

深度废气再循环对二甲醚发动机性能及排放的影响

宋睿智, 李珂, 刘圣华, 霍卫红

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在一台两缸二甲醚发动机上开展了不同废气再循环(EGR)率下发动机的性能和排放特性研究,测量了不同工况下发动机的油耗,HC、CO 和 NO_x 的排放. 研究表明:二甲醚发动机可承受的最大 EGR 率接近 60%,但在高负荷时,过大的 EGR 率会导致发动机燃油消耗率显著升高;EGR 率对发动机的 NO_x 排放量影响很大,随着 EGR 率的增加,发动机的 NO_x 排放量大幅度下降,高负荷时下降幅度更大;EGR 率增大,HC 和 CO 排放增加,高负荷时增加的幅度更大,特别是当 EGR 率超过一定范围时,EGR 率的增大会引起 HC 和 CO 排放的急剧增加;低负荷时,最佳 EGR 率应保持在 30%左右,而高负荷时,应采用较小的 EGR 率.

关键词: 二甲醚发动机;废气再循环;性能;排放特性

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)11-0027-05

Influences of Ultra-High Exhaust Gas Recirculation on Performance and Emission Characteristics of a Dimethyl Ether Engine

SONG Ruizhi, LI Ke, LIU Shenghua, HUO Weihong

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

Abstract: To study the influences of the exhaust gas recirculation(EGR)rate on the emissions and performance of dimethyl ether (DME) engines, an experimental investigation was conducted on a 2-cylinder DME engine with EGR. Under the various operating conditions, the fuel consumption and emissions of HC, CO, and NO_x were measured. The results show that the maximum EGR rate of the DME engine can reach 60% approximately, however, under high load conditions, too large EGR rate will result in obvious deterioration in the engine brake specific fuel consumption. EGR has significant effects on NO_x emissions. NO_x emissions decrease clearly with the increase in the EGR rate, especially under high load conditions. HC and CO emissions increase with the increase in the EGR rate, particularly under high load conditions. When the EGR rate is over a certain value, the increase of the EGR rate will lead to a quick increase in HC and CO emissions. It is suggested that the optimal EGR rate should be near 30% under low load conditions while the engine should run with low EGR rates under high load conditions.

Keywords: dimethyl ether engine; exhaust gas recirculation; performance; emission characteristics

能源短缺和环境污染已成为全世界关注的两大问题. 内燃机清洁替代燃料的研究和利用正受到广泛重视. 二甲醚(DME)可以从煤、天然气与生物质资源中提取,具有稳定可靠的原料来源,对于缓解我国石油资源短缺具有重要的价值. DME 具有以下优

点:沸点低,容易气化,十六烷值高,容易压燃着火;DME 燃料直接喷入发动机气缸后,与空气的混合较柴油容易,且本身含氧 34.8%,燃烧过程不会产生碳烟;与柴油机相比,燃用 DME 后,发动机氮氧化物、未燃碳氢和 CO 排放均降低,排放指标可达国Ⅲ

标准,而且接近国Ⅳ排放标准和美国加州超低排放标准^[1-2],是一种非常清洁的柴油机代用燃料.已有的研究表明,二甲醚发动机采用废气再循环(EGR)后,氮氧化物排放可得到进一步的降低,但目前的研究仅限于低 EGR 率(低于 25%)的情况^[3-4]. DME 本身含氧,能承受较大的 EGR 率,本文即通过试验获得二甲醚发动机所能耐受的极限 EGR 率,并研究深度 EGR 率下发动机的性能及排放特性,探索二甲醚发动机的最佳 EGR 率,以便在保证发动机动力性和经济性的情况下最大程度地降低氮氧化物排放,为进一步将二甲醚发动机整机排放降至国Ⅳ水平提供理论基础.

