

甲醇替代率对甲醇/柴油双直喷发动机性能的影响

尹晓军¹, 任宪丰^{1,2}, 栾建伟^{1,2}, 段浩¹, 汪映¹, 曾科¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 潍柴动力股份有限公司, 261041, 山东潍坊)

摘要: 为了实现甲醇/柴油双燃料发动机的高热效率和低排放,在一台单缸柴油机上搭建了独立的双直喷系统,开展了甲醇/柴油双直喷发动机运行范围的试验研究。结果表明:在低负荷率工况下,随着甲醇替代率的增加,发动机热效率降低;在中、高负荷率工况下,甲醇的加入有利于提高发动机热效率。在负荷率为79.5%、甲醇替代率为52.4%的工况下,发动机指示热效率达到最大值(43.4%)。同时,随着甲醇替代率的增加,发动机 NO_x 和碳烟排放降低,而HC和CO排放呈现出增加的趋势。此外,在全负荷工况下,探究了最大甲醇替代率及其对发动机热效率的影响,发现双直喷发动机的最大甲醇替代率可以达到96.0%。随着甲醇替代率的增加,发动机指示热效率呈现出先提高后降低的趋势,最高指示热效率发生在甲醇替代率为50.0%的工况下。该研究结果可为甲醇/柴油双直喷发动机性能和排放特性的进一步优化提供试验和数据支持。

关键词: 甲醇/柴油双燃料;双直喷发动机;甲醇替代率;运行范围;热效率;排放特性

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202309008 **文章编号:** 0253-987X(2023)09-0071-08

Effect of Methanol Energy Substitution Ratio on Performance of Methanol/Diesel Dual-Direct Injection Engine

YIN Xiaojun¹, REN Xianfeng^{1,2}, LUAN Jianwei^{1,2}, DUAN Hao¹, WANG Ying¹, ZENG Ke¹

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

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang, Shandong 261041, China)

Abstract: In order to achieve higher thermal efficiency and lower emissions of methanol/diesel dual-fuel engines, an independent dual-direct injection system was built on a single-cylinder diesel engine and the operating range of the methanol/diesel dual-direct injection engine was conducted experimentally. Results show that the indicated thermal efficiency decreases with the increase of the methanol energy substitution ratio under low engine loads. But the increase of the methanol energy substitution ratio benefits the improvement of indicated thermal efficiency under medium and high engine loads. The highest indicated thermal efficiency of 43.4% could be achieved at an engine load rate of 79.5% and a methanol energy substitution ratio of 52.4%. Meanwhile, with the increase of the methanol energy substitution ratio, NO_x and soot emissions decrease, but the opposite trends of HC and CO emissions are observed. Besides, the maximum methanol energy substitution ratio and its influence on the thermal efficiency of the engine were investigated under the full engine load and it was found that the maximum methanol energy substitution ratio of the dual-direct injection engine could reach up to 96.0% and the indicated thermal efficiency first increases and then

decreases with the increase of the methanol energy substitution ratio and reaches a peak when the ratio increases to 50.0%. The research can provide experimental and data support for further optimization of the performance and emission characteristics of methanol/diesel dual-direct injection engines.

Keywords: methanol/diesel dual-fuel; dual-direct injection engine; methanol energy substitution ratio; operating range; thermal efficiency; emissions characteristics

柴油机因其高热效率和可靠的动力性,被广泛应用于交通运输和工程机械等领域^[1]。柴油机排气中的氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、碳氢(HC)和碳烟排放不仅会对环境造成污染,而且危害人类的身体健康。随着我国“双碳”目标的提出和排放法规的更新,寻找先进的燃烧模式和合适的替代燃料成为发动机研究领域的热点^[2]。其中,双燃料燃烧模式通常采用两种物理化学性质互补的燃料,能够实现高效清洁燃烧,具有广阔的应用前景^[3-4]。该模式下,可以通过燃料的喷射比例来调节燃料的反应性,也可以通过喷射策略和燃料混合气的形成过程来控制活性梯度^[5]。研究表明:在活性反应可控的情况下,通过调节燃烧状态能够有效提高热效率、降低排放^[6-7]。

高、低活性燃料通过两个独立的喷射系统直接喷入气缸,可以在时间和空间上形成活性和浓度的可控分层,从而实现燃烧状态的调整和优化。吕兴才等^[8-9]基于缸内双直喷模式开展了相关研究,结果表明,作为一种高效、清洁的压缩点火发动机燃烧技术,双燃料缸内直喷模式的甲醇替代率和热效率高度依赖于发动机的负荷。鉴于当前国内外鲜有关于双直喷发动机运行范围的报道,有必要系统研究双直喷燃烧模式的运行范围,探索甲醇替代率对双直喷发动机热效率和排放特性的影响,从而为实际发动机的设计过程提供理论指导。本文在一台单缸发动机上开展了甲醇/柴油双直喷燃烧模式的试验研究,重点探讨了基于发动机负荷率和甲醇替代率下双直喷发动机的运行范围,并对发动机外特性工况下的最大甲醇替代率进行了研究。

