

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.004

## 二甲醚/甲醇混合燃料 HCCI 燃烧特性数值模拟

王鑫, 谈岭, 陈朝阳  
(长安大学汽车学院, 西安 710064)

**摘要:** 为了研究混合气浓度及燃料掺混对二甲醚/甲醇混合燃料 HCCI (homogeneous charge compression ignition) 燃烧特性的影响, 对不同过量空气系数和二甲醚掺混比下的醇醚混合燃料 HCCI 燃烧过程进行了模拟计算, 分析了缸内温度、压力、压力升高率、放热率和燃料消耗路径随过量空气系数和二甲醚掺混比的变化关系。结果表明, 随过量空气系数增大, 缸内压力、温度、放热率和压力升高率峰值减小, 相位推迟, 过量空气系数太大时, CO 的进一步氧化反应会受到阻碍, 使缸内产生大量的 CO 残留; 随二甲醚掺混比的增大, 缸内压力、温度峰值增大, 相位提前, 压力升高率和放热率峰值减小; 二甲醚 HCCI 燃烧放热率曲线存在 3 个峰值, 第 1 个峰值出现上止点前曲轴转角  $30^\circ$ , 为二甲醚低温氧化放热, 对应缸内温度为 804 K, 第 2 个峰值出现在上止点前曲轴转角  $15^\circ$ , 对应缸内温度为 1 193 K, 为甲醛等中间产物氧化生成 CO 时放热, 第 3 个峰值为 CO 氧化, 生成  $\text{CO}_2$  时放热, 第 2 和第 3 个放热率峰值为二甲醚的高温氧化放热阶段, 与甲醇掺混燃烧时, 二甲醚的低温氧化反应对混合气的燃烧起到了促进作用。

**关键词:** 内燃机; 数值模拟; 二甲醚; 甲醇; 均质混合压燃

中图分类号: TK421.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)01-001-08

## Simulation study on HCCI combustion of DME/methanol fueled engine

WANG Xin, TAN Ling, CHEN Zhaoyang

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China)

**Abstract:** To determine the effects of mixture concentration and fuel blending on the combustion performance of a dimethyl ether/methanol fueled HCCI engine, the combustion process under different excess air coefficients and dimethyl ether addition ratios was simulated. Parameters such as temperature, pressure, pressure rise rate and the heat release rate were examined, as well as the fuel consumption path. The results show that the peak values of the pressure, temperature, heat release rate and pressure rise rate decrease with the increase of the excess air coefficient, while the phases are delayed. Excessive excess air coefficient hinders the further oxidation reaction of CO, resulting in high CO residue. On the other hand, increasing the dimethyl ether (DME) addition ratio leads to higher peak values of pressure and temperature in the cylinder, advancing their phases, while the peak values of pressure rise rate and heat release rate decrease. The combustion heat release rate curve of dimethyl ether

收稿日期: 2021-12-03 网络出版日期: 2022-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51506010); 陕西省自然科学基金资助项目(2020JM-243); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102229202)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51506010), Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JM-243) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102229202).

作者简介: 王鑫(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事代用燃料燃烧特性研究, (E-mail) 786346946@qq.com。

通信作者: 陈朝阳, 女, 副教授, 博士, (E-mail) zhychen@chd.edu.cn。

homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion exhibits three peaks. The first peak, occurring at a crank angle of  $30^\circ$  before topdead center (BTDC) with a temperature of 804 K, corresponds to the low-temperature-oxidation heat release of dimethyl ether. The second peak, appearing at a crank angle of  $15^\circ$  BTDC with a temperature of 1 193 K, corresponds to the heat release from reactions forming CO through formaldehyde and other intermediates. The third peak represents the heat release from CO oxidation when  $\text{CO}_2$  is generated. The second and third exothermic rate peaks indicate the high-temperature oxidation exothermic stage of dimethyl ether. Additionally, when mixed with methanol, the low-temperature oxidation reaction of dimethyl ether promotes the combustion of the mixture.

**Keywords:** internal combustion engine; simulation; dimethyl ether (DME); methanol; homogeneous charge compression ignition (HCCI)

随着化石能源短缺和环境污染问题的日益突出,寻找新型可替代燃料,探索清洁高效燃烧方式成为内燃机工作者所面临的最紧迫任务之一。低温燃烧发动机因其高的热效率和优良的排放性能成了研究热点。均质充量压缩着火(homogeneous charge compression ignition, HCCI)是一种低温燃烧<sup>[1-3]</sup>,其主要特点是工质在缸内均匀分布,并几乎同时压缩着火燃烧,压缩比不受爆震限制,热效率可得到大幅度提高,同时采用稀薄混合气均质压燃,燃烧温度较低,又有效抑制了碳烟和 $\text{NO}_x$ 的生成<sup>[4-6]</sup>。均质混合气压燃烧的缺点是存在着火时刻和燃烧放热过程难以控制的问题<sup>[7-8]</sup>。

