

军用车辆柴油机燃用航空煤油性能研究

姚广涛¹, 刘宏威¹, 杨春浩², 刘伍权¹

(1. 军事交通学院 军用车辆系, 天津 300161; 2. 军事交通学院 研究生大队, 天津 300161)

Study on the Performance of Military Vehicle Diesel Engine Fueled with Jet Fuel

YAO Guangtao¹, LIU Hongwei¹, YANG Chunhao², LIU Wuquan¹

(1. Military Vehicles Department, Military Transportation University, Tianjin 300161, China;

2. Postgraduate Training Brigade, Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

Abstract: Based on the contrast analysis of the physicochemical property of jet fuel and automotive diesel fuel, an experimental study on the external and load characteristics of jet fuel and diesel respectively was carried out on an electronically controlled high pressure common rail military diesel engine. Results show that compared with diesel operation, the dynamic performance of high pressure common rail diesel engine fueled with jet fuel is not obviously different. Under external characteristic conditions, the power and torque decrease by an average of 0.89%, and the brake specific fuel consumption decreases by 0.62%, the CO and NO_x emissions decrease by 6.8% and 3.8% respectively and HC emission increases by 40.5%, with an average of 15.6%. Under load characteristic conditions, the brake specific fuel consumption decreases by 1.56%, 2.54% and 2.24% respectively (corresponding engine speed is 1 000, 1 400 and 1 900 r/min respectively).

摘要: 对比分析航空煤油和车用柴油理化特性基础上,在某型电控高压共轨型军用柴油机上开展了分别燃用航空煤油和柴油的外特性和负荷特性台架试验研究。研究结果表明:与燃用柴油相比,高压共轨柴油机燃用航空煤油,动力性能未出现明显的下降,外特性下功率和转矩平均下降了0.89%;有效燃油消耗率在外特性下平均下降了0.62%,发动机有害物CO排放平均减少了6.8%,HC排放平均增加了40.5%,NO_x排放平均减少了3.8%,PM排放最多下降40%,平均下降了15.6%。在负荷特性下(发动机转速分别为1 000、1 400、1 900 r/min),有效燃油消耗率分别平均下降了1.56%、2.54%、2.24%。

关键词: 内燃机;柴油机;航空煤油;柴油;发动机性能;台架试验研究

Key words: IC engine; diesel engine; jet fuel; diesel; engine performance; experimental study

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2017.01.013

中图分类号: TK428⁺.9

文献标识码: A

0 概述

未来高技术条件下作战如何减少军用动力装备燃料保障种类,对于有效提高战时保障能力至关重要^[1]。为了提高军用车辆战时燃料适应能力,部分

国家的军用车辆动力装置不仅可以燃用传统燃料柴油,还可以燃用航空煤油、生物柴油等燃料,为实现战时油料统一保障奠定了基础,提高了作战后勤保障与应急能力^[2]。

从20世纪50年代开始,为了提高军用车辆多

种燃料的适应能力,美军等开发了多燃料发动机,可以实现军用车辆发动机燃用汽油、柴油、煤油、重油等多种燃料^[3]。20世纪70年代,美军开始实行由装备使用多种燃料向“单一化”方向发展的战略转变^[4],提出“战场单一燃料(the single fuel concept, SFC)”概念,即指在战场环境下,所有的地面车辆装备和航空装备均使用同一种燃料。进入20世纪90年代后,美军继续实施“军用汽车现代化计划”,高机动多用途轮式汽车(HMMWV)、中型战术汽车(FMTV)、重型高机动战术汽车(HEMTT)发动机均可适应柴油和JP-8军用航空煤油^[5]。

军用车辆战时实现燃用航空煤油,可以大幅简化中国军用车辆在战时后勤保障系统,实现全军油料统一保障,提高后勤保障效率^[6]。中国对于军用柴油车燃用航空煤油技术研究还处于起步阶段^[7],极大地制约了动力装置战时的燃料适应能力和战时保障能力。

