

DOI: 10.7652/xjtuxb201303009

二甲醚预混比对预混压燃发动机性能影响的试验研究

李东昌, 汪映, 孟庆斌, 肖凡, 赵玉伟

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在一台由 2105 柴油机改装成的预混压燃(PCCI)发动机上研究了二甲醚(DME)预混比对燃烧、排放特性以及燃油经济性的影响。结果表明,随着 DME 预混比的增大,PCCI 发动机燃烧始点前移,缸内最高燃烧温度和最大爆发压力均逐渐增大,压力升高率曲线由 2 个波峰发展成 3 个波峰,最大压力升高率随着 DME 预混比的增加先增大后减小再增大,放热过程由 2 个阶段发展到 3 个阶段,放热率曲线整体前移,累积放热率逐渐增大且迅速升高的位置前移,整个燃烧持续期逐渐缩短, NO_x 和碳烟排放量降低,当量燃油消耗率逐渐下降,有效热效率逐渐升高。

关键词: 二甲醚预混比;燃烧特性;排放特性;燃油经济性

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)03-0048-05

Experimental Study on Effects of DME Premixed Ratio on Performance of a PCCI Engine

LI Dongchang, WANG Ying, MENG Qingbin, XIAO Fan, ZHAO Yuwei

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

Abstract: The experimental investigation on the effects of DME premixed ratio on the combustion characteristics, emissions characteristics and fuel economy was conducted in a PCCI engine modified from a 2105 diesel engine. The results showed that the igniting timing advanced, and the maximum cylinder temperature and pressure increased with an increase in the DME premixed ratio. The rate of the pressure rise developed from two peaks to three peaks, and the maximum rate of the pressure rise increased first and then decreased and increased again with an increase in the DME premixed ratio. The heat release process changed from two-stage heat release to three-stage heat release, and the overall heat release rate curve moved forward with an increase in the DME premixed ratio. The cumulative heat release rate increased gradually; the position of the rise also advanced; the combustion duration shortened; the NO_x and smoke emissions decreased. The equivalent fuel-consumption rate b_{eq} gradually decreased, and the effective thermal efficiency gradually increased.

Keywords: DME premixed ratio; combustion characteristic; emission characteristic; fuel economy

均质压燃(HCCI)结合了传统柴油机和汽油机的优点,能够实现高效、低排放燃烧,由此引起了国

内外内燃机界的广泛关注,被认为是最具发展前景的下一代燃烧技术。然而,发动机采用 HCCI 仍然存在一些未能克服的困难,如着火时刻和燃烧过程难以控制,工作范围难以拓宽,瞬态响应、冷启动及 HC 和 CO 高排放等问题^[1-5] 还未解决。

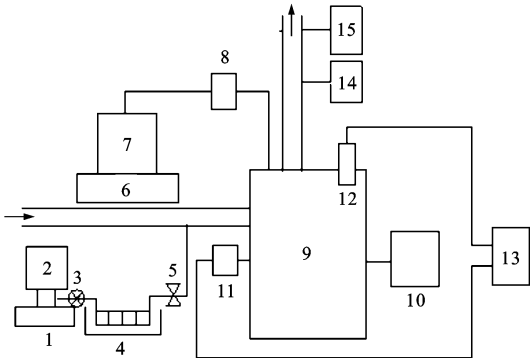
预混压燃(PCCI)燃烧是 HCCI 燃烧的一种方式,具有部分 HCCI 燃烧的优点,是当前实现压燃式发动机低污染、高效能燃烧的有效方式。为进一步探究 PCCI 发动机的性能,本文 PCCI 燃烧采用了进气道预混二甲醚(DME)、缸内直喷柴油的复合方式,并由此开展了 DME 预混比对 PCCI 发动机燃烧、排放特性以及燃油经济性影响的试验研究。

1 PCCI 发动机试验

试验用原机为 YTR2105 型 4 冲程、自然吸气直喷式柴油机,主要性能参数见表 1。实验中将原机改装为进气道喷射 DME 和缸内直喷柴油的 PC-CI 发动机。PCCI 发动机试验台架如图 1 所示。

表 1 发动机的主要技术参数

气缸数	2
缸径/mm	105
行程/mm	120
排量/L	2.078
吸气方式	自然吸气
压缩比	17
供油提前角/(°)	10
额定功率/kW	25.9
额定转速/r·min ⁻¹	2 300



