#油品的加权 NO_x 排放最低，第二部分四种京博油品的 NO_x 排放均低于 0#油品，B4#油品最低，降幅为 9.62%；碳烟排放方面，第一部分 B1#油品的加权碳烟排放最低，相比于-20#油品，降低了 6.36%，但三种油品差别不大；第二部分 B5#油品的加权碳烟排放最低，相比于 0#油品降低了 22.73%，其余三种油品与 0#油品差别不大。



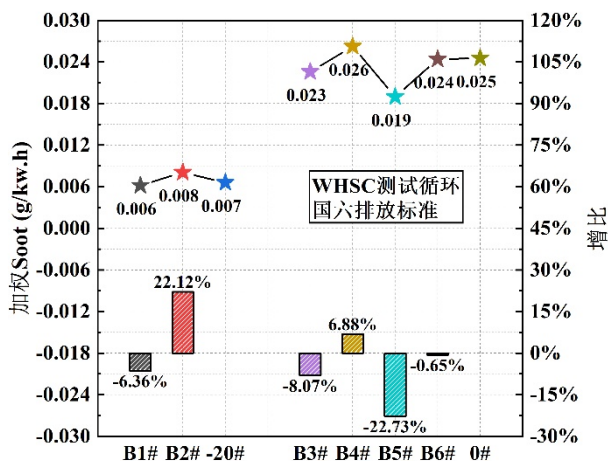
(a) 加权比油耗



(b) 加权 NOx 比排放



(a) 加权比油耗

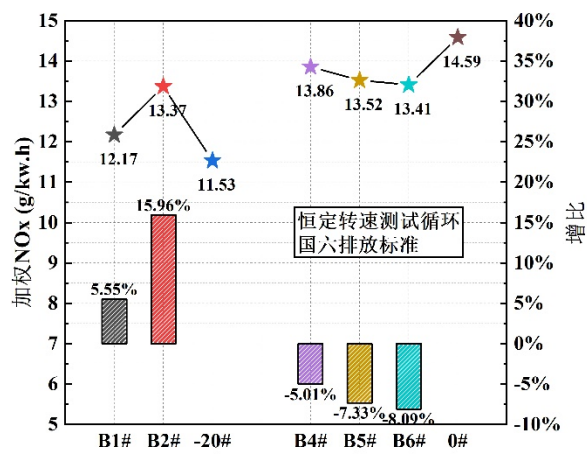


(c) 加权碳烟比排放

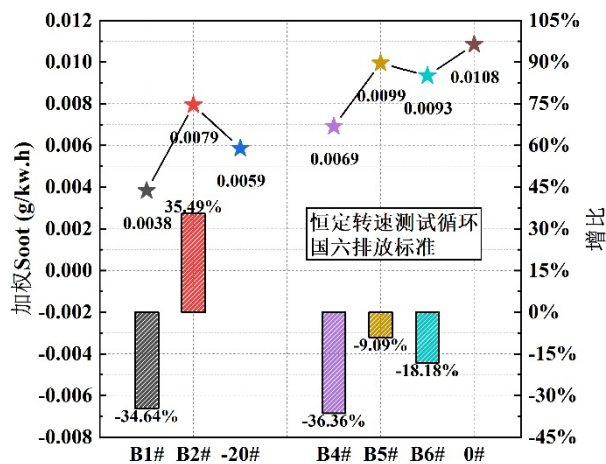
图 6 WHSC 测试循环

图 7 为不同油品在恒定转速测试循环下的油耗率和加权比排放，第一部分 B1#油品的加权油耗率最低，B2#最高，B1#油品相比于-20#油品降低了 0.004%，差别不大；第二部分京博三种油品均低于 0#柴油，B5#油品最低，相比于 0#油品降低了 1.39%。

NO_x 排放方面，第一部分-20#油品的加权 NO_x 排放最低，第二部分三种京博油品的 NO_x 排放均低于 0#油品，B6#油品最低，降幅为 8.09%；碳烟排放方面，第一部分 B1#油品的加权碳烟排放最低，B2#最高，B1#油品-20#油品降低了 34.64%；第二部分京博三种油品的加权碳烟排放均低于 0#柴油，B4#油品最低，相比于 0#油品降低了 36.36%。



(b) 加权 NOx 比排放



(c) 加权碳烟比排放

图 7 恒定转速测试循环

3 结论

(1)通过对不同油品的缸压放热率曲线和燃烧稳定性、做功有效性分析可以发现，六种京博油品相比于市售的-20#和 0#柴油在缸内燃烧过程中差异不大。燃烧稳定性和做功有效性方面，B1#和 B5#

