

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201807004

二甲醚/乙烷混合气低温着火延迟特性

柴俊霖¹, 田 瑞¹, 张红光², 石智成^{2,3}

(1.内蒙古工业大学 能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2.北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124;
3.北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要: 为了研究二甲醚/乙烷混合气在低温下的着火延迟特性,在快速压缩机实验台架上测量了二甲醚/乙烷混合气在上止点温度 627~912 K,上止点压力 16~30 bar,当量比 0.5~1 和乙烷掺混比 0~70 % 条件下的着火延迟期。同时,基于 CHEMKIN-PRO 软件进行了同等工况条件下的模拟计算。实验与模拟结果表明:二甲醚/乙烷混合气总着火延迟期呈现明显的负温度系数 (NTC) 现象,且在较低的上止点压力下 NTC 现象更加明显。上止点压力和当量比的增加使得第一阶段和总着火延迟期均呈现缩短趋势,尤其在 NTC 区间。乙烷的添加显著抑制了着火,混合气的第一阶段和总着火延迟期显著延长。化学动力学分析表明,乙烷竞争主要由二甲醚低温着火过程主导产生的 OH 自由基进而抑制二甲醚的低温氧化,而自身的着火过程得到促进甚至呈现两阶段特性。但是随着乙烷掺混比的增加,整体混合气的低温着火过程仍受到抑制,放热率和活性自由基累积量降低,因此着火延迟期延长。

关键词: 二甲醚; 乙烷; 着火延迟期; 快速压缩机

中图分类号: TK401

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)09-0171-07

Ignition delay characteristics of DME/C₂H₆ mixtures at low temperatures

CHAI Junlin¹, TIAN Rui¹, ZHANG Hongguang², SHI Zhicheng^{2,3}

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To investigate the ignition delay characteristics of dimethyl ether (DME)/ethane (C₂H₆) mixtures at low temperatures, the ignition delays were measured at compressed temperatures of 627 ~ 912 K, compressed pressures of 16 ~ 30 bar, equivalence ratios of 0.5 ~ 1 and C₂H₆ blending ratios of 0 ~ 70 % based on a rapid compression machine (RCM). Meanwhile, the simulation was conducted at the same conditions as those in experiments using CHEMKIN-PRO software. Both experimental and simulation results show that the total ignition delay exhibits obvious negative temperature coefficient (NTC) behavior, especially at lower compressed pressures. Increasing compressed pressure and equivalence ratio lead to decrease the first-stage and total ignition delays, especially at NTC region. C₂H₆ addition inhibits the ignition process significantly, thus prolongs the first-stage and total ignition delays. Chemistry kinetics analysis indicates that C₂H₆ competes for OH radicals predominately produced by the DME's low-temperature oxidation, thus the ignition process of DME is delayed while the ignition process of itself is promoted and even presents evident two-stage characteristic. With the increase of C₂H₆ blending ratio, the ignition process of whole mixtures is inhibited, the accumulation of heat release rate and active free radicals is decreased and the ignition delays are prolonged.

Keywords: dimethyl ether; ethane; ignition delay; rapid compression machine

严重的能源短缺和严格的排放法规促使人们寻找新的内燃机燃烧方式和代用燃料。作为新型燃烧方式代表的均质充量压燃 (HCCI) 与传统燃烧模式相比具有较高的热效率,同时其氮氧化物和碳烟排放更低^[1]。作为含氧类醚类燃料的二甲醚具有较高

的十六烷值,在低温下容易压燃,是柴油良好的代用燃料。同时,由于其较高的含氧量 (34.8%) 和无 C-C 键的特性使得其碳烟排放几乎为零^[2]。尽管二甲醚燃料的发动机性能具有以上优势,但是同样存在运行范围过窄、着火时刻难以控制等问题^[3]。根据燃料设计的理念^[4],向高十六烷值的二甲醚燃料中掺混高辛烷值燃料 (液化石油气、天然气等) 能够有效拓宽负荷和控制着火,而作为液化石油气和天然气中成分之一的乙烷在 HCCI 燃烧中起到重要作用^[5-6]。因此,有必要从基础燃烧动力学的角度去进

收稿日期: 2018-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51776005);

内蒙古工业大学科研项目 (ZD201606)

作者简介: 柴俊霖 (1979—), 女, 博士研究生;

田 瑞 (1956—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 田 瑞, tianr@imut.edu.cn

