

直喷式柴油机燃用 F-T 柴油时燃烧特性的研究

黄勇成, 周龙保, 潘克煜

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 根据实测的喷油器针阀升程和示功图,对一台单缸、直喷式柴油机燃用 Fischer-Tropsch (F-T) 柴油时的燃烧放热规律进行了计算,并系统分析了其燃烧特性. 研究结果表明:与 0 号柴油相比,F-T 柴油的喷油延迟角和喷油持续期稍长,滞燃期平均缩短了 18.7%,预混燃烧放热峰值平均降低了 26.8%,扩散燃烧放热峰值较高,快速燃烧期较短,燃烧持续期相当;燃用 F-T 柴油时的最高燃烧压力略低,最大压力升高率显著降低,燃烧噪声和机械损失较小,有效燃油消耗率和有效热效率得到了改善.

关键词: 直喷式柴油机;F-T 柴油;燃烧特性

中图分类号: TK429 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)01-0005-05

Study on Combustion Characteristics of a Direct Injection Diesel Engine Fueled with Fischer-Tropsch Diesel Fuel

Huang Yongcheng, Zhou Longbao, Pan Keyu

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: On the basis of the recorded in-cylinder pressures and injector needle lifts, the combustion characteristics of an unmodified single-cylinder direct injection diesel engine operating on F-T diesel fuel are analyzed and compared with those of conventional diesel fuel operation. The results show that F-T diesel fuel exhibits a slightly longer delay of injection and duration of injection, an 18.7% average shorter ignition delay, and a comparable total combustion duration when compared to those of conventional diesel fuel. Meanwhile, F-T diesel fuel displays a 26.8% average lower peak value of premixed burning rate and a higher peak value of diffusive burning rate. In addition, the F-T diesel engine has a slightly lower peak combustion pressure, a far lower rate of pressure rise, and a lower mechanical load and combustion noise than the conventional diesel engine. The brake specific fuel consumption is lower and the effective thermal efficiency is higher for F-T diesel fuel operation.

Keywords: direct injection diesel engine; F-T diesel fuel; combustion characteristics

柴油机因其热效率高、输出功率大和 CO₂ 排放低的优点,得到越来越广泛的应用,然而柴油机的发展却始终受到微粒 (PM) 和 NO_x 排放问题的制约. 为了满足日益严格的排放法规,寻找能同时降低柴油机 NO_x 和 PM 排放的措施一直是内燃机界的主要研究课题. 目前,国际上治理柴油机 NO_x 和 PM 排放除了采用超高压燃油喷射、涡轮增压、废气再循

环和排气后处理等技术途径外,寻找高品质清洁代用燃料也是一条有效途径.

近年来的研究表明:煤通过间接液化,即先将煤气化为合成气(CO + H₂),再经 Fischer-Tropsch (F-T) 催化反应合成,所获得的十六烷值极高,几乎不含硫和芳香烃的 F-T 柴油是一种优秀的清洁代用燃料,燃用 F-T 柴油时可大幅降低柴油机的排放^[1].

收稿日期: 2005-04-11. 作者简介: 黄勇成 (1973~),男,博士,副教授. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50306020).

文献[2]研究表明,与常规柴油相比,F-T 柴油的 NO_x 和 PM 排放分别降低 27 %和 21 %. Ricardo 公司对 2002 康明斯 ISM 型发动机燃用 F-T 柴油时的参数进行优化后,可满足美国 2007 年的排放法规^[3].但是,全面研究 F-T 柴油的喷油、燃烧过程及特征的报道较少^[4,5].

本文通过测录发动机的示功图和针阀升程,计算和分析了发动机燃用 F-T 柴油和 0 号柴油时的滞燃期、压力升高率、放热规律等主要燃烧特性参数.

1 试验装置与燃料特性

试验用发动机为 TY1100 型单缸、四冲程、强制水冷、自然吸气、直喷式柴油机.发动机的主要技术参数如表 1 所示.在试验中,保持原发动机参数不变.缸内压力信号和曲轴转角(φ)信号由 Kistler 公司的压力传感器及电荷放大器和角标器测得,针阀升程信号由自制的传感器获得,并利用四川 CS2092 H 型高速数据采集仪同步采集这些信号.

