

DOI: 10.7652/xjtuxb201407005

预混均质充量压缩燃烧发动机燃烧与排放特性

赵玉伟¹, 汪映¹, 雷雄¹, 孟庆斌², 刘圣华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技术中心, 261205, 山东潍坊)

摘要: 为改善柴油机的燃烧和排放特性, 在一台 2105 柴油机上开展了二甲醚(DME)预混比和废气再循环(EGR)对二甲醚-柴油双燃料预混均质充量压缩燃烧(PCCI)发动机的燃烧与排放特性影响的试验研究, 通过在进气道预混 DME 和缸内直喷柴油实现了 PCCI 燃烧模式。试验结果表明: 随着 DME 预混比的增加, 放热过程由两阶段放热发展到三阶段放热, 燃烧始点前移, 最高爆发压力逐渐增大且对应的相位不断提前; 冷 EGR 导致的 PCCI 发动机最高爆发压力下降的程度、瞬时放热率峰值及压力升高率峰值对应的相位滞后程度均随着 DME 预混比的增加逐渐减弱; 随着 DME 预混比的增大和 EGR 率的减小, 当量有效燃油消耗率逐渐降低, 有效热效率逐渐升高; DME 预混比和 EGR 率增大可有效降低 NO_x 排放, 但是 HC 和 CO 排放有所增加。文中工况下最优 DME 预混比为 30%。

关键词: 预混均质充量压缩燃烧; 二甲醚预混比; 废气再循环; 燃烧特性; 排放特性

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0023-06

Combustion and Emission Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Engine

ZHAO Yuwei¹, WANG Ying¹, LEI Xiong¹, MENG Qingbin², LIU Shenghua¹

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

2. Technology Center of Weichai Power Corporation Limited, Weifang, Shandong 261205, China)

Abstract: To improve the combustion and emission of a diesel engine, the effects of dimethyl ether (DME) pre-mixing ratio and cold exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emission characteristics of DME-diesel dual fuel PCCI (premixed charge compression ignition) engine were experimentally investigated on a 2105 diesel engine. DME was inducted to the intake air and diesel was injected directly into the cylinder to realize PCCI combustion mode. The results show that with increasing DME pre-mixing ratio, the heat release process is divided into three stages instead of two stages and combustion is advanced; the peak values of in-cylinder pressure increase and the corresponding phases are advanced; the decreasing level of the maximum in-cylinder pressure and the degree of phase latency corresponding to the maximum instantaneous heat release rate and the maximum pressure rise rate decline gradually with increasing DME pre-mixing ratio; the equivalent fuel consumption rate reduces and effective thermal efficiency increases with increasing pre-mixing ratio and decreasing EGR rate; NO_x emission effectively decreases with increasing pre-mixing ratio and EGR rate, while HC and CO emissions increase. The optimum DME pre-mixing ratio is suggested as 30%.

收稿日期: 2013-11-05。 作者简介: 赵玉伟(1987—),男,博士生;汪映(通信作者),女,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50706038);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xj2011009)。

网络出版时间: 2014-04-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140416.1748.001.html>

Keywords: PCCI; dimethyl pre-mixing ratio; exhaust gas recirculation; combustion characteristics; emission characteristics

柴油机的热效率、燃油经济性高和动力强,使其成为世界上交通运输的主要动力之一。然而,柴油机废气排放物中氮氧化物(NO_x)与碳烟呈现权衡关系,同时降低这 2 种排放物非常困难。为此,人们提出了许多改善柴油机燃烧和排放特性的新型燃烧方式,其中预混均质充量压缩燃烧(PCCI)以较低的 NO_x 和碳烟排放得到了广泛关注^[1]。吕兴才等通过气口喷射预混燃料和缸内直喷生物柴油实现了 PCCI 燃烧^[2]。结果表明:气口喷射正庚烷时整个燃烧过程呈现明显的三阶段放热,预混合的二甲氧基甲烷(DMM)和乙醇为单阶段放热;气口喷射预混燃料时生物柴油发动机的碳烟和 NO_x 排放明显降低,其中预喷射乙醇时效果最明显。张俊军等将二甲醚(DME)引入进气道,并与缸内喷射相结合研究了不同工况下复合燃烧发动机的燃烧和排放特性^[3]。研究发现,当平均有效压力为 0.24 MPa 时,随着预混率的增加,燃烧过程由两阶段放热发展为三阶段放热,气缸压力、温度和压力升高率以及 NO_x 排放均先减小后增大。

