

柴油引燃甲醇双燃料发动机滞燃期的研究

邹洪波, 王利军, 刘圣华, 李彧

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在一台 TY1100 直喷柴油机进气管上安装一套电控甲醇低压喷射装置,进行了柴油引燃甲醇双燃料发动机着火滞燃期的试验研究.结果表明:随着甲醇质量分数的增加,双燃料发动机压缩过程多变指数呈线性减小,着火滞燃期延长;与原柴油机相比,发动机燃用双燃料后,在转速为 1 600 r/min、全负荷、甲醇质量分数为 62%时,着火滞燃期最大延长约 1.5°;提高进气温度,着火滞燃期缩短,进气温度从 20 °C 增加到 40 °C 再到 60 °C 时,对着火滞燃期的影响逐渐增强;发动机的转速升高,在所有试验工况下,以时间计的着火滞燃期缩短;引燃柴油供油定时提前,着火滞燃期延长.

关键词: 着火滞燃期;压缩过程;甲醇;柴油引燃;双燃料发动机

中图分类号: TK42 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0784-04

Investigation on Ignition Delay of Dual Fuel Engine Operating with Methanol Ignited by Pilot Diesel

Zou Hongbo, Wang Lijun, Liu Shenghua, Li Yu

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

Abstract: A TY1100 direct-injection diesel engine was equipped with an electronic controlled methanol low-pressure injection system. Methanol is injected into the induction port. The premixed mixture of methanol and air is ignited by pilot diesel. The experimental results show that the polytropic index of compression process of dual fuel engine decreases linearly while the ignition delay increases with the increase of the methanol mass fraction. Compared with the conventional diesel engine, the ignition delay increment of the dual fuel engine is about 1.5° at a methanol mass fraction of 62%, a speed of 1 600 r/min, and full load. With the elevation of the intake charge temperature from 20 °C to 40 °C and then to 60 °C, the ignition delay of dual fuel engine decreases and is more obvious at high temperature. Moreover, with the increase of engine speed, the ignition delay of the dual fuel engine by time scale (ms) decreases clearly at all engine operating conditions. However, the ignition delay of the dual fuel engine increases remarkably by advancing the delivery timing of pilot diesel, especially at light engine loads.

Keywords: ignition delay; compression process; methanol; pilot diesel; dual fuel engine

甲醇是一种高含氧液体燃料,其燃烧速度快,着火界限宽,燃烧污染物排放少,被认为是内燃机很有发展前景的清洁代用燃料^[1].国内外许多学者对柴油引燃甲醇预混合气的双燃料燃烧模式进行了深入的试验研究,结果表明:采用双燃料燃烧模式,不仅可以实现高比例甲醇的掺烧,还能有效地降低柴油

机的碳烟和 NO_x 排放,提高发动机高负荷时的燃油经济性^[2-5].

滞燃期是柴油机着火和燃烧过程的一个极为重要的参数,它直接影响发动机的性能、排放及噪声污染.许多研究者在定容燃烧弹、稳流反应装置及柴油机上对柴油的着火滞燃期进行了大量的试验研究,

结果表明:柴油的着火滞燃期主要与压力、温度和混合气的浓度有关^[6-7].柴油引燃甲醇双燃料发动机的燃烧过程既不同于柴油机,也不同于汽油机.甲醇在进气管喷入,对缸内混合气的温度、压力、热力学性质以及柴油的化学反应过程都会产生一定的影响,从而影响柴油的着火过程.为了阐明柴油引燃甲醇双燃料发动机着火滞燃期的规律,本文在一台单缸直喷柴油机的进气管上安装一套电控甲醇低压喷射装置,开展了柴油引燃甲醇双燃料发动机着火滞燃期的试验研究.

1 试验装置及方法

试验用发动机为 TY1100 型单缸、水冷、直喷式柴油机,主要测量装置有 Kistler6125A 型水冷石英压力传感器、Kistler5011B10 型电荷放大器、Kistler5019B 型角标器、AVL 619 型燃烧分析仪及针阀升程仪等.发动机的主要结构参数详见文献[2].

在本试验中,甲醇在距进气门约 250 mm 处用电子喷油器喷入进气管,随空气进入气缸,喷醇量由电控系统控制,喷醇始点设为排气门关闭时刻.随着甲醇喷量的增加,适当减少引燃柴油量以保证发动机负荷不变.为保证喷油器的正常冷却,循环引燃柴油量控制在不低于额定功率下循环喷油量的 10%.