表 1 发动机结构参数

缸径,冲程/cm	10.0,11.5
排量/cm ³	903
标定转速/(r·min ⁻¹)	2 300
标定功率/kW	11
压缩比	18
供油提前角/(°)	25
喷油压力/MPa	19
进气涡流强度	2.3
喷孔直径/cm	0.030(4 孔)

试验所用 F-T 柴油由中科院山西煤炭化学研究所提供.F-T 柴油为无色透明液体,主要成分是直链饱和烃(也称烷烃,C9—C20)和分枝异构的饱和烃,具有较高的氢碳的量之比.表 2 给出了 F-T 柴油的特性,与 0 号柴油相比,F-T 柴油在物性上有以下特点:

(1)具有较高的十六烷值,有利于缩短滞燃期,减少预混燃烧放热量,降低 NO_x 排放和燃烧噪声^[4].

(2)几乎不含 S.燃油中 S 的含量直接影响 PM 排放中硫酸盐的量,因此降低燃油中 S 的含量可以降低 PM 的排放量^[1].

表 2 F-T 柴油与 0 号柴油的特性比较

特性	F-T 柴油	0 号柴油
密度(20 时)/(g·cm ⁻³)	0.76	0.831 2
运动黏度(20 时)/(mm ² ·s ⁻¹)	3.276	3.0~8.0
闪点(闭口)/	74	> 65
凝点/	- 2	< 0
冷滤点/	2	< 4
初馏点/	150	180
终馏点/	350	370
w(S)/%	< 0.000 05	< 0.5
φ (芳香烃)/%	0.1	34.68
低热值/MJ·kg ⁻¹	43.9	42.6
十六烷值	74.8	> 45
w(C)/%	85	86
w(H)/%	15	14

(3)芳香烃含量低,有利于改善发动机的燃烧,降低高致癌的 HC 排放,此外降低燃油中芳香烃含量对于降低 PM、NO_x、CO 都有利^[1].

(4)密度比 0 号柴油小,但低热值比 0 号柴油高,两者乘积之比为 0.94,因此在使用 F-T 柴油时,柴油机的供油系统不必作更多改动.

(5)馏程温度较低,燃油中难以燃烧的重馏分减少,对降低 PM 和 HC 排放有利^[1].

(6)能和普通柴油作任意比例的互溶成为混合油,可用来提高普通柴油的品质.

2 燃烧特性分析

本文的喷油延迟角 θ 定义为从供油始点至喷油始点(即喷油器针阀开始升起的瞬间)对应的曲轴转角,滞燃期定义为从喷油始点到燃烧始点(即缸内压力开始迅速升高的瞬间)对应的曲轴转角,快速燃燃期定义为预混燃烧持续的曲轴转角,燃烧持续期定义为从燃烧始点至燃料完全燃烧之间的曲轴转角.

2.1 喷油延迟角

图 1 给出了在相同的供油提前角下,发动机燃用 F-T 与 0 号柴油时喷油延迟角的对比,图中 p_{me} 为平均有效压力.由图可以看出,在相同的转速下,F-T 柴油的喷油延迟角比 0 号柴油的约大 0.4°~1.0°.这是由于压力波在 2 种燃料中的传播速度不同而引起的.F-T 柴油的密度比 0 号柴油的稍小,因

而 F-T 柴油可压缩性较大,压力波在其中的传播速度小,于是高压波在 F-T 柴油中由出油阀端传播到喷油器端所需的时间较长,所以其喷油延迟角稍大。

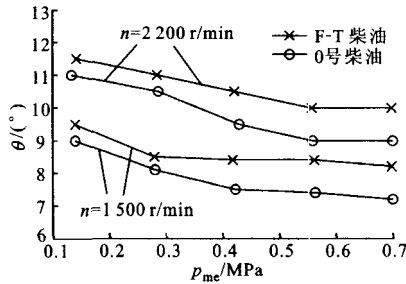


图 1 F-T 柴油与 0 号柴油的喷油延迟角对比

2.2 喷油持续期

图 2 给出了相同转速、同等负荷(即平均有效压力)条件下, F-T 柴油与 0 号柴油的针阀升程对比。图中 F-T 柴油的喷油持续期为 22.2° , 比 0 号柴油 22° 的喷油持续期延长了 0.91% 。F-T 柴油的单位体积所包含的能量为 0 号柴油的 0.94 倍, 所以在相同工况下, 其喷油持续期理论上应延长 6% 。F-T 柴油的实际喷油持续期比理论值小的原因是由于 F-T 柴油的十六烷值较高, 着火性能较好, 而且馏程温度较低, 燃油中难以燃烧的重馏分较少, 燃烧效率较高, 循环喷油量比理论的要少。