PCCI 燃烧中预混气的形成是一个关键问题。DME 的高十六烷值及无 C—C 键等特性使其能够实现高效、无烟燃烧^[4],同时 DME 在常温、常压下为气态,可以直接作为燃料引入进气道并与空气混合生成均质充量^[5-6]。因此,本文采用 DME 与空气在进气道形成均质混合气后进入气缸,利用喷射装置在压缩行程末期将柴油喷入燃烧室,以实现 PCCI 燃烧,并以此研究了预混不同比例的 DME 对发动机燃烧和排放特性的影响。相对于传统柴油机,PCCI 发动机的 NO_x 排放优势并不十分明显。废气再循环技术(EGR)通过控制燃料燃烧速率和缸内温度来抑制 NO_x 排放,降低缸内压力和压力升高率,使发动机的燃烧更加稳定^[7]。为此,本文研究了 EGR 对进气道预混 DME 和缸内直喷柴油的 PCCI 发动机的燃烧和排放特性及燃油经济性的影响。

1 试验台架及装置

发动机为直列、双缸、水冷、四冲程、自然吸气式 2105 柴油机,主要技术参数如表 1 所示,发动机台架布置如图 1 所示。为了实现发动机以 PCCI 的燃烧方式工作,增加了 DME 预混装置;为了防止 DME 气化后吸热使管道结冰而影响 DME 与新鲜

空气的混合效果,利用恒温水箱对气化的 DME 进行加热,恒温水箱温度控制在 50℃左右。DME 管道与进气管轴线呈 30°并指向进气方向。

表 1 2105 柴油机主要技术参数

参数	数值	参数	数值
缸径/mm	105	额定转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	2 300
行程/mm	120	额定功率/kW	25.9
排量/L	2.078	供油提前角/(°)	18(上止点前)
压缩比	17		

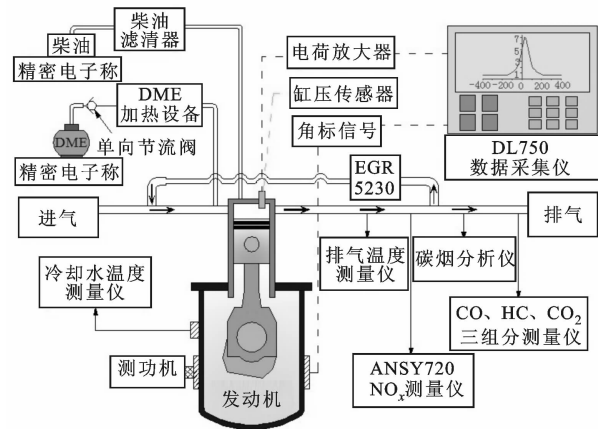


图 1 发动机台架布置

本试验使用 Horiba 三组分分析仪(MEXA-554JA)测量 CO 、 HC 和 CO_2 排放,使用日本 Horiba NO_x ANSYS 720 仪器测量 NO_x 排放,使用不透光烟度计测量碳烟,使用精密电子秤测量 DME 和柴油的流量,使用 Kistler 7061 水冷式压电晶体传感器测量发动机的缸内压力。由于缸压信号比较微弱,所以测量数据先经过 Kistler 7061B 型电荷放大器进行放大处理,再进入数据采集仪。缸压测点间隔为 0.5°(曲轴转角),每个循环有 2 002 个测点。每种工况下采集 100 个循环的缸压数据,然后取其平均值用于分析。试验所用柴油是商用 0# 柴油,DME 的纯度(质量分数)为 99.9%。

因为 DME 的热值($27.6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)与柴油($42.5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)相差较大,所以不能直接计算 DME 与柴油质量消耗比,因此本文引入了 DME 预混比 r 的概念,用来表示所消耗 DME 的热值与相同时刻发动机总燃料消耗量热值的关系。DME 预混比的计算式为

$$r = \frac{B_{\text{DME}} H_{\text{uDME}}}{B_{\text{DME}} H_{\text{uDME}} + B_{\text{diesel}} H_{\text{udiesel}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: B_{DME} 和 B_{diesel} 分别为 DME 和柴油的质量流量 ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$); H_{uDME} 和 H_{udiesel} 分别为 DME 和柴油的低热值 ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)。研究表明,进气道预混量过大会导致燃烧恶化、爆震等^[3],因此试验中 DME 预混比分别为 0%、14%、30% 和 40%。 $r=0\%$ 时为传统压燃式柴油机。