2 试验结果及分析

2.1 燃烧始点

柴油的着火滞燃期定义为从喷油器喷油始点到柴油着火燃烧始点的时间段^[6],为准确地确定引燃柴油喷油始点和燃烧始点,研究双燃料发动机的着火滞燃期,本文定义引燃柴油喷油始点为喷油器针阀的急剧升高点所对应的曲轴转角位置,并通过实测不同工况下针阀的升程曲线确定.柴油机的燃烧始点有多种定义^[6-9],文献[7]利用净放热率一阶导数即缸压二阶导数确定增压直喷柴油机的着火滞燃期,取得了很好的效果.因此,本文的燃烧始点定义为缸压二阶导数峰值所对应的曲轴转角位置.从图 1 可以看出:压力二阶导数峰值所在的位置基本上与压力急剧升高点所在的位置对应.试验发现:在所有试验工况下,压力二阶导数的峰值变化很小.

2.2 压缩过程热力学分析

发动机的压缩过程是一个多变的热力学过程^[6]: pV^{n_1} 为常数,其 $\lg p - \lg V$ 满足线性关系.甲醇在进气管喷入,一方面由于其汽化潜热大,使进气温度降低,另一方面改变了混合气的热力学性质,使压

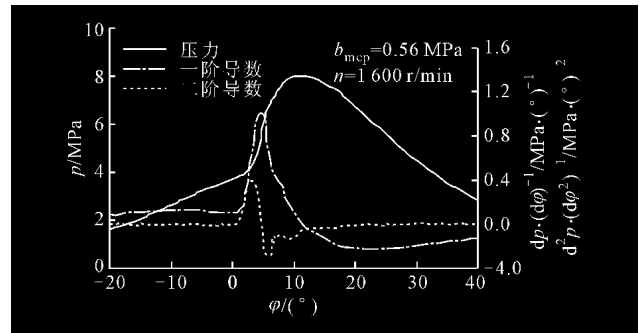


图 1 利用缸压的二阶导数确定燃烧始点

缩过程的温度和压力发生变化.由图 2 知:在 $\lg p - \lg(V/V_{\max})$ 示功图中,双燃料发动机的压缩过程仍近似为一条直线,其斜率的负值即为压缩过程多变指数(n_1).通过对实测缸压的大量数据分析,利用最小二乘法原理拟合得出双燃料发动机压缩过程多变指数随甲醇质量分数的变化曲线,如图 3 所示.从图中可知:压缩过程多变指数不随发动机的负荷发生变化,但随着甲醇质量分数的增加,压缩过程多变指数减小,使得压缩终点温度降低(见图 4).双燃料发动机的压缩过程多变指数与甲醇质量分数 $w(\text{CH}_3\text{OH})$ 有如下关系

$$n_1 = -0.0224 w(\text{CH}_3\text{OH}) + 1.2820 \quad (1)$$

$$w(\text{CH}_3\text{OH}) = M/(M+D) \quad (2)$$

式中: M 为甲醇质量; D 为柴油质量. $n_1 = 1.2820$ 与文献[6]中所给的数据一致.