已有研究表明,着火性能差异较大的2种燃料掺混燃烧是实现均质混合压燃着火和燃烧控制的有效方法<sup>[9-10]</sup>。二甲醚(dimethyl ether, DME)和甲醇是近年来备受关注的洁净替代燃料,其着火性能迥异,两者以一定比例掺混有望解决HCCI发动机着火和燃烧控制问题。郑尊清等<sup>[11]</sup>对二甲醚/甲醇混合燃料HCCI发动机的燃烧和排放特性进行了试验研究,发现在二甲醚中添加适量甲醇可以拓宽HCCI发动机运行范围。Lee等<sup>[12]</sup>对二甲醚-甲醇的HCCI燃烧特性进行了计算研究,发现在二甲醚中添加甲醇,放热率峰值和压力升高率都会增加,这一定程度增加了发动机的爆震倾向。Taghavifar等<sup>[13]</sup>对HCCI发动机中多组分柴油-二甲醚/甲醇共混物的燃烧进行了分析,结果表明混合气中二甲醚浓度增大会增加滞燃期并提高放热率。Zhou等<sup>[14]</sup>对不同过量空气系数下的HCCI柴油机燃烧特性进行了研究,发现混合气浓度对正丁醇HCCI缸内峰值压力、着火时刻和燃烧持续期等有显著影响。

均质混合压燃的着火过程完全受化学反应动力学控制,要实现HCCI发动机的着火和燃烧控制,对燃料的化学反应动力学机理进行深入了解显得非常重要。研究中明确燃料掺混对二甲醚/甲醇混合燃料HCCI着火和燃烧过程的影响细节,对不同二甲醚掺混比及过量空气系数条件下二甲醚/甲醇混合燃料HCCI燃烧过程进行了模拟计算,对比了不同初始条件下的缸内压力、温度、放热率等随曲轴转角的变化关系,并从化学反应动力学角度对其结果进行了分析。研究结果可为进一步了解影响二甲醚/甲醇HCCI燃烧控制的因素,实现HCCI发动机着火时刻的精准控制提供理论基础和技术支持。

## 1 模拟方法及参数选取

燃烧模拟采用零维均质模型,为了简化问题,忽略传热损失,采取绝热边界处理方法,基于Kaiser等<sup>[15]</sup>发展的二甲醚化学反应机理和热力学数据包,采用CHEMKIN II化学反应动力学模拟软件的IC-ENGINE模块进行模型求解,输入发动机参数包括发动机转速、初始曲轴转角、初始温度、压缩比、计算初始压力和连杆曲轴半径比等,配置不同过量空气系数和掺混比下的混合气进行计算,利用Origin软件对计算结果进行处理,分析了混合气浓度和燃料掺混比对HCCI燃烧特性的影响规律,同时基于生成速率(rate of production, ROP)分析法对燃料的反应路径进行了分析。主要模拟参数如表1所示。

表 1 主要模拟计算参数

Table 1 The main simulation calculation parameters

转速/( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	初始曲轴转角/( $^{\circ}$ )	初始温度/K	压缩比	进气压力/MPa
1 200	-142	398	16.5	1.065
连杆与曲柄半径之比	计算时长/s	$\varphi_{\text{DME}}/\%$	过量空气系数 $\lambda$	
3.714 286	0.043	0,20,40,60,80,100	1,3,6,8,10	

注: $\varphi_{\text{DME}}$ 为二甲醚/甲醇混合燃料中二甲醚的体积分数,即 $\varphi_{\text{DME}}=V_{\text{DME}}/(V_{\text{DME}}+V_{\text{甲醇}})$ 。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 过量空气系数的影响

图 1 是  $\varphi_{\text{DME}}=60\%$  时,不同过量空气系数下的缸内温度、压力和压力升高率随曲轴转角的变化规律。由图可以看出,过量空气系数较小( $\lambda=1, \lambda=3$ )时,混合燃料 HCCI 燃烧的缸内温度较高,压力和压力升高率也较大,对应着发动机较大的机械负荷和噪声,以及较高的  $\text{NO}_x$  排放;随着过量空气系数的增大,缸内温度、压力和压力升高率均逐渐下降,峰值相位也逐渐推迟,说明随过量空气系数增大,混合燃料 HCCI 燃烧过程变得柔和,爆震倾向减弱,但过量空气系数太大时,燃烧温度和压力太低,又会影响燃料燃烧放热过程的进行,从而使发动机经济性受到影响。