针对中国某型军用车辆柴油机,通过台架试验对比分析了军用车辆柴油机燃用柴油与航空煤油的性能,论证了在战场环境下采用航空煤油替代柴油做为中国军用车辆燃料的可行性。

1 燃料特性对比分析

中国军用航空煤油和车用轻柴油理化特性见表1^[8-9]。

表 1 中国航空煤油和车用轻柴油理化特性		
项目	参数	
燃料	车用轻质柴油	航空煤油(RP-3)
分子式	C ₁₅ ~C ₂₃	C ₇ ~C ₁₆
密度/(kg·L ⁻¹)	0.82~0.88	0.79~0.83
沸点/℃	180~370	185
自燃温度/℃	350~380	380~425
汽化潜热/(kg·kJ ⁻¹)	375	345
凝点/℃	-50	-60
理论空燃比	14.5	14.7
低热值/(kJ·m ⁻³)	42 500	43 200
混合气热值/(kJ·m ⁻³)	3 790	3 820
运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	2.500	1.814
表面张力/(10 ³ ·N·m ⁻¹)	27.0	23.6
十六烷值	49	43

从表1可知,航空煤油与车用轻质柴油差别主要表现在含C量、密度、沸点、自燃温度、十六烷值、凝点、热值和黏度等方面。燃料分子中的含C量越多,燃烧过程中越容易形成积炭和冒烟。RP-3航空煤油C组分范围是C₇~C₁₆,明显少于轻质柴油(C

组分范围是C₁₅~C₂₃),因此在相同情况下其碳烟排放低于柴油机。燃油密度与燃油的比能量直接相关,但还与燃料的低热值有关。航空煤油比轻质柴油的密度小,而混合气热值略高于轻质柴油,因此在喷油量变化不大情况下,其混合气燃烧产生的热量接近。燃油蒸发能力与燃油的黏度、沸点、表面张力有关。航空煤油的黏度、沸点与表面张力明显低于轻质柴油,表明其蒸发性优于轻质柴油,因此在相同喷油压力与温度下,其混合气形成质量优于柴油机。十六烷值是表示燃油着火性能的重要参数,十六烷值过低会造成发动机起动困难、滞燃期长、工作粗暴等问题。航空煤油十六烷值低,自燃点高于轻质柴油,表明其着火性比柴油差,滞燃期长,加之其蒸发能力优于柴油,因此会出现滞燃期长、工作粗暴等问题。军用柴油车低温环境适应能力是制约其保障能力的因素之一,其中燃料的抗凝能力至关重要。航空煤油凝点低于轻质柴油,有利于在严寒低温环境下使用,具有良好的环境适应能力。燃油的润滑能力直接影响了系统部件的可靠性。航空煤油的黏度比轻质柴油低,而柴油机喷油系统中部分关键部件是依赖柴油自身的润滑能力进行润滑的,柴油机长时间直接燃用航空煤油可能会造成部件的磨损。

2 试验装置与方法

结合中国军队目前装备的军用车辆发动机结构特点,针对航空煤油的性质特点及燃烧特性,在军用动力装置广泛采用的某重型柴油机上进行燃用航空煤油时发动机性能试验,并与相同条件下使用柴油作为燃料的性能特性进行对比。发动机主要参数见表2。台架测控系统为AVL测功系统,试验仪器及型号见表3。图1为试验台架系统框图。

表 2 柴油机主要技术参数	
项目	参数
发动机型式	水冷,4冲程,增压中冷
气缸数×单缸气门数	6×4
缸径/mm×行程/mm	126×155
活塞总排量/L	11.596
标定功率/kW	294(1 900 r/min)
最大扭矩/(N·m)	1 920(1 000~1 400 r/min)
喷油装置	电控高压共轨

利用建立的发动机台架测试系统,在发动机结构参数和控制参数不变的情况下,分别进行柴油机燃用柴油、航空煤油时的外特性(动力性、经济性、排放特性)和3种转速下(1 000、1 400、1 900 r/min)的

表 3 台架测试系统

仪器	厂家及型号
发动机瞬态测功机	AVL DYNOROAD DRIVES 404/6 SL(EU)
全自动控制系统	AVL PUMA 1.5.1
燃油流量计和燃油温控系统	AVL 735& AVL 753
不透光烟度计	AVL OPACIMETER 439
废气分析仪	AVL AMA i60
进气流量计	ABB