试验中直接从排气管引出部分废气,并导入进气道,通过控制调节阀的开度来控制导入废气的量。在控制调节阀之前使用管壳式冷却器,即通入与废气流动方向相反的循环冷却水对废气进行冷却。EGR 率采用了美国 ECM 公司生产的 EGR 5230EGR/Dual Lambda/O₂ Analyzer 仪器测量,相应计算式为

$$\gamma_{\text{EGR}} = \frac{\phi_{\text{air}} - \phi_{\text{mixture}}}{\phi_{\text{air}} - \phi_{\text{exhaust}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ϕ_{air} 为新鲜空气中的氧浓度(体积分数); ϕ_{mixture} 为废气与新鲜空气混合后的氧浓度; ϕ_{exhaust} 为废气中的氧浓度。试验中 EGR 率分别为 0%、9%、18% 和 27%。

在 $n=1700 \text{ r/min}$ 、 $T_{\text{iq}}=40 \text{ N} \cdot \text{m}$ (平均指示压力为 0.25 MPa)工况下,研究了不同 DME 预混比和 EGR 率对二甲醚-柴油双燃料 PCCI 发动机燃烧和排放特性及燃油经济性的影响。

2 试验结果及分析

2.1 二甲醚-柴油双燃料 PCCI 发动机的燃烧特性

试验工况下二甲醚-柴油双燃料 PCCI 发动机放热率随 DME 预混比和 EGR 率的变化如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着 DME 预混比的增加, PCCI 发动机呈现出完全不同的放热规律。传统柴油机呈现出两阶段放热,而 PCCI 发动机随着 DME 预混比的增加呈现出三阶段放热,3 个波峰分别对应 DME 预混燃料低温 HCCI 燃烧(LTR)、DME 预混燃料高温 HCCI 燃烧(HTR)和柴油燃料扩散燃烧(Diffusion)。随着 DME 预混比的增加,发生 HCCI 预混燃烧的 DME 的量越多,主喷射期柴油的量减少,因此预混燃料在 LTR 和 HTR 阶段的放热率峰值不断升高,而柴油扩散燃烧阶段的放热率峰值不断降低。

从图 2 还可以看出,采用冷 EGR 时 PCCI 发动机瞬时放热率峰值出现的位置比没有采用冷 EGR 时滞后,且随着 EGR 率的升高,滞后时间延长。这是由于冷 EGR 引入气缸的废气中含有大量的惰性

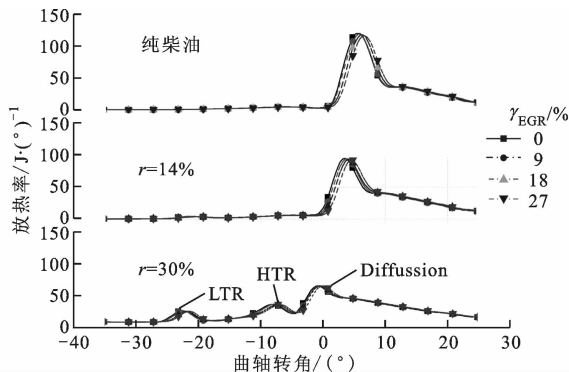


图 2 平均指示压力为 0.25 MPa 时不同 EGR 率和 DME 预混比下的放热率曲线

气体和三原子分子,惰性气体增加了燃料的滞燃期,使燃烧推迟,而三原子分子比热容较大,使温度上升缓慢。对比 $r=14\%$ 、 $r=30\%$ 看出,随着 DME 预混比的增加,冷 EGR 致使发动机瞬时放热率滞后的趋势越来越不明显。这是因为 DME 预混比的增加使得可燃混合气发生 HCCI 燃烧放出的热量增加,缸内温度随之升高,由此抑制了 EGR 对燃烧过程的影响。

