

文章编号:1671-6833(2018)01-0024-05

EGR 对二甲醚 HCCI 发动机燃烧特性的影响

黄锦耀¹, 严诗伦¹, 陈朝阳^{1,2}

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对 HCCI 发动机的燃烧控制问题, 对不同废气再循环(EGR)率 R_{EGR} 和过量空气系数 λ 下的二甲醚均质混合压燃发动机的工作过程进行了数值模拟, 重点分析了 R_{EGR} 和 λ 对二甲醚 HCCI 发动机燃烧特性的影响. 结果表明, λ 一定时, 随着 R_{EGR} 的增大, 缸内压力、温度、放热率都会降低, 高温反应阶段开始时刻推迟; 而在 R_{EGR} 不变的情况下, λ 增大, 缸内的压力、温度、放热率降低, 低温反应阶段提前, 而高温放热时刻推后. 表明控制 R_{EGR} 和 λ 能达到有效控制二甲醚 HCCI 燃烧时刻的目的.

关键词: 二甲醚; 废气再循环; HCCI; 燃烧特性; 数值模拟

中图分类号: TK46 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.010

0 引言

汽车保有量的急剧增加, 加剧了环境污染和能源消耗. 必须寻找新型洁净可替代燃料, 并进一步开发高效低污染的新型燃烧方式, 才能顺应社会的发展.

二甲醚(DME)是一种可以从煤中制取的清洁燃料, 分子式为 CH_3OCH_3 , 由于分子中没有 C—C 键, 且汽化潜热较大, 在燃烧中可以降低 PM 和 NO_x 的生成. DME 常温下是无色无味无毒的气体, 压力超过 0.5 MPa 即可液化, 便于运输和储存. DME 十六烷值比柴油高, 被认为是柴油机的理想代用燃料^[1-3]. 均质混合气压燃(HCCI)是一种新型的燃烧方式, 其主要特点是采用稀薄燃烧, 可以降低 NO_x 和 PM 的排放, 是清洁的燃烧方式, 但 HCCI 的着火和燃烧过程受燃料的化学反应动力学控制^[3-6], 面临着着火时刻不易控制和工作范围狭窄的问题. 研究表明, HCCI 发动机对燃料的灵活性高, 可以利用 DME 燃料的特点来解决 HCCI 燃烧中工作范围狭窄的问题^[7].

国内外对二甲醚的化学反应动力学机理进行了广泛的研究, 证明了二甲醚燃料也遵循碳氢类燃料的反应机理路径, 先分成小分子, 再氧化成甲醛、甲酸基, 进而生成 CO, 最后 CO 和 H 氧化成

CO_2 和 H_2O ^[8-10]. 罗马吉等^[9]利用 EGR 研究 DME 的 HCCI 着火过程, 证实了 EGR 对 HCCI 燃烧既有(内部 EGR)高温促进作用, 也有(外部 EGR)抑制的作用, 还从化学反应动力学的角度, 应用单区燃烧模型和已建立的二甲醚化学反应机理, 对采用内部 EGR 技术控制的 DME 的 HCCI 着火过程进行了数值模拟, 分析了不同 R_{EGR} 对其着火过程的影响.

诸多研究表明, 二甲醚燃料结合不同比例的 R_{EGR} , 可以有效拓展 HCCI 发动机的工况范围. 然而, R_{EGR} 对二甲醚 HCCI 燃烧过程的影响细节并不清楚, 笔者利用化学反应动力学软件 CHEMKIN 对不同 R_{EGR} 和过量空气系数 λ 下的 DME 的 HCCI 燃烧进行了系统的数值模拟, 重点分析 R_{EGR} 和 λ 对二甲醚 HCCI 燃烧过程的影响.

1 模拟方法介绍及参数选取

模拟采用气缸压缩比为 16.5, 容积 103.3 cm³, 使燃烧更接近实际情况, 转速设置为 1 600 r/min, 进气压力 1.079 MPa, 进气温度 400 K.

