

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.04.004

甲醇缸内直喷发动机均质燃烧特性研究*

李本正^{1,2} 刘圣华¹ 刘杰¹ 李毅¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049; 2. 北京军区军械汽车技工训练大队, 石家庄 050081)

【摘要】 在一台四缸柴油机改造的火花点火甲醇缸内直喷发动机上, 高负荷时, 在进气冲程将燃油喷入缸内, 形成近化学计量比的混合气来实现均质燃烧。通过对典型工况的气缸压力的测量和分析, 探讨了不同参数对甲醇发动机燃烧特性的影响。结果表明: 甲醇缸内直喷发动机最大功率和最大扭矩比原机分别提高 5.88% 和 20.90%, 发动机最高热效率可达 35.3%, 远高于普通汽油机水平。甲醇缸内直喷发动机的滞燃期和急燃期随负荷的增加而变小。全负荷时, 甲醇发动机的燃烧放热始点随转速的增大而推迟, 滞燃期和急燃期随转速的增大而增加。发动机循环变动随工况的变化规律与滞燃期一致。

关键词: 缸内直喷 均质燃烧 甲醇发动机 燃烧特性 试验

中图分类号: TK46⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0016-04

Experiment on Homogeneous Charge Combustion Characteristics of Direct-injection Spark-ignition Methanol Engine

Li Benzhen^{1,2} Liu Shenghua¹ Liu Jie¹ Li Yi¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. Ordnance and Automobile Artificers Training Regiment, Beijing Garrison, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract

For a direct-injection spark-ignition (DISI) methanol engine retrofitted from a four-cylinder diesel engine, fuel is injected into the cylinder during the intake stroke to realize the homogeneous charge combustion for the high power output. The cylinder pressure of typical operating conditions was measured and analyzed. The effects of different parameters on methanol engine combustion characteristics were investigated. The results showed that the maximum power output and torque of the methanol engine are 5.88% and 20.90% higher than original diesel engine, respectively. The maximum brake thermal efficiency reaches 35.3% at a speed of 1 500 r/min, and a brake mean effective pressure of 0.85 MPa, which is higher than the conventional gasoline engine. The ignition delay period and rapid combustion phase increase with decreasing load. The start of combustion is postponed with increasing speed at full load. The ignition delay period and rapid combustion phase increase with increasing speed under full load. The change of the cyclic variations has the approximate trend with that of the ignition delay period at different operating conditions.

Key words Direct injection, Homogeneous charge combustion, Methanol engine, Combustion characteristics, Experiment

引言

缸内直喷火花点火汽油机可以采用分层燃烧技

术和较高的压缩比,减小传统节气门功率控制造成的泵气损失,因而可以提高发动机的热效率;在高速和高负荷工况,发动机燃用化学计量比混合气,可使

收稿日期: 2009-06-25 修回日期: 2009-07-29

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA11A1A4)

作者简介: 李本正, 博士生, 北京军区军械汽车技工训练大队助理讲师, 主要从事清洁代用燃料发动机研究, E-mail: benz@stu.xjtu.edu.cn

动力性进一步提高;缸内直喷技术在降低排放方面也比传统的进气道喷射发动机有很大的优势^[1]。高辛烷值的甲醇燃料是一种优良的车用代用燃料,国内外对甲醇燃料或甲醇/汽油混合燃料用作汽油机燃料的研究较多^[2-3],然而将甲醇应用于缸内直喷火花点火发动机上的研究较少,且都是在改装的单缸柴油机上进行的^[4-7]。在柴油机上直接燃用纯甲醇燃料,由于其十六烷值低,自燃能力差,通常采用火花助燃方法点燃混合气。作者借鉴 DISI 燃烧系统开发和匹配方法,在一台四缸柴油机上,依据原机进气涡流的特点,综合甲醇燃料的喷雾和蒸发特点,开发了缸内直喷复合导流分层燃烧系统,研究了将甲醇应用在该燃烧系统时的分层燃烧特性^[8]。

为了对缸内直喷甲醇发动机燃烧现象和发动机运行特性有进一步的认识,本文在这台四缸柴油机改装的火花点火缸内直喷甲醇发动机上进行不同负荷、转速和点火正时下的均质燃烧特性研究。

1 试验装置和方法

试验用发动机由 4102QB 型柴油机改装而成,基本参数见表 1。试验中为满足高负荷工况时的动力性要求,在进气冲程将甲醇喷入缸内,形成近化学计量比的均质混合气,通过对发动机缸内均质预混燃烧过程的压力采集,研究了发动机的燃烧特性,以及燃烧系统参数匹配对缸内直喷甲醇发动机动力性和经济性的影响。