一步理解二甲醚/乙烷混合燃料在着火和燃烧过程中的相关作用机制。

着火延迟期是 HCCI 燃烧过程中的关键参数,同时也是化学动力学机理建立、验证和进一步改进的实验数据依据^[7]。相关学者针对纯二甲醚和纯乙烷的着火延迟特性开展了大量研究。Cook 等^[8]利用激波管(ST)测量了二甲醚在温度 1 175~1 900 K、压力 1.6~6.6 bar 和当量比 0.5~3.0 范围内的着火延迟期。Li 和 Pan 等^[9-10]同样利用 ST 分别在温度 697~1 239 K、压力 22~23 bar、当量比 0.5~1.5 范围和温度 1 000~1 600 K、压力 1.2~20 bar、当量比 0.5~2.0 范围内研究了二甲醚的着火延迟期特性。Hu 等^[11]利用 ST 测量了乙烷在高温下的着火延迟期并根据测量实验结果对乙烷的动力学机理进行验证,其工况范围为压力 1.2~20 bar 和当量比 0.5~2.0。而针对二甲醚/乙烷混合气的着火延迟特性,只有 Zhang 等^[12]利用 ST 在高温(1 100~1 500 K)和高稀释(80%)条件下进行了研究,其压力范围为 2~20 atm。其研究表明:随着乙烷掺混比的增加,二甲醚/乙烷混合气的着火延迟期呈下降趋势。

二甲醚/乙烷混合气的高温着火延迟特性已经明了,但是目前针对更贴近于发动机真实工况的低温、高压下的着火延迟特性尚未见相关报道。因此,本文在快速压缩机实验台架上测量二甲醚/乙烷混

合气在低温、高压下的着火延迟期,探究二甲醚和乙烷在低温着火过程中的相互作用机理,为其化学动力学机理的验证提供实验数据依据。

1 实验方法

本文实验工作在北京工业大学的 RCM 实验台架上进行,图 1 为 RCM 的系统图。RCM 采用典型的气压驱动、液压制动方式,其压缩行程可在 190~250 mm 范围内调节,对应压缩比为 8.42~16.90。整体压缩时间约为 30 ms,其较短的压缩时间可以避免压缩过程中更多的热损失和化学反应的发生。燃烧缸、进气管路和预混罐采用加热带进行加热,通过 PID 温度控制仪来实现对温度的精准控制,最高加热温度可达到 400 K。燃烧活塞为快速压缩机中广泛应用的“creviced piston”^[13],这种活塞能够将压缩过程中产生的涡流挤压到余隙中从而减小对绝热核心区域的影响。由于着火过程非常迅速,难以直接测量瞬时温度,因此本文中通过“绝热核心假设”来间接计算上止点温度(T_c)。

$$\int_{T_0}^{T_c} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{dT}{T} = \ln\left(\frac{p_c}{p_0}\right).$$