2.3 滞燃期分析

Prakash 等人^[10]根据试验数据,总结出柴油引燃气体燃料双燃料发动机着火滞燃期(以曲轴转角计)关系式如下

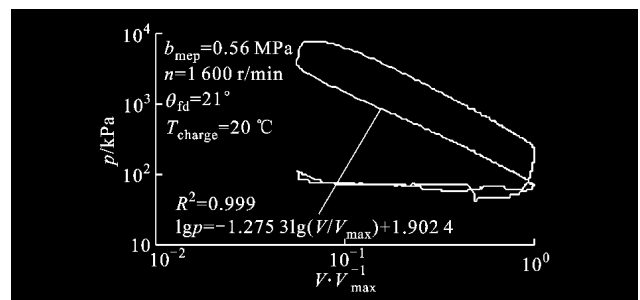


图 2 $\lg p - \lg(V/V_{\max})$ 示功图

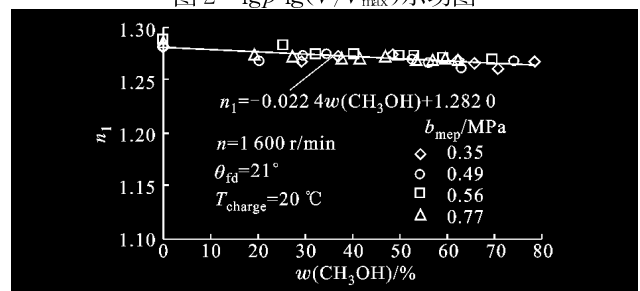


图 3 压缩过程多变指数随甲醇质量分数的变化

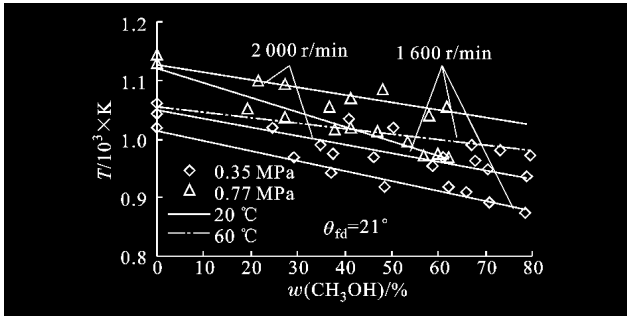


图4 压缩终点温度随甲醇质量分数的变化

$$\varphi_i = Ar^k \exp[EP + Q^{0.63}] \quad (3)$$

式中: $A = (0.36 + 0.22S_p) C_1$; $E = \frac{618\ 840}{C_N + 25}$; $P = \frac{1}{RT_i \epsilon^{\gamma-1}} - \frac{1}{17\ 190}$; $Q = \frac{21.2}{p_i \epsilon^{\gamma_1}}$; S_p 为活塞平均速度; C_1 为修正系数; k 为常数 ($k > 1$); r 为相对氧浓度; C_N 为燃料的十六烷值; T_i 、 p_i 分别为进气管内气体温度和压力; ϵ 为压缩比; R 为通用气体常数. 相对氧浓度由下式计算

$$r = \frac{\omega_{\text{dual fuel}}(\text{O})}{\omega_{\text{pure diesel}}(\text{O})} \quad (4)$$

$$\omega(\text{O}) = \frac{x_a}{4.76(x_a + x_m + x_{\text{exh}})} \quad (5)$$

式中: x_a 、 x_m 、 x_{exh} 分别为新鲜空气、甲醇蒸气和缸内残余废气的摩尔分数.

由图5可知:与原柴油机相比,燃用双燃料后,混合气中的氧浓度降低.这是由于甲醇在进气管中喷入时占据一部分体积,使得进入气缸中的空气量减少,氧浓度降低.

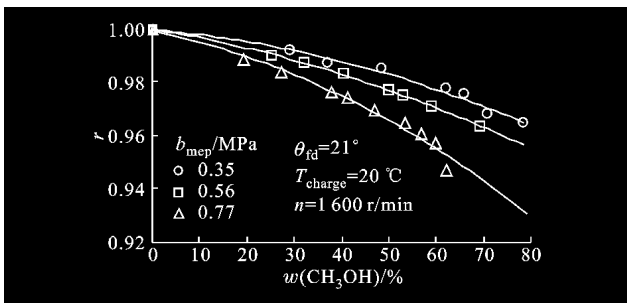
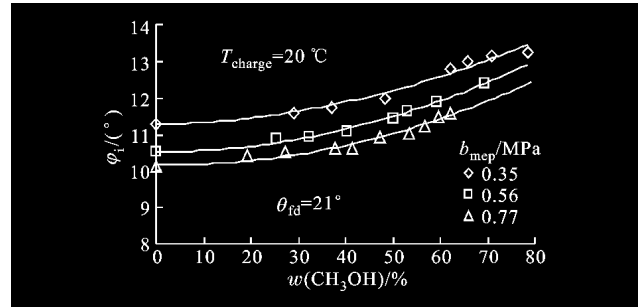