1 试验系统及研究方案

1.1 试验台架与设备

试验所用发动机为单缸共轨风冷柴油机,表 1 给出了其主要参数。为保证甲醇和柴油能够分别独立喷入气缸,在发动机缸盖上加装了甲醇缸内直喷喷嘴,柴油仍沿用原机的共轨直喷系统(图 1)。试验用甲醇为无水甲醇,柴油为市售 0# 柴油,其理化性质如表 2 所示。

表 1 发动机主要参数

Table 1 Specification of the test engine

参数	数值
排量/L	0.498
缸径,行程/mm	92,75
压缩比	19:1
最大扭矩/(N·m)	25
转速/(r·min ⁻¹)	2 000

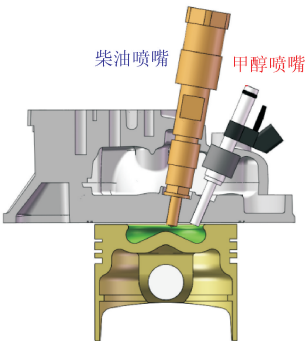


图 1 发动机缸盖剖面图
Fig. 1 Section view of the engine cylinder head

表 2 试验燃料的理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of test fuels

理化性质	柴油 ^[10]	甲醇 ^[11]
分子式	C ₁₀ ~C ₁₅	CH ₃ OH
十六烷值	51	<5
辛烷值	17	111
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	42.5	20.1
汽化潜热/(kJ·kg ⁻¹)	260	1 100

甲醇/柴油双直喷发动机台架测试系统如图 2 所示。发动机的转速和转矩采用电力测功机(CAC37)监测,柴油和甲醇消耗量由高精度电子秤称量,缸内压力信号和曲轴转角信号分别通过压电式压力传感器(Kistler 6058A)和曲轴转角传感器(Kistler 2619A11)进行测量。同一运行工况下,采集 200 个连续工作循环的缸压数据用于分析燃烧特征参数。常规气体和颗粒排放分别采用 AVL4000L 排放分析仪和 Horiba MEXA-600S 不透光烟度计进行测定。

