

高比例甲醇柴油双燃料发动机燃烧与排放特性的研究

王利军, 刘圣华, 邹洪波, 马静

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在一台 TY1100 单缸柴油机的进气管上安装了一套电控甲醇喷射装置,进行了高比例甲醇柴油双燃料发动机燃烧和排放特性的试验研究. 研究表明:在相同的平均有效压力和转速条件下,随着甲醇质量分数的增加,双燃料燃烧的滞燃期增加,主燃期缩短,放热率曲线第1峰值增大,第2峰值减小,表明预混燃烧量增加而扩散燃烧量减少;高负荷时放热率曲线型心向上止点靠近,燃烧等容度提高,当量柴油燃料消耗率显著下降;在高比例甲醇柴油双燃料工作模式下,发动机的 HC 和 CO 排放有所升高,但 NO_x 和碳烟排放大幅度下降.

关键词: 柴油机; 甲醇; 燃烧特性; 排放特性

中图分类号: TK42 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0014-04

Combustion and Emission Characteristics of a DI Engine Operating on High Proportion of Methanol-Diesel Dual Fuel

Wang Lijun, Liu Shenghua, Zou Hongbo, Ma Jing

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

Abstract: Combustion and emission characteristics of a TY1100 diesel operating on high proportion of methanol-diesel dual fuel were investigated when the engine was equipped with an electronically controlled methanol port injection system. Under the same brake mean effective pressure (bmep) and engine speed, the ignition delay increases while the main combustion duration decreases with the increase of methanol mass fraction. The first peak value of heat release rate increases and the second peak value decreases, which indicates that the fraction of premixed burning amount increases while diffusive burning amount decreases. Moreover, the center of heat release rate curve closes to the top-dead-center under high-load condition and diesel equivalent fuel consumption decreases. NO_x and smoke decrease significantly while HC and CO concentration increase.

Keywords: diesel engine; methanol; combustion characteristics; emission characteristics

柴油机具有较高的热效率,但 NO_x 和碳烟排放较高. 为了同步降低柴油机中 NO_x 和碳烟的排放,许多研究者采用在柴油中添加含氧燃料,甲醇就是其中的一种. 甲醇作为柴油机的添加燃料,对其研究主要有甲醇与柴油混合^[1-2]、甲醇与柴油缸内双喷射^[3]、甲醇进气管低压喷射柴油缸内引燃双燃料燃烧方式^[4-9]等. 由于甲醇的物性与柴油的相差较大,

二者互溶难度较大,需要较多的助溶剂,这会使燃料的价格提高. 若采用双喷射系统,需在一个缸盖上安装两套喷油器,控制、制造难度大,费用高,因此采用进气管甲醇低压喷射、柴油缸内引燃的方法比较实用. 在文献[4-9]的研究中,当采用甲醇与柴油双燃料低比例燃烧时,最高爆发压力下降,压力升高率上升,放热率曲线呈单峰形,碳烟和 NO_x 排放同时降

低,但文献[4-9]对于发动机燃用高比例甲醇柴油双燃料的研究较少。

本文着重研究发动机燃用高比例甲醇柴油双燃料的燃烧与排放特性。为此,在柴油机的进气管靠近缸盖处,安装一套电控低压甲醇喷射装置。电子控制装置可以根据发动机的转速和负荷将一定量的甲醇喷入进气管中,随进气进入气缸形成均匀的混合气。引燃燃料柴油由原供油系统供给,供油提前角为 21° 。

1 试验条件和方法

试验用发动机为 TY1100 型柴油机(立式、单缸、四冲程、强制水冷),主要性能和结构参数如下:缸径为 100 mm;活塞行程为 115 mm,活塞排量为 0.903 L;燃烧室型式 ω 型,压缩比 ϵ 为 18;额定转速 n 为 2 300 r/min,功率为 11 kW。试验用 AVL 619 燃烧分析仪测录发动机缸内燃烧压力随曲轴转角的变化,通过计算得到压力升高率、主燃期、滞燃期、瞬时燃烧放热率等发动机燃烧过程的特征参数,来研究甲醇柴油双燃料发动机的燃烧特性。排放测量所用仪器为:AVL 五组分分析仪和 AVL Dismoke4000 不透光烟度计。五组分分析仪可测量 HC、CO、CO₂、O₂、NO_x 及 λ (过量空气系数),不透光烟度计可测量柴油发动机的颗粒污染物,所得碳烟度结果有消光系数 K_{VALUE} 和不透光度两种,本文采用前者。