式中: p_0 为初始压力, T_0 为初始温度, p_c 为实验中测得的上止点压力, γ 为二甲醚/乙烷混合气的比热容比,是温度的函数。

RCM 实验台架更详细的介绍参见文献[14]。

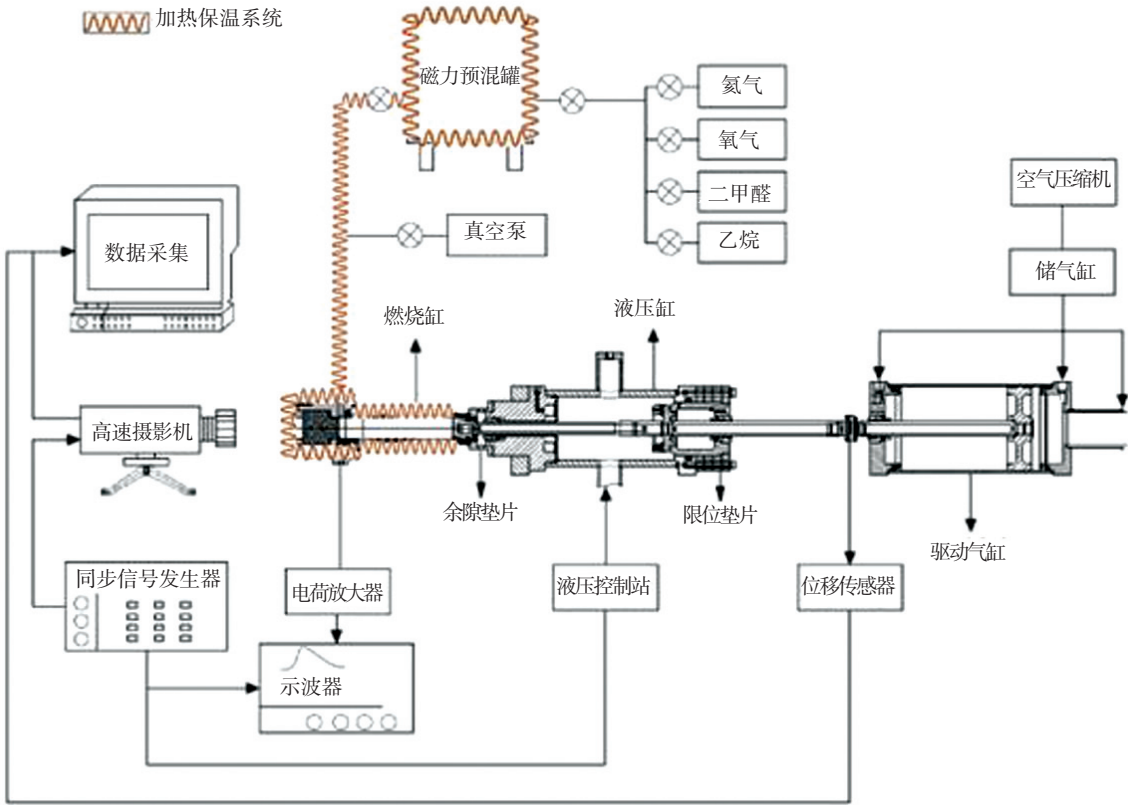


图 1 RCM 实验台架系统图

Fig.1 Schematic diagram of the RCM test bench

实验中所用气体纯度依次为二甲醚(99.5%),乙烷(99.95%),氧气(99.999%)和氮气(99.999%)。涉及的工况条件为:上止点温度 627~912 K,上止点压力 16~30 bar,当量比 0.5~1,乙烷掺混比 0~70%,其中乙烷掺混比在此定义为乙烷在二甲醚/乙烷混合燃料中的摩尔比,计算式为

$$R_{C_2H_6} = n_{C_2H_6} / (n_{DME} + n_{C_2H_6}).$$

实验中上止点温度通过调节压缩比和初始温度来控制,上止点压力通过调节压缩比和初始压力来控制。此外,实验中氮气和氧气的摩尔比近似其在空气中的比例(4:1),便于更真实地模拟发动机的工况。实验过程中为确保实验结果的准确性,相同工况条件下实验重复次数不少于3次。

本文中定义上止点到压力升高率的第一个峰值的时间间隔为第一阶段着火延迟期 τ_1 ,压力升高率第一个峰值到第二个峰值的间隔时间为第二阶段着火延迟期 τ_2 ,总着火延迟期 $\tau = \tau_1 + \tau_2$,具体如图2所示。

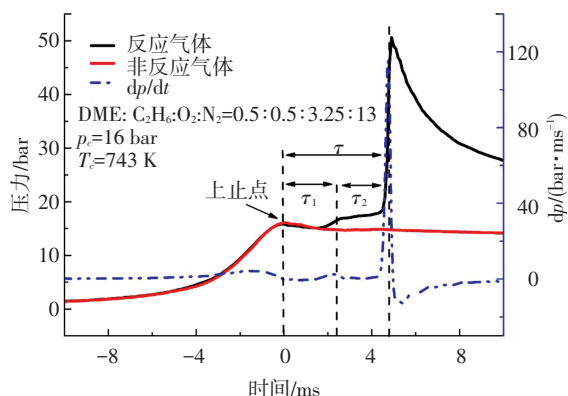


图2 着火延迟期定义

Fig.2 Definition of ignition delay

实验测得的着火延迟期的不确定性主要来自于压力和温度测量的不确定性以及压缩过程中可能存在的化学反应的不确定性。根据 Di 等^[15]的计算方法,着火延迟期的不确定度为三种因素的不确定度的平方和的算数平方根:

$$\Delta\tau = \sqrt{\left(\frac{\partial\tau}{\partial T}dT\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau}{\partial p}dp\right)^2 + (\Delta\tau_{\text{compression}})^2}.$$