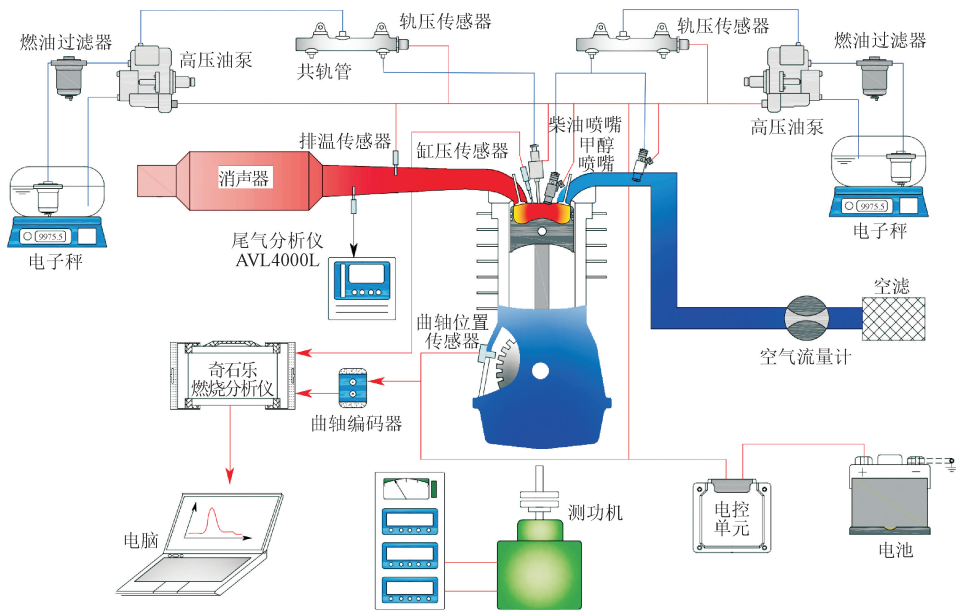


图 2 发动机台架测试系统
Fig. 2 Engine set-up and instrumentation layout

1.2 试验方案

试验在原机最大转矩转速(2 000 r/min)下进行。柴油和甲醇的喷射时刻和脉宽均由自主开发的电控系统控制。采用柴油预喷策略以抑制燃烧粗暴,为便于标记,将预喷柴油记为 D1,主喷柴油记为 D2。为了在发动机宽负荷工况下全面提高热效率,柴油喷射时刻相对较早,以便于在缸内形成均匀的混合物。本文将压缩上止点定义为 0°,为保证燃烧累计放热 50%时刻(CA50)集中在上止点后 8°~10°范围内,柴油主喷时刻(T_{D2})固定在-17°,柴油预喷和主喷间隔为 12°,喷射压力为 90 MPa。为避免甲醇和柴油油束的碰撞干扰,甲醇喷射时刻(T_M)为上止点前 60°,喷射压力为 15 MPa。

定义甲醇替代率为双燃料发动机每循环喷入缸内的甲醇燃料热值与该循环下喷入气缸的总燃料热值之比,其计算公式如下

$$R_M = \frac{m_M h_M}{m_M h_M + m_D h_D} \tag{1}$$

式中: R_M 为甲醇替代率,%; m_M 和 m_D 分别为甲醇与柴油的燃料消耗量,kg/h; h_M 和 h_D 分别为甲醇和柴油的低热值,MJ/kg。

暖机过程采用纯柴油模式,发动机负荷率固定在 20%,逐渐增加甲醇喷射量,使得发动机输出转矩不断提高直至达到外特性转矩,试验过程中记录不同甲醇喷射量下的发动机性能和排放数据。随后增加柴

油喷射量并固定,逐渐增加甲醇喷射量,直至发动机达到外特性工况。依此类推,直至覆盖全负荷工况。试验过程中,最大压升率(R_{max})超过 0.8 MPa/(°),则认为发生了粗暴燃烧。为保证燃烧稳定性,指示平均有效压力(IMEP)的循环变动(δ_{IMEP})控制在 5.0%以下。为保证机械设计强度,最高缸内压力限制在 15 MPa 以下。

2 试验结果与讨论

2.1 双直喷燃烧模式的运行范围

甲醇/柴油双直喷发动机的运行范围如图 3 所示。值得注意的是,在高负荷率工况下,最大甲醇替代率达 65.1%,高于以往的研究结果^[12-13]。随着发动机负荷率的增加,甲醇替代率的进一步提高受限于粗暴燃烧边界。

由图 3 可见:指示热效率(η_i)随发动机负荷率的增加而提高,而随甲醇替代率的变化则呈现出不同的趋势;当发动机负荷率为 40%时,纯柴油运行工况的指示热效率为 38.6%,随着甲醇替代率分别增加到 16.1%和 21.1%,指示热效率分别降低至 37.8%和 36.9%,这是因为在发动机低负荷率工况下,较低的缸内温度和甲醇的冷却使得较稀燃料混合物的燃烧恶化,从而导致指示热效率降低^[14-15];而当发动机负荷率增加到 60%时,甲醇替代率为 18.6%、28.4%、40.5%和 43.9%时的指示热效率

分别为 40.6%、40.9%、41.2% 和 41.0%。由于甲醇分子结构中仅含有一个碳键,其燃烧过程相对简单^[16]。作为一种含氧燃料,甲醇在燃烧过程中可产生 OH 自由基,有利于加速燃烧^[17]。此外,较高的汽化潜热也会增强甲醇的冷却,有利于降低燃烧过程中的传热损失^[18]。因此,随着甲醇替代率的增加,指示热效率提高。但是,当甲醇替代率进一步增加时,甲醇燃料在燃烧过程中起主导作用,增加的甲醇量降低了缸内燃料混合物的活性,导致指示热效率降低。随着发动机负荷率进一步增加,在发动机负荷率为 79.5%、甲醇替代率为 52.4% 的工况下,指示热效率达到最大值 43.4%。这是因为在发动机高负荷率工况下,缸内的温度和压力升高,有利于提高燃烧速率,从而提高了指示热效率。

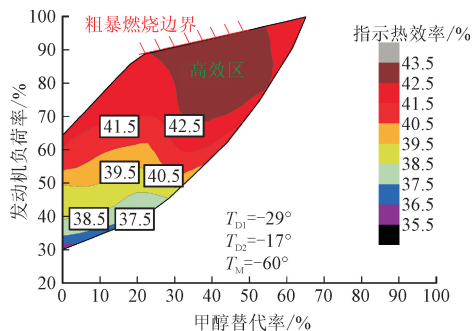
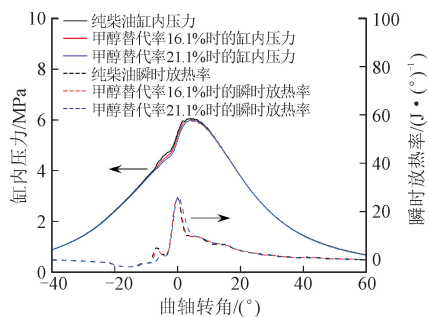