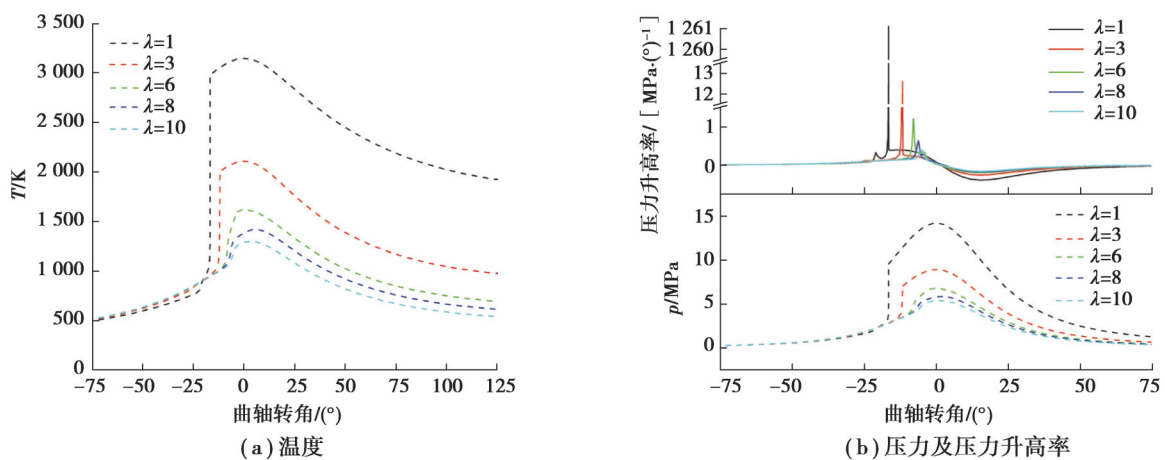


图 1 不同过量空气系数下的缸内温度、压力和压力升高率

Fig. 1 Temperature, pressure and pressure rise rate in the cylinder under different excess air coefficients

图 2 是  $\varphi_{\text{DME}}=60\%$  时,不同过量空气系数下的混合燃料 HCCI 燃烧放热率曲线和 CO 物质的量分数变化曲线。由图 2(a)可以看出,随过量空气系数的增加,放热率峰值逐渐减小,主放热阶段对应曲轴转角后移,着火延迟期增大,放热持续曲轴转角增大,这是由于混合气较稀,达到着火的条件要求较苛刻,燃烧速度降低,持续期增加,从而导致单位曲轴转角放热量减少,放热推迟。

图 2(b)是不同过量空气系数条件下混合燃料 HCCI 燃烧的 CO 物质的量分数变化曲线。由图可以看出,当过量空气系数  $\lambda=1$  时,CO 物质的量分数存在 2 个峰值,先在短时间内快速增大后急剧下降,之后缓慢上升后再缓慢下降。这是因为当量燃烧时,缸内温度较高,燃烧初期氧气又相对充足,生成的 CO 很快被氧化消耗,之后随着反应进行,混合气中氧含量下降,反应条件变差,CO 的生成速率高于继续氧化消耗反应速度,物质的量分数稍有增加后再缓慢降低,最终达到化学平衡,维持一个较小的数值不变(0.1%);过量空气系数  $\lambda=3$  和  $\lambda=6$  时,混合气中氧气充足,燃烧温度也较高,使 CO 的氧化过程更为彻底,反应终了时,混合气中 CO 物质的量分数接近于 0;  $\lambda=8$  时,CO 的物质的量分数与较小过量空气系数时相比,峰值进一步降低,峰值相位进一步推迟,且在燃烧终了时维持一较小值不变(0.16%);而  $\lambda=10$  时,CO 物质的量分数峰值进一步降低,相位进

