

甲醇预混合气 F-T 柴油引燃模式下发动机燃烧特性研究

苏志伟, 朱建军, 安俏俏, 高聪慧, 韩 卫, 王 乐
(太原理工大学 车辆工程系, 太原 030024)

Study on Combustion Characteristics of Methanol/F-T Fuel Dual Fuel Engine with Pilot Injection

SU Zhiwei, ZHU Jianjun, AN Qiaoqiao, GAO Conghui, HAN Wei, WANG Le

(Department of Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to use the advantage of F-T fuel and methanol in improving the energy conversion efficiency of methanol, the effect of methanol/diesel energy ratio and F-T fuel injection timing on combustion characteristics was investigated on a CY25TQ diesel engine. The mixture of methanol and air was induced into cylinder from the intake port, and ignited by pilot F-T fuel. Experimental results show that the ignition delay and combustion duration would fluctuate greatly with the increase of methanol/diesel energy ratio. When the brake mean effective pressure is 0.45 MPa, the maximum cylinder pressure, the peak value of instantaneous heat release rate and the maximum pressure rise rate are significantly lower with a maximum drop of 26.40%, 59.25% and 58.00% respectively. At high load operation, the pilot fuel injection timing can promote the further reduction of pressure rise rate in different methanol/diesel energy ratio. Although the effective thermal efficiency of dual fuel engine with pilot injection than that of the original diesel engine with diffusion combustion mode at low and middle loads, however, with the increase in load, the thermal efficiency of the dual fuel engine is higher than that of the original diesel engine at high load, which leads to the increase in the maximum thermal efficiency of the engine by 17.14%.

摘要: 为了提高甲醇在能量转化效率方面的优势,在一台 CY25TQ 型柴油机上,利用 F-T 柴油和煤基甲醇研究了甲醇占能比、F-T 柴油喷油时刻对甲醇预混合气 F-T 柴油引燃燃烧方式下发动机燃烧特性的影响。试验结果表明:甲醇占能比增加,此燃烧方式滞燃期、持续期波动较大。在平均有效压力为 0.45 MPa 下,缸内最大压力、瞬时放热率峰值、最大压力升率明显降低,最大降幅分别为 26.40%、59.25% 和 58.00%。高负荷时,不同甲醇占能比下 F-T 柴油喷射时刻调整,能促进压升率进一步降低。与原柴油机扩散燃烧方式相比,虽然采用引燃喷射的双燃料发动机在中低负荷时的有效热效率有所降低,但是随着负荷增加,高负荷下的热效率比原柴油机高,最大提高了 17.14%。

关键词: 内燃机; 甲醇空气预混合气; F-T 柴油引燃; F-T 柴油喷油时刻; 甲醇占能比; 燃烧特性

Key words: IC engine; mixture of methanol and air; pilot F-T fuel; F-T fuel injection timing; methanol/diesel energy ratio; combustion characteristics

收稿日期: 2015-06-15

基金项目: 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金项目(KF14082)

作者简介: 苏志伟(1990—),男,硕士,主要研究方向为内燃机清洁代用燃料, E-mail: suzhiweisunny@163.com;

朱建军(联系人),男,博士, E-mail: 13994217597@163.com。

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.02.007
中图分类号: TK427 文献标识码: A

0 概述

煤基甲醇和 F-T 柴油作为煤炭转化深层次加工产品,由于其在发动机上表现出优良的燃烧和排放特性,被认为是石油的理想替代品。甲醇自身物化特性决定了其抗爆性能良好,但是其在压燃式柴油机上不借助其他技术方法难以直接被压燃。由于 F-T 柴油自身十六烷值极高,着火性能较强,因此可以将 F-T 柴油作为引燃燃料实现甲醇在柴油机上的应用。

对于甲醇预混合气 F-T 柴油引燃燃烧模式,发动机缸内燃烧分为甲醇预混合气的预混合燃烧和后续喷入缸内的 F-T 柴油的扩散燃烧两个过程。此燃烧模式下点火的能量大幅增加,扩大了缸内燃料的稀燃范围,加快了燃烧反应速度,使燃烧集中在上止点附近并且允许保留压燃式发动机的高压缩比而不发生爆震,可以获得较高热效率。