图 3 双直喷燃烧模式运行范围和热效率分布

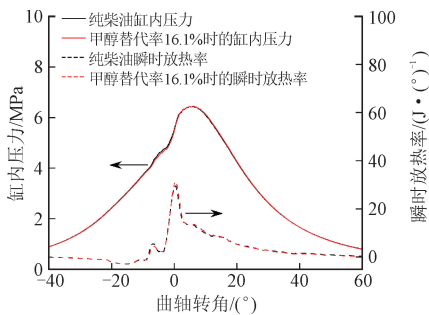
Fig. 3 Experimental operating range and indicated thermal efficiency contours

2.2 不同发动机负荷率下甲醇替代率的影响

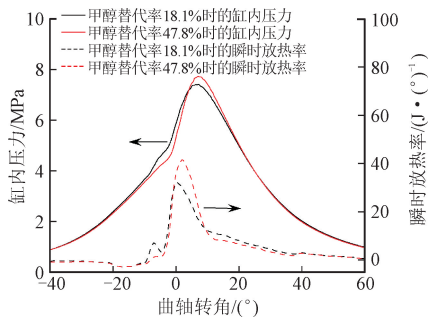
图 4 为不同发动机负荷率下甲醇替代率对燃烧过程的影响。如图 4(a) 和 (b) 所示,在 40.0% 和 56.5% 发动机负荷率下,甲醇替代率对燃烧过程影响较小,燃烧呈现显著的两段放热特征^[19-20]。随着甲醇替代率的增加,压缩冲程的缸内压力降低,第一段放热峰值降低,这是因为甲醇的冷却降低了缸内温度,抑制了柴油的低温放热反应。如图 4(c) 所示,在高发动机负荷率下,随着甲醇替代率由 18.1% 增加到 47.8%,压缩冲程的压力降低,而膨胀冲程的压力升高。燃料燃烧过程由两段放热变为单段放热,燃烧压力峰值和放热率峰值提高。在高甲醇替代率下,柴油喷射量减少,甲醇喷射量增加,使得缸内高活性燃料的局部当量比降低,快速高温反应无法迅速形成。而随着活塞接近压缩上止点,缸内的温度和压力增加,触发大范围高温放热反应,从而呈现出单段放热的特征,此时缸内放热过程主要由甲醇燃烧主导。



(a) 40.0% 发动机负荷率的燃烧特征



(b) 56.5% 发动机负荷率的燃烧特征



(c) 85.7% 发动机负荷率的燃烧特征

图 4 甲醇替代率对燃烧过程的影响

Fig. 4 Effect of methanol energy substitution ratio on the combustion process

图 5 为不同发动机负荷率下甲醇替代率对燃烧特征参数的影响。由图可见,在不同发动机负荷率下,随着甲醇替代率的增加,着火延迟期逐渐被延长。由于甲醇的冷却降低了缸内温度,且甲醇的活性较低,因而导致缸内高活性燃料的局部当量比降低,着火延迟期增加。此外,在低温条件下,甲醇参与 OH 自由基的竞争反应,后者被甲醇氧化后产生活性较低的 H_2O_2 ,使得着火延迟期增加^[21]。较长的着火延迟期有利于在缸内形成均匀的燃料混合物,增加燃料燃烧的集中放热速率。甲醇燃料的含氧特性和较高的火焰传播速度有利于缸内燃烧速率的提高^[22]。因此,随着甲醇替代率的增加,燃烧持续期缩短,燃烧状态提前,燃烧累计放热 50% 的时刻(CA50)提前。

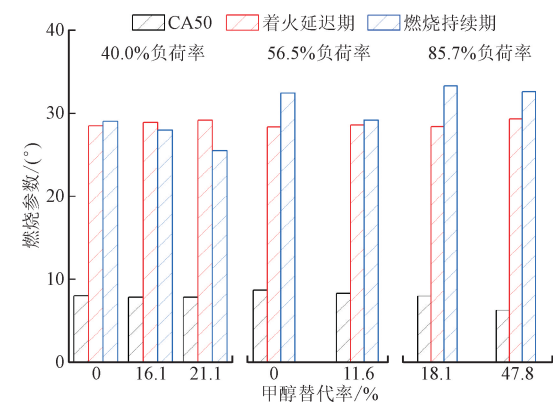


图 5 甲醇替代率对燃烧特征参数的影响

Fig. 5 Effect of methanol energy substitution ratio on the combustion characteristics