(1)过量空气系数 λ : 是实际进气量与 DME 恰好反应完全所需进气量的比值. 笔者所取的过量空气系数分别为 1、3、6、9.

(2)废气再循环率 R_{EGR} : 是指利用废气再循

收稿日期:2017-03-20; 修订日期:2017-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51506010); 中国博士后基金项目(2014M552439)

通信作者:陈朝阳(1982—), 女, 陕西富平人, 长安大学副教授, 博士, 主要研究方向为代用燃料燃烧学, E-mail: zhy-chen@chd.edu.cn.

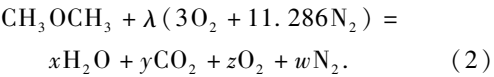
环技术后,引入废气的物质的量占混合气与引入废气的总物质的量的百分比,由如下公式计算:

$$R_{\text{EGR}} = \frac{n_{\text{废气}}}{n_{\text{混合气}} + n_{\text{废气}}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: $n_{\text{废气}}$ 为进入气缸的废气的物质的量; $n_{\text{混合气}}$ 为进入气缸的新鲜混合气的物质的量.

笔者采用外部 EGR, R_{EGR} 取值分别为 0%、10%、20%、30%、40%.

(3)数据的计算:废气成分比较复杂,若对含量较多的废气成分研究,一般只考虑 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O 4 种成分. 那么不同 λ 对燃料在缸内的化学反应就可以简化为以下公式:



设引入缸内的废气占燃烧产生的总废气量的百分比数为 α , 利用废气再循环技术后,缸内的 R_{EGR} 表示为:

$$R_{\text{EGR}} = \frac{\alpha(x + y + z + w)}{1 + (3 + 11.286)\lambda + \alpha(x + y + z + w)} \times 100\%. \quad (3)$$

在预设的不同 R_{EGR} 和 λ 下,即可利用公式求出废气的引入系数 α ,从而确定该条件下废气中 4 种气体、二甲醚及空气中的 O_2 、 N_2 的摩尔比值,就可以将数据录入 CHENMKIN 的前处理器,并基于包含 55 种组分,290 种基元反应的 DME 化学反应机理^[11],利用软件中的发动机绝热反应模块进行模拟.

2 分析与讨论

2.1 废气再循环率对 DME 燃烧的影响

DME 的 HCCI 燃烧从开始放热可以分成 3 个区域,第一是低温放热反应区,DME 的低温氧化反应是链传播过程,链传递的载体是羟基自由基,产生重要的中间产物甲醛和甲酸,放出少量的热量;第二是负温度系数区,上一阶段生成的大量活性很低的甲醛在这一区域内积累,抑制了链传播,DME 氧化反应速率降低,所以几乎无热量放出;第三是高温反应区,主要是低温氧化阶段产物的氧化,是 CO 的氧化放热阶段,放出的热量在整个燃料的燃烧阶段占有较大的比例^[3].

图 1 和图 2 分别给出的是模拟计算得到的过量空气系数为 3 时,不同 R_{EGR} 下发动机缸内温度和压力随曲轴转角的变化曲线. 由图 1 和图 2 可知,随着 R_{EGR} 增大,气缸内的最高压力、最高温度

都有所下降. 笔者采用外部 EGR,因此不考虑废气的加热作用,EGR 主要通过其稀释作用、吸热作用和化学作用影响 DME 的燃烧和放热. 首先,废气占有一定的发动机容积,使进入缸内的新鲜混合气量减少,使得燃料燃烧放热量减少;另一方面,废气主要成分中的 CO_2 和 H_2O 为三原子气体,比热容大,引入 EGR 后增加了混合气的比热容,使混合气的吸热作用增加,最终燃烧压力和温度降低;再则, CO_2 和 H_2O 在高温下会发生分解反应,进而影响混合气的化学反应进程. 三者的综合作用使二甲醚的燃烧受到一定程度抑制,缸内燃烧剧烈程度和反应速度降低,但同时也能减轻发动机工作粗暴的问题. EGR 是减轻 HCCI 发动机爆震燃烧的有效措施之一.