文中甲醇质量分数、当量柴油燃料消耗率和放热率曲线型心分别定义如下

$$w(\text{CH}_3\text{OH}) = \frac{b_M}{b_M + b_D}$$

$$b_{\text{eq}} = b_D + b_M H_M / H_D$$

$$\varphi_c = \int_{\varphi_s}^{\varphi_e} \left(\frac{dQ_B}{d\varphi} \right) \varphi d\varphi / \int_{\varphi_s}^{\varphi_e} \left(\frac{dQ_B}{d\varphi} \right) d\varphi$$

式中: b_D 为柴油的消耗率; b_M 为甲醇的消耗率; H_M 为甲醇的低热值; H_D 为柴油的低热值; φ_s 为燃烧始点; φ_e 为燃烧终点。燃烧始点和燃烧终点分别定义为燃料燃烧掉的 10% 和 90% 时所对应的曲轴转角,主燃期为燃烧始点至燃烧终点对应的曲轴转角,滞燃期为针阀升程信号确定的喷油始点至燃烧始点对应的曲轴转角。

2 燃烧特性研究

1 600 r/min 是发动机的最大转矩点,原机在该点的燃油经济性和排放性最差,试验主要集中在 1 600 r/min 转速上。

图 1 给出了甲醇的质量分数不同时燃烧的放热

率曲线。图中 $w(\text{CH}_3\text{OH})$ 为 0 时代表纯柴油。从图中可以看出,随着甲醇质量分数的增加,放热率曲线第 1 峰值增大,第 2 峰值减小,直至不明显。这是因为甲醇在喷入进气管后,与空气形成均匀的混和气,柴油在引燃甲醇的自燃过程中,二者混在一起,相应的混合燃料蒸气的十六烷值降低,与燃用纯柴油相比,着火时间延迟,双燃料燃烧的滞燃期(φ_{ig})增加,如图 2a 所示。由于滞燃期的增加,滞燃期内形成的

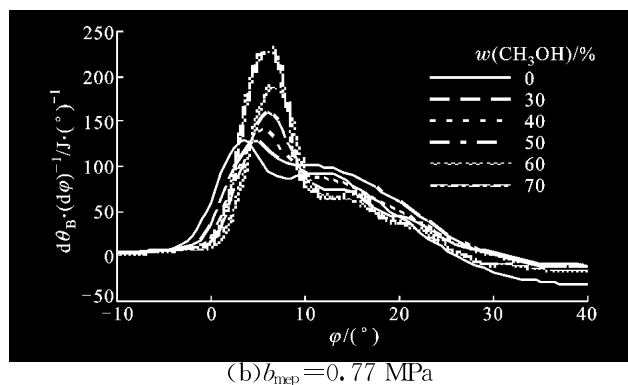
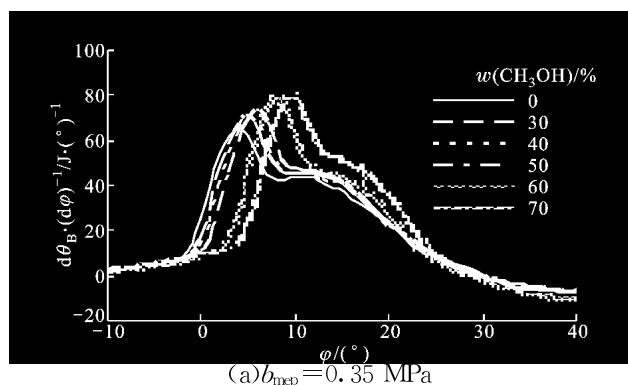
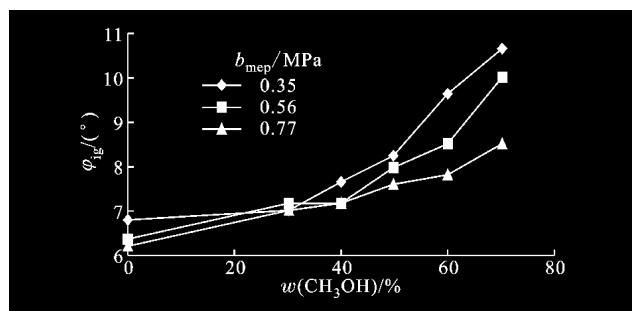