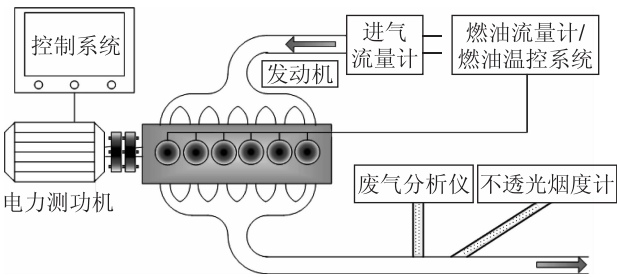


图 1 发动机试验台架系统框图

负荷特性试验。

3 试验结果与分析

3.1 外特性对比

在柴油机油门全开情况下,测量在不同转速情况下发动机分别燃用 0# 轻质柴油、RP-3 型航空煤油时的功率(P_e)、转矩(T_{iq})及有效燃油消耗率(b_e)。测量结果如图 2 所示。

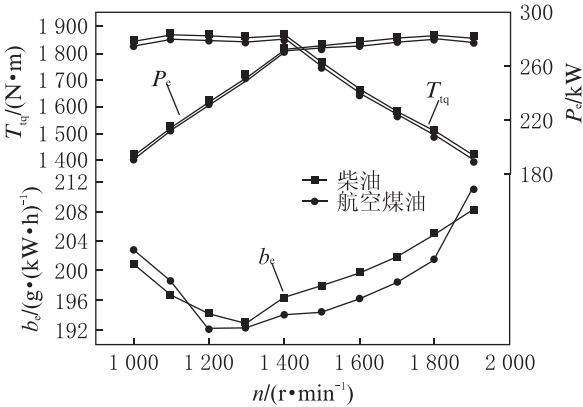


图 2 柴油机燃用航空煤油和柴油时外特性曲线

从发动机功率和转矩试验结果来看,与燃用柴油相比,燃用航空煤油动力性指标略有下降,下降幅度在 0.66%~1.12%之间,在全部转速范围内动力性平均下降了 0.89%。有效燃油消耗率在发动机低速(<1 150 r/min)和高转速(>1 850 r/min)时略高于燃用柴油,增幅在 0.92%~1.37%之间,而在中间转速燃用航空煤油有效燃油消耗率略低于燃油柴油,降幅在 0.27%~1.92%;在发动机全部转速范围

内有效燃油消耗率平均下降了 0.62%。

该试验结果与国外在机械泵柴油机上的试验结果明显不同:文献[10]在一款 558 kW 直喷式柴油机上开展了燃用航空煤油 JP8 与柴油时性能对比试验研究,结果表明燃用航空煤油时发动机动力性能出现明显下降,外特性功率下降幅度在 2.1%~5.7%之间,在全部转速范围内动力性平均下降了 4.8%,有效燃油消耗率平均上升了 2.1%。造成该结果的主要原因是发动机燃用不同燃料时循环供油量发生明显变化,燃用 JP8 航空煤油时,发动机不同转速下每小时燃油消耗量比燃用柴油时下降幅度在 1.6%~3.8%之间,平均下降了 2.9%。

本试验采用 RP-3 航空煤油密度为 0.793 g/cm³, 0# 柴油密度为 0.845 g/cm³,密度下降高达 6%,但发动机动力性能并没有发生明显的变化,究其原因主要是本试验发动机为高压共轨供油系统,文献[10]采用传统的机械泵。传统的机械泵每循环供油量取决于喷油泵柱塞有效行程,在发动机转速一定、油门开度一定时,无论燃用何种燃料,每循环供油量的体积均不变,造成了燃用航空煤油时每循环发动机供油量出现明显的下降,从而引起发动机性能的下降。而高压共轨柴油机每循环供油量取决于喷油脉宽,由于航空煤油的黏度(1.8 mm²/s)小于柴油(2.5 mm²/s),喷射航空煤油时流动阻力小于喷射柴油,喷油速率加快,使得喷射航空煤油时喷油量减少的幅度下降。图 3 为外特性试验时不同转速下每小时燃油消耗量 B 对比曲线。试验结果表明:外特性下油门全开时,燃用航空煤油燃油消耗量比燃用柴油减少幅度平均为 1.5%,其减少程度大幅低于文献[10]中燃用航空煤油时供油量的减少。