图 6 为不同发动机负荷率下甲醇替代率对最高燃烧温度的影响。由图可见,随着发动机负荷率的增加,缸内最高燃烧温度提高。当发动机负荷率由 40.0% 增加至 56.5% 时,纯柴油工况下的最高燃烧温度由 1 308 K 提高至 1 455 K。在不同的发动机负荷率下,随着甲醇替代率的增加,缸内最高燃烧温度提高。随着甲醇喷射量的增加,预混燃烧比例提高,有利于提高缸内燃料的燃烧速率,致使燃烧状态提前,燃料燃烧的等容度更高,从而提高了缸内最高燃烧温度。

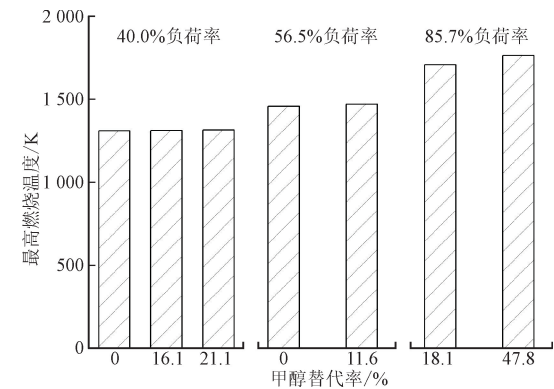


图 6 甲醇替代率对最高燃烧温度的影响

Fig. 6 Effect of methanol energy substitution ratio on the maximum combustion temperature

图 7 为不同发动机负荷率下甲醇替代率对最大压力升高率的影响。由图可见,随着发动机负荷率的增加,最大压力升高率提高。在 85.7% 发动机负荷率工况下,随着甲醇替代率由 18.1% 增加到 47.8%,最大压力升高率由 0.61 MPa/(°) 提高到 0.76 MPa/(°)。甲醇的加入使得预混燃烧比例增加,燃烧速率提高,进而导致缸内最大压升率提高。同时,高发动

机负荷率工况的最大压力升高率高于低负荷率工况。

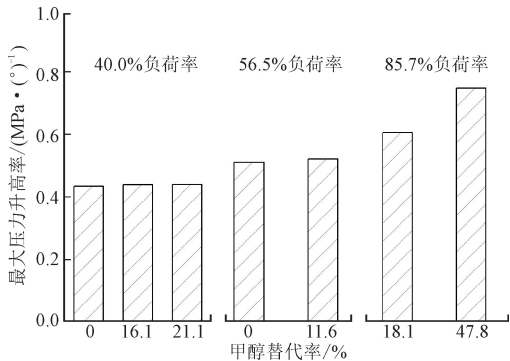


图 7 甲醇替代率对最大压力升高率的影响

Fig. 7 Effect of methanol energy substitution ratio on the maximum pressure rise rate

图 8 为不同发动机负荷率下甲醇替代率对循环变动的影响。可以看出,在低负荷率下,随着甲醇替代率的增加,燃烧循环变动提高。例如,在 40.0% 发动机负荷率工况、甲醇替代率分别为 0%、16.1% 和 21.1% 时的循环变动分别为 3.96%、4.01% 和 4.41%。这是因为在低负荷率工况下,缸内温度较低,喷入气缸的甲醇冷却作用加强,抑制了柴油的低温反应,不利于燃烧的稳定。随着发动机负荷率的增加,燃烧循环变动降低,意味着缸内燃烧过程更加稳定。高负荷率下的高温、高压环境有利于提高着火和燃烧过程的稳定性^[23]。同时,甲醇的含氧特性能够促进燃烧速率的提升,进而增强燃烧的稳定。因此,在中、高发动机负荷率下,随着甲醇替代率的增加,燃烧的稳定提高。