文献[1-2]研究表明:均质混合气引燃(homogeneous charge induced ignition, HCII)燃烧方式具有较高的热效率,在部分负荷下可以达到甚至超过柴油机水平,且利用缸内柴油二次喷射的方法限制了过快的燃烧反应速度,将最大压升率降到合理范围之内。文献[3-5]研究表明:在组合燃烧中,自身含氧的甲醇能够显著改善燃烧,降低有害尾气排放。文献[6-7]对天然气/柴油双燃料燃烧系统进行了研究,并得出此燃烧模式可有效降低发动机排放的理论。文献[8]使用了一种与柴油十六烷值很接近的蔬菜油作为引燃燃料,进行了与甲醇的双燃料试验,结果表明这种发动机碳烟排放较低且热效率较高。

纵观国内外研究者们对预混双燃料燃烧模式的研究,可以发现此燃烧模式具有极大的发展潜力,将成为未来内燃机的发展方向。本文中尝试采用十六烷值比柴油更高、着火性能更好的 F-T 柴油^[9]来引燃甲醇预混合气,但 F-T 柴油生产成本较高,过多的引燃量将造成优势资源的浪费,因此如何增大甲醇的使用量和提高发动机热效率是此研究的重点。本文中主要研究了循环供油量中甲醇占能比和引燃 F-T 柴油喷油时刻对此模式下发动机燃烧特性的影响。

1 试验燃料及理化特性

试验燃料为常规 0# 柴油、无水甲醇和山西潞安集团提供的 F-T 柴油。燃料的理化特性参数见表 1。

表 1 试验燃料的理化特性

项目	参数		
	0# 柴油	F-T 柴油	甲醇
燃料			
液态密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	0.830	0.760	0.796
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	42.50	44.20	19.66
汽化潜热/(kJ·kg ⁻¹)	270	—	1 109
十六烷值	40~50	74	3
比热容/(kJ·(kg·℃) ⁻¹)	1.90	—	2.55
化学计量空燃比	14.30	15.20	6.45
氧质量含量/%	0	0	50
自燃温度/℃	200~220	—	470
运动黏度(60℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	2.77	1.32	1.00
90%馏出温度(T90)/℃	355	310	—

2 试验设备及方法

试验发动机为常运 CY25TQ 型单缸柴油机(非增压)。发动机参数见表 2。

表 2 发动机主要参数

项目	参数
排量/L	1.25
压缩比	16.9
燃烧室类型	ω 型
标定功率/kW	12.5(2 200 r/min)
最大扭矩/(N·m)	63.8(1 600 r/min)
供油提前角/(°)	20
F-T 柴油启喷压力/MPa	20.0
F-T 柴油实际最大喷射压力/MPa	25.3
甲醇喷射压力/MPa	3.5

试验在一台单缸柴油机上进行,F-T 柴油供给采用原机的缸内直喷系统(由柱塞泵供油,轴针式喷油器喷射燃油),启喷压力 20.0 MPa,实际最大喷射压力 25.3 MPa(由高压油管的压力传感器实时测量),甲醇由在进气管上自主设计的甲醇喷油器供给,喷射压力固定在 3.5 MPa,由甲醇控制器(ECU)调控,可以改变甲醇的喷射周期和脉宽。缸内燃烧压力通过 Kistler 6125C11 型缸压传感器和 4618A2