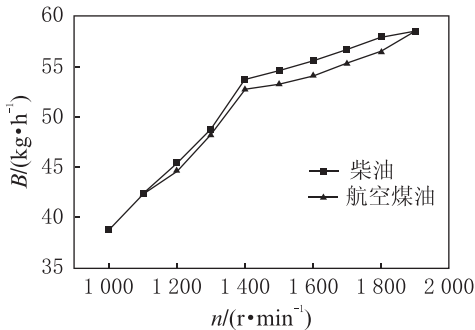


图 3 外特性下每小时燃油消耗量曲线对比

从图 2 可以看到,在发动机低速和高速时,燃用航空煤油时发动机有效燃油消耗率出现不降反升的现象。分析其原因:从图 3 可以看到,在发动机低速和高速时,燃用航空煤油时 B 与燃用柴油时逐渐接近。发动机转速越低,燃用航空煤油时其蒸发性好

对燃烧带来影响的优势减弱,动力性并未出现明显改善,使得有效燃油消耗率不降反升;发动机转速越高,航空煤油十六烷值低对燃烧带来滞后的影响就越明显^[11],同样造成了有效燃油消耗率出现了不降反升的现象。其他工况下虽然燃用航空煤油时供油量有所减少,但由于航空煤油热值略高于柴油,蒸发性好于柴油,使得其性能与燃用柴油相比未出现明显的下降。

3.2 负荷特性对比

为了对比分析发动机转速不变而负荷变化时燃油经济性变化,分别在1 000、1 400、1 900 r/min转速下开展了燃用航空煤油和柴油时发动机负荷特性试验,试验结果如图4所示。试验结果表明:在发动机相同转速不同负荷时,燃用航空煤油与燃用柴油相比较,除大负荷工况外,有效燃油消耗率均出现明显下降,转速为1 000 r/min时平均降幅为1.56%,转速为1 400 r/min时平均降幅为2.54%,转速为1 900 r/min时平均降幅为2.24%。分析其主要原因是:发动机部分负荷工作时,在相同喷油压力的情况下,柴油的蒸发对温度的影响更为敏感,航空煤油仍然能够保持良好的雾化与蒸发,因此燃烧速度更快更完全,热效率更高,有效燃油消耗率反而会下降。

3.3 排放特性对比

图5为发动机在外特性下燃用航空煤油和柴油排放有害物浓度变化曲线。其中,气态物浓度为体积浓度,烟度为不透光度。

从试验结果可以看出:燃用航空煤油比燃用柴油时,发动机CO排放有所减少,最多减少了9%,在试验转速范围内平均减少了6.8%。这主要是因为航空煤油沸点低,燃油蒸发性好,加之十六烷值略低于柴油,着火滞燃期有所延长,使得发动机燃用航空燃油时形成的混合气更加均匀,燃烧更加完全。

燃用航空煤油时,其HC排放相对于燃用柴油明显增加,最多增加了46.8%,平均增加了40.5%。这主要是因为相对于柴油,燃用航空煤油时其着火前形成的预混合气数量比较多,余隙及激冷造成的HC排放必然会有所增加。

燃用航空煤油时,NO_x排放略有减少,最多减少了5.5%,平均减少了3.8%。主要是因为是在喷油提前角不变的情况下,发动机燃用航空煤油时滞燃期延长,使得缸内最高压力峰值点比燃用柴油出现了推迟,缸内最高温度有所降低,使得NO_x排放略有减少。

发动机颗粒物排放不透光烟度试验结果表明:

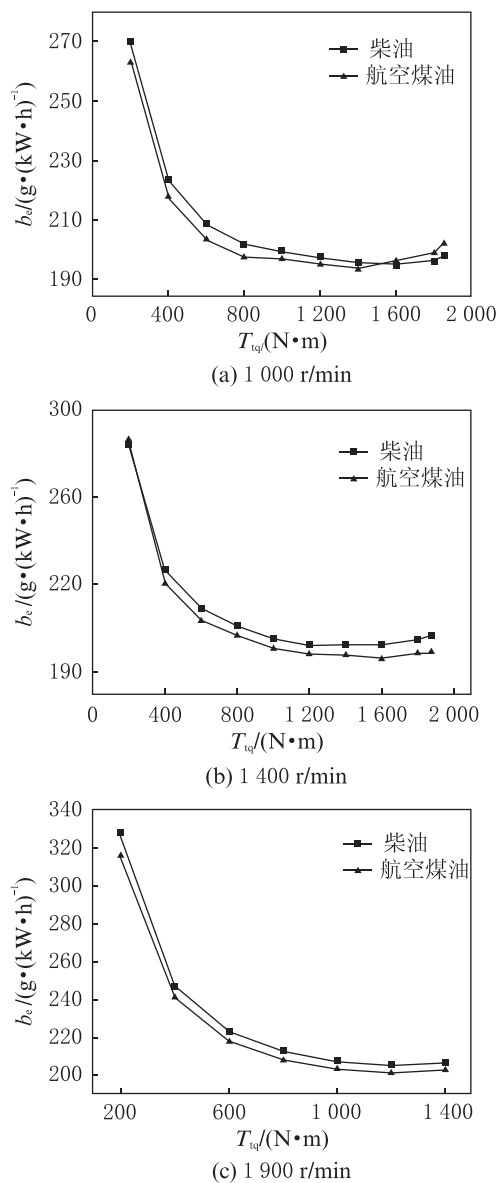


图4 燃用航空煤油和柴油负荷特性曲线

燃用航空煤油时,颗粒物排放出现了较明显的下降,特别是中低转速下降明显,最多下降了40%,平均下降了15.6%。这主要是因为航空煤油分子含碳量比柴油少,加之蒸发性好,所以燃烧过程中的扩散燃烧低于燃用纯柴油,碳烟排放明显下降。

4 结论

(1) 高压共轨柴油机,发动机每循环供油量取决于喷油脉宽,由于航空煤油的黏度小于柴油,喷射航空煤油时流动阻力小于喷射柴油,喷油速率加快,造成喷射航空煤油时喷油量的减少幅度下降。由于航空煤油热值略高于柴油,蒸发性好于柴油,使得其性能与燃油柴油相比未出现明显的下降。