1:小电子称;2:二甲醚罐;3:单向阀;4:加热器;5:流量调节阀;
6:大电子称;7:柴油油箱;8:电子输油泵;9:发动机;
10:测功机;11:角标传感器;12:缸压传感器;
13:数据采集仪;14:烟度计;15:NO_x 分析仪

图 1 PCCI 发动机试验台架

试验中采用 Kistler 7061 型水冷式压电晶体传感器测量缸压信号,采用 Kistler 2613B 型角标传感器测量上止点信号,采用 DL750 型数据采集仪收集来自缸压传感器和角标传感器的数据信号。

用预混比 r 表示从进气道引入的 DME 量与相同时刻发动机总燃料消耗量的关系,即

$$r = \frac{m_{\text{DME}} H_{\text{DME}}}{m_{\text{DME}} H_{\text{DME}} + m_{\text{diesel}} H_{\text{diesel}}} \times 100\%$$

式中: m_{DME} 为 DME 的质量流量,kg/h; m_{diesel} 为柴油的质量流量,kg/h; H_{DME} 为 DME 的低热值; H_{diesel} 为柴油的低热值。

本试验研究了在 $n=1\,700\text{ r/min}$ 、 $T_{\text{iq}}=40\text{ N}\cdot\text{m}$ 工况下 DME 预混比 r 对 PCCI 发动机燃烧、排放特性以及燃油经济性的影响。以往的研究表明,采用过大的 r 会导致发动机爆燃,因此试验中 r 分别取 0、14%、25%、30% 和 40%。

2 试验结果及分析

2.1 r 对 PCCI 发动机燃烧特性的影响

图 2~图 6 分别为试验工况下 PCCI 发动机缸内温度、压力、压力升高率、放热率和累积放热率随 r 的变化。

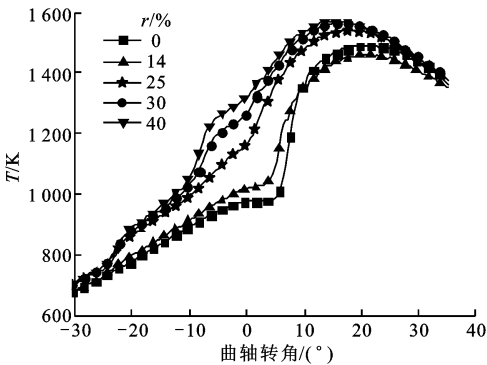
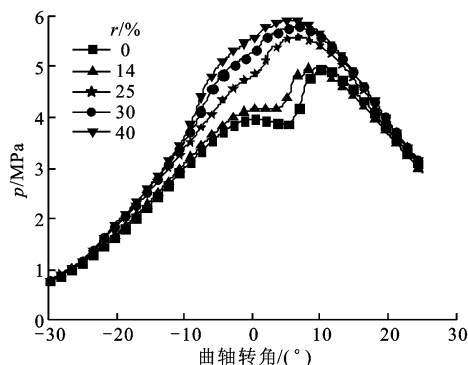


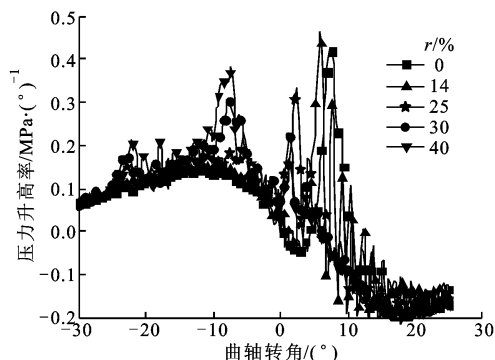
图 2 缸内温度随 r 的变化

从图 2、图 3 可以看出,与传统的直喷压燃式发动机相比,PCCI 发动机缸内的最高燃烧温度更高,最大爆发压力更大,且二者出现时间均提前。这是因为 DME 的十六烷值较高,DME 和空气混合形成均质预混气进入气缸,并在主喷射之前发生了 HC-CI 燃烧,所以发动机缸内温度和压力升高,主喷燃料的滞燃期缩短,燃烧始点前移^[6]。

从图 2、图 3 还可以看出,随着 r 的增大,PCCI 发动机缸内温度和压力急剧上升的始点前移,温度和压力曲线逐渐陡峭,最高燃烧温度逐渐提升,最大爆发压力逐渐增大。这是因为随着 r 的增大,DME