型电荷放大器获取,并通过德维创 DEWE-800-CA-SE 燃烧分析仪进行数据采集与计算分析。试验装置如图 1 所示。

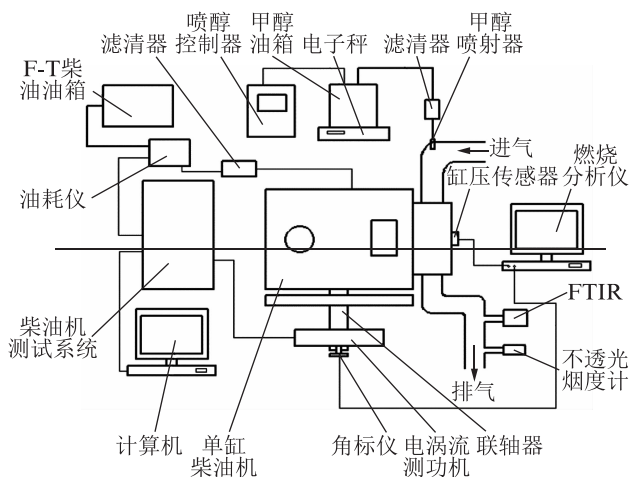


图 1 试验装置示意图

定义甲醇占能比为发动机每工作循环喷入气缸的甲醇热值占总燃料热值的比例,F-T 柴油喷射时刻改变由供油提前角的调节来实现。

试验中,固定发动机的转速和负荷不变,同时调整 F-T 柴油的油门开度和甲醇喷射脉宽,改变甲醇占能比,寻找此工况点下的最大甲醇占能比,然后逐渐减小甲醇喷射量,增大 F-T 柴油油门开度,降低甲醇占能比;重复上述操作,测录同一测试工况的 5 个甲醇占能比,然后调整供油提前角,重复以上步骤。不同供油提前角下甲醇占能比是不确定的。

3 甲醇占能比对甲醇预混合气 F-T 柴油引燃燃烧特性的影响

甲醇占能比影响缸内燃烧过程中预混合燃烧和扩散燃烧的比例,能有效控制燃烧的反应速率,对燃烧特性有重要的影响。在发动机转速为 2 000 r/min、平均有效压力为 0.45 MPa、供油提前角为 20°(即喷油时刻为上止点前 20°曲轴转角)工况下研究了甲醇占能比对甲醇预混合气 F-T 柴油引燃燃烧特性的影响。

图 2 为 4 组甲醇占能比下,缸压、瞬时放热率的变化趋势。甲醇占能比增加,缸压及放热率峰值降低,最大降幅分别达到 26.40% 和 59.25%,主燃烧相位后移,缸压峰值位置后移,逐渐远离上止点。这是因为在预混引燃燃烧模式中,一方面甲醇气化吸收大量的热,使压缩终点缸内混合气温度下降,且甲醇占能比越大,缸内混合气温度下降越明显,这极大地抑制了火焰传播速度;另一方面已形成预混合气的燃烧速度高于 F-T 柴油扩散燃烧速度,即预混合

引燃燃烧模式中最高缸压的大小由缸内温度和预混合气的浓度共同决定^[10]。该试验中温度对缸内压力的大小起主导作用。预混合引燃模式研究中,随高辛烷值燃料比例增加,放热模式由单阶段缓慢放热向两阶段放热、单阶段快速放热方式转变^[11]。本试验中甲醇占能比主要处于单阶段快速放热阶段,甲醇占能比增加,F-T 柴油比例减小,预混燃油比例增加,缸内温度降低,减弱了缸内燃料着火性的分层,从而降低了缸内混合气的整体着火性^[12]和局部当量比^[13],导致瞬时放热速率降低。

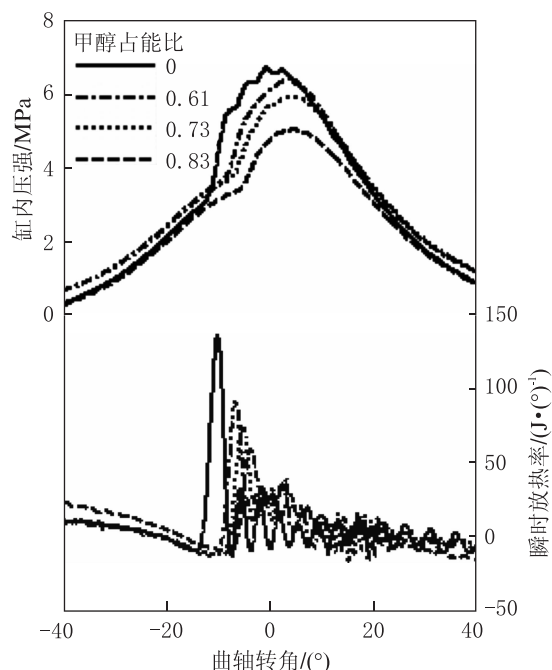


图 2 甲醇占能比对缸内压力、瞬时放热率的影响

滞燃期的长短受甲醇喷射量及缸内混合气均匀程度的影响,而持续期的长短则关系到缸内的燃烧效率和放热速率,探究二者的变化规律对燃烧特性有重要意义。用 5% 累计放热时刻与供油时刻之间的曲轴转角表示滞燃期,用 90% 累计放热时刻与 5% 累计放热时刻之间的曲轴转角表示持续期。