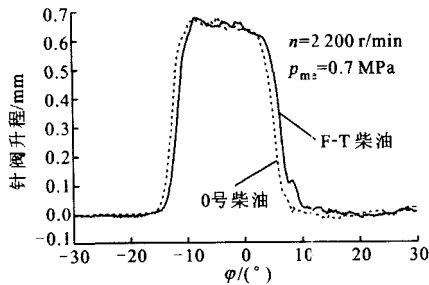


图 2 F-T 柴油与 0 号柴油的喷油器针阀升程对比

2.3 滞燃期

图 3 给出了 F-T 与 0 号柴油的滞燃期对比。由图可以看出, 2 种燃料的滞燃期随转速和负荷变化的基本趋势是一致的, 但 F-T 柴油的滞燃期明显比 0 号柴油的短, 平均缩短了 18.7% 。这主要是由于 F-T 柴油的十六烷值高、着火性能较好的缘故。

2.4 放热率分析

图 4 给出了 F-T 柴油和 0 号柴油的燃烧放热率随曲轴转角的变化。由图可以看出, 与 0 号柴油相比, F-T 柴油的预混燃烧放热峰值(图中第 1 峰)较低, 预混燃烧量较少, 而扩散燃烧放热峰值(图中第 2 峰)较高, 扩散燃烧量较大。

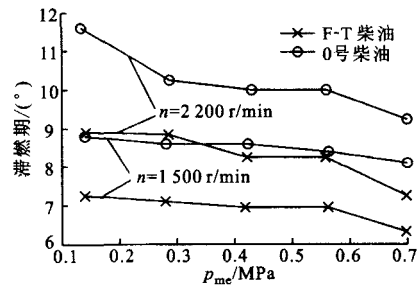


图 3 F-T 柴油与 0 号柴油的滞燃期对比

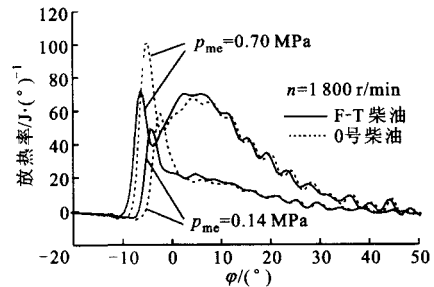
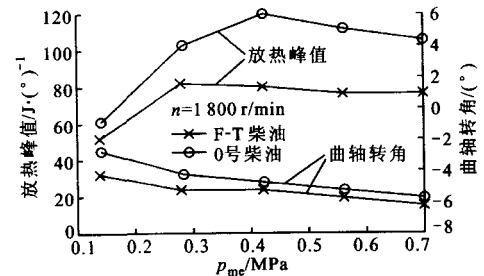
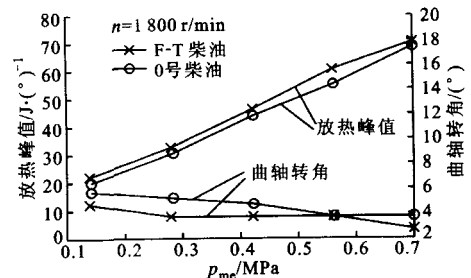


图 4 F-T 柴油与 0 号柴油的瞬时放热率对比

图 5 给出了燃用 F-T 柴油与 0 号柴油时预混燃烧放热峰值和扩散燃烧放热峰值随负荷变化的对比。由图 5a 可以看出, 在整条负荷特性曲线上, F-T 柴油的预混燃烧放热峰值远低于 0 号柴油, 平均降低了 26.8% , 此现象在中、高负荷时更为明显。这是因为与 0 号柴油相比, F-T 柴油的十六烷值极高, 滞燃期较短, 滞燃期内形成的可燃混合气较少, 因而 F



(a) 预混燃烧放热峰值及其所在的曲轴转角



(b) 扩散燃烧放热峰值及其所在的曲轴转角

图 5 F-T 柴油与 0 号柴油的预混燃烧放热峰值和扩散燃烧放热峰值的对比

-T 柴油的预混燃烧量和预混燃烧放热峰值较低. 由图 5a 还可看出, 较短的滞燃期使得 F-T 柴油的预混燃烧放热峰值所在曲轴转角有所提前.

由图 5b 可以看出, F-T 柴油的扩散燃烧放热峰值比 0 号柴油的略高(平均高 6.4%), 这是因为 F-T 柴油参与预混燃烧的燃油量较少, 于是参与扩散燃烧的量较多, 再加上 F-T 柴油馏程较低, 所含的重馏分较少, 蒸发、扩散和燃烧速率较快, 因而 F-T 柴油扩散燃烧阶段的放热峰值较高. 由图 5b 还可看出, F-T 柴油的扩散燃烧放热峰值所在曲轴转角有所提前.