本文定义累积放热率为 10% 时的曲轴转角为燃烧始点。不同 EGR 率和预混比下燃烧始点变化如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着 DME 预混比的增加,燃烧始点不断提前。在 EGR 率为 0,预混比分别为 14% 和 30% 时,燃烧始点分别提前 1.2° 和 6.6°。这是因为随着进气道中预混的 DME 增多,预混燃烧增强,燃烧速率提高,整个放热过程提前使得燃烧始点提前。采用冷 EGR 时, PCCI 发动机的燃烧始点明显滞后。这是因为随着 EGR 率增加,可燃混合气的比热容增大使得压缩过程的压力和温度升高减缓,缸内燃烧速度下降,由此推迟了放热过程,导致燃烧始点滞后。

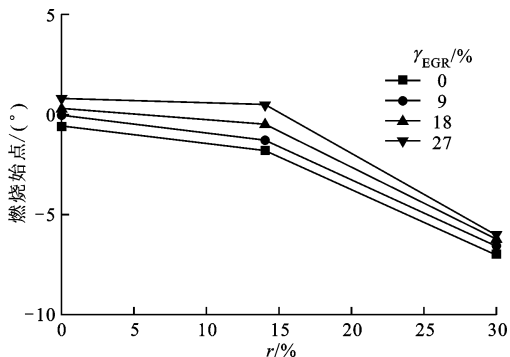


图 3 不同 EGR 率和预混比下燃烧始点变化

不同 EGR 率和 DME 预混比下缸内压力变化

如图4所示。从图4可以看出,随着DME预混比的增加,PCCI发动机缸内最高爆发压力逐渐增大,对应相位不断提前。在EGR率为0时,压力峰值由6.11 MPa增加到6.29 MPa和6.72 MPa,对应相位由 6.6° 提前到 6.0° 和 4.8° 。这是因为DME具有较高的十六烷值,DME和空气形成的可燃混合气在柴油扩散燃烧之前发生HCCI燃烧,从而提高了缸内压力和温度,缩短了柴油的滞燃期,因此最高爆发压力的相位前移。发动机在压缩行程的放热不断增加,使得发动机缸内最高爆发压力增大。

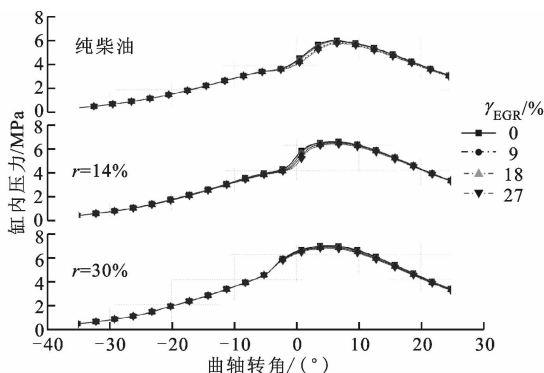


图4 平均指示压力为0.25 MPa时不同EGR率和DME预混比下缸内压力变化

从图4还可以看出,随着EGR率的增加,最高爆发压力逐渐下降,对应相位出现的时刻滞后。这是因为EGR把发动机上一个循环燃烧后的含有很多惰性气体和比热容较高的多原子分子的废气,经冷却后再度引入气缸,使得在放热量相同时缸内温升减小,氧浓度下降,燃料的滞燃期延长,燃烧始点滞后,更多的燃料在上止点后燃烧(该燃烧不属于等容放热)。所以,发动机的最高爆发压力降低,出现位置向后推移。

对比EGR率为0%和27%这2种工况发现:纯柴油时压力峰值由6.11 MPa减小到5.86 MPa,相位由 6° 推迟到 7.2° ; $r=14\%$ 时压力峰值由6.29 MPa减小到6.07 MPa,相位由 5.6° 推迟到 6.2° ; $r=30\%$ 时压力峰值由6.72 MPa减小到6.51 MPa,相位由 5° 推迟到 5.4° 。

因此可以得出:缸内最高爆发压力下降的幅度以及对应相位的变化随着DME预混比的增大而减小。这是因为预混DME的HCCI燃烧提高了缸内温度,缩短了柴油的滞燃期,加速了柴油的燃烧速度。所以,进气预混DME在一定程度上抑制了冷EGR使缸内最高爆发压力下降的问题。