图5 相对氧浓度随甲醇质量分数的变化

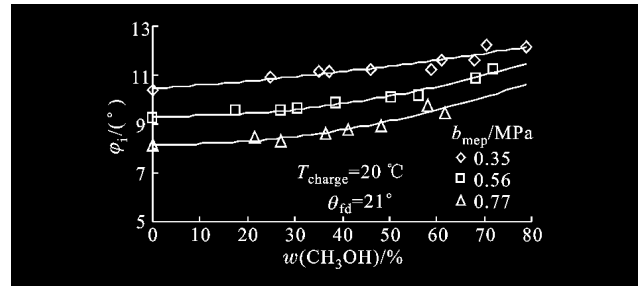
从图6可以看出:在所有试验工况下,发动机燃用双燃料后的着火滞燃期要比燃用纯柴油的长,增加发动机负荷,着火滞燃期缩短;随着甲醇质量分数的增加,着火滞燃期延长,在1600 r/min、全负荷 ($b_{\text{mep}} = 0.77$ MPa) 时,最大甲醇质量分数(约为62%)所对应的着火滞燃期比纯柴油的延长约1.5°.

2.4 滞燃期影响因素分析

2.4.1 进气温度的影响 从图7可以看出:随着进



(a) $n = 1\ 600$ r/min



(b) $n = 2\ 000$ r/min

图6 着火滞燃期随甲醇质量分数的变化

气温度升高,着火滞燃期缩短,进气温度从20°C提高到40°C再到60°C,对着火滞燃期的影响趋势逐渐增大.提高进气温度,压缩终点混合气温度升高(见图4),有利于引燃柴油的蒸发、混合和焰前化学反应;在进气温度较低(低于40°C)时,进气温度对压缩终点的混合气温度影响不大.因此,当进气温度较高时,着火滞燃期缩短得比进气温度低时更明显.

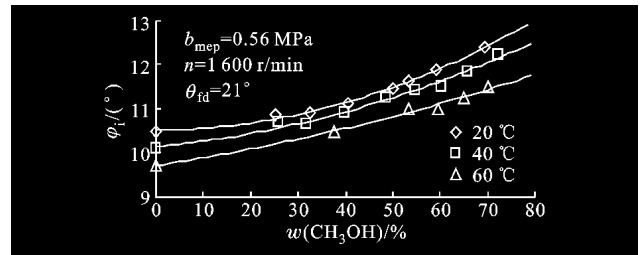


图7 进气温度对着火滞燃期的影响

2.4.2 发动机转速的影响 由图8可知:随着发动机转速升高,着火滞燃期缩短,发动机转速对着火滞燃期的影响主要通过压缩温度、压力和喷油压力起

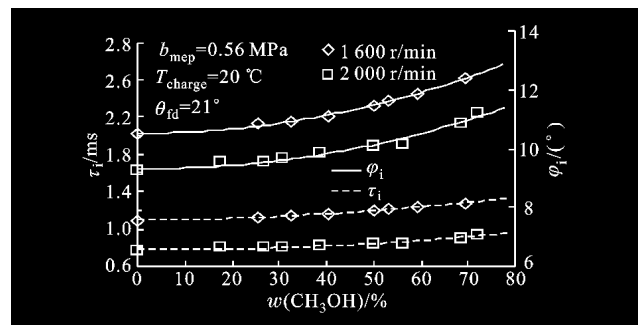


图8 发动机转速对着火滞燃期的影响

作用^[1]。发动机转速升高,其单位时间内所做的功增加,通过活塞环的漏气损失及混合气向缸壁的传热量减少,促使压缩温度升高(见图4)。发动机转速升高,引燃柴油的喷油压力升高,引燃柴油雾化得到改善。另外,发动机转速升高,缸内气体运动加强,有利于引燃柴油的蒸发、混合。试验还发现:在所有试验工况下,以时间计的着火滞燃期(τ_i)随着发动机转速的升高而缩短,而在全负荷时,以曲轴转角计的着火滞燃期随着发动机转速的升高在甲醇质量分数约为20%后开始增加,这表明在高转速、高负荷时,甲醇质量分数对着火滞燃期的影响更为明显。

2.4.3 供油提前角的影响 从图9中可知:在所有试验负荷下,增大引燃柴油供油提前角(θ_{fd}),着火滞燃期延长;引燃柴油供油提前角为 25° 、低负荷($b_{nep}=0.35$ MPa)时,随着甲醇质量分数的增加,着火滞燃期迅速延长。增加供油提前角,引燃柴油喷油提前,缸内混合气压力、温度较低,不利于柴油的焰前化学反应,使着火滞燃期延长;随着甲醇质量分数的增加,压缩终点温度降低,引燃柴油供油提前,在低负荷时,缸内混合气温度过低,以及在高甲醇质量分数时,引燃柴油雾化质量较差,使得着火滞燃期迅速延长。