图3 缸内压力随 r 的变化

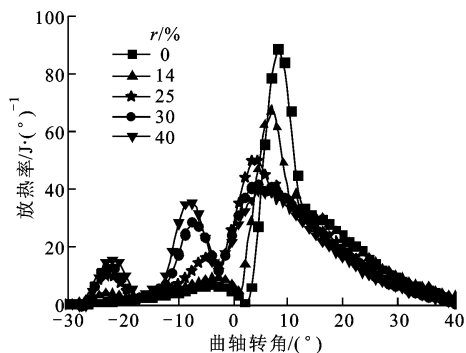
预混燃料量增加,燃料的体积分数(浓度)提高,高温HCCI燃烧加速,放出的热量更多的缘故。

图4 压力升高率随 r 的变化

从图4可以看出,当 r 在较小范围时,PCCI发动机缸内的压力升高率具有2个波峰,分别由DME预混燃料HCCI燃烧和主喷燃料扩散燃烧引起的。第1个波峰峰值很小,随着 r 的增大,该峰值的大小和波峰出现的时间变化不大;第2个波峰峰值很大,随着 r 的增大,波峰出现的时间提前,整个燃烧持续期缩短。当 r 在较大范围时,PCCI发动机缸内的压力升高率具有3个波峰,分别由DME预混燃料低温HCCI燃烧、高温HCCI燃烧和柴油燃料扩散燃烧引起的。在此范围,第1个波峰的峰值随着 r 的增大略有增加,但波峰出现的时间变化不大;第2个波峰峰值随着 r 的增加而增大,增幅随之增大;第3个波峰的峰值随 r 的增大而减小,减幅随之增大,波峰出现的时间随之提前,整个燃烧持续期缩短。

从图4还可以看出,PCCI发动机缸内的最大压力升高率随 r 的增大先增大后减小再增大:先增大是因为,DME预混燃料在压缩行程中发生了低温HCCI燃烧,发动机缸内温度和压力升高,主喷燃料滞燃期缩短,主喷燃料被喷入气缸后遇到温度较高

的燃气迅速着火并形成了多个火焰中心,从而导致压力升高率峰值增大;后减小是因为,此时负荷和转速不变,缸内温度随着 r 的增加而进一步升高,虽然在一定程度上加速了主喷燃料的燃烧,但是主喷燃料量减少,使得扩散燃烧的放热量大幅减少,从而导致压力升高率峰值减小;再增大是因为,随着 r 的进一步增大,发生高温HCCI燃烧的DME预混燃料量很大并占据主导,使得缸内温度和压力迅速升高,从而导致压力升高率再度增大。

图5 放热率随 r 的变化

从图5可以看出,PCCI发动机燃烧的放热率曲线出现了两阶段或三阶段放热。当 $r=0$,即完全缸内直喷时,燃烧由柴油燃料的预混燃烧和扩散燃烧构成;当 r 在较小范围时,PCCI燃烧出现了预混燃料的低温HCCI燃烧放热阶段,此时DME预混燃料的浓度低,高温HCCI燃烧放热不明显,所以整个燃烧过程呈现出三阶段放热;当 r 在较大范围时,PCCI燃烧出现了DME预混燃料低温燃烧和高温HCCI燃烧的两阶段放热,此时DME预混燃料发生较为剧烈的高温HCCI燃烧,发动机缸内温度很高,而主喷燃料仅有扩散燃烧放热,所以整个燃烧过程也呈现出三阶段放热。此后,随着 r 的继续增大,整个燃烧过程均呈现出三阶段放热。

从图5还可以看出,随着 r 的增大,PCCI发动机放热率曲线的峰值有较大变化。当 r 增大时,DME预混燃料低温和高温HCCI燃烧放热率峰值逐渐增大,主喷燃料扩散燃烧放热率峰值逐渐下降。这是因为:随着 r 的增大,发生低温和高温HCCI燃烧的DME预混燃料的浓度和质量不断增大,燃烧放热量不断增加,所以发动机低温和高温HCCI燃烧放热率峰值逐渐增大;随着 r 的继续增大,主喷燃料量减少,燃烧放热量减少,所以发动机扩散燃烧放热率峰值逐渐下降。

此外,随着 r 的增大,PCCI 发动机的放热率曲线整体前移。当 r 增大时,DME 预混燃料低温 HC-CI 燃烧阶段出现的时间未发生明显变化,但主喷燃料扩散燃烧放热出现的时间提前,整个燃烧持续期逐渐缩短。这是因为:DME 预混燃料低温 HCCI 燃烧着火时刻主要受温度的影响(反应开始的温度大约在 $700 \sim 750 \text{ K}$)^[7],而该阶段缸内温度升高主要由活塞压缩混合气引起,所以着火时刻与 r 的关系并不大;随着 r 的增大,发生 HCCI 燃烧的预混燃料量不断增多,缸内温度不断升高,主喷燃料滞燃期逐渐缩短,燃烧迅速,所以燃烧放热位置随之前移。