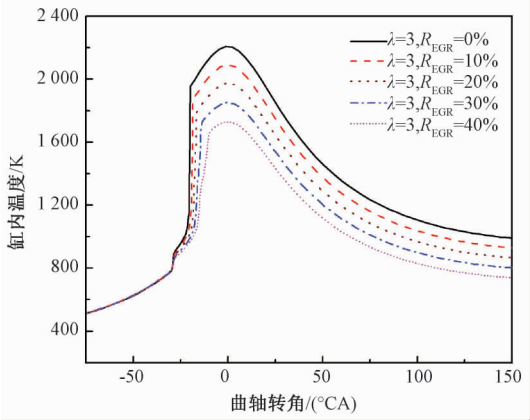


图 1 不同 R_{EGR} 下的发动机缸内温度
Fig.1 The engine temperature in cylinder with different EGR rate

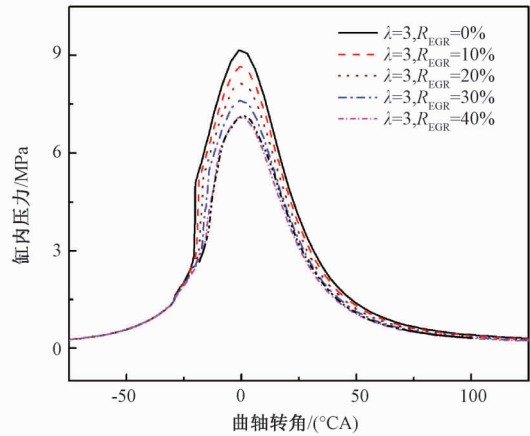


图 2 不同 R_{EGR} 下的发动机缸内压力
Fig.2 The engine pressure in cylinder with different EGR rate

图 3 为不同 R_{EGR} 下的放热率曲线,如图 3 所示,随 R_{EGR} 增加,放热率峰值降低,亦是受到 EGR 的抑制作用,且高温阶段呈现双峰放热,第一个峰

是中间产物生成 CO 的放热量,第二个是 CO 被氧化成 CO₂ 的放热量.

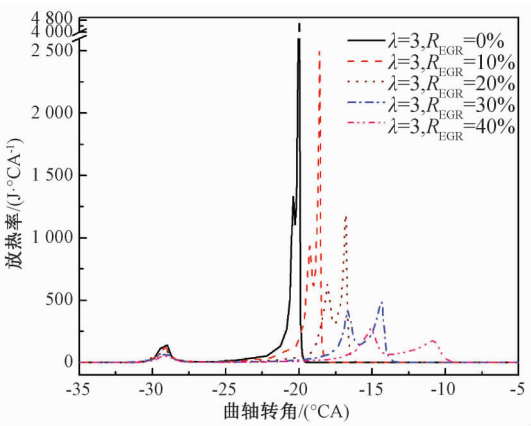


图3 不同 R_{EGR} 下发动机的放热率

Fig.3 The engine with different EGR rate of heat release rate

在低温放热阶段,开始放热的位置是在 -29.5°CA 曲轴转角处,几乎不随 R_{EGR} 的增大而变化,这是由于压缩到 -29.5°CA 左右时,缸内温度达到 $750\sim 800\text{ K}$,低温放热阶段开始,二甲醚被氧化成甲醛和甲酸基等中间产物放出少量的热量.而负温度系数区 and 高温反应区持续期随 R_{EGR} 的增大而变长.这是因为增大 R_{EGR} ,提高了混合气的热容,压缩过程中缸内温度降低,且废气对燃料的稀释作用增大,使燃料的反应速度减慢,持续期增长.