式中: $\frac{\partial\tau}{\partial T}$ 为着火延迟期对上止点温度的多项式拟合

公式的导数, $\frac{\partial\tau}{\partial p}$ 近似为上止点压力的倒数^[16],

$\Delta\tau_{\text{compression}}$ 为压缩过程中发生化学反应导致的不确定度,根据着火延迟期的积分来计算,更具体计算方法参见文献[17]。

2 模拟方法

为了更好地模拟压缩过程及压缩后的热损失,

首先进行与着火实验相同工况条件的非反应气体实验,即用氮气来代替氧气(两者热物理性质相同)。如图2所示,非反应气体与反应气体曲线在着火前吻合良好,证明本文中散热模型的合理性。假定绝热压缩来将非反应气体的压力曲线转化为体积—时间曲线,即用体积膨胀来反映上止点后的热损失^[18]。然后将体积曲线导入 CHEMKIN-PRO 软件中的 0-D 均质定容绝热反应器中,反应器初始参数与实验过程中的初始参数相同,即从压缩过程开始模拟,具体方法参见文献[19]。

本文中采用爱尔兰国立高威大学 Curran 等人开发的建立于 NUIG Aramco Mech1.3 之上的 NUIG Aramco Mech 2.0 化学动力学机理^[20]。相比于 NUIG Aramco Mech1.3,该机理(493 种组分和 2 716 个基元反应)包含乙烷在内的 C1-C4 的更详细子机理,得到来自 RCM/ST 等大量基础燃烧实验数据的验证^[21]。

3 结果与讨论

3.1 上止点压力效应

图3所示为不同上止点压力下 ($p_c = 16, 30 \text{ bar}$) 当量比为 0.5 的二甲醚/乙烷混合气 (50%/50%) 着火延迟期的实验与模拟结果。从图3中可以看出,尽管较高温度下第一阶段着火延迟期预测值小于实验值,但是 NUIG Aramco Mech 2.0 整体对实验结果预测良好。其中第一阶段着火延迟期的不确定度随着上止点温度的增加而增大,这主要是由于压缩过程中发生的化学反应增强导致的,类似的现象在 RCM 测量着火延迟期时被广泛发现^[15]。二甲醚/乙烷混合气呈现两阶段着火,总着火延迟期呈现明显的负温度系数 (NTC) 现象,且在较低的上止点压力下 NTC 现象更加明显。由于乙烷本身呈现单阶段着火且无 NTC 现象,而二甲醚在低温下通常呈现明显的 NTC 现象^[18,22],因此可以推断在本文乙烷掺混比条件下的二甲醚/乙烷混合气中二甲醚的着火化学起到主导作用。随着上止点压力增加,第一阶段和总着火延迟期均呈现下降趋势,且在负温度系数 (NTC) 区间压力增加对着火的促进作用更加明显。随着上止点压力增加,增长的混合气浓度使得分子的有效碰撞次数增加从而化学反应速率加快,在宏观上体现为着火延迟期的缩短。相比于 NTC 区间,低温区间的着火化学更依赖于温度^[23],因此在 NTC 区间压力对着火的促进作用更加明显。

3.2 当量比效应

图4所示为不同当量比下 ($\varphi = 0.5, 1$) 上止点压力为 30 bar 的二甲醚/乙烷混合气 (50%/50%) 着火延迟期的实验与模拟结果。从图4中可以看出,

随着当量比的增加,第一阶段和总着火延迟期均呈现缩短趋势. 与上止点压力效应类似,相比于低温区间,在 NTC 区间当量比增加对着火的促进作用更加明显. 在低温条件下,来自燃料分解产生的自由基物种主导着火化学. 因此随着当量比增加,燃料浓度增加,化学反应速率加快进而着火延迟期缩短.

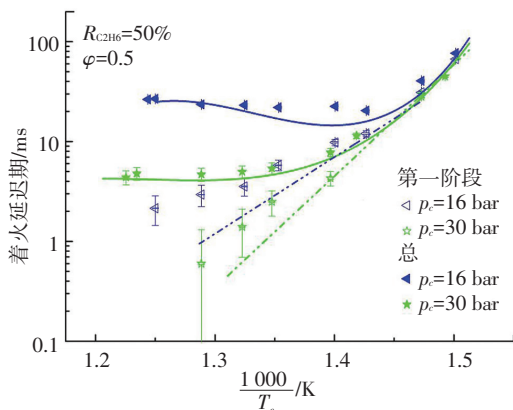


图 3 上止点压力对二甲醚/乙烷混合气着火延迟期影响 (点:实验值;线:预测值)

