

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.09.005

甲醇/柴油双燃料发动机燃烧与排放特性研究

申立忠, 赵静平, 黄粉莲, 万明定

(昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘要:文章在一台增压中冷高压共轨电控发动机上研究低、中负荷工况下替代率、喷油正时对双燃料发动机燃烧及排放特性的影响。研究表明:低负荷工况下,双燃料热效率低于纯柴油,不完全燃烧现象增多,碳氢化合物(THC)、一氧化碳(CO)、未燃甲醇和甲醛排放均随着替代率的上升而上升,随着喷油正时的提前,双燃料模式的热效率有所改善,THC、CO、未燃甲醇和甲醛排放降低,氮氧化物(NO_x)排放急剧上升;中负荷工况下,随着替代率的升高,由于过多的甲醇降低了缸内初始温度,使得缸内燃烧恶化,热效率先升高后降低,随着喷油正时的提前,THC、CO、未燃甲醇和甲醛的排放有所降低,但降低幅度小于低负荷工况,同时喷油正时的提前会导致 NO_x 排放急剧增加。

关键词:甲醇;柴油;反应活性控制压燃;喷油提前角;排放

中图分类号:TK422;TK421.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)09-1183-08

Combustion and emission characteristics of methanol/diesel dual-fuel engine

SHEN Lizhong, ZHAO Jingping, HUANG Fenlian, WAN Mingding

(Yunnan Province Key Laboratory of Internal Combustion Engines, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The investigation of the effects of the methanol substitution ratio and the pilot injection timing on the combustion and emission characteristics of methanol/diesel dual-fuel engine at low and medium load conditions were conducted on a modified turbocharged four-cylinder engine. The results show that at low load, the indicated thermal efficiency of dual-fuel mode is lower than that of pure diesel mode, the incomplete combustion increases, and the emissions of total hydrocarbons(THC), carbon monoxide(CO), unburned methanol and formaldehyde increase with the increase of the methanol substitution ratio. Advancing the pilot injection timing can improve the indicated thermal efficiency of the dual-fuel mode and reduce THC, CO, unburned methanol and formaldehyde emissions, but it will sharply increase nitrogen oxides(NO_x) emissions. At medium load, as the methanol substitution ratio increases, the indicated thermal efficiency first increases and then decreases for too much methanol lowers the initial temperature in the cylinder, which deteriorates the combustion. With the advancement of pilot injection timing, the emissions of THC, CO, unburned methanol and formaldehyde are reduced, but the reduction is less than that at low load. At the same time, NO_x emissions increase sharply.

Key words: methanol; diesel; reactivity controlled compression ignition(RCCI); injection advance angle; emissions

收稿日期:2022-09-21;修回日期:2024-02-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52066008);云南省科技计划资助项目(2016FD034)

作者简介:申立忠(1956—),男,云南昆明人,昆明理工大学教授,博士生导师;

黄粉莲(1986—),女,云南昆明人,博士,昆明理工大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:hfenlian@126.com.

近年来,随着环境污染与能源短缺问题日益严峻,探索清洁可再生代用燃料及高效、低污染的新型燃烧方式已成为内燃机界的研究热点^[1]。反应活性控制压燃(reactivity controlled compression ignition, RCCI)技术利用两种不同反应活性的燃料混合物实现高效低温燃烧,低活性、易挥发的燃料采用进气道喷射,高活性燃料在压缩上止点附近直接喷入燃烧室引燃缸内可燃混合气,通过调整两种燃料的喷射比例及喷射正时实现燃烧相位和放热率的有效控制,这已逐步被全球业界公认为一种高效、清洁的新型燃烧方式^[2-3]。RCCI 燃烧策略通过预混合、稀薄燃烧控制燃烧温度低于 2 000 K、油气当量比小于 2,使燃烧过程避开 NO_x 和碳烟的生成区域^[4]。

国内外学者针对 RCCI 的燃烧和排放性能开展了大量的研究工作。高反应活性燃料主要选用柴油;低反应活性燃料主要选用汽油、甲醇、天然气等^[5-7]。甲醇燃料来源广泛,具有含碳量低、含氧量高、辛烷值高、无排烟等特点,是最具潜力的清洁可再生替代燃料^[8-10]。研究表明:甲醇/柴油双燃料 RCCI 发动机能同时降低氮氧化物(NO_x)和碳烟排放,热效率高,负荷范围广,但存在未燃碳氢化合物(THC)、一氧化碳(CO)、未燃甲醇和甲醛的排放较高,低负荷工况下燃烧效率不高,高负荷工况下容易产生爆震现象等问题。文献[11]研究了双燃料发动机的燃料喷射策略对低负荷下经济性、THC 及 CO 排放的影响,结果表明:在低负荷下替代率增加和柴油喷油提前角较大时会降低缸内反应活性,THC 和 CO 排放显著增加;推迟预喷正时和降低预喷油量可以提高有效热效率、THC 及 CO 的排放;废气再循环(exhaust gas re-circulation, EGR)的加入可以延迟燃烧相位,改善 NO_x 和颗粒物(PM)的排放。文献[12]研究了预喷正时和预喷油量对燃烧和性能的影响,结果表明:较早的预喷正时能够提高发动机有效热效率,降低压升率,CO 和 THC 排放减少, NO_x 排放基本不变;较晚的预喷正时能够提高缸压,缩短滞燃期,THC 和 CO 排放降低, NO_x 排放升高;预喷油量的增加可以提高有效热效率,较小的预喷油量能降低缸压和压升率。文献[13]研究了不同喷油策略对双燃料发动机燃烧与排放的影响,结果表明:单次喷射方面,在一定范围的喷油正时内,合适的喷射压力可以提高发动机热效率和降低排放, NO_x 和未完全燃烧排放物之间呈 trade-off 关系,喷油正时的提前会提高燃烧速度,但过