一步推迟,且在燃烧后期产生了较大量的CO残余(物质的量分数为0.74%)。

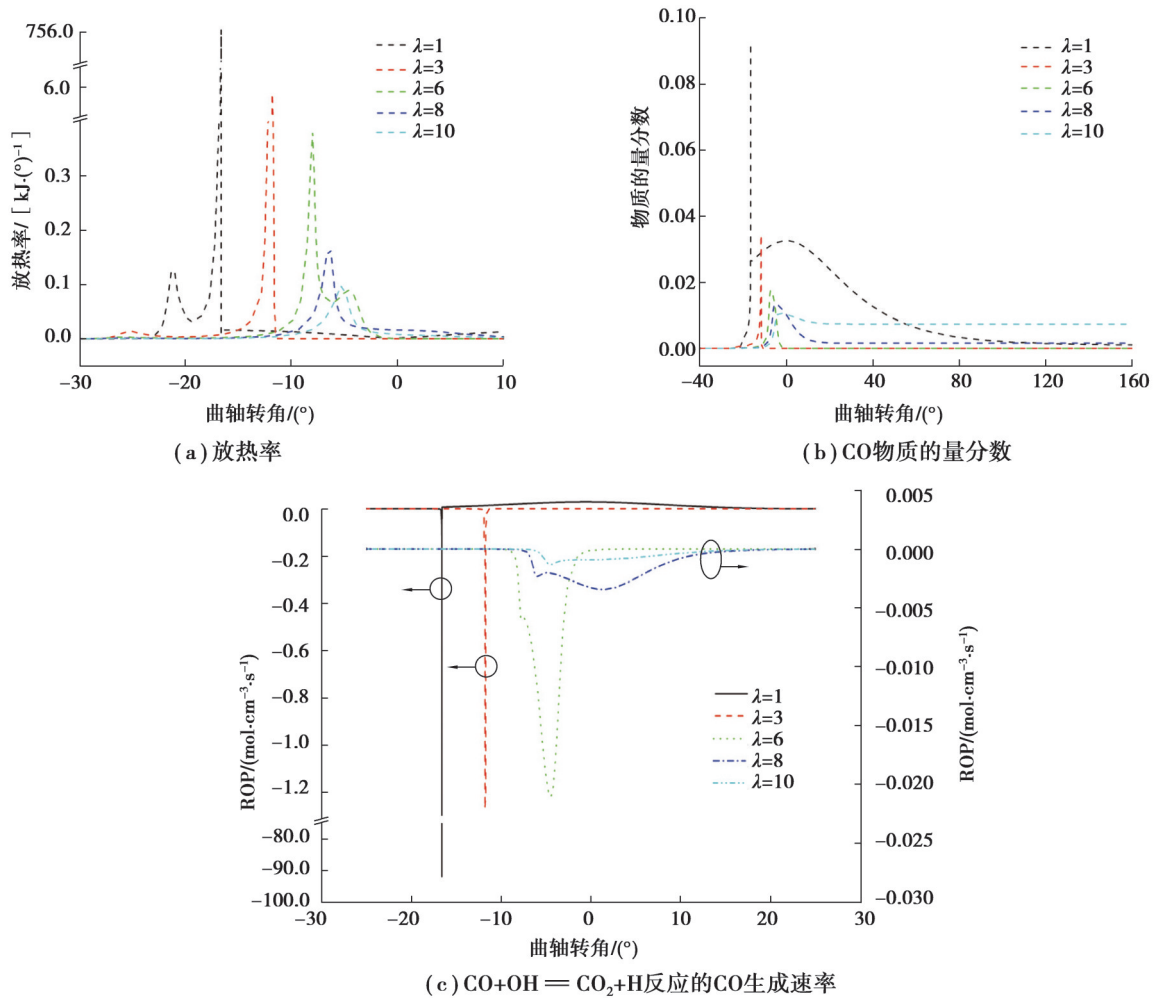


图2 不同过量空气系数下的放热率、CO物质的量分数和CO生成速率

Fig. 2 Variation of heat release rate, CO mole fraction and ROP of CO under different excess air coefficients

根据碳氢燃料的燃烧特点,反应前期以生成CO为主,燃烧达到一定条件后,混合气中的CO通过反应 $\text{CO}+\text{OH}\rightarrow\text{CO}_2+\text{H}$ (R7)氧化消耗,最终生成 $\text{CO}_2$ 。R7反应是燃烧过程中的主要放热反应,其进行程度对发动机的燃烧效率有非常重要的影响。R7反应的先导反应 $\text{H}_2\text{O}_2+\text{M}\rightarrow\text{OH}+\text{OH}+\text{M}$ 是一个活化能较高的吸热反应,达到一定的临界温度(1 200 K)后才能快速进行,因此,CO向 $\text{CO}_2$ 的转化反应对混合气温度有强烈的依赖关系。图2(c)给出了不同过量空气系数条件下R7反应相关的CO生成速率。 $\lambda=1$ 时,燃烧前期,CO的生成速率有很大的负值,而在燃烧后期,CO生成速率在呈现一较小的正值后逐渐减小为0,这是因为在燃烧后期,随着混合气中氧化剂物质的量分数的降低和 $\text{CO}_2$ 物质的量分数的升高,R7反应速率减小,其逆反应速率增大,最终达到化学平衡时,CO物质的量分数维持一较小的数值;随着过量空气系数增大,燃烧温度降低,R7反应速率降低;当 $\lambda=8$ 时和 $\lambda=10$ 时,因为混合气太稀使缸内温度过低,R7反应速率大幅度减小,当缸内温度降低至1 200 K以下时,CO的氧化过程因激冷效应受到阻碍,导致缸内产生一定量的CO的残留。 $\lambda=10$ 时,缸内最高温度较低( $T_{\text{max}}=1\ 300\ \text{K}$ ),混合气在高温下停留的时间极短,R7反应速率很小,最终在缸内产生了大量的CO残余。

## 2.2 二甲醚掺混比的影响

图3为过量空气系数 $\lambda=6$ 时,不同二甲醚掺混比下的缸内温度、压力及压力升高率随曲轴转角的变化曲线。由图可以看出,随二甲醚掺混比的增大,缸内温度和压力逐渐增大,压力和温度开始偏离压缩线的相位逐渐提前,说明随着二甲醚掺混比的增大,混合燃料HCCI着火时刻有所提前;随二甲醚掺混比的增大,压力