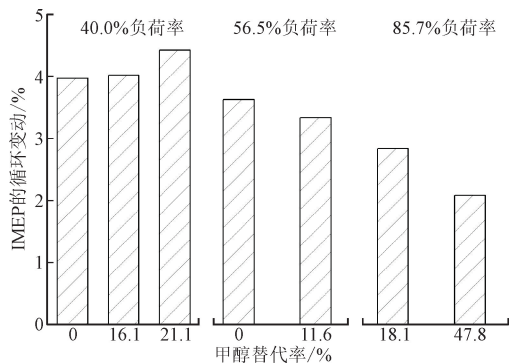


图 8 甲醇替代率对循环变动的影响

Fig. 8 Effect of methanol energy substitution ratio on the cyclic variation

图 9 为不同发动机负荷率下甲醇替代率对常规气体排放的影响。可以看出,随着发动机负荷率的

提高, NO_x 排放增加。这是因为在高负荷率下, 缸内燃烧温度增大, 更多的燃料喷射量也提高了燃料的局部当量比^[24], 从而在缸内形成高温、富燃环境, 有利于 NO_x 污染物的生成。在不同发动机负荷率下, 随着甲醇替代率的增加, NO_x 排放水平降低, 而 CO 和 HC 排放水平提高。首先, 甲醇的冷却效应降低了缸内温度, 抑制了 NO_x 的生成^[25-26]; 其次, 着火延迟期的延长提高了缸内燃料混合物的均匀性, 降低了局部当量比; 最后, 燃烧速率的提高缩短了缸内高温持续时间。因此, 随着甲醇替代率的增加, NO_x 排放降低。缸内温度的下降恶化了燃料的燃烧状况, 导致更多的燃料不能完全氧化, 造成了 HC 和 CO 排放的增加。在低温条件下, 甲醇与 OH 基反应生成活性较低的 H_2O_2 , 抑制了 CO 的氧化反应^[27]。同时, 甲醇的加入导致着火延迟期延长, 更多的甲醇燃料喷射到近缸壁区域, 也会增加 HC 和 CO 排放。

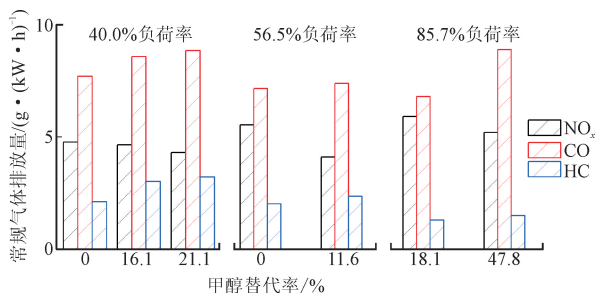


图9 甲醇替代率对常规气体排放的影响

Fig. 9 Effect of methanol energy substitution ratio on the regular gaseous emissions

图10为不同发动机负荷率下甲醇替代率对碳烟排放的影响。随着发动机负荷率的提高, 碳烟排放增加。柴油喷射量的增加提高了燃料的局部当量比, 有利于碳烟的生成。在同一发动机负荷率下, 随着甲醇替代率的增加, 碳烟排放降低。这是因为柴油喷射量的减少使得多环芳烃等减少, 进而改善了颗粒物排放。同时, 着火延迟期增加有利于减少缸内局部富燃区域。此外, 在高温环境下, 甲醇的含氧特性有利于碳烟的氧化。因此, 随着甲醇替代率的增加, 碳烟排放降低。

2.3 全负荷工况最大甲醇替代率对指示热效率的影响

考虑到在高负荷率下, 甲醇替代率的提高受限于粗暴燃烧边界, 本节通过滞后柴油主喷时刻(-11°)来降低燃烧压力升高率, 从而实现甲醇替代率的提

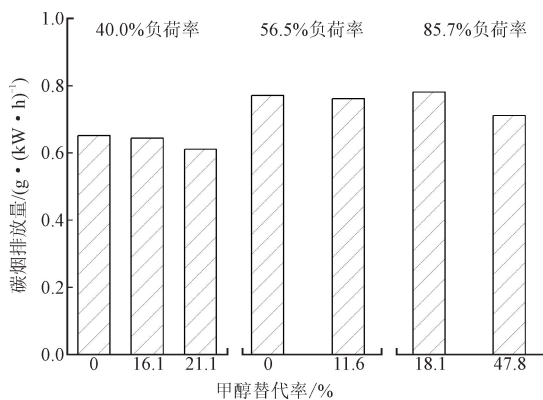


图10 甲醇替代率对碳烟排放的影响

Fig. 10 Effect of methanol energy substitution ratio on the soot emissions

高。试验过程中, 柴油的预喷和主喷间隔角度不变(12°)。在保证燃料燃烧指示功不变的前提下, 通过不断减小柴油喷射量、增加甲醇喷射量来提高甲醇替代率。

图11为全负荷工况下甲醇替代率对指示热效率的影响。由图可知, 在柴油预喷策略下, 甲醇替代率可以达到80.0%; 在柴油单次喷射策略下, 最高甲醇替代率可以高达96.0%, 指示热效率为33.75%。纯柴油运行工况的指示热效率为39.74%, 随着甲醇替代率的增加, 指示热效率呈现出先提高后降低的趋势。当甲醇替代率为50.0%时, 可实现最高指示热效率(41.55%)。当甲醇替代率从20.0%增加至50.0%时, 指示热效率提高。这是因为甲醇的加入提高了预混燃烧比例, 使燃烧状态提前, 燃烧持续期缩短, 从而提高了热效率。但是, 随着甲醇替代率的进一步增加, 甲醇的冷却效果加强, 使得缸内温度降低, 同时缸内燃料混合物的活性降低, 导致热效率下降。