Fig.3 Effect of compressed pressure on ignition delays of the DME/C₂H₆ mixtures (symbols: measurement; lines: prediction)

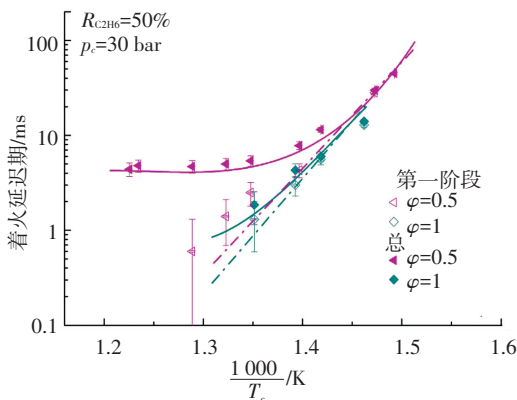


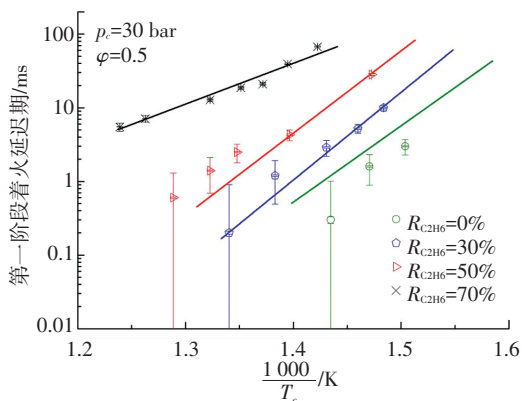
图 4 当量比对二甲醚/乙烷混合气着火延迟期影响 (点:实验值;线:预测值)

Fig.4 Effect of equivalence ratio on ignition delays of the DME/C₂H₆ mixtures (symbols: measurement; lines: prediction)

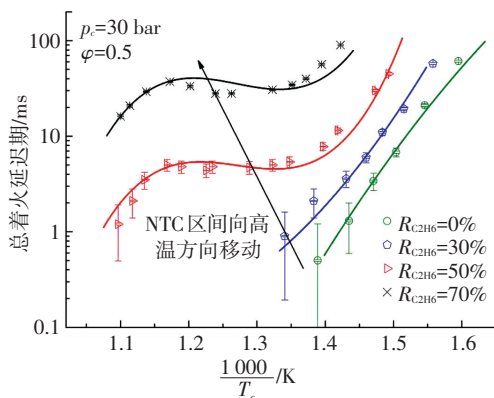
3.3 乙烷掺混比效应

图 5 所示为不同乙烷掺混比下 ($R_{C_2H_6} = 0\%$, 30% , 50% , 70%) 的二甲醚/乙烷混合气着火延迟期的实验与模拟结果. 尽管定量上存在较小的差异,NUIG Aramco Mech 2.0 对二甲醚/乙烷混合气的着火延迟期预测良好. 随着乙烷掺混比的增加,二甲醚/乙烷混合气的第一阶段和总着火延迟期均呈现明显的延长趋势,即乙烷添加抑制二甲醚的着火. 这与高温条件下二甲醚/乙烷混合气总着火延迟期随乙烷掺混比的变化趋势相反. Zhang 等^[12]在高温激波管实验中发现乙烷添加缩短了二甲醚的着火延

迟期,分析认为着火促进作用来自于二甲醚对乙烷产生的小分子自由基的竞争作用. 从图 5 还可以看出,随着乙烷掺混比的增加,总着火延迟期的 NTC 区间向高温方向移动.



(a) 第一阶段着火延迟期



(b) 总着火延迟期

图 5 乙烷掺混比对二甲醚/乙烷混合气着火延迟期影响 (点:实验值;线:预测值)

Fig.5 Effect of C₂H₆ blending ratio on ignition delays of the DME/C₂H₆ mixtures (symbols: measurement; lines: prediction)