1 试验装置及方法

在一台两缸自然吸气式 DME 发动机上开展了不同 EGR 率下发动机的性能及排放特性研究.该二甲醚发动机是西安交通大学在云内动力股份有限公司生产的 2102QB 柴油机基础上开发的,发动机主要性能和结构参数如表 1 所示.所开发的 DME 发动机动力性优于原柴油机,污染物排放较原柴油机大幅降低(见图 1、图 2). $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 是二甲醚发动机的最大扭矩转速,且发动机经常在该转速附近运转,因而试验主要集中在转速为 $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下进行.选取该转速下 2 个负荷: $p_{me}=0.73\text{ MPa}$ (发动机最大扭矩点)和 $p_{me}=0.36\text{ MPa}$ 进行试验(p_{me} 为发动机的平均有效压力),对不同 EGR 率下的二甲醚发动机性能和排放进行了测试与分析.

表 1 发动机主要性能和结构参数

参数	2102 型 柴油机	2102 型 DME 发动机
燃烧室类型	直喷 ω 型燃烧室	直喷 ω 型燃烧室
缸径/mm	102	102
冲程/mm	115	115
排量/ cm^3	1 880	1 880
压缩比	17.5 : 1	17.5 : 1
额定功率/kW	26.1	26.8
额定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	2 700	2 800
最大扭矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	110.2	108.9
最大转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	1 400	2 000
柱塞直径/mm	8.5	10.5
喷嘴孔数	4	5
喷嘴孔径/mm	0.27	0.35
喷嘴启喷压力/MPa	19.1	18.0
供油提前角(上止点前)/ $(^\circ)$	25	22

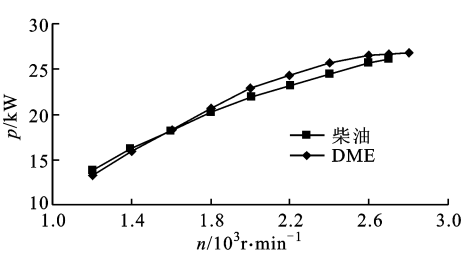


图 1 二甲醚发动机与原柴油机动力性比较

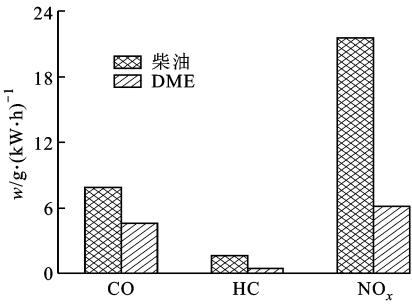


图 2 ESC-13 工况二甲醚发动机与柴油机排放比较

发动机台架布置见图 3. 用来进行排放测量的 Horiba MEXA 7100DEGR 分析仪是用不分光红外线法测量 CO 和 CO₂,用氢火焰离子法测量 HC,用电化学方法测量 NO_x.使用 Horiba 公司的 MEXA-700 λ 空燃比分析仪对发动机空燃比进行监测.通过 Siments 科里奥利质量流量计对发动机油耗进行测量. EGR 率定义如下

$$R_{\text{EGR}} = \frac{\varphi_{\text{CO}_2, \text{in}}}{\varphi_{\text{CO}_2, \text{out}}}$$

(1)

式中: $\varphi_{\text{CO}_2, \text{in}}$ 指发动机加入 EGR 后进气中 CO₂ 的体积分数; $\varphi_{\text{CO}_2, \text{out}}$ 为发动机加入 EGR 后排气中 CO₂ 的体积分数.