图 6 给出了 F-T 柴油和 0 号柴油的快速燃烧期和燃烧持续期的负荷特性. 由图 6 可以看出, 与 0 号柴油相比, F-T 柴油的快速燃烧期较短, 燃烧持续期相差不大.

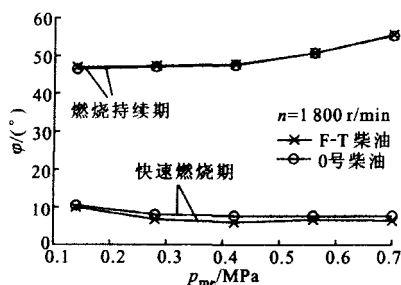


图 6 F-T 柴油与 0 号柴油快速燃烧期和燃烧持续期的对比

2.5 最高燃烧压力和压力升高率

图 7 给出了不同负荷下 F-T 柴油和 0 号柴油缸内压力 p 随曲轴转角的变化. 由图 7 可以看出, F-T 柴油的缸内燃烧压力上升较早而且较平缓, 最高燃烧压力略低, 并且所在的曲轴转角略有延迟.

图 8 给出了燃用 F-T 柴油和 0 号柴油时最高燃烧压力 $p_{\max}$ 和最大压力升高率 $(dp/d\phi)_{\max}$ 随平均有效压力的变化. 由图 8 可以看出, 与 0 号柴油相比, F-T 柴油的最高燃烧压力略低(平均低 1.6%), 最高燃烧压力所在的曲轴转角延迟了约 0.75° , 而最大压力升高率所在的曲轴转角提前了约 0.7° , 最

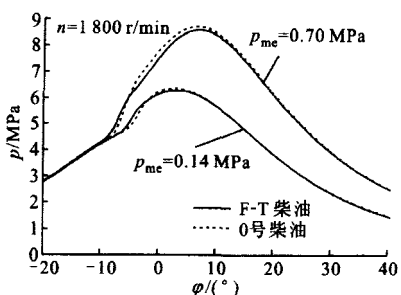
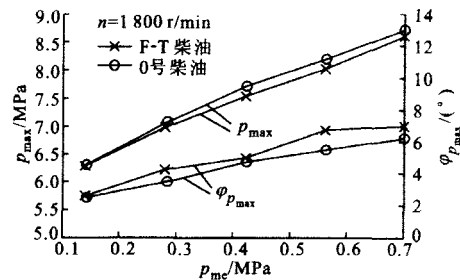
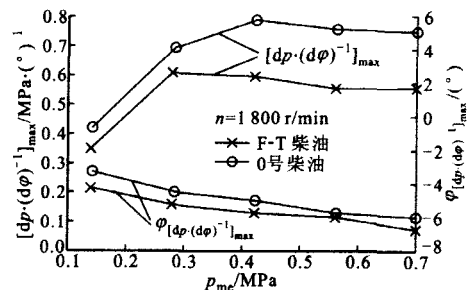


图 7 F-T 柴油与 0 号柴油缸内压力的对比

大压力升高率大幅下降(其曲线形状与预混燃烧放热峰值负荷特性曲线相似), 平均降低了 21.9%, 因而发动机的机械损失和燃烧噪声较小, 这主要归功于 F-T 柴油较短的滞燃期、较少的预混燃烧量.