早的喷射会导致燃料蒸汽的稀释,从而导致 THC、CO 排放的增加和燃烧波动;两次喷射方面,适当的喷射正时可以降低 THC 和 NO_x 排放,提升热效率,预喷油量的提升可以减少 THC 和 NO_x 排放。

甲醇 RCCI 发动机燃烧与排放特性研究表明,甲醇燃料喷射比例、柴油喷射策略、进气条件是甲醇/柴油 RCCI 发动机燃烧控制的关键参数。小负荷工况下高反应性燃料较少,不易着火,THC 排放较高。

总体而言,目前针对甲醇 RCCI 发动机中、低负荷工况的燃烧及排放特性的研究不多,且主要针对常规排放物,而关于未燃甲醇、甲醛等非常规排放物的研究较少。本文对某四缸高压共轨柴油机进气道进行改造,实现甲醇进气道喷射,并试验研究中、低负荷工况下不同甲醇替代率及柴油喷射正时对甲醇/柴油 RCCI 发动机燃烧及排放特性的影响规律。

1 试验设备与方案

试验采用一台四缸增压中冷电控高压共轨柴油机。试验前对发动机进行改造,在进气歧管处安装甲醇低压喷射系统,甲醇的喷油时刻和喷射脉宽由甲醇电控单元控制,喷油压力保持在 0.3 MPa,保证甲醇在进气冲程喷射,使其能在缸内形成均质混合气,然后由柴油引燃,实现 RCCI 燃烧。试验发动机台架如图 1 所示。发动机型号 D30,主要参数见表 1 所列。

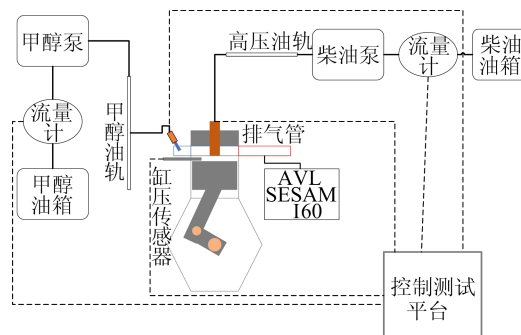


图 1 试验台架示意图

表 1 发动机参数

参数	数值	参数	数值
缸径/mm	95	功率/kW	115
行程/mm	105	扭矩/(N·m)	450
排量/L	2.977	最高转速/(r/min)	3 200
压缩比	16.6		

甲醇/柴油双燃料发动机在自然发生之前,缸内燃料主要分为柴油浓区、柴油/甲醇混合区和甲醇/空气混合区3个区域^[14]。试验过程中,发动机转速固定在2 200 r/min,在25%负荷下进行5%、10%、15%、20%替代率和4.4、8.4、12.4、16.4、20.4 °CA BTDC 喷油提前角对发动机燃烧与排放性能影响的试验;在50%负荷下进行5%、10%、15%、20%、30%替代率和7.0、9.0、11.0、13.0 °CA BTDC 喷油提前角对发动机燃烧与排放性能影响的试验。由于替代率和喷油正时的变化对燃烧特性的影响符合其变化趋势,为了方便图表展示,本文在燃烧特性部分只展示部分数据。

在双燃料模式下,甲醇根据热值换算成柴油计算总油耗,即

$$m_{\text{Dual}} = m_{\text{Diesel}} + \frac{h_m}{h_{\text{Diesel}}} m_m \quad (1)$$

其中: m_{Dual} 为双燃料总油量; m_{Diesel} 、 m_m 分别为柴油和甲醇总油量; h_{Diesel} 、 h_m 分别为柴油和甲醇的低热值。

甲醇替代率 S 为每循环喷入缸内的甲醇热值占循环供油量总热值的比例,即

$$S = \frac{h_m m_m}{h_m m_m + h_{\text{Diesel}} m_{\text{Diesel}}} \times 100\% \quad (2)$$