升高率峰值逐渐减小,峰值相位提前,说明二甲醚掺混有利于降低HCCI燃烧过程的震动和噪声;二甲醚掺混比例较小时( $\varphi_{\text{DME}}=20\%$ , $\varphi_{\text{DME}}=40\%$ ),混合燃料HCCI燃烧的缸内温度、压力和压力升高率曲线表现出与纯甲醇燃料相似的变化规律,掺混比较大时( $\varphi_{\text{DME}}=60\%$ , $\varphi_{\text{DME}}=80\%$ ),3组曲线表现出与纯二甲醚燃料相似的变化规律,压力和温度曲线上出现2段凸起,压力升高率曲线在最大峰值前出现明显的小峰值,这主要由于二甲醚的低温放热引起。

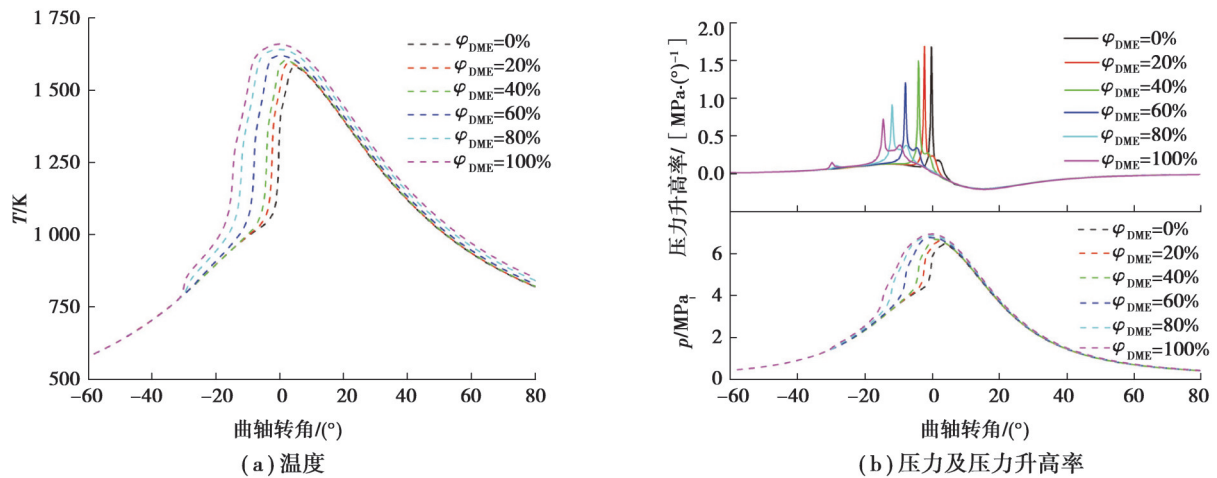


图 3 不同掺混比下的燃烧温度、压力和压力升高率

Fig. 3 Temperature, pressure and pressure rise rate in the cylinder under different blending ratios

图 4 所示为过量空气系数 $\lambda=6$ 时,不同二甲醚掺混比下混合燃料HCCI燃烧的放热率曲线。由图可以看出,随二甲醚掺混比的增大,放热率峰值逐渐减小,相位提前,放热持续期增大,说明随二甲醚掺混比的增大,混合燃料的着火时刻显著提前;纯甲醇和较小二甲醚掺混比( $\varphi_{\text{DME}}=20\%$ , $\varphi_{\text{DME}}=40\%$ )混合燃料燃烧时,放热率曲线均只有 2 个峰值,而纯二甲醚和较高二甲醚掺混比( $\varphi_{\text{DME}}=60\%$ , $\varphi_{\text{DME}}=80\%$ )混合燃料燃烧时,放热率曲线上出现 3 个峰值,其中第 1 个峰值对应二甲醚的低温放热过程,这也促使纯二甲醚及较大掺混比混合燃料燃烧时压力和温度曲线上产生第一个凸起。

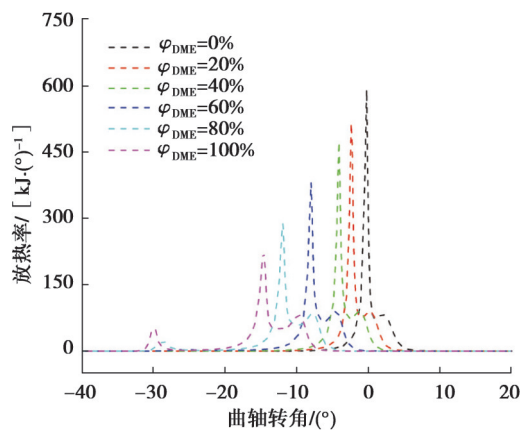


图 4 不同掺混比下放热率变化

Fig. 4 Heat release rate under different blending ratios

### 2.3 反应路径及放热率曲线分析

发动机的燃烧和排放特性与燃料的氧化分解过程密切相关,放热率曲线形状可直接反映混合气在缸内的燃烧放热过程。图 5 为混合燃料 HCCI 燃烧时的放热率曲线,以及重要中间物种的物质的量分数曲线。图中可见,对于纯二甲醚燃烧,在上止点前曲轴转角 $30^\circ$ ,放热率曲线出现第 1 个峰值,在上止点前曲轴转角