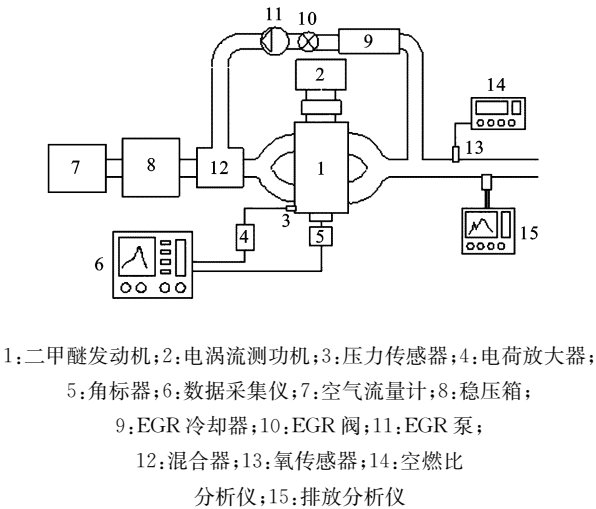


图 3 发动机试验台架布置简图

2 试验结果与分析

2.1 发动机性能分析

EGR 就是通过回引部分废气与新鲜空气共同参与燃烧反应,利用废气中含有大量的惰性气体(CO_2 、 N_2 、 H_2O 等)具有较高的比热容这一特性来降低 NO_x 的生成.因为 NO_x 的生成条件是高温富氧,而废气的引入,一方面使混合气热容量增大,从而降低最高燃烧温度,另一方面废气对新鲜充量的稀释也相应降低了氧的浓度,从而有效地抑制了 NO_x 的生成^[5-6].由图 4 可知,高负荷和低负荷时的空燃比都随着 EGR 率的增大而减小,特别是高负荷时,当 EGR 率增大到 30% 时,混合气的空燃比已经接近 DME 的理论空燃比,继续增大 EGR 率时,由于空燃比的降低,部分燃料不能完全燃烧,将会导致发动机性能和排放发生显著变化.

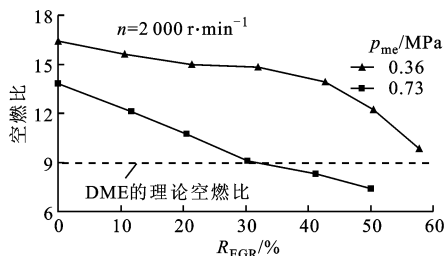


图 4 空燃比与 EGR 率的关系

为便于与原柴油机燃油消耗率对比,本文中已将 DME 的消耗率转化为等热值的柴油(DIE)消耗率.柴油的当量油耗率按下式计算

$$b_e = b_{e,\text{DME}} \cdot \frac{H_{\text{U,DME}}}{H_{\text{U,DIE}}} \quad (2)$$

式中: $H_{\text{U,DME}}$ 、 $H_{\text{U,DIE}}$ 分别为二甲醚和柴油的低热值.由图 5 可以看出:二甲醚发动机在高负荷时油耗率随着 EGR 率的增大而明显升高;低负荷时,在一定的 EGR 率范围内,发动机油耗率随着 EGR 率的增大而减小,当 EGR 率高到一定程度时,发动机油耗率开始升高,低负荷时发动机能承受更大的 EGR 率; $p_{\text{me}} = 0.36$ MPa 时,最大 EGR 率可达到 57.8%,而 $p_{\text{me}} = 0.73$ MPa 时,试验条件下发动机能承受的最大 EGR 率则为 50%,当进一步增大 EGR 率时,发动机运转不稳定,转速急剧降低.高负荷下,随着 EGR 率的增大,二甲醚发动机经济性变差,其原因主要是由于随着 EGR 率的增大,发动机空燃比降低(见图 4).高负荷、大 EGR 率时,发动机空燃比接近甚至低于二甲醚发动机的理论空燃比,导致混合气过浓,燃烧恶化,因而在全负荷或大负荷

工况下为追求发动机动力性,不适合采用废气再循环或应采用较小的 EGR 率.在低负荷时,发动机油耗率随着 EGR 率的增大呈现先减小后增大的趋势,当 EGR 率为 30% 左右时,发动机油耗率最低.低负荷、小 EGR 率时油耗率减小的主要原因为回流的废气导致进气压力增大,从而有效地减小了发动机的泵气损失,同时 EGR 导致燃烧温度降低从而减少了气缸壁面的传热损失^[7-8].大负荷时,回流的废气更显著地降低了发动机的空燃比,导致部分混合气无法完全燃烧,在这一因素的主导下,油耗率随着 EGR 率的增大而呈现出增大的趋势.