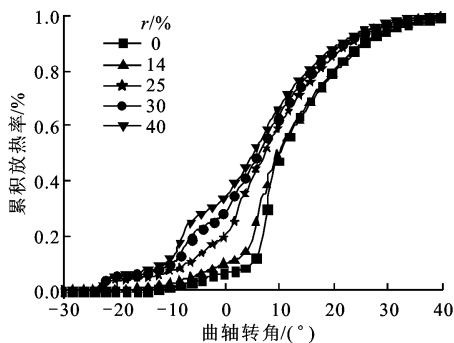


图6 累积放热率随 r 的变化

从图6可以看出,随着 r 的增大,PCCI 发动机累积放热率逐渐增大且迅速升高的始点逐渐前移,整个燃烧持续期逐渐缩短。这是因为,随着 r 的增大,发生 HCCI 燃烧的 DME 预混燃料量增多,发动机缸内压力和温度不断升高,主喷燃料滞燃期缩短,所以燃烧始点前移,燃烧更快、更充分。

从图6还可以看出,各累积放热率曲线均存在着一段极其缓慢的变化过程。这是因为,PCCI 发动机在燃烧前期发生了 DME 预混气的 HCCI 燃烧,当低温放热过程结束后,受负温度反应系数的影响,系统内温度虽然上升,但整个系统反应速率下降,所以累积放热率增加极其缓慢^[8]。

2.2 r 对 PCCI 发动机排放特性的影响

图7和图8为试验工况下 PCCI 发动机的 NO_x 和碳烟排放随 r 的变化。

从图7可以看出,在试验工况下,PCCI 发动机的 NO_x 排放随着 r 的增大而降低。这是因为,浓度较低的 DME 预混气在发生低温 HCCI 燃烧后,缸内温度小幅升高,所以主喷燃料的滞燃期缩短。另外,DME 预混气 HCCI 燃烧的废气受到了内部废气再循环的作用,从而抑制了 NO_x 的生成。在转速和

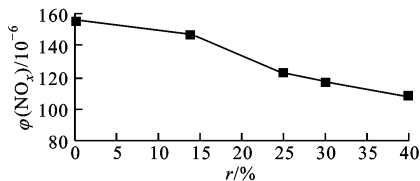


图7 NO_x 排放随 r 的变化

负荷不变时,主喷燃料量随着 r 的增大而减少,这有利于改善燃料与空气混合的均匀性,减少局部富氧和高温的现象,因为 DME 预混气挤占了空气的进气容积,从而抑制了主喷燃料燃烧时 NO_x 的生成。

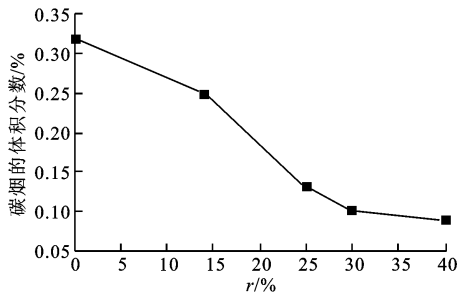


图8 碳烟排放随 r 的变化

从图8可以看出,PCCI 发动机的碳烟排放随着 r 的增大而降低。这是因为,随着 r 的增大,发生 HCCI 燃烧的 DME 预混气增多,发动机缸内压力和温度不断升高,主喷燃料的滞燃期缩短,燃烧速度加快,整个燃烧持续期逐渐缩短,从而抑制了主喷燃料燃烧时碳烟的生成。另外,DME 是富氧燃料,分子结构中不含 C—C 键,可以实现无烟燃烧,在转速和负荷不变时,随着 r 的增大,发动机主喷燃料量减少,因此碳烟排放相应降低。主喷燃料量的降低有利于改善其与空气混合的均匀性,减少局部缺氧和高温现象,这也是碳烟排放降低的原因。

2.3 r 对 PCCI 发动机燃油经济性的影响

当量燃油消耗率和有效热效率是表征发动机燃油经济性的2个重要参数。本文试验中,由于柴油和 DME 的低热值相差较大,直接采用燃油消耗率对比意义不大,所以本文引入了当量燃油消耗率 b ,即将 r 分别为 0、14%、25%、30%、40% 时柴油和 DME 燃料的燃油消耗率转换为与柴油等热值的当量燃油消耗率。