2 实验结果与分析

2.1 甲醇替代率对燃烧及排放性能的影响

2 200 r/min 转速、25%负荷、4.4 °CA BTDC 喷油提前角下不同替代率对燃烧特性的影响如图2所示。

由图2可知,缸内压力呈现双峰现象,随着甲醇替代率升高,缸压第1波峰略微升高,第2波峰降低且提前;双燃料模式下最大缸压和压升率均比纯柴油模式低。第1波峰升高的原因是随着甲醇替代率的增加,缸内进气行程喷射甲醇量增多,在压缩行程中燃料预放热增多;而低负荷下,循环喷射量较低,甲醇混合气含量较低,缸内当量比较小,不利于甲醇的火焰传播,导致最大缸压和压升率比纯柴油小。从图2c可以看出,最大放热率随着甲醇替代率升高而降低。这是由于低负荷条件下发动机功率小,燃油喷射量少,缸内过量空气系数较大,不利于甲醇的火焰传播,燃烧速度降低,峰值放热率降低;且甲醇喷射量小,缸内初始温度变化不大,对滞燃期的影响较小。

25%负荷下甲醇替代率对有效燃油消耗率的影响如图3所示。

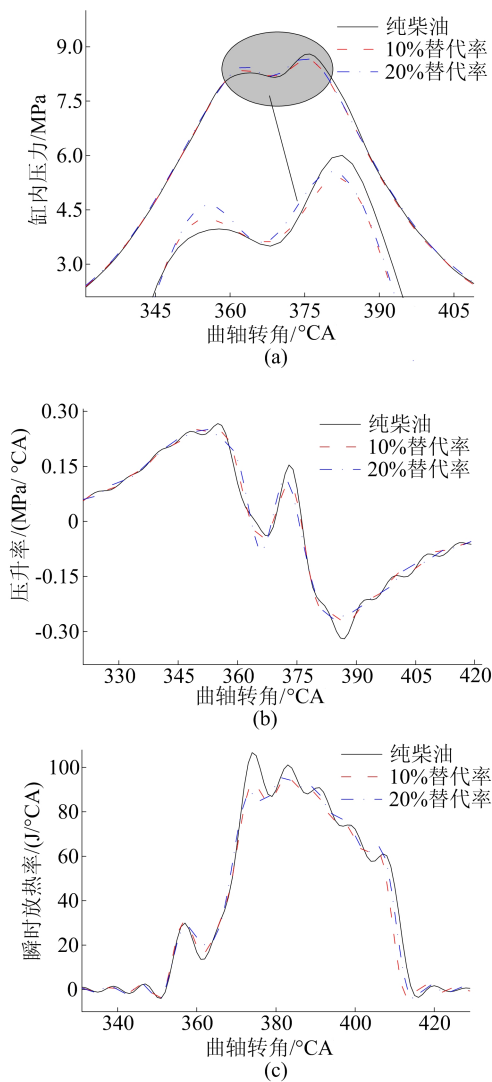


图2 25%负荷下甲醇替代率对燃烧特性的影响

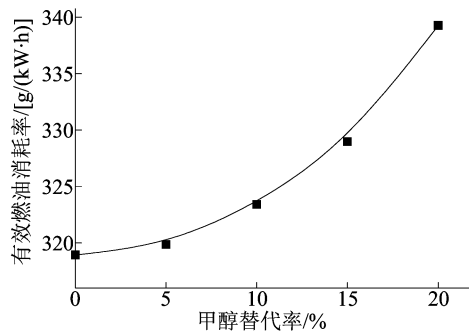


图3 25%负荷下甲醇替代率对有效燃油消耗率的影响

从图3可以看出,低负荷工况下,发动机有效燃油消耗率随着甲醇替代率的升高而增大。在低负荷工况下,燃油循环喷射量较低,引燃柴油量少,混合气较稀,燃烧持续期延长,燃料不完全燃烧加剧,导致低负荷下双燃料模式的有效燃油消耗率升高。

25%负荷下甲醇替代率对排放特性的影响如图4所示。

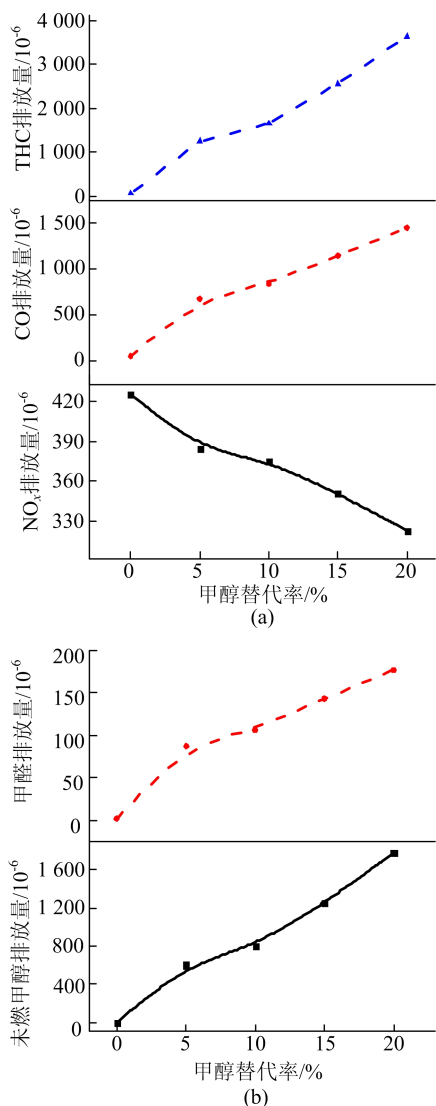


图 4 25%负荷下甲醇替代率对排放特性的影响

图 4a 为 25% 负荷下甲醇替代率对 NO_x 、THC 和 CO 排放特性的影响。从图 4a 可以看出,随着甲醇替代率升高,THC、CO 排放升高, NO_x 排放降低。低负荷下醇油喷射量少,缸内过量空气系数较大,可燃混合气较稀,且因甲醇的汽化潜热大,双燃料模式下甲醇的加入会导致进气温度下降,从而使柴油的着火时刻推迟,且甲醇氛围对柴油自燃起抑制作用,降低低温放热的强度,缸内燃烧温度降低,不完全燃烧加剧,导致 THC 和 CO 排放升高, NO_x 排放降低。