图 3 为不同负荷下,滞燃期、持续期随甲醇占能比的变化趋势。甲醇占能比增加,各负荷下滞燃期和持续期呈波动变化。这是因为:预混引燃燃烧模式中,中、低负荷引燃 F-T 柴油油量较少,大量甲醇对新鲜冲量的冷却作用明显,加上甲醇对着火的抑制作用^[14],燃烧循环变动较大;高负荷下,缸内温度较高,甲醇预混合气易出现爆震现象,导致燃烧循环变动增加^[15],使每循环的燃烧始点(即累计放热时刻所对应曲轴转角)偏差变化不规律,而滞燃期和持续期都受燃烧始点的影响,二者变化波动较大。

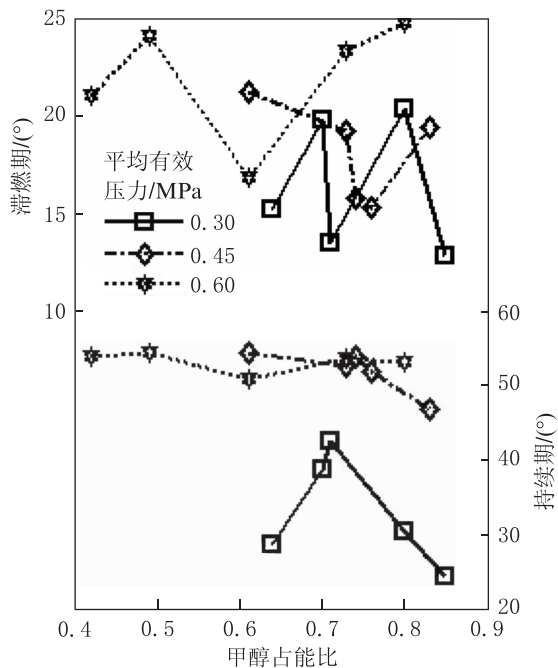


图3 甲醇占能比对滞燃期、持续期的影响

图4为4组甲醇占能比下,压力升高率的变化趋势。甲醇占能比增加,最大压升率明显降低,最大降幅为58%,且出现位置后移。这是因为纯F-T柴油燃烧时,达到着火始点的可燃混合气较多,出现多点同时着火现象,初期放热率峰值较高,从而最高压升率较高。而同一工况下,随着甲醇占能比增加,缸内温度降低明显,燃烧始点滞后,虽然着火前缸内形成的预混合气较多,但是可燃的F-T柴油预混合气的量却在减少,缸内混合气的整体着火性降低^[12],初期放热率降低,甲醇预混合气在之后由F-T柴油引燃^[4],因此最高压升率降低且出现时刻后移。

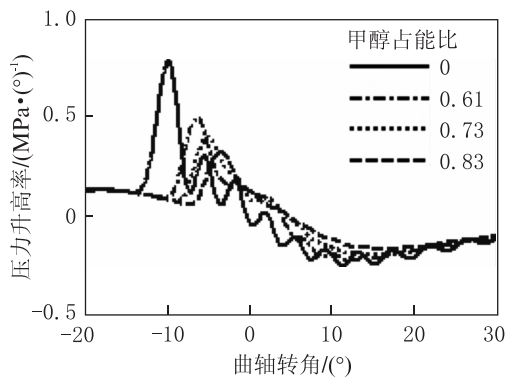


图4 甲醇占能比对压力升高率的影响

图5为不同负荷下,有效热效率随甲醇占能比的变化趋势。随甲醇占能比增加,中低负荷的有效热效率呈降低的趋势,而高负荷下的热效率则呈上升趋势,比原柴油机最高提高了17.14%。这是因为中低负荷下,缸内甲醇量增加,即引燃F-T柴油量减

少,导致缸内温度低,点火能力减弱,易使燃烧不充分,热效率低下;而高负荷下,缸内温度较高,可燃混合气浓且较均匀,虽然甲醇大的汽化潜热使压缩终点缸内温度下降,影响初期的预混合燃烧速率^[4],但是滞燃期过后,多点大面积的F-T柴油同时点燃甲醇预混合气^[1],在上止点后一定曲轴转角范围内燃烧较快较充分,有利于提高热效率。