不同EGR率和DME预混比下压力升高率变

化如图5所示。从图5可以看出,随着DME预混比的增加,PCCI发动机压力升高率曲线与传统压燃式柴油机有所不同。高预混比工况($r=30\%$)下,压力升高率曲线有3个波峰,分别对应DME低温HCCI燃烧、DME高温HCCI燃烧和柴油燃料扩散燃烧。3个波峰出现的相位与图2中放热率波峰的相位对应。PCCI发动机采用EGR时,压力升高率的峰值减小,对应相位滞后;随着EGR率的增大,压力升高率的峰值下降幅度增大,对应相位不断滞后。这是因为EGR引入的多原子分子使得缸内压力和温度升高减缓,压力升高率减小,燃料的滞燃期延长,燃烧始点滞后(该燃烧不属于等容放热),最高压力升高率降低,对应相位滞后。从图5还可以看出,压力升高率峰值减小的幅度以及对应相位滞后的幅度随DME预混比的增大而减小。这是因为DME在主喷射期前发生HCCI燃烧,缩短了柴油的滞燃期,使得柴油能快速充分燃烧,从而削弱了冷EGR的作用。

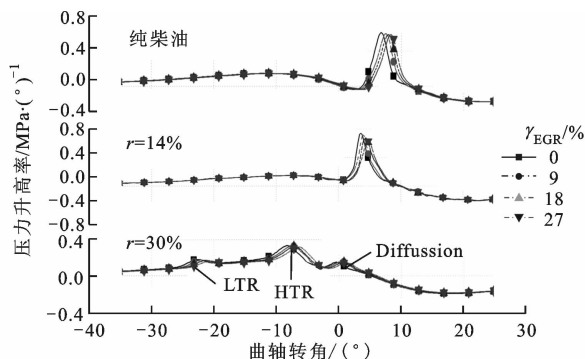


图5 平均指示压力为0.25 MPa时不同EGR率和DME预混比下压力升高率变化

2.2 二甲醚-柴油双燃料PCCI发动机的燃油经济性和有效热效率

二甲醚和柴油的低热值差别较大,因此本文引入当量有效燃油消耗率 b_{eq} 来表征发动机的燃油经济性,相应的计算式为

$$b_{eq} = \frac{b_{eDME} H_{uDME} + b_{ediesel} H_{udiesel}}{H_{udiesel}} \quad (3)$$

式中: b_{eDME} 和 $b_{ediesel}$ 分别表示二甲醚和柴油的消耗率, $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$; H_{uDME} 和 $H_{udiesel}$ 分别表示二甲醚和柴油的低热值, $MJ \cdot kg^{-1}$ 。

试验工况下二甲醚-柴油双燃料PCCI发动机的 b_{eq} 和有效热效率 η_{et} 随DME预混比和EGR率的变化如图6所示。从图6可以看出,随着DME预混比的增大, b_{eq} 逐渐降低, η_{et} 逐渐升高。这是因为

发生 HCCI 燃烧的预混燃料的量随着 DME 预混比的增大而增加,缸内压力和温度升高,扩散燃烧阶段柴油燃烧更快、更充分,从而提高了发动机的有效热效率,降低了当量油耗。随着 EGR 率的增加,缸内压力和温度降低,氧浓度下降,燃烧速度减缓,燃烧持续期延长,因此发动机热效率下降,当量油耗增多。高预混比工况 ($r = 30\%$, $r = 40\%$) 下, η_{et} 随 EGR 率的增加而下降的幅度比压燃式柴油机工况 ($r = 0$) 小。这是因为高预混比工况下, HCCI 燃烧阶段放热量增多,缸内压力和温度提高,这在一定程度上抑制了 η_{et} 下降的趋势。

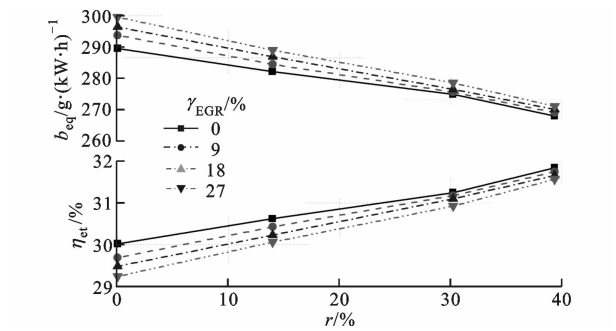


图 6 平均指示压力为 0.25 MPa 时不同 EGR 率和 DME 预混比下的 b_{eq} 和 η_{et}

2.3 二甲醚-柴油双燃料 PCCI 发动机的排放特性

试验工况下二甲醚-柴油双燃料 PCCI 发动机 NO_x 和碳烟排放如图 7 所示。

从图 7 可以看出,对于 PCCI 发动机,转速、负荷在试验范围内, NO_x 的排放随着 EGR 率的增大而不断减少,碳烟排放随着 EGR 率的增大而增加。这是因为冷 EGR 导入的废气使得缸内新鲜充量被稀释,空燃比下降,火焰传播速率减缓,缸内的最高燃烧温度和压力升高率降低,因此抑制了 NO_x 排