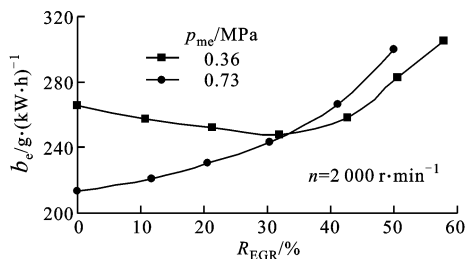


图 5 EGR 率对二甲醚发动机当量油耗率的影响

2.2 发动机排放特性分析

2.2.1 EGR 率对 NO_x 排放的影响 由图 6 可看出,各试验工况下,随着 EGR 率的增大, NO_x 排放大幅降低. $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,低负荷和高负荷下,当 EGR 率分别达到 50.0% 和 57.8% 时, NO_x 排放仅分别为 12.58×10^{-6} 和 7.74×10^{-6} .随着 EGR 率的增大,高负荷时 NO_x 排放下降更快.这是因为随着 EGR 率的增加,更多的废气被引入到发动机的进气系统,使得混合气的比热增大,导致发动机最高燃烧温度下降,同时回流的废气对进气中的新鲜空气具有稀释作用,有效地降低了缸内氧浓度,从而降低了废气中的 NO_x 的含量.当不采用废气再循环时,受最高燃烧温度较高影响,高负荷下 NO_x 排放比低负荷时高;当采用废气再循环被时,与低负荷时相比,高负荷下空燃比更低,废气对燃烧的影响更大,特别是当 EGR 率高于 30.4% 时,空燃比已接近甚至低于二甲醚的理论空燃比,氧浓度的急剧减少有效地抑制了 NO_x 的生成,使其保持在极低的水平,低负荷下大 EGR 率时,与高负荷时相比,空燃比仍较高,如 EGR 率为 32.0% 时,空燃比仍高达 14.8,仍具备生成较多 NO_x 的条件.

2.2.2 EGR 率对 HC 排放的影响 由图 7 可看出,HC 排放随 λ 的减小呈上升趋势,但在一定的 λ 范围内 HC 排放变化不大,只有超过某一值时,HC 排放才会突然增加,这在发动机低负荷时表现得

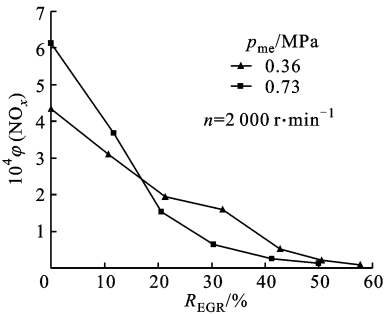


图 6 不同工况下 EGR 率对 NO_x 排放的影响

为明显. 这主要是废气的引入降低了气缸内的过量空气系数, 特别是大 EGR 率下气缸内混合气燃烧恶化, 从而导致 HC 排放激增. 高负荷下缸内过量空气系数相对较低, 废气对燃烧的影响更大, 因而由 EGR 引起的 HC 排放上升幅度也更大.

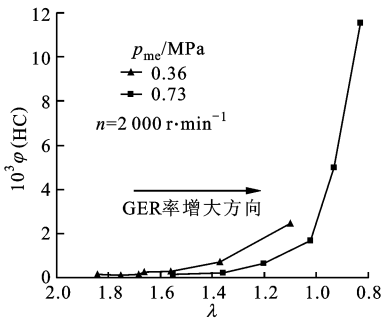


图 7 HC 排放与过量空气系数的关系

2.2.3 EGR 率对 CO 排放的影响 如图 8 所示, 不同负荷下, 随着 λ 的增大, 发动机 CO 排放与 HC 排放有着相同的变化趋势. CO 是碳氢化合物燃料燃烧过程中重要的中间产物, 它的生成主要受燃烧室内混合气的浓度和温度的影响. 随着 EGR 率的增加, 缸内燃烧温度下降, CO 氧化反应速率变慢. 高负荷时, 缸内过量空气系数比较小, 混合气较浓, 废气对燃烧的影响更大, 燃烧不完全, 从而由 EGR 率增大导致的 CO 排放升高的幅度也更大. 另外, 发动机采用废气再循环后的 HC 排放较高也是造成 CO 排放升高的一个主要因素.