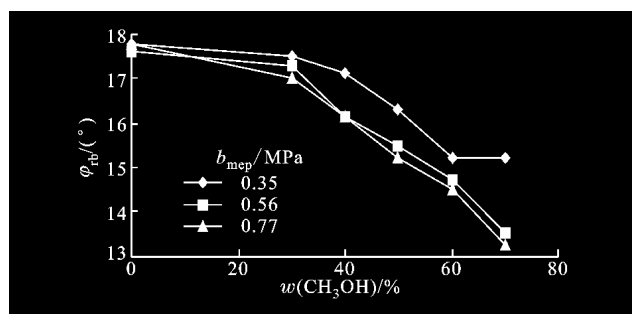
图 1 双燃料燃烧放热率曲线

可燃混合气增加,一旦着火,就会形成多点点火,且火焰传播距离缩短,加上此时由进气涡流和挤流造成的湍流强度大和甲醇燃烧速度(0.48 m/s)快,其燃烧速度必然要比采用扩散燃烧方式的柴油快,导致放热率曲线峰值增大,这也是双燃料燃烧的主燃期(φ_{rb})缩短的原因所在,如图 2b 所示。

图 3 为放热率曲线型心所对应的曲轴转角随甲醇质量分数的变化。放热率曲线型心曲轴转角是燃烧放热率面积型心距离上止点的曲轴转角,相应型心曲轴转角越小,表明整个燃烧放热过程越靠近上止点,燃烧过程的等容度好,热效率高,发动机的经济性改善。由图 3 可以看出,低负荷($b_{\text{mep}} = 0.35$ MPa)时放热率曲线型心远离上止点,中负荷($b_{\text{mep}} = 0.56$ MPa)时基本不变,高负荷($b_{\text{mep}} = 0.77$ MPa)时趋于靠近上止点。这是因为在低负荷时,发动机的热负荷小,甲醇喷入后汽化吸热,降低了进气温度,



(a) 滞燃期



(b) 主燃期

图2 滞燃期和主燃期

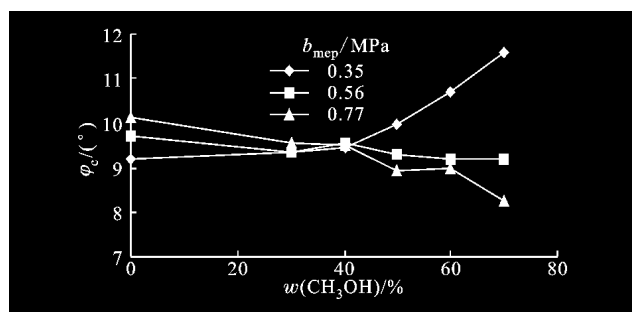


图3 放热率曲线型心对应的曲轴转角

使压缩终点温度也同时降低,滞燃期增加,放热率曲线整体后移(见图1a)。随着甲醇喷入量的增加,上述情况加剧,导致整个曲线远离上止点,同时燃油消耗率上升,热效率下降。在高负荷时,与燃用纯柴油相比,虽然滞燃期有所增加,但燃烧持续期缩短,放热比较集中(见图1b),整个曲线向上止点移动。由图4可看出:随着负荷的增大,当量柴油燃料消耗率 b_{eq} 明显减小,尤其在高负荷时, b_{eq} 随着甲醇质量分数的增大显著减小,上述两点充分说明了双燃料发

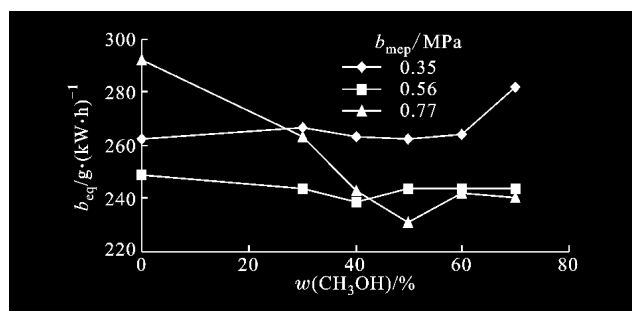


图4 当量柴油燃料消耗率曲线

动机适合于高负荷运转。

由图5、图6可以看出:低负荷($b_{mep} = 0.35$ MPa)时,正如上述原因,缸内气体最高爆发压力和最大压力升高率随着甲醇质量分数的增大而减小;在中高负荷($b_{mep} = 0.56, 0.77$ MPa)时,甲醇较快的燃烧速度占主导因素,缸内气体最高爆发压力和最大压力升高率随着甲醇质量分数的增大而增大。但是,由于燃烧滞后,尤其是最大压力升高率发生在上止点后,使最大压力和发动机的燃烧噪声未有明显的增大,且最大压力较柴油更靠近上止点,使平均指示压力增大,动力性提高,这也是甲醇柴油双燃料发动机工作的一个特点。