图 4b 为 25% 负荷下甲醇替代率对未燃甲醇和甲醛排放特性的影响。从图 4b 可以看出,随着甲醇替代率升高,未燃甲醇和甲醛的排放升高。造成未燃甲醇排放增加的原因有:增压中冷发动机的扫气过程使部分甲醇混合气在扫气过程中被排出缸外;在小负荷下甲醇与空气的预混合气过

稀,不利于甲醇燃烧的火焰传播,在气缸壁附近燃料燃烧不完全以及缸内狭隙、润滑油等对未燃甲醇的排放也有较大影响。甲醛是甲醇燃烧的中间产物,甲醇与活性基脱氢后生成 CHOH 和 CH_2O ,与氧气反应生成甲醛^[15],在低负荷下发动机壁面温度较低,淬熄层较厚,甲醇无法完全燃烧,以上原因均导致小负荷工况下双燃料发动机甲醛排放较高。

50% 负荷下甲醇替代率对燃烧特性的影响如图 5 所示。

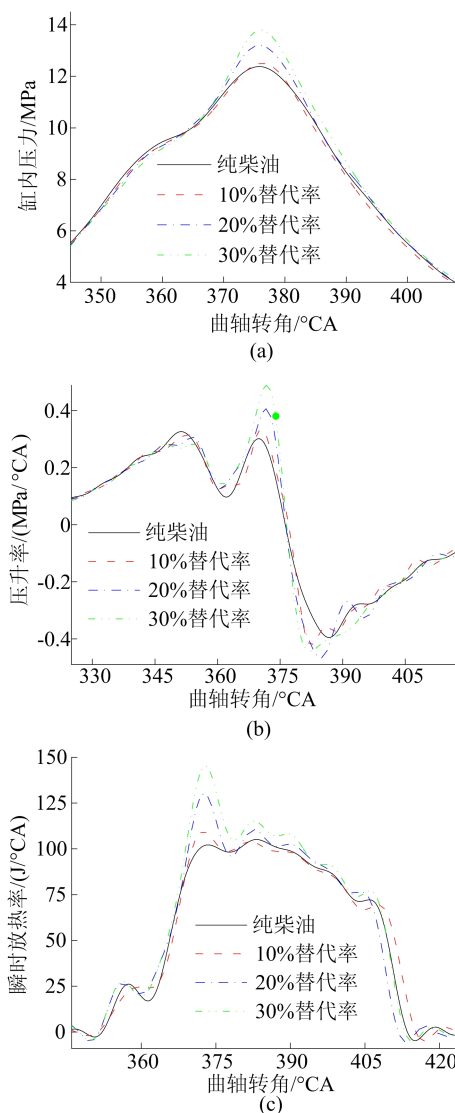


图 5 50%负荷下甲醇替代率对燃烧特性的影响

从图 5 可以看出,随着替代率的升高,缸内燃烧压力、压力升高率和放热率均上升,最大缸压、压升率和放热率对应的曲轴转角后移。在中等负荷工况下,发动机柴油喷射量增多,缸内混合气的含量增加,大量均匀可燃混合气同时燃烧放热,使

得缸压、放热率和压升率均提高。随着甲醇替代率的升高,缸内甲醇空气混合气含量增加,燃烧速度加快,导致缸压、放热率及压升率均比纯柴油模式高,此外,由于甲醇的汽化潜热值高,甲醇喷入后会降低缸内初始温度,且甲醇的十六烷值较低,致使燃烧滞燃期变长,燃烧相位延后。

50%负荷下甲醇替代率对有效燃油消耗率的影响如图6所示。

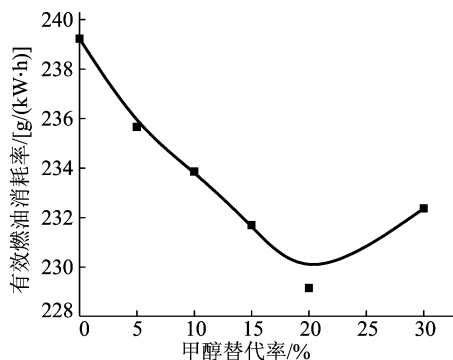


图6 50%负荷下甲醇替代率对有效燃油消耗率的影响

从图6可以看出,随着甲醇替代率的增加,有效燃油消耗率先降低再升高。随着甲醇喷射量增加,混合气质量改善,燃烧速度加快,燃烧更接近于等容燃烧,燃烧热效率升高,有效燃油消耗率降低。而甲醇替代率超过20%之后,过多的甲醇喷射量导致缸内初始温度大幅降低,滞燃期延长,燃烧持续期延长,后燃严重,燃料不完全燃烧加剧,燃油消耗率增加。在发动机中负荷下,甲醇替代率不宜过大,最大甲醇替代率受燃烧稳定性的限制。