2.2.4 EGR 率控制策略 随着 EGR 率的增大, NO_x 排放可显著降低, 但 HC 和 CO 排放却随之升高. 此外, 低负荷、小 EGR 率时热效率也有所升高, 因而最佳 EGR 率的确定应在 NO_x 排放与 HC 和 CO 排放以及热效率之间进行折衷. 为最大限度地改善发动机性能及排放, 在降低 NO_x 排放的同时保持发动机较好的燃油经济性 & 动力性, 对 EGR 率进行优化选取. 按照 ESC-13 工况法, 在试验工况

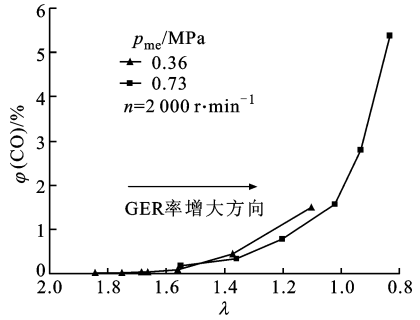


图 8 CO 排放与过量空气系数的关系

EGR 率适用的范围内, 按照单工况 NO_x 比排放量最大不超过 3.5 g/(kW · h) (欧 IV 排放法规标准), 同时热效率最大的原则选取 EGR 率. HC 和 CO 排放可通过氧化催化转化器得到显著降低, 因而此处可暂不考虑.

由图 9 可以看出, 低负荷、EGR 率低于 32.0% 时, 发动机热效率随着 EGR 率的增大而升高, 与未采用 EGR 时相比, 最大增幅可达 7.2%. 当 EGR 率继续增大时, 发动机油耗率升高, 热效率将持续降低 (见图 5). EGR 率为 32.0% 时, NO_x 比排放量为 2.10 g/(kW · h), 远低于 3.5 g/(kW · h) 的欧 IV 排放限值, 因而在低负荷时最佳 EGR 率应保持在 30% 左右为宜. 高负荷时发动机 NO_x 排放较大, 同时该工况在 ESC-13 工况表中所占权重也较大, 为缓解排放压力可适当采用较小的 EGR 率. 高负荷下, 当 EGR 率为 11.8% 时, NO_x 比排放量为 3.08 g/(kW · h), 而该工况下不采用 EGR 时, NO_x 比排放量却高达 5.16 g/(kW · h), 远高于欧 IV 排放限值.

3 结 论

(1) 废气再循环对二甲醚发动机动力性及燃油消耗率有显著影响. 高负荷时, 过大的 EGR 率会导致发动机动力下降, 油耗率升高, 而低负荷时, 适当的 EGR 率可使发动机的油耗率降低.

(2) EGR 率对发动机的 NO_x 排放量影响很大. 随着 EGR 率的增加, 发动机的 NO_x 排放量大幅度下降, 高负荷时下降幅度更大.

(3) EGR 率增大, 发动机过量空气系数减小, 导致 HC 和 CO 排放上升, 特别是当 EGR 率超过一定范围时, EGR 率的增大会引起 HC 和 CO 排放的急剧增大.