如图4是模拟过量空气系数为3时,不同 R_{EGR} 下 CO 的摩尔百分数变化曲线.在曲轴转角为 -29.5°CA 的低温反应区开始生成少量 CO.因为此阶段产生的甲醛和甲酸基等中间产物也会同时生成少量的 CO.在负温度系数区 CO 变化曲线斜率接近为0,这是由于 EGR 和中间产物甲醛的抑制作用,使 CO 的生成受到抑制,且 R_{EGR} 越大抑制越强持续期越长.高温反应阶段有大量的 CO 产生并完全消耗,此过程是经历了甲醛等生成 CO 的蓝焰反应和 CO 被氧化成 CO₂ 的热焰反应.随着 R_{EGR} 的增大,CO 从生成到消耗的持续时间增长,这是由于着火持续期增长,CO 的生成和消耗时间增长.

2.2 过量空气系数对 DME 燃烧的影响

图5和图6分别给出的是 R_{EGR} 为0.2时,不同 λ 下的缸内温度、压力曲线.由图可知,缸内压力和温度峰值随过量空气系数的增大而降低,且压力和温度曲线的变化率也逐渐减小.这是因为 λ 增加,参加反应的燃料量相对减小,燃烧剧烈程

度减小,燃烧放出的热量减少.

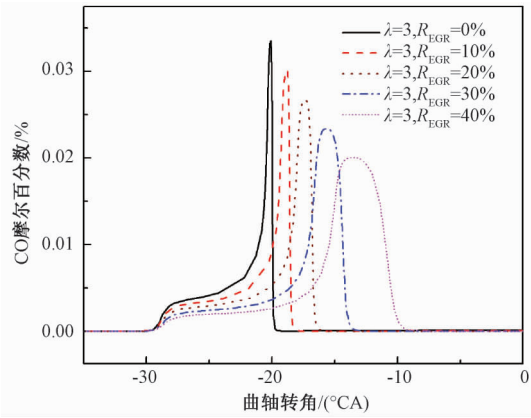


图4 不同 R_{EGR} 下发动机燃烧过程中 CO 的摩尔百分数变化曲线

Fig.4 The engine combustion process with different EGR rate curves of the mole fraction CO

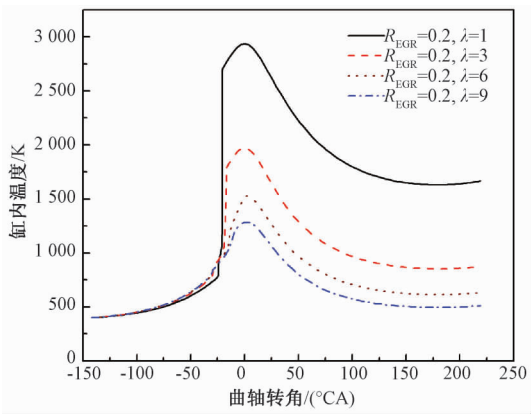


图5 不同 λ 下的发动机缸内温度

Fig.5 The engine temperature in cylinder with different λ

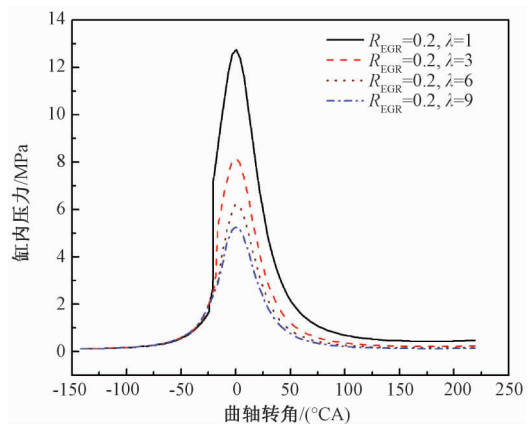


图6 不同 λ 下的发动机缸内压力

Fig.6 The engine pressure in cylinder with different λ

图7所示的是 R_{EGR} 为0.2,不同 λ 下 DME 燃料发动机 HCCI 燃烧模式的放热率曲线.由图7可以看出,随着 λ 的增大,放热率峰值急剧下降,

这与缸内压力和温度峰值的下降一致,都是由于 λ 的增大减少了缸内的燃料量所致.放热率的两个峰值位置随 λ 的变化呈现不同的规律.随着 λ 的增大,低温放热阶段提前,而高温放热阶段滞后.这是由于随着 λ 的增大,混合气的比热容减小,压缩阶段温度升高幅度增大,因此,大的 λ 的混合气先达到低温反应温度限值,使低温反应阶段提前;然而,大的 λ 使得混合气中燃料量减少,低温燃烧放热阶段放热量减小,前期温度积累减小,使得高温主反应阶段滞后,过多的空气量也使得高温反应阶段反应剧烈程度减小,放热率峰值下降.