(2) 在发动机部分负荷工作时,相同喷油压力的情况下,柴油的蒸发对温度的影响更为敏感;航空煤油

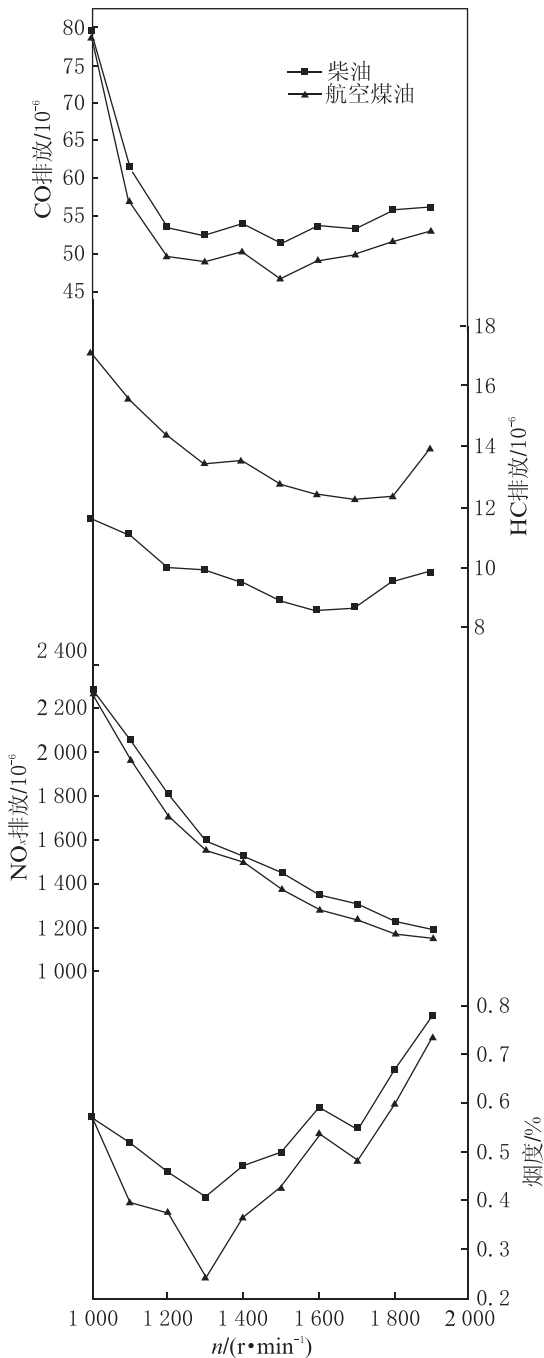


图5 外特性下发动机燃用航空煤油和柴油时排放有害物质浓度变化曲线

的蒸发性能优于柴油,所以在部分负荷时,仍然能够保持良好的雾化与蒸发,因此燃烧更快且更完全,热效率更高。这些因素使得高压共轨柴油机燃用航空煤油时,在部分负荷工况下,有效燃油消耗率反而会下降。

(3) 燃用航空煤油相比燃用柴油时,外特性下发动机 CO 排放最多减少了 9%,在试验转速范围内平均减少了 6.8%;HC 排放最多增加了 46.8%,平均增加了 40.5%;NO_x 排放略有减少,最多减少了 5.5%,平均减少了 3.8%,而 PM 排放出现了较明显的下降,特别是中低转速下降明显,最多下降了

40%,平均下降了 15.6%。

参考文献:

- [1] 任连岭,杨冰,邓才超,等. 战场单一燃料研究进展及我军燃料单一化探讨[J]. 石油商技,2011,29(1):48-54.
REN L L, YANG B, DENG C C, et al. Research on development of single fuel of our army in the battlefield[J]. Petroleum Products Application Research, 2011,29(1):48-54.
- [2] 姚广涛,王兴华. 军用汽车发动机发展方向的研究[J]. 后勤科技装备,1998(6):33-35.
YAO G T, WANG X H. Research on the development of military automobile engine [J]. Logistics Technology and Equipment, 1998(6):33-35.
- [3] 吴学雷. 国内外军用汽车发展历史、现状及趋势综述[J]. 导弹与航天运载技术,2001(3):6-15.
WU X L. Development history status and tendency of foreign military truck[J]. Missiles and Space Vehicles, 2001(3):6-15.
- [4] 陈轲. 军用装备燃料品种单一化探讨[J]. 内蒙古科技与经济, 2011(5):9-10.
CHEN K. Study on the single fuel variety of military equipment [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2011(5):9-10.
- [5] CHRISTOPHER F F. Jane's military vehicles and logistics (1996—1997)[M]. London:Jane's Pub. Co.,1998.
- [6] 姚广涛,刘伍权,刘宏威. 军用车辆战时燃用航空煤油研究现状与分析[J]. 军事交通学院学报,2014,16(5):45-49.
YAO G T, LIU W Q, LIU H W. Current situation and analysis of operating military vehicles with jet fuel in wartime [J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2014, 16 (5):45-49.
- [7] 张虎. 柴油机燃用航空煤油初探[J]. 内燃机,1995(1):40-42.
ZHANG H. Study on diesel engine fueled with aviation kerosene [J]. ICE, 1995(1):40-42.
- [8] 李冰林,魏民祥. 活塞式发动机燃烧煤油研究现状与技术分析 [J]. 小型内燃机与摩托车,2012,41(6):87-90.
LI B L, WEI M X. Research status and technical analysis of piston engine burning kerosene[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2012,41(6):87-90.
- [9] SCHIHL P, GINGRICH E, DECKER L. The combustion and ignition characteristics of varying blend ratios of JP-8 and a coal to liquid fischer-tropsch jet fuel in a military relevant single cylinder diesel engine[J]. Fuels Lubr, 2015,8(2):501-514.
- [10] PANDEY A K, NANDGAONKAR M R. Performance, emission and pump wear analysis of JP-8 fuel for military Use on a 558 kW, CIDI diesel engine[J]. Fuels Lubr, 2010,3(2):238-245.
- [11] 张全,尧命发,郑尊清,等. 柴油、柴油-正丁醇和柴油-DMF 燃烧及排放特性研究[J]. 内燃机工程,2014,35(4):45-50.
ZHANG Q C, YAO M F, ZHENG Z Q, et al. Study on combustion and emission characteristics fueled with diesel diesel-butanol and diesel-DMF blends [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014,35(4):45-50.