(a) 最高燃烧压力及其所在的曲轴转角

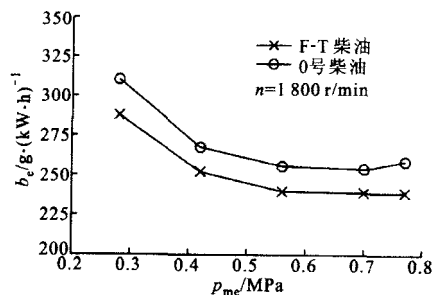


(b) 最大压力升高率及其所在的曲轴转角

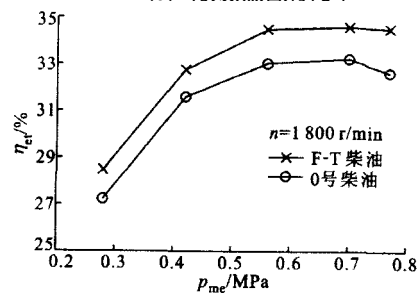
图 8 F-T 柴油与 0 号柴油的最高燃烧压力和最大压力升高率的对比

2.6 有效热效率

图 9 给出了 F-T 柴油与 0 号柴油的有效燃油



(a) 有效燃油消耗率



(b) 有效热效率

图 9 F-T 柴油与 0 号柴油的有效燃油消耗率和有效热效率的对比

消耗率和有效热效率的负荷特性对比.有效热效率通过以下公式求得

$$\eta_{\text{et}} = 3.6 \times 10^6 / (H_u \cdot b_e) \times 100\%$$

式中: H_u 为燃料的低热值; b_e 为有效燃油消耗率.由图 9 可知,在 $n=1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的负荷特性曲线上,与 0 号柴油相比,燃用 F-T 柴油的油耗平均降低了 6.6%,热效率平均提高了 4.5%.燃用 F-T 柴油可改善发动机经济性的原因是:一方面,F-T 柴油的十六烷值较高,着火性能较好,而且馏程温度较低,燃油中难以燃烧的重馏分较少,对改善燃烧有利;另一方面,F-T 柴油的最高燃烧压力和压力升高率较低,具有较高的机械效率.

3 结 论

在一台未作改动的单缸、直喷式柴油机上比较了 F-T 柴油和 0 号柴油的燃烧特性,结果如下:

(1) 与 0 号柴油相比,F-T 柴油的喷油延迟角略大,喷油持续期稍长(但比理论持续期短).

(2) F-T 柴油的滞燃期短(平均缩短约 18.7%),预混燃烧放热峰值较低(平均低 26.8%),扩散燃烧峰值较高(平均高 6.4%),快速燃燃期较短,燃烧持续期相差不大,其燃烧模式接近于压燃式发动机的理想要求.

(3) 燃用 F-T 柴油时的最高燃烧压力略低(平均低 1.6%),最高燃烧压力所在的曲轴转角略有延迟,最大压力升高率大幅下降(平均降低了 21.9%),因而发动机的燃烧噪声和机械损失较小.

(4) 发动机燃用 F-T 柴油时具有较低的燃油消耗率和较高的有效热效率.

参考文献:

- [1] Alleman T L, McCormick R L. Fischer-Tropsch diesel fuels - properties and exhaust emissions: a literature review[R]. SAE Paper, 2003-01-0763. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc, 2003.
- [2] Schaberg P W, Myburgh I S, Botha J J. Diesel exhaust emission using sasol slurry phase distillate process fuels[R]. SAE Paper, 972898. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc, 1997.
- [3] May M P, Vertin K. Development of truck engine technologies for use with Fischer-Tropsch fuels[R]. SAE Paper, 2001-01-3520. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc, 2001.
- [4] Atkinson C M, Thompson G J, Traver M L. In-cylinder combustion pressure characteristics of Fischer-Tropsch and conventional diesel fuels in a heavy duty CI engine[R]. SAE Paper, 1999-01-1472. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc, 1999.
- [5] McMillian M H, Gautans M. Combustion and emission characteristics of Fischer-Tropsch and standard diesel fuel in a single-cylinder diesel engine[R]. SAE Paper, 2001-01-0357. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc, 2001.

(编辑 王焕雪)

“环保型水性聚氨酯家具漆的研制与开发”通过科技成果鉴定

2005 年 11 月 13 日,由西安交通大学能源与动力工程学院环境系郭焱课题组完成的项目“环保型水性聚氨酯家具漆的研制与开发”通过了教育部组织的科技成果鉴定。

传统的油漆原料以石油化工产品聚酯多元醇或聚醚多元醇为原料,不仅成本高,而且对人体、环境有害。随着人们环保意识和环保要求的提高,用对环境无污染、对人体无危害的水性聚氨酯代替传统溶剂型聚氨酯已是大势所趋,然而目前国内使用的水性聚氨酯及其生产原料均依赖进口,价格昂贵。郭焱课题组经过几年的刻苦攻关,成功研制出以植物油为原料生产水性聚氨酯来制备环保节约型家具漆的工艺技术,且制备的水性聚氨酯和家具漆的性能指标达到或超过国外同类产品的水平。植物油在我国种植范围广,种类多,资源丰富,价格低廉,该项目的研制成功不仅拓宽了环保型树脂制备各种家具漆的原材料来源,而且大幅度降低了生产成本,具有极高的经济效益和社会效益,同时该技术还可以应用于汽车、飞机,建筑内外墙涂料,钢材的防锈处理,皮革涂饰剂,纸张、玻璃的涂布等领域,具有广阔的应用前景。

(来源 <http://www.xjtust.com>)