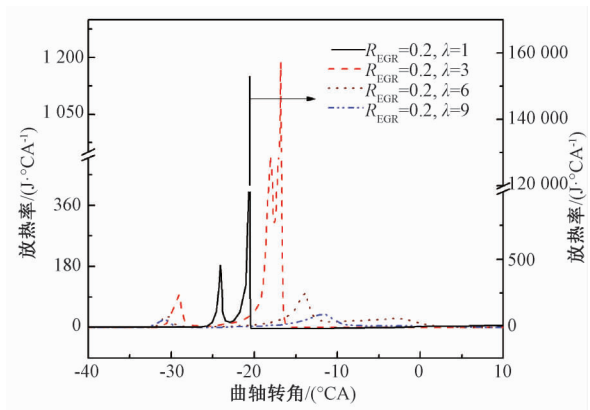


图 7 不同 λ 下发动机的放热率

Fig.7 The engine with different λ of heat release rate

图 8 所示的是 R_{EGR} 为 0.2,不同 λ 下的 CO 摩尔百分数变化曲线.由图 8 可知, $\lambda = 1$ 时,CO 摩尔百分数表现出两个峰值,先在较短时间内急剧增大后降低,再缓慢上升最终消耗完全,这是因为当 $\lambda = 1$ 时,缸内温度较高,氧气以当量供给,燃

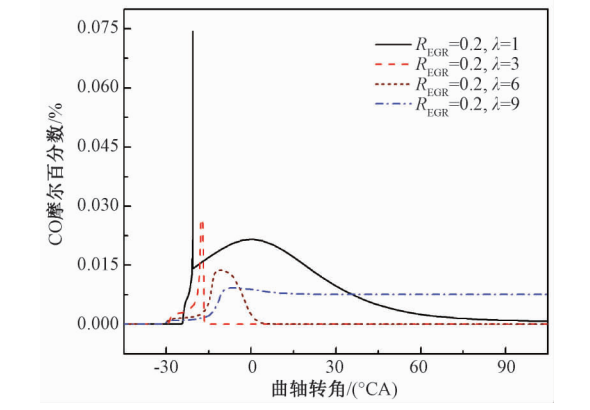


图 8 不同 λ 下发动机燃烧过程中 CO 的摩尔分数变化曲线

Fig.8 The engine combustion process with different λ curves of the mole fraction CO

烧初期,氧气相对充足,生成的 CO 很快氧化成 CO_2 ,而之后受到了 O_2 浓度的限制,CO 的蓝焰反应速率高于热焰反应,摩尔百分数稍有增加,最终 CO 基本完全被氧化.当 λ 大于 3 时,在低温反应阶段,有少量 CO 生成,负温度系数区 CO 摩尔百分数保持不变.在高温反应阶段有大量 CO 生成并消耗,变化趋势逐渐减小.因为随着 λ 增大, O_2 浓度增加,氧化改善,CO 几乎完全氧化成 CO_2 , λ 增大,缸内温度降低,使 CO 的反应速率降低. $\lambda = 9$ 时,CO 又出现剩余,这是因为 λ 过大,缸内温度较低,CO 的氧化受到抑制.

3 结论

(1)外部 EGR 能改变 DME 的 HCCI 燃烧,随着 R_{EGR} 的增大,缸内的压力、压力升高率、温度及放热率都有所降低;对应的二甲醚低温反应阶段的燃烧相位几乎不变,负温度系数区持续时间增长,高温反应阶段的燃烧相位推迟,燃烧持续期增长.

(2)随着过量空气系数的增加,缸内压力、温度以及放热率峰值降低,低温氧化放热提前,而高温放热阶段和燃烧持续期增长.