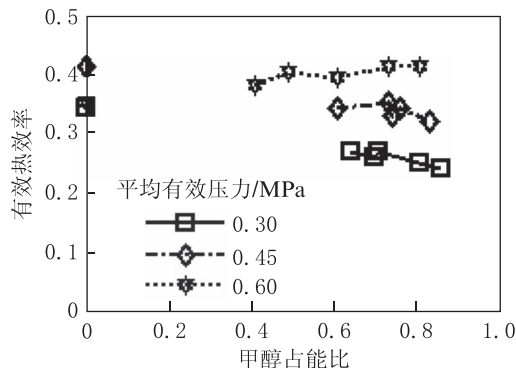


图5 甲醇占能比对有效热效率的影响

4 F-T柴油喷油时刻对甲醇预混合气F-T柴油引燃燃烧特性的影响

在甲醇预混合气F-T柴油引燃燃烧方式中,F-T柴油喷油时刻影响可燃混合气滞燃期的长短,决定着火始点及初期燃烧放热速率,在某种程度上决定缸内的化学反应过程。在发动机转速为2000 r/min、平均有效压力为0.6 MPa工况下研究了F-T柴油喷油时刻对甲醇预混合气F-T柴油引燃燃烧特性的影响。

图6为不同喷油时刻最高缸压、最高压升率的变化趋势。喷油时刻为原机供油提前角(20°曲轴转角)时缸内最高压力最大,喷油时刻提前或推迟,缸内最高压力均降低;甲醇占能比在0.68以下,喷油时刻提前,最高压升率上升。产生这种变化规律的原因是:由于甲醇气化吸热,缸内温度降低,过早喷入的F-T柴油达不到着火所需的临界温度,混合燃料燃烧始点推迟,滞燃期大大延长,反而制约了燃料的放热,使得燃烧重心向后推迟,远离上止点,最高缸压降低;相反过晚喷入F-T柴油,虽然缸内温度较高,易达到F-T柴油的着火临界点,但是与原机供油提前角20°时相比,燃烧重心远离上止点,放热率峰值降低,导致最高缸压降低。压力升高率则取决于滞燃期内形成可燃混合气的多少,而可燃混合气的生成量由滞燃期的长短和燃料的物化特性决定。喷油提前,F-T柴油与甲醇预混合气混合较充分,滞燃期内形成的可燃混合气较多,在氧浓度合理范围内达到着火点的时刻较早,放热率中心更接近上止点,

因此最高压升率增加。

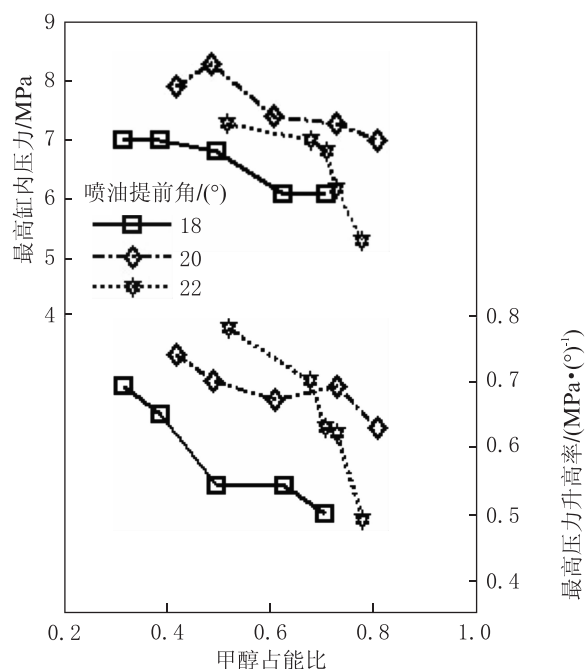


图 6 喷油时刻对最高缸内压力和最高压力升高率的影响

图 7 为不同喷油时刻,滞燃期、持续期的变化趋势。甲醇占能比在 0.43~0.71 之间,随喷油时刻提前,滞燃期先延长后略有缩短;高甲醇占能比下的滞燃期趋于一致。在甲醇占能比低于 0.56 时,持续期随喷油时刻提前而缩短;而在甲醇占能比高于 0.56 时,持续期随喷油时刻提前先延长后缩短。出现上述变化的原因是:喷油时刻提前意味着活塞离上止点较远,此时缸内温度较低,F-T 柴油很难达到着火临界点,滞燃期延长;而喷油继续提前,喷入缸内的 F-T 柴油与气缸壁接触面积增大,能够充分吸收热量使自身的温度升高,燃油蒸发和雾化效果良好,所以滞燃期略有缩短;而高甲醇占能比下,甲醇量达到极限,对 F-T 柴油滞燃期影响效果达到最大化,此时主要是 F-T 柴油自身理化特性影响其滞燃期,因此高占能比下滞燃期趋于一致。