表 1 发动机参数

Tab. 1 Engine specifications

参数	直喷式柴油机	火花点火缸内直喷甲醇发动机
型号	4102QB	4102QB
型式	立式、直列、水冷、四冲程	立式、直列、水冷、四冲程
缸径×行程/mm×mm	102×115	102×115
总排量/L	3.76	3.76
燃烧室型式	直喷 ω 型	斜坡碗型 ^[9]
压缩比	17	14
喷油嘴孔数(直径/mm)	4(0.29)	6(0.31)
启喷压力/MPa	19.1	10
油泵柱塞直径/mm	9	10.5
点火系统	无	火花点火

2 试验结果和分析

2.1 负荷对燃烧的影响

在发动机转速为 3 000 r/min,点火提前角为 22°CA BTDC,涡流比为 0.8,供油提前角为 310°CA BTDC 试验条件下,研究不同负荷对发动机燃烧特性的影响。

图 1 为不同负荷工况下的压力示功图及计算累积放热率曲线(X 为已燃质量分数)。由图可见,随着负荷的增加,缸内混合气充量增加,缸内温度提

高,燃烧放热速率和最高压力随之增大,但最高压力对应的曲轴转角 φ 随负荷增加变化不大。当平均有效压力 p_{me} 为 0.61、0.51、0.33 MPa 时,对应的 φ 分别为 15°CA BTDC、15°CA BTDC、16°CA BTDC。高负荷工况下,燃烧速度加快,中低负荷工况燃烧速度变慢,此时宜采用分层燃烧模式,以提高甲醇发动机全部负荷范围内的热效率。

火花点火发动机的燃烧特性还可通过缸内燃烧过程的滞燃期、急燃期、循环变动等参数来研究。本文滞燃期定义为从火花开始点火开始到累积放热率达

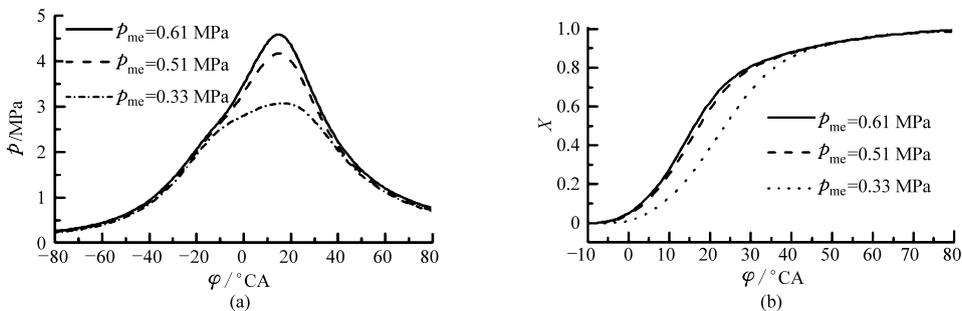


图 1 不同负荷的压力示功图及累积放热率曲线

Fig. 1 Cylinder pressure and accumulated heat release rate at different engine loads

(a) 压力示功图 (b) 累积放热率

10%之间的曲轴转角;急燃期定义为累积放热率从10%到90%之间的曲轴转角。图2显示了上述3个工况下的滞燃期、急燃期和循环变动情况。由图可见,甲醇发动机的滞燃期随负荷增大而减小,这是因为本文甲醇发动机的喷射时刻设置在进气行程,此外该试验发动机喷射压力高,雾化性能好,因此能保证在点火时刻在缸内形成均质混合气。大负荷时,甲醇喷射量多,汽化的吸热量大,甲醇大的汽化潜热会使缸内温度有所降低。但是负荷增大时,混合气变浓(空燃比向化学计量空燃比方向移动),燃烧速度增加,这也使得缸内温度明显增加。混合气浓度改变的影响大于汽化吸热对缸内温度的影响,这两方面的综合因素使得滞燃期随负荷增大而减小。急燃期随负荷的变化趋势与滞燃期相似,也是随着负荷的增加而变小。平均指示压力的循环变动系数 C_{imep} 表征了发动机的燃烧稳定性,图2可以看出, C_{imep} 随负荷的增加而变小,这是因为随着负荷的增加,一方面缸内温度增加,滞燃期缩短,燃烧速率加快,发动机循环变动降低;另一方面,负荷增加,平均指示压力增大,在相同平均指示压力的标准偏差条件下,大负荷时循环变动比小负荷时的循环变动要小。 C_{imep} 随负荷的变化与滞燃期有一致的对应关系。