15°, 出现第2个峰值, 随后出现第3个峰值。二甲醚燃烧过程存在3个阶段的放热, 结合图中甲醛和CO的物质的量分数变化曲线发现, 放热率曲线上的第1个峰值与混合气中甲醛的物质的量分数增长峰值相对应, 说明第1阶段放热以甲醛的生成为主; 第2个峰值与甲醛的物质的量分数减小峰值与CO的物质的量分数增长峰值相对应, 说明在第2个放热阶段中, 甲醛等中间产物逐渐被氧化, 生成CO; 第3个峰值与CO的物质的量分数减小峰值相对应, 说明第3个放热阶段中CO被进一步氧化成CO<sub>2</sub>。掺混比为60%时, 放热率曲线上没有明显的低温放热峰值, 物种物质的量分数变化曲线上也没有甲醛物质的量分数的明显增大, 但较高温时的甲醛物质的量分数减小和CO物质的量分数增大, 以及CO物质的量分数减小峰值仍然分别对应高温氧化阶段的2个放热率峰值。

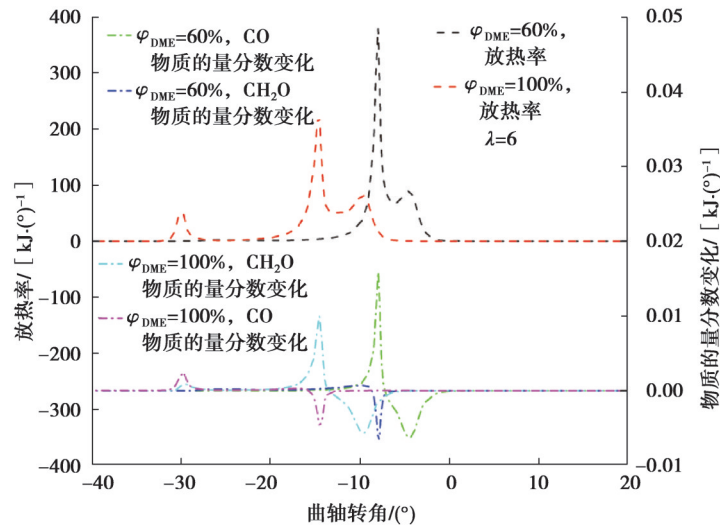


图5 放热率、CO和甲醛物质的量分数

Fig. 5 Heat release rate, and mole fractions of CO and CH<sub>2</sub>O

为了进一步探究二甲醚多阶段氧化过程的具体细节, 利用生成速率分析的方法对二甲醚混合气HCCI燃烧过程中二甲醚的消耗路径进行了分析, 图6为二甲醚及其燃烧过程重要中间物种的主要生成速率曲线。由图可以看出, 二甲醚的消耗速率曲线上有2个峰值, 分别出现在上止点前曲轴转角30°和上止点前曲轴转角15°, 这2个峰值与放热率曲线上的第1个和第2个峰值相位吻合, 对应二甲醚的低温和高温氧化过程, 此时缸内温度分别为804 K和1 193 K。

图7分别给出了过量空气系数 $\lambda=6$ 时, 二甲醚在低温和高温条件下的反应路径, 可以看出, 在该工况下二甲醚的低温和高温氧化过程都起始于与OH的脱氢反应, 且都经历了甲醛路线, 后经甲醛的连续脱氢反应, 生成CO, CO再被氧化为CO<sub>2</sub>。反应温度的不同促使二甲醚脱氢产物甲氧基甲基产生了不同的反应路径。低温条件下, 甲氧基甲基通过加氧、异构和分解, 生成甲醛, 如图7(a)所示; 高温条件下, 甲氧基甲基直接通过 $\beta$ 裂解, 生成甲醛, 如图7(b)所示。

图8为混合燃料中甲醇的反应路径。甲醇的氧化过程也主要起始于与OH的脱氢反应, 生成2种不同的脱氢产物, 这两者经过裂解或与氧气发生脱氢反应成甲醛, 甲醛再经连续脱氢生成CO, 最终生成CO<sub>2</sub>。

与高比例二甲醚掺混燃烧相比, 低比例二甲醚掺混燃烧时没有产生低温燃烧阶段的放热率峰值, 这主要是由于反应初期, OH自由基的物质的量分数较低, 而甲醇脱氢与DME的脱氢反应竞争OH, 导致二甲醚的低温反应受到阻碍, 因此, 纯甲醇和低比例二甲醚掺混燃烧时放热率曲线上只有2个峰值, 分别对应生成CO时放热和生成CO<sub>2</sub>时的放热, 符合高温单阶段燃烧特性。由此可以看出, 改变二甲醚掺混比可以改变二甲醚/甲醇混合燃料发动机HCCI的着火时刻, 从而实现对HCCI发动机的着火和燃烧控制, 闫妍等<sup>[16]</sup>对醇醚双燃料发动机均质压缩燃烧试验研究也得出了类似的结论。