50%负荷下甲醇替代率对排放特性的影响如图7所示。

从图7可以看出,随着甲醇替代率的升高,发动机总THC、CO、未燃甲醇和甲醛排放均有明显升高,NO_x先降低后略微升高。由于甲醇的加入抑制了燃烧温度的升高,加剧了不完全燃烧,导致THC、CO、未燃甲醇和甲醛排放的升高。NO_x排放的降低同样是由于燃烧温度的降低,避开了NO_x的生成区,而随着替代率的升高,甲醇喷射量增加,高汽化潜热值导致缸内初始温度过低,燃烧持续期延长,缸内喷油量增加,燃烧温度增加,从而导致NO_x生成增多。此外,50%负荷工况的THC、CO排放远低于25%负荷工况,这是由于中负荷下循环油量较多,甲醇喷射量提高,甲醇-空气含量较高,且缸内当量比升高,减少了甲醇不

完全燃烧的现象。

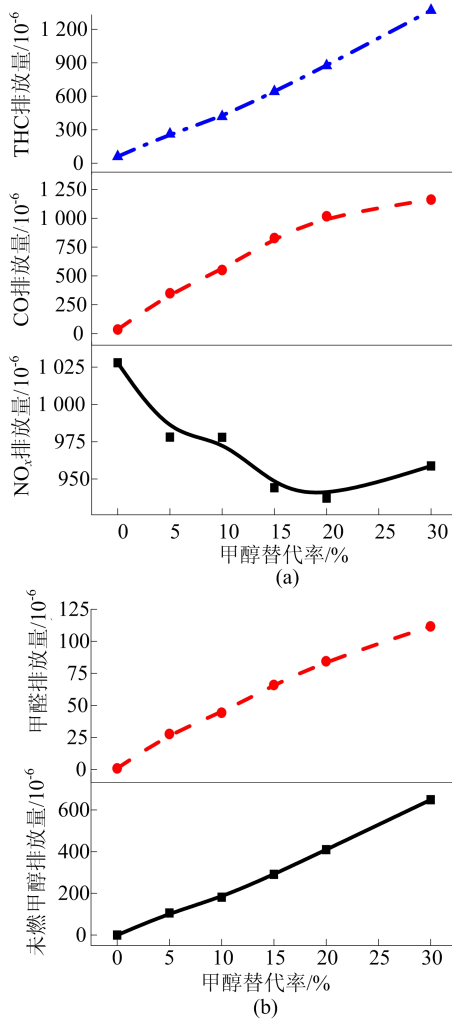


图7 50%负荷下甲醇替代率对排放特性的影响

2.2 不同喷油正时对燃烧和排放的影响

2200 r/min 转速、25%负荷、10%甲醇替代率下不同喷油正时对燃烧特性的影响如图8所示。

由图8可知,随着喷油正时的提前,缸压曲线变为单峰,最大缸压和压升率升高,且峰值提前。单峰是因为随着喷油正时的提前,滞燃期增长,缸内柴油与空气混合得更均匀,预混合燃烧比例增加,燃烧更加集中。缸压和压升率升高是由于滞燃期增长,缸内燃油混合更均匀,柴油自燃点增多,有利于甲醇空气混合气的火焰传播,使燃烧初期有更多燃料参与燃烧,导致缸压、压升率升高。

图8c所示为不同喷油正时下放热率的对比,可以看出,随着喷油正时的提前,双燃料着火点对应的曲轴转角提前,放热率主峰提前。在选用12.4 °CA BTDC作为喷油提前角时,最大放热率在曲轴转角364 °CA时达到79.8 J/°CA。喷油

正时的提前延长了燃料在缸内与空气的混合时间和预热时间,提升了缸内温度,达到自燃点对应的曲轴转角更早,燃烧速度更快,放热率主峰提前,最大放热率提高,但由于小负荷下循环油量较小,缸内燃油含量较小,因此喷油提前角 4.4、8.4 °CA BTDC 时,最大放热变化较小。