3.3.1 反应路径分析

为分析低温着火过程中二甲醚和乙烷的相互作用机理,进行了不同乙烷掺混比下二甲醚/乙烷混合气着火的反应路径分析,如图 6 所示. 计算工况为处在 NTC 区间的上止点温度 740 K,选择广泛采用的总体燃料消耗 20% 的时刻表征燃料的着火化学^[22]. 同时,为了减少计算时间而采用绝热模拟. 从图 6(a)中可以看出,CH₃OCH₃主要由 OH、H 和 OH 自由基进行脱氢形成 CH₃OCH₂自由基,形成的 CH₃OCH₂自由基首先进行第一次加氧形成 CH₃OCH₂O₂自由基. CH₃OCH₂O₂自由基主要通过异构化形成 CH₂OCH₂O₂H 自由基,而小部分直接通过 β 裂解形成 CH₂O. CH₂OCH₂O₂H 自由基的反应分成两个部分:(1)进行第二次加氧形成 O₂CH₂OCH₂O₂H 自由基进而再次异构化以及随后的链分支路产生 OH 自由基;(2)通过 β 裂解形成一分子 OH 和两

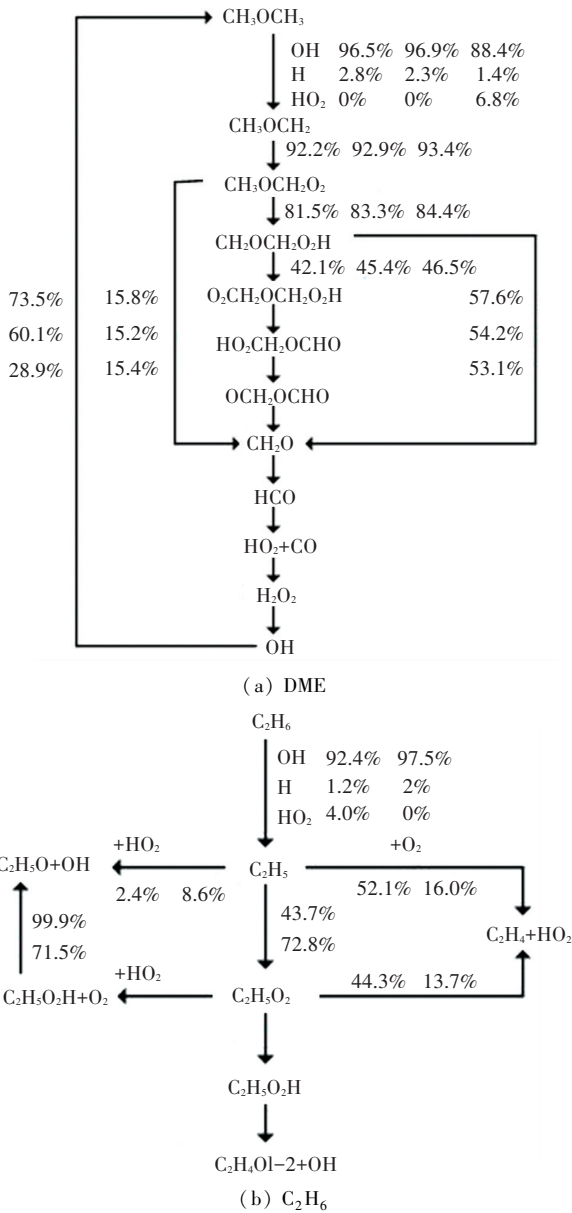


图 6 反应路径分析: $T_c = 740\text{ K}$, $\varphi = 0.5$, $p_c = 30\text{ bar}$ (黑色: $R_{C_2H_6} = 0\%$; 红色: $R_{C_2H_6} = 30\%$; 绿色: $R_{C_2H_6} = 70\%$)

Fig.6 Reaction path analysis at $T_c = 740\text{ K}$, $\varphi = 0.5$ and $p_c = 30\text{ bar}$ (Black: $R_{C_2H_6} = 0\%$; Red: $R_{C_2H_6} = 30\%$; Green: $R_{C_2H_6} = 70\%$)

分子稳定 CH_2O . $\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{O}_2\text{H}$ 自由基进行 β 裂解与相应的第二次加氧反应竞争, 其形成的稳定的 CH_2O 分子降低了系统活性、导致 NTC 现象的出现^[9]. 从图 6(a) 中可以看出, $\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{O}_2\text{H}$ 自由基的 β 裂解反应起到主导作用, 即二甲醚/乙烷混合气呈现 NTC 现象. 随着乙烷掺混比的增加, $\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{O}_2\text{H}$ 自由基 β 裂解反应的比例降低而第二次加氧反应的比例增加, 因此总着火延迟期的 NTC 区间向高温方向移动. 通过链分支路径产生的 OH 自由基将继续促进二甲醚的脱氢消耗, 是二甲醚低温着火过程中的链载体. 乙烷的添加使得通过 OH 自由基的二甲醚脱氢反应略有降低, 但是作为链载体的