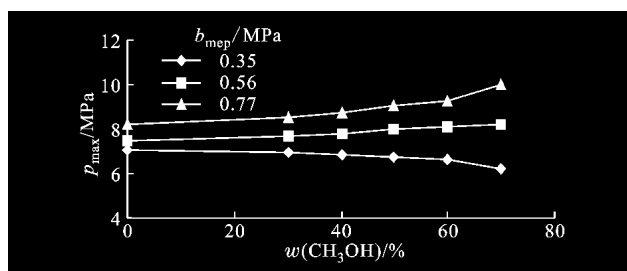


图5 缸内气体最高压力

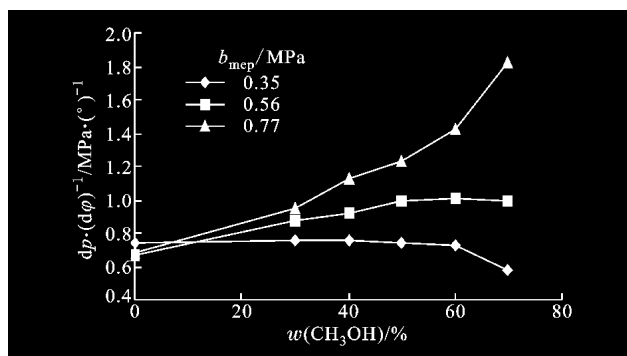


图6 最大压力升高率

3 排放特性研究

从图7可以看出,在相同负荷下,HC排放随着甲醇质量分数的增大而增加。出现这种现象是因为在柴油引燃甲醇的双燃料燃烧模式下,甲醇与空气在进入燃烧室前形成均质混合气,壁面淬熄和狭缝效应导致HC排放增加。由图8可以看出:CO排放

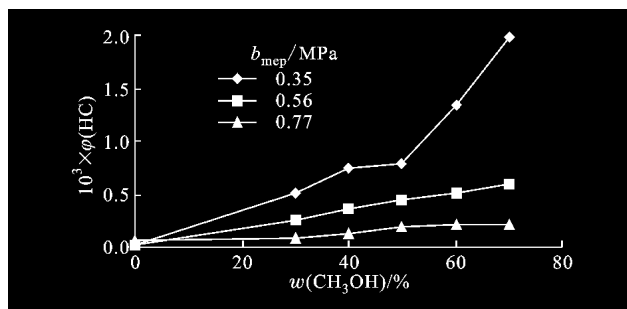


图7 HC排放

随着甲醇质量分数的增大而增加.原因在于:CO是燃烧过程的中间产物,它的生成主要是受燃烧室温度影响,随着甲醇喷入量的增加,缸内燃烧温度下降,CO氧化反应速率变慢,且在膨胀和排气过程中受到化学反应动力学的控制,CO排放增加.此外,双燃料模式下HC和CO排放较高还是由于甲醇均质混合气属稀薄燃烧造成的.

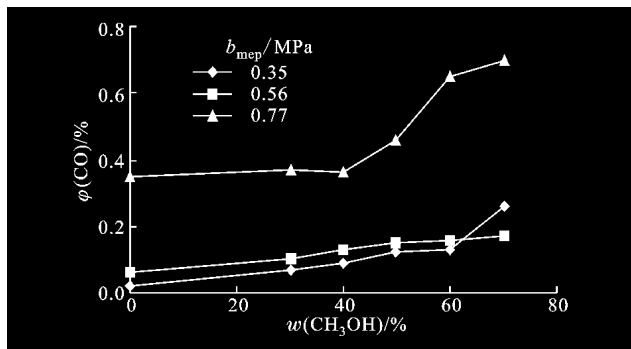


图8 CO排放

从图9可以看出,在低负荷时,由于氧气充足,燃烧温度较低,发动机燃用纯柴油和双燃料时的碳烟排放浓度相差不大.随着负荷的增加,柴油机的排气烟度迅速增加,但当发动机燃用双燃料时,碳烟排放显著下降.这是因为碳烟主要在扩散燃烧中生成,随着甲醇质量分数的增加,滞燃期延长,大大减少了柴油的扩散燃烧量,同时甲醇不含有C—C链,燃烧过程不会产生碳烟,因此甲醇柴油双燃料工作模式是降低发动机碳烟/颗粒排放的有效方法之一.从图10可以看出,NO_x排放随着甲醇质量分数的增大而减少.这是因为甲醇的绝热燃烧温度低,加上发动机燃烧的滞燃期增加,燃烧总体上以火焰传播为主,缸内燃烧温度下降,使得NO_x排放降低.