因此可以通过改变 R_{EGR} 和 λ 来对 DME 的 HCCI 燃烧进行控制.

参考文献:

[1] 亢银虎.二甲醚火焰燃烧特性及工程应用的研究[D].重庆:重庆大学动力工程学院,2015:4-18.

[2] 廖水容.二甲醚柴油缸内温度场数值模拟的研究[J].郑州大学学报(工学版),2010,31(1):111-115.

[3] 徐凯.二甲醚发动机 HCCI 燃烧与排放研究[D].四川:西华大学交通与汽车工程学院,2010:6-30.

[4] 罗马吉,陈志,黄震,等. EGR 对二甲醚 HCCI 着火过程的数值模拟研究[J].汽车工程,2005,27(4):399-403.

[5] 吴晗,张春化,佟娟娟,等.外部 EGR 甲醇 HCCI 发动机燃烧特性试验[J].甘肃农业大学学报,2013,48(2):114-118.

[6] HASAN M M, RAHMAN M M. Homogeneous charge compression ignition combustion: advantages over compression ignition combustion, challenges and solutions[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 57: 282-291.

[7] 张志超.发动机燃烧新技术 HCCI[J].技术新视野,2015(9):79-80.

[8] 罗马吉,黄震.二甲醚均质压燃燃烧化学反应动力学机理数值模拟[J].上海交通大学学报,2005,39(8):1266-1271.

[9] 罗马吉,黄震,彭小圣,等.二甲醚 HCCI 燃烧高温反应动力学分析[J].工程热物理学报,2006,27(1):155-158.

[10] PRINCE J C, WILLIAMS F A. A short reaction mechanism for the combustion of DME[J]. Combustion and flame, 2015, 162: 3589-3595.

[11] ZHAO Z W, CHAOS M, KAZAKOV A, et al. Thermal decomposition reaction and a comprehensive kinetic model of dimethyl ether[J]. International journal of chemical kinetics, 2007,40(1):1-18.

Effect of EGR on the Performance in Dimethyl Ether Fueled HCCI Engine

HUANG Jinyao¹, YAN Shilun¹, CHEN Zhaoyang^{1, 2}

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Combustion performance of DME fueled homogeneous charge compression ignition(HCCI) engine under different exhaust gas recirculation (EGR) rate and different coefficient of excess air (λ) was studied numerically by using the software CHEMKIN. Influences of EGR and λ on the combustion performance of DME HCCI engine were analyzed. The result showed that at a specific λ , the pressure, temperature and the heat release rate decreased with the increase of EGR rate and the high temperature reaction was delayed. With a specific EGR rate, the pressure, temperature and the heat released rate in cylinder decreased with the increase of λ . And the low temperature reaction advanced while the high temperature reaction delayed. It could be recognized that the ignition time of HCCI engine could be controlled by changing the EGR rate or λ .

Key words: dimethyl ether; EGR; HCCI; combustion performance; numerical simulation

(上接第 17 页)

Quantitative Study on the Representative Volume Element Size of Concrete Strength under Uniaxial Loading

WANG Juan¹, WANG Huijuan², XU Yaoqun¹, WU Xiaopeng¹

(1. School of Water Conservancy and Environment Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Xinlian College of Henan Normal University, Zhengzhou 45000, China)

Abstract: Based on meso-numerical simulation technology, a new method was developed for the determination of the RVE (representative volume element) size of concrete. The uniaxial tensile and compressive strength of concrete specimens with various RVE size were calculated by means of the interfacial spring element model. Then the RVE size was determined quantitatively by analyzing the discreteness of concrete strength and the increase trend of concrete strength. Results showed that the RVE size for concrete uniaxial tensile and compressive strength were 5 times and 6.5 times of maximum aggregate diameter of concrete respectively, which were close to the RVE sizes for concrete micro-structure. This study could enrich the numerical methods for strength analysis of concrete and lay a foundation for multi-scale analysis of concrete.

Key words: concrete; representative volume element; strength; meso-scale; quantitative study