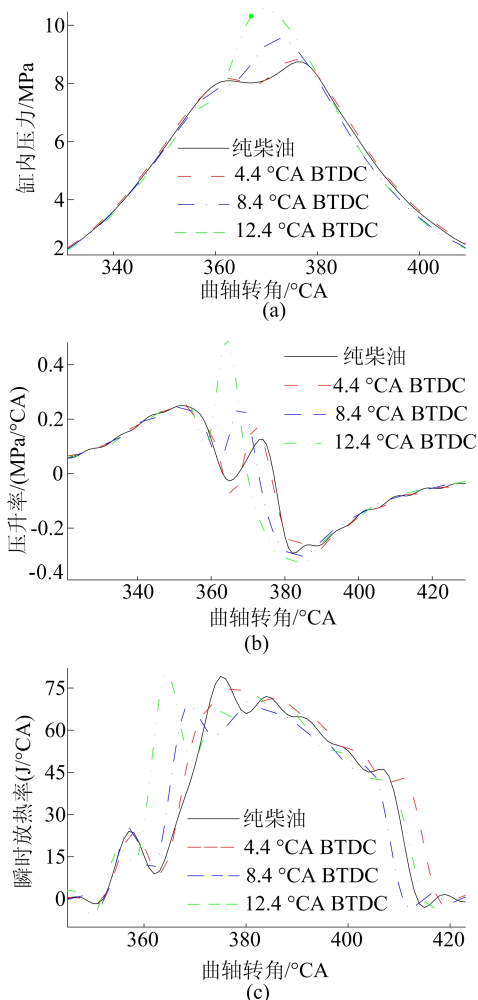


图 8 25% 负荷下不同喷油正时对燃烧特性的影响

4.4、8.4、12.4、16.4、20.4 °CA BTDC 喷油正时下有效燃油消耗率的对比如图 9 所示。

由图 9 可知,通过喷油正时的提前有效燃油消耗率先降低后增加,且通过提前喷油正时,可以在一定程度上改善双燃料模式燃烧,使得有效燃油消耗率低于纯柴油模式。这是由于喷油正时的提前使得柴油空气混合得更均匀,预混燃烧比例增加,缸内柴油自燃点增多,加快了甲醇混合气火焰传播的速度,缩短了燃烧持续期,燃烧更趋向于等容燃烧,并且由于缸内燃料分布更均匀,减少了缸内低温区域,减少了甲醇的不完全燃烧,提高了双燃料发动机的热效率。而喷油正时提前过多会导致燃烧始点过于提前,不在最佳的做功点,使得

发动机热效率降低。

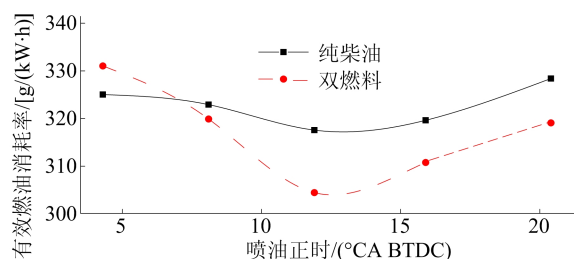


图 9 25% 负荷下不同喷油正时对有效燃油消耗率的影响

低负荷下 4.4、8.4、12.4、16.4、20.4 °CA BTDC 喷油正时下的排放数据如图 10 所示。

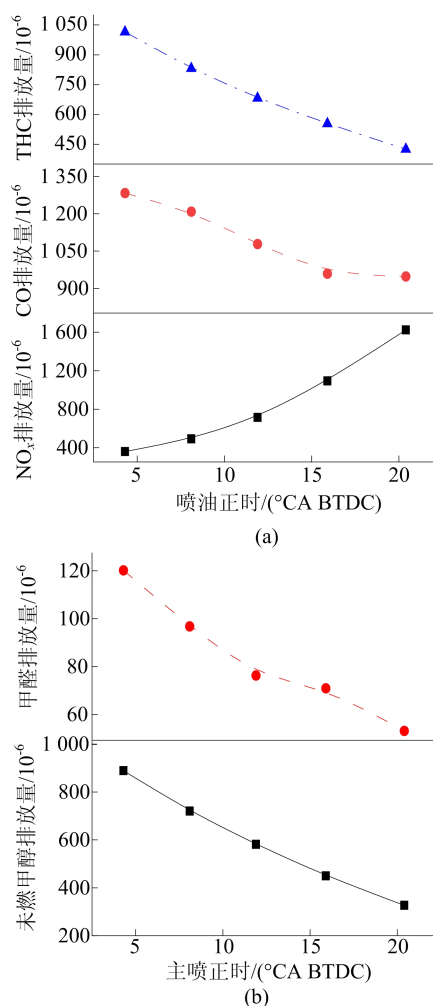


图 10 25% 负荷下不同喷油正时对排放特性的影响

从图 10 可以看出,随着喷油正时的提前,THC、CO、未燃甲醇和甲醛排放均有明显的降低,但 NO_x 排放上升了约有 3 倍。这是由于喷油正时提前,缸内柴油混合得更均匀,有利于甲醇的火焰传播和柴油的扩散燃烧,减少了不完全燃烧,导致 THC、CO 等排放降低,但由于燃料混合得