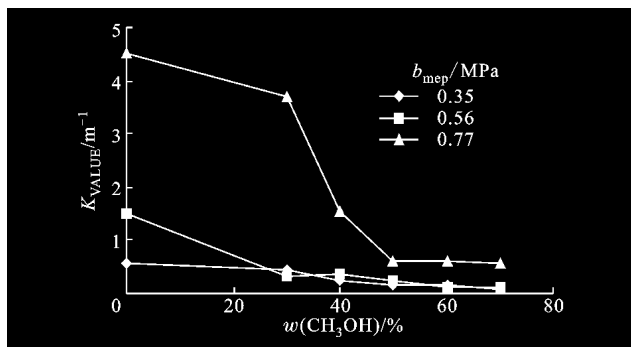
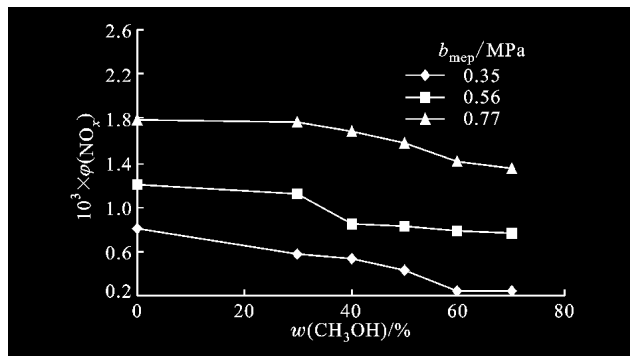


图9 碳烟排放

4 结 论

(1)在相同的平均有效压力和转速下,甲醇质量分数的增加改变了双燃料发动机预混燃烧和扩散燃烧比例,从而使发动机滞燃期增加,主燃期缩短,由

图10 NO_x排放

此导致预混燃烧量增加,放热率曲线第1峰值增大,第2峰值减小.

(2)在高负荷时,双燃料发动机放热率曲线型心趋于靠近上止点,燃烧等容度和热效率均提高,当量柴油燃料消耗率曲线显著下降.

(3)在中高负荷时,随甲醇质量分数的增大,双燃料发动机燃烧的缸内最高爆发压力和最大压力升高率均增大,最大压力升高率处于上止点后,但缸内气体最高爆发压力较柴油更加靠近上止点.

(4)虽然HC和CO排放有所升高,但NO_x和碳烟排放却大幅下降,这说明采用甲醇柴油双燃料是同步降低柴油机NO_x和碳烟排放的一种有效方法.

参考文献:

- [1] Huang Zuohua, Lu Hongbing, Jiang Deming, et al. Study on combustion characteristics of a DI engine operating on diesel/methanol blends[J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(6):401-410.
- [2] 张俊强,卢红兵,王锡斌,等.直喷式柴油机燃用甲醇/柴油混合燃料燃烧及排放特性[J].燃烧科学与技术, 2004, 10(2):171-175.
Zhang Junqiang, Lu Hongbing, Wang Xibin, et al. Combustion and emission characteristics of a DI diesel engine fueled by diesel/methanol blends [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004, 10(2):171-175.
- [3] 方显忠,刘巽俊,金文华,等.直喷压燃式发动机用双喷射系统燃用柴油/甲醇的研究[J].内燃机学报, 2003, 21(6):411-414.
Fang Xianzhong, Liu Xunjun, Jin Wenhua, et al. A study on a DI compression ignition engine with diesel-methanol injection by dual injection systems [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(6):411-414.
- [4] 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和排放特性[J].燃烧科学与技术, 2005,

- 11(3):214-217.
- Yao Chunde, Duan Feng, Li Yunqiang, et al. Combustions characteristics and emissions of the compound combustion of the diesel engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(3): 214-217.
- [5] 汪洋,蒋宁涛,郑尊清,等. 甲醇/柴油双燃料发动机的性能[J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10(5):451-454.
- Wang Yang, Jiang Ningtao, Zheng Zunqing, et al. Performance of a methanol/diesel dual fuel engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004, 10(5):451-454.
- [6] 姚春德,李云强,王银山,等. 柴油机进气预混甲醇降低碳烟与 NO_x 排放的试验研究[J]. 天津大学学报, 2004, 37(9):759-764.
- Yao Chunde, Li Yunqiang, Wang Yinshan, et al. Reduction of soot and NO_x emissions by pre-mixed methanol through intake manifold on a diesel engine[J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(9):759-764.
- [7] 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 Publisher, 1996:463-476.
- [8] Shi Shaoxi, Zhao Kuihan, Fu Maolin, et al. An investigation of using methanol as an alternative fuel for diesel engines[C]//Shi Shaoxi. The articles of professor Shi Shaoxi. Tianjin: Tianjin University Publisher, 1996:451-462.
- [9] Holt D J. Alternative diesel fuels[M]. Warrendale, USA: SAE Inc., 2004:21-32.

(编辑 王焕雪)