做功的有效性大。B1#、B3#和 B6#油品稳定性最好。

(2) 外特性工况下, 第一部分, -20#油品的质量油耗率最低; 在中等转速范围内, B1#油品的油耗率与-20#油品接近。B2#油品的体积燃油消耗率最低, 相比于-20#油品最大降幅为 1.3%, B1#油品的最高; 对于第二部分, B5#油品的质量燃油消耗率最低, 最大降幅为 1.7%。体积燃油消耗率方面是 0#油品最低, B5#油品的最高。

(3) WHSC 测试循环下, B5#和 B6#有效燃油消耗率较低, 降幅分别为 0.49%和 0.19%, 0#和 B4#的有效燃油消耗率较高, 排放方面, B4#和 B6#的加权 NO_x 排放较低, 最大降幅为 9.62%, B5#油品的碳烟排放数值较小, 相比于 0#油品降幅为 22.73%; 恒定转速测试循环下, B5#和 B6#有效燃油消耗率较低, 最大降幅为 1.39%, B5#和 B6#的加权 NO_x 排放较低, 最大降幅为 8.09%, B1#和 B4#油品的加权碳烟排放较低, 降幅分别为 34.64%和 36.36%。

参考文献:

- [1] SHIMAZAKI N, TSUCHIYA K, MORINAGA M, et al. Parametric Study and Clarification of Determination Factors of Diesel Exhaust Emission Using a Single Cylinder Engine and Model Fuels-JCAP Combustion Analysis Working Group Report Part I[C]. SAE Trans, 2002, 1720-1745.
- [2] XU G, JIA M, LI Y, et al. Potential of reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion coupled with variable valve timing (VVT) strategy for meeting Euro 6 emission regulations and high fuel efficiency in a heavy-duty diesel engine[J]. Energy Convers Manage, 2018, 171: 683-98.
- [3] SHUNDOH S, et al. The effect of injection parameters and swirl on diesel combustion with high pressure fuel injection[C]. SAE, 1991, 910489.
- [4] MINAMI, T, et al. Reduction of diesel engine NO_x using pilot injection[C]. SAE, 1995, 950611.
- [5] KROGERUS T, HYVÖNEN M, HUHTALA K. Analysis of common rail pressure signal of dualfuel large industrial engine for identification of injection duration of pilot diesel injectors[J]. Fuel, 2018, 216: 1-9.
- [6] LIU H, MAO B, LIU J, et al. Pilot injection strategy management of gasoline compression ignition (GCI) combustion in a multi-cylinder diesel engine[J]. Fuel, 2018, 221:116-127.
- [7] MIKULIC L, et al. Exhaust-emission optimization of DI-diesel passenger car engine with high-pressure fuel injection and EGR[C]. SAE, 1993, 931035.
- [8] KONNO M, et al. An investigation on the simultaneous reduction of particulate and NO_x by controlling both the turbulence and the mixture formation in DI diesel engines[C]. SAE, 1993, 932797.
- [9] YANG C, et al. Effect of rich and high turbulence combustion on NO_x and particulate emissions from a high speed direct-injection diesel engine[J]. COMODIA98, 1998, 63-68.
- [10] RAKOPOULOS C D, RAKOPOULOS D C, MAVROPOULOS G C, et al. Investigating the EGR rate and temperature impact on diesel engine combustion and emissions under various injection timings and loads by comprehensive two-zone modeling[J]. Energy, 2018, 157: 990-1014.
- [11] TANG Q, SAMPATH R, SHARMA P, et al. Study on the effects of narrow-throat pre-chamber geometry on the pre-chamber jet velocity using dual formaldehyde PLIF imaging[J]. Combustion and Flame, 2022, 111987.
- [12] ULLMAN T, et al. Effects of cetane number, cetane improver, aromatics, and oxygenates on 1994 heavy-duty diesel engine emissions[C]. SAE, 1994, 941020.
- [13] TSURUTANI K, et al. The effects of fuel properties and oxygenates on diesel exhaust emissions[C]. SAE, 1995, 952349.
- [14] NYLUND N, et al. Effects of physical and chemical properties of diesel fuel on NO_x emissions of heavy-duty diesel engines[C]. SAE, 1997, 972997.
- [15] AKASAKA Y, et al. Effects of fuel properties on exhaust emission from DI diesel engine[C]. Int. Trans. JSME, Series B, 1998, 41(1): 13-18.
- [16] FUJIMOTO Y, et al. Effects of diesel fuel properties on particulate emissions from a D.I. diesel engine[C]. Trans. JSAE, 1996, 27(1): 46-51.
- [17] OGAWA H, et al. Chemical analysis and characterization of diesel fuel in relation to particulate emission[C]. Trans. JSAE, 1996, 27(3): 53-58.
- [18] NAKAKITA K, et al. Effect of diesel fuel properties on exhaust emissions[C]. Trans. JSAE, 1999, 30(2): 55-61.
- [19] IKEDA A, et al. Study on thermal cracking and oxidation process of hydrocarbon fuel in flow reactor[C]. Proc. JSME, 1998, 985(1): 167-168.