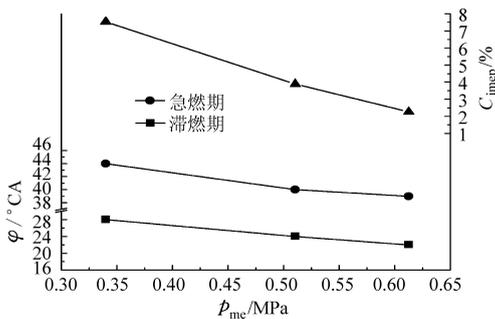


图2 滞燃期、急燃期及循环变动负荷特性曲线
Fig.2 Load characteristics of ignition delay, rapid combustion phase and cyclic variations

2.2 转速对燃烧的影响

在点火提前角 $20^\circ CA$ BTDC、进气涡流比0.8、供油提前角为 $310^\circ CA$ BTDC的试验条件下,研究了外特性工况下转速对发动机燃烧过程的影响。

图3为发动机的有效热效率曲线。由图可见,1500 r/min时,发动机的有效热效率高达35.3%,远高于普通汽油机水平。图4为发动机的外特性曲线。3000 r/min时,甲醇发动机的最大功率为62.53 kW,原机的最大功率为59.06 kW,最大功率提高了5.88%。甲醇发动机最大扭矩为260.3 N·m ($n=1500$ r/min),原4102QB型柴油机最大扭矩为215.3 N·m ($n=1800$ r/min),提高了20.90%。这

充分体现了该甲醇发动机高负荷区域采用均质化学当量比混合气动力性好的优点。

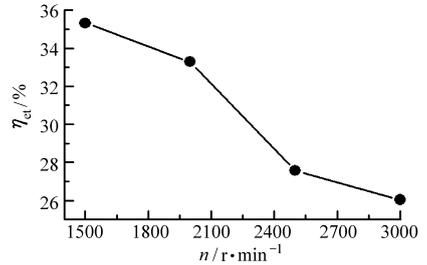


图3 发动机的有效热效率曲线

Fig.3 External characteristics of brake thermal efficiency

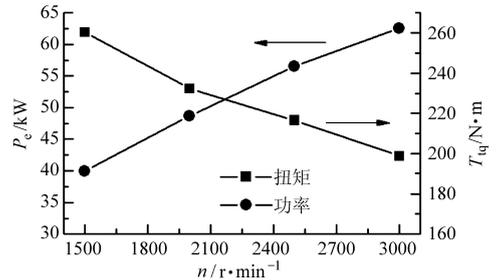


图4 发动机的外特性曲线

Fig.4 External characteristic curve

图5为外特性工况下的压力示功图和累积放热率曲线。由图5a可见,最高压力随着转速的提高而逐渐下降,且相位滞后。高速工况下性能下降主要由两方面因素所致。一方面是随着转速的提高,进入缸内的新鲜充量减少,最高燃烧压力随之降低;另一方面是摩擦损失随发动机转速的增加而增大。图5a中1500 r/min、2000 r/min、2500 r/min、3000 r/min 4个转速工况下的机械效率(p_{me}/p_{mi})分别为75.70%、74.75%、71.73%和70.07%。由图5b可知,随着转速的增加,放热曲线逐渐向后推迟,这也造成了平均指示压力和热效率的降低。发动机高速工况性能的提高需要进一步匹配涡流运动,从而使充量系数提高。

图6为滞燃期、急燃期及循环变动外特性曲线。由图可见,(按曲轴转角计)滞燃期随转速升高而增加,这是因为随着转速的升高,缸内气流运动和湍流增强,使气缸内可燃混合气更均匀,有利于缩短滞燃期,但另一方面,由于残余废气系数增加,气流吹走电火花的可能性增大,又促使滞燃期增加。以上两种因素使以秒计的滞燃期与转速关系不大,但按曲轴转角计的滞燃期却随转速的增加而增大。急燃期随着转速的增加呈递增趋势,循环变动随着转速的提高而增加,这与滞燃期有一致的对应关系。