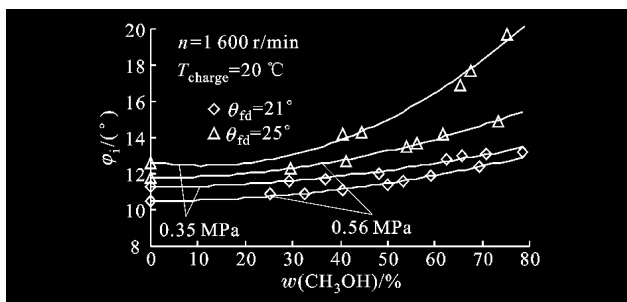


图9 引燃柴油供油提前角对着火滞燃期的影响

3 结论

(1) 双燃料发动机的压缩过程多变指数随甲醇质量分数的增加呈线性减小,且不随发动机负荷的变化而发生变化,压缩终点温度随甲醇质量分数的增加而下降。

(2) 随着甲醇质量分数的增加,双燃料发动机的着火滞燃期延长,在1600 r/min、全负荷、甲醇质量分数约为62%时,与燃用纯柴油相比,着火滞燃期延长约1.5°。

(3) 进气温度、发动机转速、引燃柴油供油提前角等都对双燃料发动机的着火滞燃期有较大的影响。提高进气温度,着火滞燃期缩短,进气温度越高,

着火滞燃期缩短的趋势越明显。发动机转速升高,以时间计的着火滞燃期缩短,在高负荷高转速时,甲醇质量分数对双燃料发动机着火滞燃期的影响增大。增加引燃柴油供油提前角,着火滞燃期延长。

参考文献:

- [1] 周龙保. 内燃机学[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2005:115-139.
- [2] 王利军, 刘圣华, 邹洪波, 等. 高比例甲醇柴油双燃料发动机燃烧与排放特性的研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1):14-17.
Wang Lijun, Liu Shenghua, Zou Hongbo, et al. Combustion and emission characteristics of a DI engine operating on high proportion of methanol-diesel dual fuel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1):14-17.
- [3] 姚春德, 段峰, 李云强, 等. 柴油/甲醇组合燃烧发动机的燃烧特性与排放[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(3):214-217.
Yao Chunde, Duan Feng, Li Yunqiang, et al. Combustion characteristics and emissions of the compound combustion of the diesel engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(3):214-217.
- [4] Popa M G, Negurescu N, Pana C, et al. Results obtained by methanol fuelling diesel engine [C]// Holt D J. Alternative Diesel Fuels. Warrendale, USA: SAE Inc., 2004: 21-32.
- [5] Shi Shaoxi, Fu Maolin, Zhang Dexian. An investigation of burning methanol as alternative fuel by dual fuelling method in compression ignition engine [C]// Shi Shaoxi. The Articles of Professor Shi Shaoxi. Tianjin: Tianjin University Press, 1996:463-476.
- [6] Heywood J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York: McGraw-Hill, 1988:383-554.
- [7] Assanis D N, Filipi Z S, Fiveland S B, et al. A predictive ignition delay correlation under steady-state and transient operation of a direct injection diesel engine [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(2):450-457.
- [8] 罗响亮, 任自中. 柴油机滞燃期的确定方法及试验验证[J]. 柴油机, 2006, 28(1):16-18.
Luo Xiangliang, Ren Zizhong. Determination method of combustion delay period of diesel engine and experimental verification [J]. Diesel Engine, 2006, 28(1):16-18.
- [9] 任毅, 黄佐华, 蒋德明, 等. 柴油机燃用柴油二甲氧基甲烷混合燃料滞燃期研究[J]. 内燃机学报, 2005, 23

(5):392-398.

Ren Yi, Huang Zuohua, Jiang Deming, et al. Study on ignition delay of DI diesel engine operating on diesel/dimethoxymethane blends [J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(5):392-398.

[10] Prakash G, Ramesh A. An approach for estimation of ignition delay in a dual fuel engine [J]. SAE Transactions, 1999, 108(3): 399-405.

(编辑 王焕雪)