更均匀,燃料燃烧更充分,燃烧温度升高,缸内温度达到了NO_x的主要生成区,NO_x排放升高。

双燃料发动机 50%负荷、20%替代率下 7.0、9.0、11.0、13.0 °CA BTDC 喷油提前角对应的有效燃油消耗率如图 11 所示。

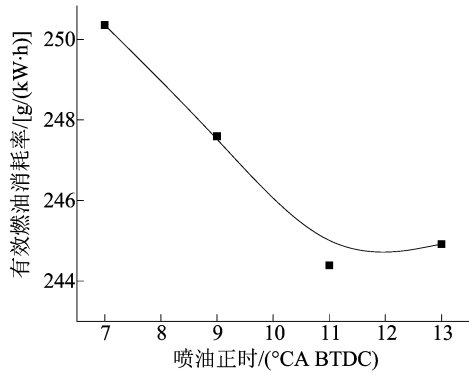


图 11 50%负荷下不同喷油正时对有效燃油消耗率的影响

由图 11 可知,有效燃油消耗率随着喷油正时的提前先降低后增加,这是由于更好的燃料混合程度使燃烧更加集中,而随着喷油正时提前过多,导致燃烧始点过于提前,不在最佳的做功点,使得发动机热效率降低,双燃料发动机在 11.0~12.0 °CA BTDC 范围内有效燃油消耗率最低。

中负荷工况下,20%替代率下不同喷油正时的燃烧数据如图 12 所示。

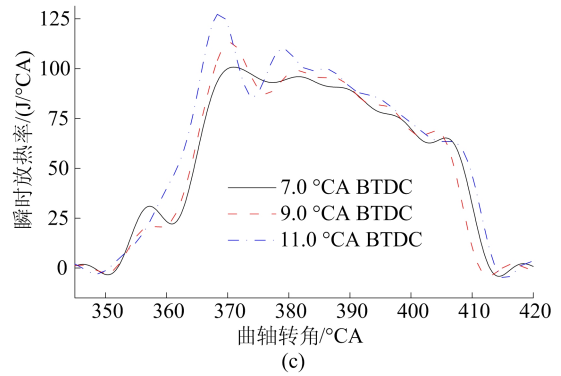
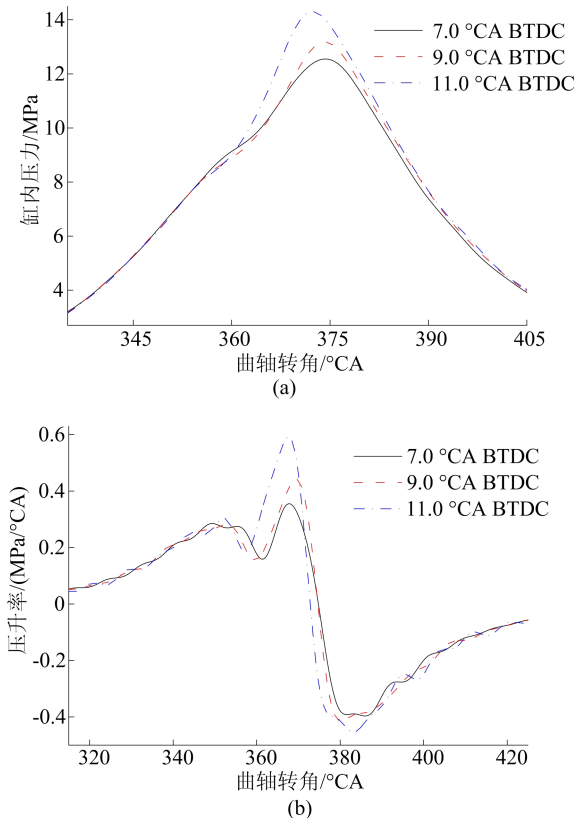


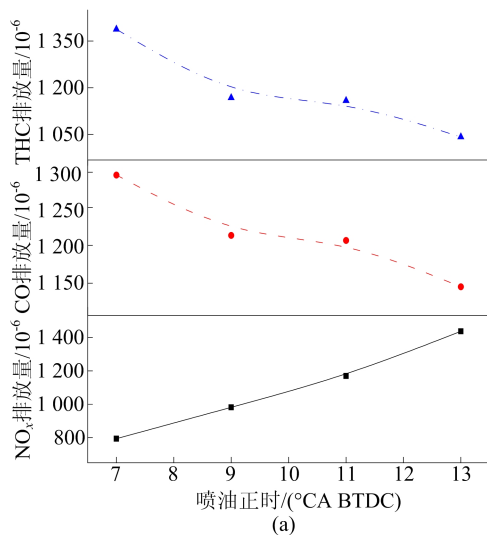
图 12 50%负荷下不同喷油正时对燃烧特性的影响

从图 12 可以看出,最大缸压、压升率和放热率明显增加,放热率主峰提前且呈双峰现象。缸压和压升率上升主要是由于喷油正时提前,滞燃期延长,缸内燃油混合更均匀,柴油自燃点增多,有利于甲醇空气混合气的火焰传播,使得燃烧初期有更多燃料参与燃烧,使缸压、压升率升高;放热率的增加主要是由于中、高负荷下循环喷射量较高滞燃期的延长使柴油空气混合气更均匀,降低了局部当量比,使燃烧速度加快,放热率升高;而较长的滞燃期使预混燃烧增多,形成第 1 个峰值,第 2 个峰值主要是由柴油的扩散燃烧和甲醇的火焰传播形成。