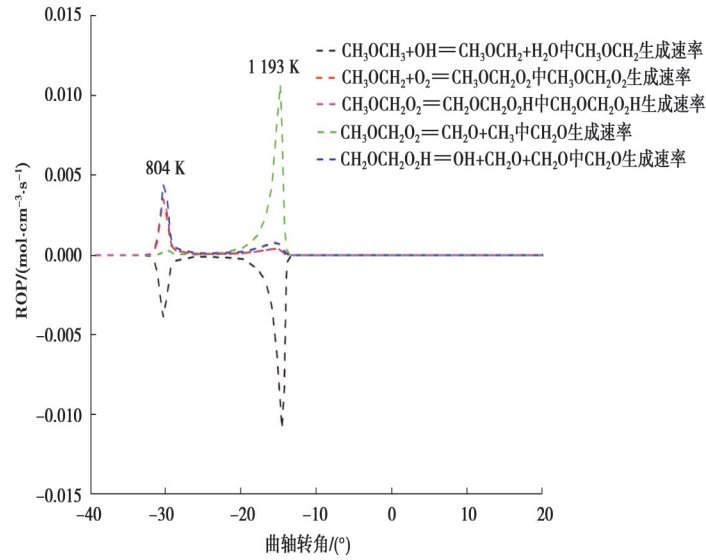
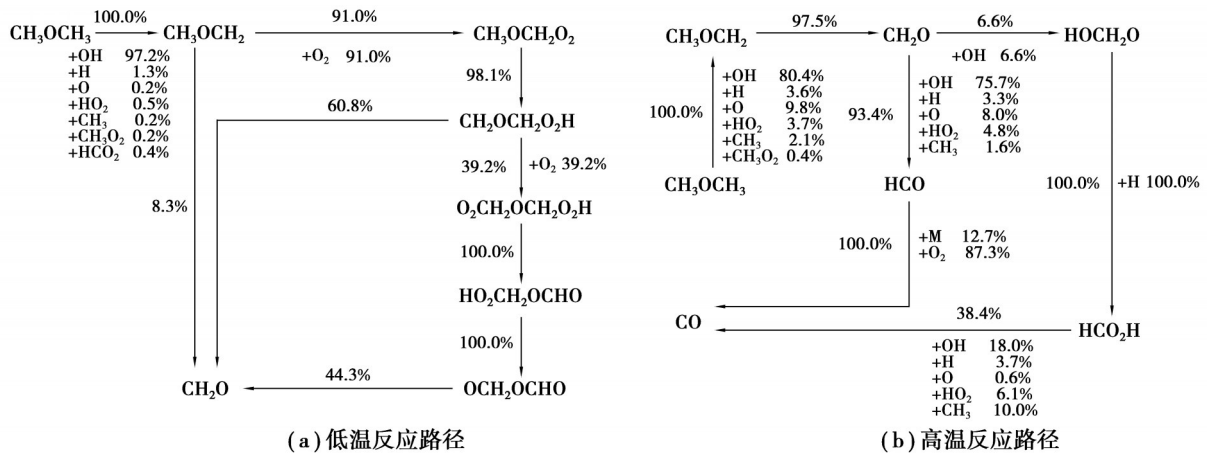