(4) 最佳 EGR 率的确定应在 NO_x 排放与 HC 和 CO 排放以及热效率之间进行折衷, 低负荷时, 最

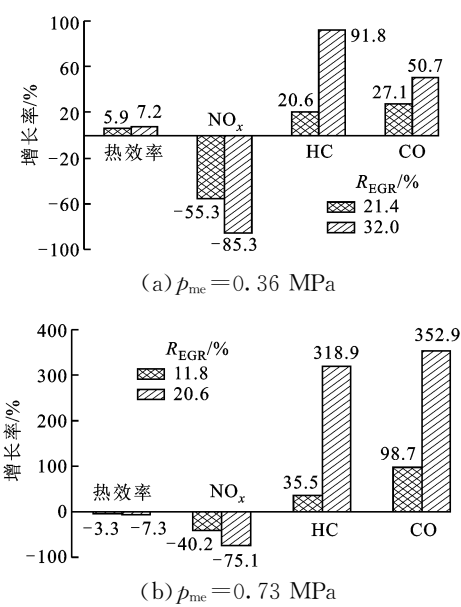


图 9 不同工况下 EGR 率对热效率, NO_x、HC 和 CO 排放的影响

佳 EGR 率应保持在 30%左右,而高负荷时,应采用较小的 EGR 率.

参考文献:

[1] WANG Y, ZHOU L B, YANG Z J, et al. Study on combustion and emission characteristics of a vehicle engine fuelled with dimethyl ether[J]. Proc IMechE: J Automobile Engineering, 2005, 219(2): 263-269.

[2] FLRISCH T, MCCARTHY C, BASU A, et al. A new clean diesel technology: demonstration of ULEV emission on a Navistar diesel engine fueled with dimethyl ether, SAE Paper 950061 [R]. Warrendale, Pennsylvania, USA: Society of Automotive Engineers, Inc., 1995.

[3] WANG Y, ZHOU L B. Experimental study on exhaust emissions from a multi-cylinder DME engine operating with EGR and oxidation catalyst[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(13): 1589-1595.

[4] 吴君华, 黄震, 乔信起, 等. 废气再循环对增压二甲醚发动机性能和排放影响的试验研究[J]. 内燃机学报, 2008, 26(2): 147-152.

[5] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2006: 233-235.

[6] 王尚勇, 杨青. 柴油机电子控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005:259-260.

[7] ABD-ALLA G H. Using exhaust recirculation in internal combustion engines: a review[J]. Energy Conversion & Management, 2002, 43(8): 1027-1042.

[8] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1998: 572-592.

(编辑 王焕雪)

[本刊相关文献链接]

燃烧与供油系统参数对二甲醚发动机热效率的影响. 西安交通大学学报,2008,42(5):528-531.

柴油-丙烷发动机不同喷油提前角时的燃烧和排放特性. 西安交通大学学报, 2008,42(5): 532-536.

柴油-丙烷发动机不同喷油提前角时的燃烧和排放特性. 西安交通大学学报, 2008,42(5):532-536.

二甲醚-氢气-空气混合气预混燃烧的实验研究. 西安交通大学学报, 2008,42(5):542-545.

甲醇柴油双燃料发动机甲醇掺烧比例的正交试验研究. 西安交通大学学报,2007,41(11):1284-1287.

柴油机燃用柴油-丙烷混合燃料的性能与排放研究. 西安交通大学学报,2007,41(9):1083-1086.

引燃油量对甲醇柴油双燃料发动机燃烧特性的影响. 西安交通大学学报,2007,41(5):517-520.

高比例甲醇柴油双燃料发动机燃烧与排放特性的研究. 西安交通大学学报,2007,41(1):14-17.

柴油机燃用柴油/乙醇混合燃料的燃烧特性. 西安交通大学学报,2006,40(9):1019-1023.

直喷发动机燃用天然气掺氢混合燃料的燃烧特性. 西安交通大学学报,2006,40(9):1001-1005.

柴油机燃用二甲醚/柴油混合燃料时的性能与排放研究. 西安交通大学学报,2006,40(3):294-297.

直喷式柴油机燃用 F-T 柴油时燃烧特性的研究. 西安交通大学学报,2006,40(1):5-9.

甲醇-汽油混合燃料对汽油机性能和排放的影响. 西安交通大学学报,2006,40(1):1-4.