当量油耗率

$$b = \frac{b_{\text{DME},r} H_{\text{DME}} + b_{\text{diesel},r} H_{\text{diesel}}}{H_{\text{diesel}}}$$

式中: $b_{\text{DME},r}$ 为 r 时DME消耗率, $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$;
 $b_{\text{diesel},r}$ 为 r 时柴油消耗率, $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

图9和图10为试验工况下PCCI发动机的 b 和有效热效率 η 随 r 的变化。

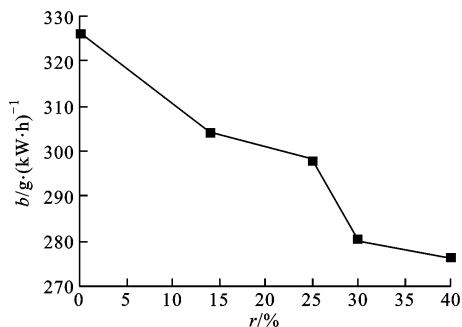


图9 当量燃油消耗率随 r 的变化

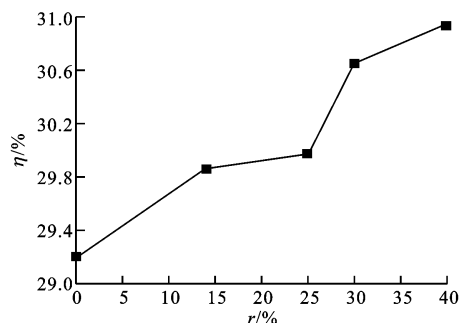


图10 有效热效率随 r 的变化

从图9和图10可以看出,PCCI发动机的 b 随着 r 的增大而降低, η 随着 r 的增大而升高。这是因为,随着 r 的增大,发生HCCI燃烧的预混燃料量逐渐增多,缸内燃烧压力和温度不断升高,主喷燃料燃烧更快、更充分,燃烧持续期逐渐缩短且主燃期逐渐靠近上止点,所以发动机有效热效率提高,当量油耗降低。

3 结 论

(1)随着 r 的增大,PCCI发动机燃烧始点不断前移,最高燃烧温度升高,最大爆发压力逐渐增大;压力升高率曲线和放热率曲线均由两阶段发展到三阶段,且最大压力升高率随着 r 的增加先增大后减小再增大;累积放热率迅速升高的始点逐渐提前,整个燃烧持续期逐渐缩短。

(2)随着 r 的增大,PCCI发动机的 NO_x 和碳烟排放呈下降趋势。

(3)随着 r 的增大,PCCI发动机的 b 逐渐下降, η 逐渐升高。

参考文献:

- [1] PARK Y, BAE C. Influence of EGR and pilot injection on PCCI combustion in a single-cylinder diesel engine, SAE 2011-01-1823 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2011.
- [2] FATHI M, SARAY R K, CHECKEL M D. The influence of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of n-heptane/natural gas fueled homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines [J]. Applied Energy, 2011, 88 (12): 4719-4724.
- [3] CINAR C, CAN Ö, SAHIN F, et al. Effects of premixed diethyl ether (DEE) on combustion and exhaust emissions in a HCCI-DI diesel engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(4): 360-365.
- [4] MA Junjun, LÜ Xingcai, JI Libin, et al. An experimental study of HCCI-DI combustion and emissions in a diesel engine with dual fuel [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47(9): 1235-1242.
- [5] WANG Ying, HE Li, ZHOU Jie, et al. Study of HC-CI-DI combustion and emissions in a DME engine [J]. Fuel, 2009, 88(11): 2255-2261.
- [6] 汪映. 不同参数对PCCI-DI发动机燃烧压力和温度影响的数值模拟研究 [J]. 内燃机, 2011(1): 6-9.
WANG Ying. Numerical simulation investigation on effect of the different parameters on the combustion pressure and temperature in a PCCI-DI engine [J]. Internal Combustion Engines, 2011(1): 6-9.
- [7] SATO S, LIDA N. Analysis of DME homogeneous charge compression ignition combustion, SAE 2003-01-1825 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2003.
- [8] 李维, 周龙宝, 汪映, 等. DME部分预混压燃与缸内直喷复合燃烧的研究 [J]. 重庆交通大学学报, 2010, 29(3): 480-483.
LI Wei, ZHOU Longbao, WANG Ying, et al. Study on combustion characteristics of partial premixed charge compression ignition-direct injection engine fueled with dimethyl ether [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2010, 29(3): 480-483.

(编辑 苗凌)