在低甲醇占能比下,甲醇蒸发吸热造成温度降低对燃烧始点的影响较弱,喷油提前,F-T 柴油着火较早,放热集中在上止点附近,持续期较短。在高甲醇占能比下,喷油提前,缸内温度大幅降低,燃烧始点滞后,燃烧重心离上止点较远,燃烧速率降低;但是,当喷油继续提前,同一甲醇占能比下,活塞距离上止点较远,缸内混合气从气缸壁得到的热量会增加,这在一定程度上影响着火始点位置,可能造成放热中心更接近上止点,燃烧迅速,持续期缩短。

图 8 为不同喷油时刻有效热效率的变化趋势。甲醇占能比在 0.50~0.68 之间,随喷油时刻提前有

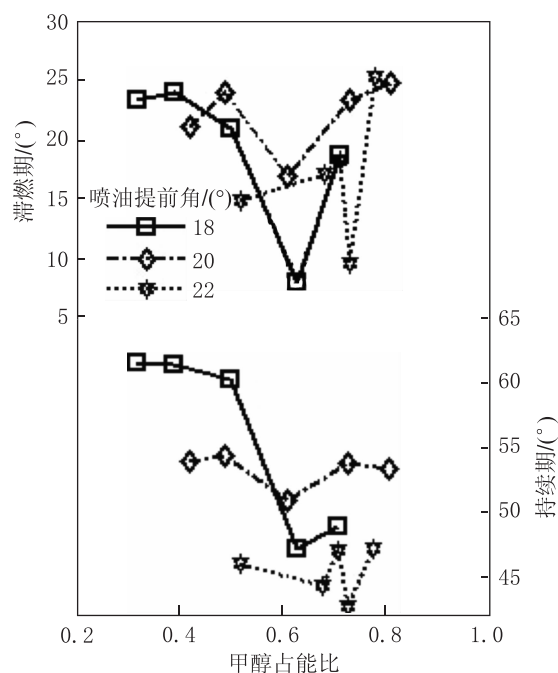


图 7 喷油时刻对滞燃期与燃烧持续期的影响

效热效率升高。喷油提前,F-T 柴油与甲醇混合气有充足时间混合,着火提前,放热在活塞上行时开始且主要集中在上止点附近,整个燃烧反应过程速度增加,热效率提高。

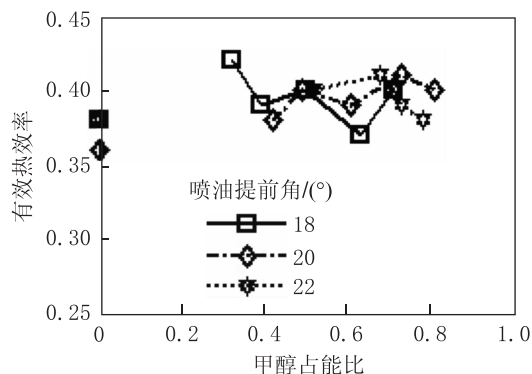


图 8 喷油时刻对有效热效率的影响

5 结论

(1) 在甲醇预混合气 F-T 柴油引燃燃烧方式下,有效热效率随负荷增加而增加,且高负荷热效率均大于原柴油机,最大增幅为 17.14%。甲醇占能比在 0.50~0.68 之间时,喷油提前,有效热效率增加,这大幅提高了甲醇的能量转化效率。

(2) 甲醇占能比增加,滞燃期和持续期的变化波动较大,在平均有效压力为 0.45 MPa 工况下,缸内最高压力、瞬时放热率、最高压升率明显下降,最大降幅分别为 26.40%、59.25%和 58.00%,且出现

位置后移。

(3) 高负荷时,不同的甲醇占能比下,合理调整F-T柴油喷射时刻有利于缩短滞燃期,这对降低最高缸内压力和最高压升率有促进作用。

参考文献:

- [1] 王建昕,蒋恒飞,王燕军,等.汽油均质混合气柴油引燃(HCII)燃烧特性的研究[J].内燃机学报,2004,22(5):391-396.
WANG J X, JIANG H F, WANG Y J, et al. Study on the combustion characteristics of homogeneous charge induced ignition(HCII)for gasoline engine [J]. Transactions of CSICE, 2004,22(5):391-396.
- [2] JIANG H F, WANG J X, SHUAI S J. Visualization and performance analysis of gasoline homogeneous charge induced ignition by diesel [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2005, 2005-01-0136.
- [3] 于超,王建昕,王志,等.均质混合气引燃发动机的燃烧和排放特性[J].汽车安全与节能学报,2011,2(3):263-270.
YU C, WANG J X, WANG Z, et al. Combustion and emission characteristics of homogeneous charge induced ignition engine [J]. Automotive Safety and Energy, 2011,2(3):263-270.
- [4] 于超,王建昕,王志,等.汽油均质混合气柴油引燃低温燃烧的试验[J].内燃机学报,2013,31(2):120-125.
YU C, WANG J X, WANG Z, et al. Experiment on low temperature combustion of gasoline homogeneous charge induced ignition by diesel[J]. Transactions of CSICE, 2013,31(2):120-125.
- [5] 汪洋,苏万华,谢辉,等.柴油/汽油双燃料发动机排放性能的研究[J].汽车工程,2002,24(3):221-223.
WANG Y, SU W H, XIE H, et al. A study on the emission characteristics of a diesel/gasoline dual fuel engine [J]. Automotive Engineering, 2002,24(3):221-223.
- [6] 姚春德,夏琦,陈绪平,等.柴油在甲醇氛围中高效清洁燃烧机理[J].天津大学学报,2011,44(8):671-676.
YAO C D, XIA Q, CHEN X P, et al. Mechanism of diesel fuel burning in methanol mixture with high efficiency and low emission [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 671-676.
- [7] 姚春德,代乾,许汉君,等.柴油在甲醇/空气高温热氛围中的着火和燃烧特性[J].燃烧科学与技术,2012,18(3):193-198.
YAO C D, DAI Q, XU H J, et al. Ignition and combustion characteristics of diesel spray in premixed methanol/air mixture with high temperature[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012,18(3):193-198.
- [8] KUMAR M S, RAMESH A, NAGALINGAM B. An experimental comparison of methods to use methanol and jatropha oil in a compression ignition engine [J]. Biomass and Bioenergy, 2003(25):309-318.
- [9] 黄勇成,周龙保,蒋德明.清洁燃料F-T柴油在柴油机中应用的研究[J].内燃机工程,2005,26(5):18-23.
HUANG Y C, ZHOU L B, JIANG D M, et al. Study and development of Fischer-Tropsch (F-T) diesel fuel as a clean alternative fuel for diesel engines [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005,26(5):18-23.
- [10] 王建昕,帅石金.汽车发动机原理[M].北京:清华大学出版社,2011.
- [11] YU C, WANG Z, WANG J X. Sequenced combustion characteristics, emission and thermal efficiency in gasoline homogeneous charge induced ignition [J]. Applied Energy, 2014,124:343-353.
- [12] SLUDER C, WAGNER R, LEWIS S, et al. Fuel property effects on emissions from high efficiency clean combustion in a diesel engine[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2006, 2006-01-0080.
- [13] 马帅营,尧命发,童来会,等.汽油/柴油双燃料高比例预混压燃燃烧与排放的试验[J].内燃机学报,2012,30(1):1-8.
MA S Y, YAO M F, TONG L H, et al. An experimental on combustion and emissions of gasoline/diesel dual fuel HPCC [J]. Transactions of CSICE, 2012,30(1):1-8.
- [14] XU H J, YAO C D, XU G L. Chemical kinetic mechanism and a skeletal model for oxidation of n-heptane /methanol fuel blends[J]. Fuel, 2012,93:625-631.
- [15] 王全刚,姚春德,于海涛,等.柴油甲醇双燃料运行边界研究[J].工程热物理学报,2014,35(9):1879-1883.
WANG Q G, YAO C D, YU H T, et al. The optimum operating boundary of DMDF [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014,35(9):1879-1883.