中负荷工况、20%替代率下不同喷油正时下排放数据如图 13 所示。

从图 13 可以看出,THC、CO、未燃甲醇和甲醛排放均有所下降。NO_x排放急剧上升的原因与低负荷相似。

从图 13 还可以看出,提前喷油正时,中负荷下的 THC、CO、未燃甲醇排放相较于低负荷下降幅度较小。



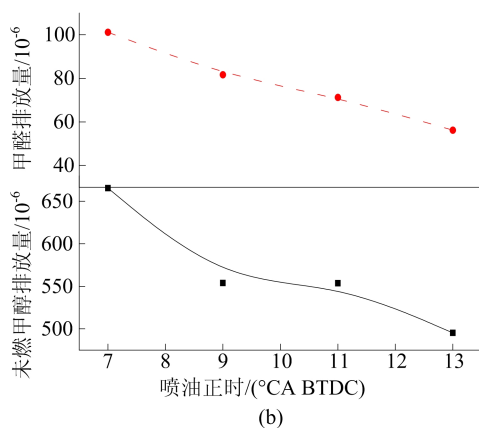


图 13 50%负荷下不同喷油正时对排放特性的影响

低负荷下,THC 等排放高主要是由缸内甲醇混合气含量过低造成的,改变喷油正时能改善柴油与空气的混合,改善整个燃烧过程;而在中负荷下,THC、CO、未燃甲醇等排放物主要是由于甲醇的狭隙效应、淬熄层等导致 THC 等排放较高,因此改变柴油喷油正时对 THC、CO 等排放影响较小。

3 结 论

1) 低负荷工况下双燃料模式燃烧,随着替代率的增加,最大缸压、压升率和放热率降低,有效燃油消耗率增加,未燃甲醇、甲醛等不完全燃烧排放物升高, NO_x 降低。提前喷油正时可以使双燃料模式热效率高于纯柴油模式,但 NO_x 会随着喷油正时的提前急剧增加。考虑到低负荷下燃烧稳定性和失火等问题以及替代率对经济性和排放特性的影响,低负荷下应采用纯柴油模式。

2) 中负荷工况下双燃料模式燃烧,随着替代率的升高,有效燃油消耗率先降低再升高,最大缸压、压升率和放热率升高,未燃甲醇、甲醛等不完全燃烧排放物升高, NO_x 降低。随着喷油正时的提前,最大缸压、压升率和放热率升高,有效燃油消耗率先降低后增加,不完全燃烧排放物降低, NO_x 升高。考虑到经济性和排放特性,在中负荷下应该选用较低的替代率和喷油正时。

3) 中高负荷工况下,THC、CO、未燃甲醇和甲醛等排放主要是由淬熄效应、狭隙效应等因素导致甲醇不完全燃烧,调节喷油正时只能有限度地降低其排放,同时会导致 NO_x 排放的增加。因此,在中高负荷工况下,选用较低的喷油正时,有

利于发动机的燃烧稳定和排放。

[参 考 文 献]

- [1] 朱剑明,彭代勇. 世界能源现状与内燃机的发展机遇[J]. 内燃机工程,2011,32(2):80-84.
- [2] LI J, YANG W M, ZHOU D Z. Review on the management of RCCI engine[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,69:65-79.
- [3] REITZ R D, DURAISAMY G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2015,46:12-71.
- [4] 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(1):625-631.
- [5] LI Y P, JIA M, CHANG Y C, et al. Parametric study and optimization of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine fueled with methanol and diesel[J]. Energy,2014,65:319-332.
- [6] 李旭聪,康志强,高定伟. 汽/柴油双燃料发动机燃烧过程的影响因素[J]. 内燃机学报,2015,33(3):217-223.
- [7] 李伟峰,刘忠长,王忠恕. 引燃柴油量和当量比对双燃料发动机低负荷燃烧的影响[J]. 内燃机学报,2015,33(6):481-490.
- [8] ELIK M B, ZDALYAN B, ALKAN F. The use of pure methanol as fuel at high compression ratio in a single cylinder gasoline engine[J]. Fuel,2011,90(4):1591-1598.
- [9] 苗韧,赵岑,吴頔,等. 中国车用甲醇发展评述[J]. 中国能源,2012,34(9):20-36.
- [10] 王全刚,姚春德,余海涛,等. 柴油甲醇双燃料燃烧运行边界研究[J]. 工程热物理学报,2014,35(9):1879-1883.
- [11] PARK H SHIM E, BAE C. Injection strategy in natural gas-diesel dualfuel premixed charge compression ignition combustion under low load conditions[J]. Engineering,2019,5(3):421-441.
- [12] 赵国锋,贾崎,姚崇. 预喷策略对双燃料发动机燃烧和排放特性的影响[J]. 内燃机学报,2020,38(1):19-26.
- [13] ISHIYAMA T, KANG J, YUTAKA O, et al. Improvement of performance and reduction of exhaust emissions by pilotfuelinjection control in a leanburning naturalgas dualfuel engine; SAE Paper 2011-01-1963 [R]. [S. l.]: SAE,2011.
- [14] 姚春德. 柴油/甲醇二元燃料燃烧理论与实践[M]. 天津:天津大学出版社,2015.
- [15] 姚春德,彭红梅,刘义亭,等. 柴油/甲醇组合燃烧尾气中甲醛排放特性研究[J]. 内燃机学报,2008,26(3):233-237.

(责任编辑 胡亚敏)