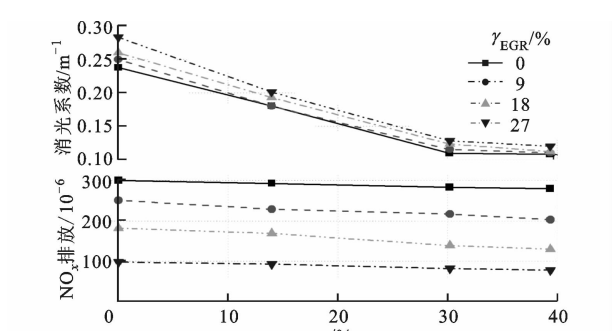


图 7 平均指示压力为 0.25 MPa 时不同 EGR 率和 DME 预混比下 NO_x 和碳烟排放

放;冷 EGR 导入的废气使得混合气的氧浓度相对降低,局部缺氧区域增大,燃料燃烧不完全,导致碳烟排放增加。

从图 7 还可以看出,随着 DME 预混比的增大, NO_x 排放逐渐减小。这是因为 HCCI 燃烧产生的废气随着预混比的增加而增多,这些废气形成了内部 EGR,从而抑制了 NO_x 的生成。同时,扩散燃烧阶段柴油的量随着 DME 预混比的增大而减少,柴油与空气混合得更加均匀,局部富氧和高温区域减小,从而抑制了扩散燃烧阶段 NO_x 的生成。所以,在较高的 DME 预混比下,适当采用较高的 EGR 率可以降低 NO_x 排放。

PCCI 发动机改善了冷 EGR 对碳烟排放的不利影响,随着 DME 预混比的增加,碳烟排放不断下降,即使在采用冷 EGR 情况下,当 DME 预混比达到一定值后,碳烟排放仍然可以保持在比较低水平。DME 是含氧燃料,分子中没有生成碳烟的 C—C 键,因此 DME 预混燃烧时碳烟排放几乎为 0; DME 预混燃烧提高了缸内温度,加快了气体流动,促进了柴油扩散燃烧阶段的蒸发,使得燃烧更充分;主燃烧期柴油的喷射量随着 DME 预混比的增加逐渐减少,因此柴油扩散燃烧阶段形成的碳烟量减少。

不同 EGR 率和 DME 预混比下 HC 和 CO 排放如图 8 所示。从图 8 可以看出, PCCI 发动机的 HC 和 CO 的变化趋势基本相同。随着 DME 预混比的升高, HC 与 CO 排放逐渐增多。DME 与空气形成的可燃混合气的 HCCI 燃烧不完全,致使 HC 排放增加, DME 预混比越高, DME 与空气形成的均质混合气越浓,在气缸狭缝和环槽内存留的 DME 增多,这部分燃料燃烧不充分,致使 HC 排放增多。随着预混比的增加,燃烧后燃期逐渐缩短,部分可燃混合气无法充分燃烧且得不到进一步氧化,从而使

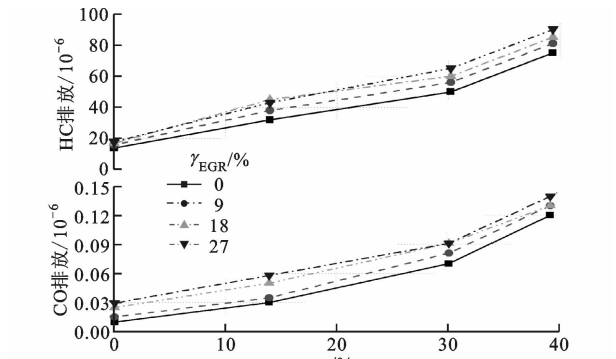


图 8 平均指示压力为 0.25 MPa 时不同 EGR 率和 DME 预混比下 HC 和 CO 排放

得 CO 排放增多。随着冷 EGR 率的升高, HC 与 CO 排放不断增加。这是因为冷 EGR 导入的废气使得气缸中氧浓度降低, 局部缺氧区域增大, 同时废气中的惰性气体使得压缩过程中温度升高减缓, 因此燃烧不完全, 造成了大量 HC 与 CO 排放。