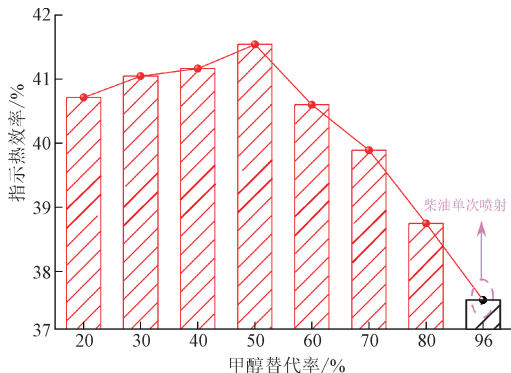


图11 外特性工况下甲醇替代率对指示热效率的影响

Fig. 11 Effect of methanol energy substitution ratio on the indicated thermal efficiency at the full engine load

3 结 论

(1)甲醇/柴油双直喷发动机的运行范围主要受限于粗暴燃烧边界,在发动机负荷率为79.5%、甲醇替代率为52.4%工况下,指示热效率可达到最高值43.4%。

(2)随着甲醇替代率的增加,着火延迟期增加,燃烧持续期缩短,燃烧状态提前。甲醇喷射量增加有利于降低 NO_x 和碳烟排放水平,但是HC和CO排放提高。

(3)在发动机外特性工况下,最大甲醇替代率可以达到96.0%。甲醇替代率96.0%的指示热效率为37.55%,低于纯柴油工况的指示热效率。

(4)随着甲醇替代率的增加,指示热效率先提高后降低。甲醇替代率为50.0%时,最高指示热效率可达41.55%。

参考文献:

- [1] 马宝东,姚安仁,姚春德,等. 基于国VI排放的柴油甲醇双燃料燃烧能量平衡研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(11): 3117-3121.
MA Baodong, YAO Anren, YAO Chunde, et al. Study on energy balance of diesel methanol dual fuel combustion based on China VI emission regulations [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(11): 3117-3121.
- [2] PAYKANI A, GARCIA A, SHAHBAKHTI M, et al. Reactivity controlled compression ignition engine: pathways towards commercial viability [J]. Applied Energy, 2021, 282(A): 116174.
- [3] 廉蓉,朱维娜,肖城,等. 甲醇柴油双燃料重型货车推广及价值研究[J]. 汽车实用技术, 2019(3): 10-12.
LIAN Rong, ZHU Weina, XIAO Cheng, et al. Research on promotion and value of DMCC heavy-duty trucks [J]. Automobile Applied Technology, 2019(3): 10-12.
- [4] YAO Chunde, PAN Wang, YAO Anren. Methanol fumigation in compression-ignition engines: a critical review of recent academic and technological developments [J]. Fuel, 2017, 209: 713-732.
- [5] 陈旨明,刘军恒,孙平,等. 柴油/甲醇双燃料发动机耦合后处理系统的排放性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(12): 12-22.
CHEN Zhiming, LIU Junheng, SUN Ping, et al. Experimental study on emission characteristics of diesel/

methanol dual-fuel engine coupled with an after-treatment system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(12): 12-22.