2.3 点火提前角对燃烧的影响

点火提前角的调整直接影响发动机的动力经济性。图7为标定点工况(3000 r/min,全负荷)下,点

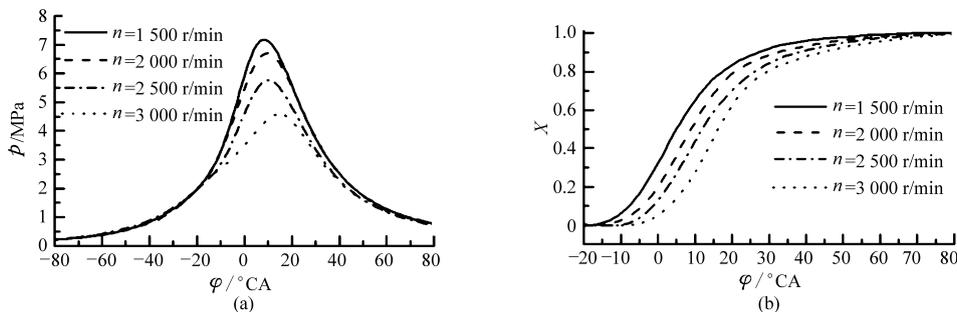


图 5 外特性工况下的压力示功图和累积放热率曲线

Fig. 5 Cylinder pressure and accumulated heat release rate at different speeds under full load condition

(a) 压力示功图 (b) 累积放热率曲线

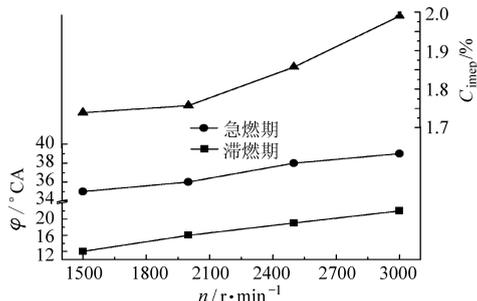


图 6 滞燃期、急燃期及循环变动外特性曲线
Fig. 6 External characteristics of ignition delay, rapid combustion phase and cyclic variations

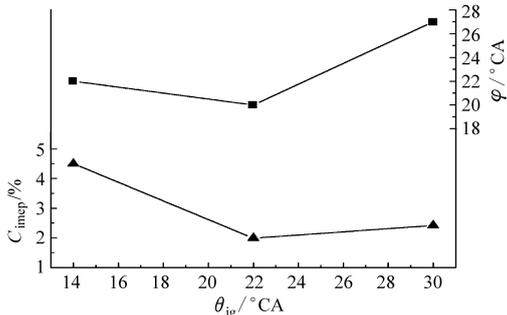


图 8 点火提前角对滞燃期和循环变动的影响
Fig. 8 Effects of the ignition timing on ignition delay and cyclic variations

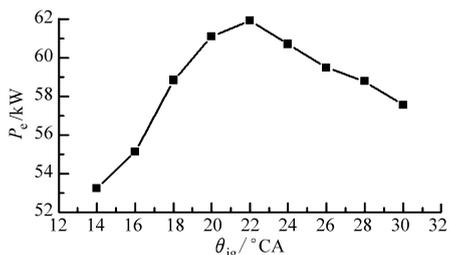


图 7 点火提前角对功率的影响

Fig. 7 Effects of the ignition timing on power output

火提前角对发动机功率的影响,由图可见,点火正时 θ_{ig} 为 22°CA BTDC 时,发动机的功率最大,过早点火或推迟点火均会造成发动机的功率下降。

图 8 为标定点工况下(3 000 r/min,全负荷),点火提前角对滞燃期和循环变动的影响。变化曲线呈 U 字形,在最佳点火提前角时,对应的滞燃期最短,此时燃烧循环变动也最小,点火提前角偏离最佳点火提前角时,滞燃期和循环变动均增加。这是因为如果点火提前角大,缸内混合气温度低,使滞燃期延长(压缩负功的影响);如果点火提前角小,着火

燃烧较晚,导致部分燃料在膨胀过程燃烧,缸内平均温度水平低,平均火焰传播速度下降,也使滞燃期延长。只有在最佳点火提前角时,滞燃期最短,这时循环变动最小。

3 结论

(1) 甲醇缸内直喷发动机高负荷区域采用均质预混燃烧,获得了 62.53 kW 的最大功率,比原柴油机提高了 5.88%,最大扭矩为 260.3 N·m,比原机提高了 20.90%,发动机的动力性能提高。

(2) 同一转速下,滞燃期和急燃期随负荷增加而减小,平均指示压力的循环变动随负荷的变化趋势与滞燃期的变化趋势一致。

(3) 外特性工况下,发动机的滞燃期和急燃期随转速的增加而变大。需要进一步匹配涡流运动,提高充量系数来改善发动机的高速性能。

(4) 3 000 r/min、全负荷时,当 θ_{ig} 为 22°CA BTDC,该甲醇发动机功率最大,滞燃期和循环变动最小。

参 考 文 献

- 1 Zhao F, Lai M C, Harrington D L. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(5): 437 ~ 562.
- 2 Liu Shenghua, Eddy R. Cuty Clemente, Hu Tiegang, et al. Study of spark ignition engine fueled with methanol/gasoline fuel blends[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11 ~ 12): 1 904 ~ 1 910.