本文中, DME 预混比的优劣是根据不同预混比对发动机的燃烧特性、燃油经济性和排放特性的影响来评判的。随着预混比的增大, 发动机缸内压力和温度逐渐升高, 当量有效油耗逐渐降低, 有效热效率逐渐升高, NO_x 和碳烟排放逐渐降低, 因此高预混比可以改善发动机的燃烧特性、燃油经济性和部分排放特性。然而, 过高的预混比($r=40\%$)会导致 HC 和 CO 排放提高, $r=30\%$ 工况下, 碳烟排放已经在比较低的水平。因此, 本文工况下最优 DME 预混比为 30% 。

3 结 论

(1) 二甲醚-柴油双燃料 PCCI 发动机在高 DME 预混比工况下呈现出三阶段放热。随着 DME 预混比的增加, 燃烧始点提前, LTR 和 HTR 阶段的放热率峰值增大, 柴油扩散燃烧阶段的放热率峰值减小。冷 EGR 使 PCCI 发动机的燃烧始点和瞬时放热率峰值出现的位置明显滞后, 随着 EGR 率的升高, 滞后时间延长, 但是滞后程度随着 DME 预混比的升高而减弱。

(2) 随着 DME 预混比的增加, PCCI 发动机缸内最高爆发压力逐渐增大, 对应相位不断提前。随着 EGR 率的增加, 最高爆发压力逐渐下降, 对应相位不断滞后, 但随着 DME 预混比的升高, 最高爆发压力下降的程度及对应相位滞后的程度逐渐减弱。

(3) 随着 DME 预混比的增加, 二甲醚-柴油双燃料 PCCI 发动机的 b_{eq} 逐渐降低, η_{et} 逐渐升高; 随着 EGR 率的增加, b_{eq} 逐渐升高, η_{et} 逐渐降低。

(4) 冷 EGR 可以有效降低 PCCI 发动机的 NO_x 排放, 但是增加了碳烟排放。DME 预混比的增加改善了 NO_x 和碳烟的排放。随着冷 EGR 率和 DME 预混比的增大, HC 和 CO 排放均有所增加。本文中最优 DME 预混比为 30% 。

参考文献:

- [1] MANCARUSO E, VAGLIECO B M. UV-visible imaging of PCCI engine running with ethanol/diesel fuel, SAE 2012-01-1238 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2012.
- [2] 吕兴才, 马骏骏, 吉丽斌, 等. 气口喷射预混合燃料对生物柴油发动机排放特性的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(2): 288-293.
LÜ Xingcai, MA Junjun, JI Libin, et al. Improved emission characteristics of biodiesel fuelled engines by port injection of various premixed fuels [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(2): 288-293.
- [3] 张俊军, 乔信起, 王真, 等. 燃用二甲醚柴油机气道-气缸喷射复合燃烧 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 370-374.
ZHANG Junjun, QIAO Xinqi, WANG Zhen, et al. Study on compound charge compression ignition combustion in an engine fueled with dimethyl ether [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(3): 370-374.
- [4] KIM H J, PARK S H, LEE K S, et al. A study of spray strategies on improvement of engine performance and emissions reduction characteristics in a DME fueled diesel engine [J]. Energy, 2011, 36(3): 1802-1813.
- [5] ZHANG B, FU W, GONG J. Study of fuel consumption when introducing DME or ethanol into diesel engine [J]. Fuel, 2006, 85(5): 778-782.
- [6] 胡真, 杨敬, 李湘萍, 等. 直喷柴油机掺烧低比例二甲醚(DME)和高比例柴油的试验研究 [J]. 内燃机工程, 2005, 26(5): 6-9.
HU Zhen, YANG Jing, LI Xiangping, et al. Investigation of direct injection diesel engine fuelled with both low proportion dimethyl ether (DME) and high proportion diesel [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005, 26(5): 6-9.
- [7] 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.

(编辑 苗凌)