- [6] ELKELAWY M, EL SHENAWY E A, MOHAMED S A, et al. Impacts of EGR on RCCI engines management: a comprehensive review [J]. Energy Conversion and Management: X, 2022, 14: 100216.
- [7] LIU Haifeng, MA Guixiang, MA Naifeng, et al. Effects of charge concentration and reactivity stratification on combustion and emission characteristics of a PFI-DI dual injection engine under low load condition [J]. Fuel, 2018, 231: 26-36.
- [8] HUANG Guan, LI Zilong, ZHAO Wenbin, et al. Effects of fuel injection strategies on combustion and emissions of intelligent charge compression ignition (ICCI) mode fueled with methanol and biodiesel [J]. Fuel, 2020, 274: 117851.
- [9] ZHAO Wenbin, ZHANG Yaoyuan, HUANG Guan, et al. Experimental study of butanol/biodiesel dual-fuel combustion in intelligent charge compression ignition (ICCI) mode: a systematic analysis at low load [J]. Fuel, 2021, 287: 119523.
- [10] NING Le, DUAN Qimeng, CHEN Zhanming, et al. A comparative study on the combustion and emissions of a non-road common rail diesel engine fueled with primary alcohol fuels (methanol, ethanol, and n-butanol)/diesel dual fuel [J]. Fuel, 2020, 266: 117034.
- [11] CHEN Zhanming, WANG Long, ZHANG Qingang, et al. Effects of spark timing and methanol addition on combustion characteristics and emissions of dual-fuel engine fuelled with natural gas and methanol under lean-burn condition [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181: 519-527.
- [12] CHEN Zhifang, YAO Chunde, YAO Anren, et al. The impact of methanol injecting position on cylinder-to-cylinder variation in a diesel methanol dual fuel engine [J]. Fuel, 2017, 191: 150-163.
- [13] WU Taoyang, YAO Anren, YAO Chunde, et al. Effect of diesel late-injection on combustion and emissions characteristics of diesel/methanol dual fuel engine [J]. Fuel, 2018, 233: 317-327.
- [14] LI Gang, ZHANG Chunhua, LI Yangyang. Effects of diesel injection parameters on the rapid combustion and emissions of an HD common-rail diesel engine fueled with diesel-methanol dual-fuel [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 1214-1225.
- [15] MA Baodong, YAO Anren, YAO Chunde, et al. Experimental study on energy balance of different param-

- eters in diesel methanol dual fuel engine [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113954.
- [16] ZHANG Yaoyuan, MI Shijie, ZHAO Wenbin, et al. Experimental study on the application of bioethanol in dual-fuel intelligent charge compression ignition (ICCI) engine [J]. *Fuel*, 2021, 303: 121181.
- [17] WANG Yang, XIAO Ge, LI Bo, et al. Study on the performance of diesel-methanol diffusion combustion with dual-direct injection system on a high-speed light-duty engine [J]. *Fuel*, 2022, 317: 123414.
- [18] 黄粉莲, 杨群, 王正江, 等. 甲醇替代率对柴油/甲醇反应活性控制压燃发动机性能的影响 [J]. *内燃机工程*, 2022, 43(1): 48-57.
- HUANG Fenlian, YANG Qun, WANG Zhengjiang, et al. Effects of methanol substitution rate on performance of diesel-methanol reactivity controlled compression ignition engines [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2022, 43(1): 48-57.
- [19] DONG Yabin, KAARIO O, HASSAN G, et al. High-pressure direct injection of methanol and pilot diesel: a non-premixed dual-fuel engine concept [J]. *Fuel*, 2020, 277: 117932.
- [20] SACCULLO M, NYGREN A, BENHAM T, et al. Alcohol flexible HD single cylinder diesel engine tests with separate dual high pressure direct fuel injection [J]. *Fuel*, 2021, 294: 120478.
- [21] ZHU Jizhen, WANG Sixu, RAZA M, et al. Autoignition behavior of methanol/diesel mixtures: experiments and kinetic modeling [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 228: 1-12.
- [22] SACCULLO M, BENHAM T, DENBRATT I. Dual fuelmethanol and diesel direct injection HD single cylinder engine tests [C]//WCX World Congress Experience. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2018: 2018-01-0259.
- [23] WANG Quangang, WANG Bin, YAO Chunde, et al. Study on cyclic variability of dual fuel combustion in a methanol fumigated diesel engine [J]. *Fuel*, 2016, 164: 99-109.
- [24] PANDA K, RAMESH A. HCCI combustion of methanol along with diesel through novel injection strategies and its potential over conventional dual fuel combustion [J]. *Fuel*, 2022, 324(Part C): 124766.
- [25] JIA Zhiqin, DENBRATT I. Experimental investigation into the combustion characteristics of a methanol-diesel heavy duty engine operated in RCCI mode [J]. *Fuel*, 2018, 226: 745-753.
- [26] 王军, 金毅, 张幽彤. 高压共轨系统中的燃油温度变化及其影响 [J]. *内燃机工程*, 2018, 39(3): 16-22.
- WANG Jun, JIN Yi, ZHANG Youtong. Fuel temperature change and its effect on high pressure common rail system [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2018, 39(3): 16-22.
- [27] YIN Zenghui, YAO Chunde, GENG Peilin, et al. Visualization of combustion characteristic of diesel in premixed methanol-air mixture atmosphere of different ambient temperature in a constant volume chamber [J]. *Fuel*, 2016, 174: 242-250.

(编辑 亢列梅 杜秀杰)