图 6 二甲醚及主要中间产物的生成速率

Fig. 6 ROP of dimethyl ether and main intermediate products



(a) 低温反应路径

(b) 高温反应路径

图 7 二甲醚化学反应路径

Fig. 7 Chemical reaction path on DME

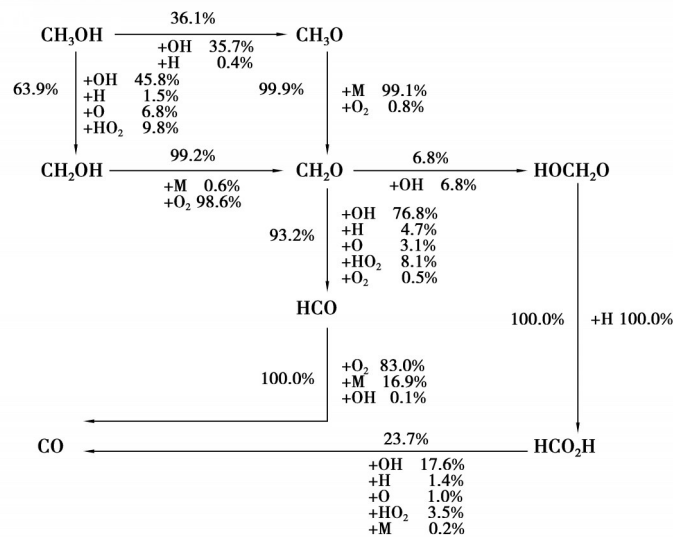


图 8 甲醇化学反应路径

Fig. 8 Chemical reaction path on methanol

### 3 结 论

1)随二甲醚掺混比增大,混合燃料HCCI燃烧的着火时刻提前,燃烧温度和压力峰值升高。通过改变二甲醚掺混比可以控制HCCI发动机的着火时刻。

2)二甲醚HCCI燃烧放热率曲线存在3个峰值,第1个峰值出现上止点前曲轴转角 $30^\circ$ ,为二甲醚低温氧化放热,对应缸内温度为804 K;第2个峰值出现在上止点前曲轴转角 $15^\circ$ ,对应缸内温度为1 193 K,为甲醛等中间产物氧化生成CO时放热;第3个峰值为CO氧化,生成 $\text{CO}_2$ 时放热,第2和第3个放热率峰值为二甲醚的高温氧化放热阶段,与甲醇掺混燃烧时,二甲醚的低温氧化反应对混合气的燃烧起到了促进作用。

3)随过量空气系数的增加,缸内压力和温度降低,放热率减小,相位推迟,过量空气系数较大时,由于缸内温度太低而使CO的进一步氧化受到阻碍,当 $\lambda=10$ 时,缸内产生了大量的CO残留,这将对发动机的经济性和排放性产生较大影响。

#### 参考文献

- [ 1 ] Wang Z S, Du G Z, Li Z J, et al. Study on the combustion characteristics of a high compression ratio HCCI engine fueled with natural gas[J]. Fuel, 2019, 255:115701.
- [ 2 ] Ali K, Kim C, Lee Y, et al. A numerical study to investigate the effect of syngas composition and compression ratio on the combustion and emission characteristics of a syngas-fueled HCCI engine[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2020, 142(9): 092301.
- [ 3 ] Calam A, İcingür Y. The effects of air fuel ratio and octane number on HCCI combustion and engine performance characteristics[J]. Politeknik Dergisi, 2019: 22(3):607-618.
- [ 4 ] Yousefi A, Birouk M. Fuel suitability for homogeneous charge compression ignition combustion[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 119:304-315.
- [ 5 ] Prasad A R, Bhandari R, Jagadish D. Experimental investigations of various modes of charging on HCCI engine[J]. Journal of KONES, 2019,26(1):119-126.
- [ 6 ] Niklawy W, Shahin M, Amin M I, et al. Performance of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine with common rail fuel injection[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 973(1):012038.
- [ 7 ] Hunicz J, Mikulski M, Koszałka G, et al. Detailed analysis of combustion stability in a spark-assisted compression ignition engine under nearly stoichiometric and heavy EGR conditions[J]. Applied Energy, 2020, 280: 115955.
- [ 8 ] Ezoji H, Shafaghat R, Jahanian O. Numerical simulation of dimethyl ether/natural gas blend fuel HCCI combustion to investigate the effects of operational parameters on combustion and emissions[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 135(3): 1775-1785.
- [ 9 ] Calam A, Aydoğan B, Halis S. The comparison of combustion, engine performance and emission characteristics of ethanol, methanol, fusel oil, butanol, isopropanol and naphtha with n-heptane blends on HCCI engine[J]. Fuel, 2020, 266: 117071.
- [ 10 ] Jang J, Yang K, Bae C. The effect of injection location of DME and LPG in a dual fuel HCCI engine[C]//SAE Technical Paper Series. United States: SAE International, 2009.
- [ 11 ] 郑尊清, 尧命发, 陈征, 等. 二甲醚/甲醇均质压燃性能和排放特性的试验研究[J]. 内燃机学报, 2005, 23(1): 32-36.  
Zheng Z Q, Yao M F, Chen Z, et al. Experimental study on performance and emissions characteristics of HCCI operation for DME/methanol dual fuel[J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(1): 32-36.(in Chinese)
- [ 12 ] Lee H, Lim O. A computational study of DME-methanol fractions with controlling several factors on HCCI combustion[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(4): 1931-1941.
- [ 13 ] Taghavifar H, Nematı A, Walther J H. Combustion and exergy analysis of multi-component diesel-DME-methanol blends in HCCI engine[J]. Energy, 2019, 187(15):115951.1-115951.12.
- [ 14 ] Zhou J W, Zhang C H, Li G, et al. Effects of  $\lambda$  on the combustion characteristics of HCCI engine fueled with N-butanol[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1092/1093: 508-511.
- [ 15 ] Kaiser E W, Wallington T J, Hurley M D, et al. Experimental and modeling study of premixed atmospheric-pressure dimethyl ether-air flames[J]. Journal of Physical Chemistry A, 2000, 104(35): 8194-8206.
- [ 16 ] 闫妍, 张煜盛, 余金平, 等. 醇醚双燃料均质压缩燃烧试验研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2014,43(1):64-68.  
Yan Y, Zhang Y S, She J P, et al. The experimental study on HCCI mode of diesel engine fueled with methanol/dimethyl ether [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2014,43(1):64-68.(in Chinese)

(编辑 詹燕平)