- Diao Jinnan. New technology of radiation for bud germination inhibition of export red bean[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2007, 13(4): 42~43. (in Chinese)
- 4 王守经, 于子厚, 孙守义, 等. 辐照生姜的贮藏性状研究[J]. 核农学报, 2004, 18(1): 26~29.
Wang Shoujing, Yu Zihou, Sun Shouyi, et al. Study on the storage properties of irradiated ginger[J]. Acta Agricultural Nucleatae Sinica, 2004, 18(1): 26~29. (in Chinese)
- 5 刘超, 王宏, 汪晓鸣. 板栗辐照冷藏保鲜技术研究[J]. 安徽农业科学, 2004, 32(6): 1213~1214.
Liu Chao, Wang Hong, Wang Xiaoming. Research on the irradiation and low temperature storage technique of Chinese chestnut[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2004, 32(6): 1213~1214. (in Chinese)
- 6 丁静, 沈镇德, 方亦雄, 等. 植物内源激素的提取分离和生物鉴定[J]. 植物生理学通讯, 1979, 5(2): 27~39.
- 7 Khan A A. Primary, preventive and permissive role of hormones in plant systems[J]. The Botanical Review, 1975, 41(4): 391~420.
- 8 张志华, 王文江, 高仪, 等. 核桃果实成熟过程中呼吸速率与内源激素的变化[J]. 园艺学报, 2000, 27(3): 167~170.
Zhang Zhihua, Wang Wenjiang, Gao Yi, et al. Changes of respiration and endohormones during the fruit ripening of walnut [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2000, 27(3): 167~170. (in Chinese)
- 9 Turnbull C G N, Hanke D E. The control of bud dormancy in potato tubers[J]. Planta, 1985, 165(3): 359~365.
- 10 李晓东, 陆岷一, 于燕. 休眠“蔡家坡”蒜内源激素水平的变化规律[J]. 园艺学报, 1996, 23(2): 150~154.
Li Xiaodong, Lu Guoyi, Yu Yan. Effect of endogenous hormones on the dormancy of garlic (*Allium Sativum* L.) [J]. Acta Horticulturae Sinica, 1996, 23(2): 150~154. (in Chinese)
- 11 洽鸿飞, 吴秀兰. 高分子辐射化学原理与应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.
- 12 王守经, 孙守义, 于子厚. 辐照大蒜贮藏性状及抑芽效果研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 1998, 16(4): 246~248.
Wang Shoujing, Sun Shouyi, Yu Zihou. Some biological properties and budding inhibition of irradiated garlic [J]. J. Radiat. Res. Radiat. Proces, 1998, 16(4): 246~248. (in Chinese)

(上接第 19 页)

- 3 Kowalewicz A, Wojtyniak M. Alternative fuels and their application to combustion engines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2005, 219(1): 103~125.
- 4 Zhou Longbao, Zhang Yuyin, Han Zhiyu. An experimental study on the working stability and combustion characteristics of a direct injection diesel engine operating on multifuels[C]. SAE Paper 901568, 1990.
- 5 Hu Junjun, Zhou Longbao, Huang Yongcheng, et al. Experimental study on performances of gasoline direct injection engines with stoichiometric mixture at full load[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002, 8(5): 415~420.
- 6 宫长明, 刘金山, 徐百龙, 等. 火花助燃甲醇发动机燃烧特性的研究[J]. 内燃机学报, 1998, 16(1): 31~36.
Gong Changming, Liu Jinshan, Xu Bailong, et al. Investigation on combustion characteristic of a spark-assisted methanol engine[J]. Transactions of CSICE, 1998, 16(1): 31~36. (in Chinese)
- 7 Kato S, Onishi S. New mixture formation technology of direct fuel injection stratified combustion SI engine(OSKA)[C]. SAE Paper 871689, 1987.
- 8 李本正, 宫艳峰, 刘圣华, 等. 甲醇缸内直喷发动机的燃烧特性[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1372~1376.
Li Benzhen, Gong Yanfeng, Liu Shenghua, et al. Combustion characteristics of a direct-injection spark-ignition methanol engine[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2008, 42(11): 1372~1376. (in Chinese)
- 9 Li Benzhen, Liu Shenghua, Nong Jinji, et al. Development of a direct-injection stratified-charge methanol engine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(11): 2121~2129.