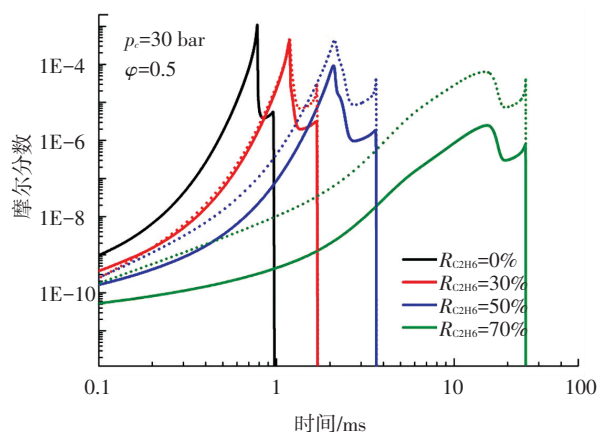
OH 自由基被二甲醚消耗的比例从 $R_{C_2H_6} = 0\%$ 的 73.5% 降低到 $R_{C_2H_6} = 70\%$ 的 28.9%.

从图 6(b) 中可以看出, 乙烷的脱氢反应同样由 OH 自由基主导, 脱氢产生的 C_2H_5 自由基主要通过加氧形成 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$ 自由基或者和氧气反应形成 C_2H_4 和 HO_2 自由基, 另外小部分和 HO_2 自由基反应产生 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ 自由基和 OH 自由基. 而产生的 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$ 自由基主要通过裂解反应产生 C_2H_4 和 HO_2 自由基或者和 HO_2 自由基反应产生 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2\text{H}$ 和 O_2 , 其中绝大部分的 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2\text{H}$ 分解产生 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ 自由基和 OH 自由基. 值得注意的是, 不同于二甲醚的低温反应路径, 几乎没有 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$ 自由基继续进行异构化及其后的第二次加氧反应, 即乙烷无低温链分支反应, 产生更少的高活性自由基. OH 自由基是燃料低温着火过程中的链载体, 因此, 乙烷将竞争由二甲醚在低温着火过程中主导产生的 OH 自由基. 而图 6(a) 中二甲醚用于脱氢反应的 OH 自由基比例大幅度降低, 可以推断乙烷竞争得到更多的 OH 自由基. 从图 6(b) 中还可以看出, 随着混合气中二甲醚比例的增加, 由 C_2H_5 自由基和 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$ 自由基产生低温下相对稳定产物 C_2H_4 和 HO_2 自由基的比例显著降低, 而产生活跃的 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ 自由基和 OH 自由基的比例相应增加. 即二甲醚的存在促进了乙烷低温下的氧化过程.

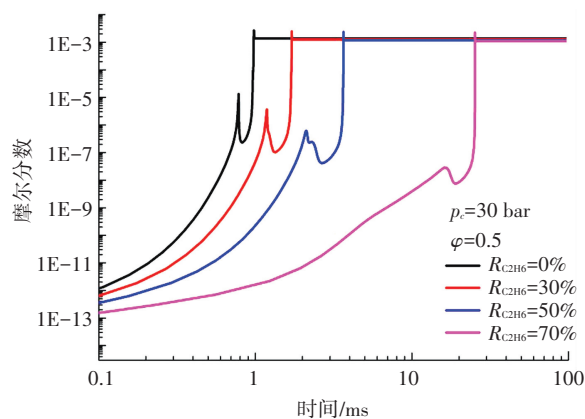
综上, 二甲醚/乙烷混合气低温着火过程中, 乙烷竞争由二甲醚主导产生的 OH 自由基进而抑制二甲醚的低温氧化, 而乙烷自身的氧化过程得到促进.

3.3.2 摩尔浓度分析

为进一步阐明二甲醚和乙烷的相互作用机制, 图 7 和图 8 分别给出了二甲醚/乙烷混合气低温着火过程中的重要自由基、温度和放热率曲线. 由前文反应路径分析可知, CH_3OCH_2 、 $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{O}_2$ 、 C_2H_5 和 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$ 自由基是二甲醚/乙烷混合气低温反应过程中的重要自由基, 而 H、O 和 OH 自由基具有很高的活性, 因此这些自由基可以用来表征二甲醚/乙烷的着火化学. 从图 7(a) 可以看出, 随着乙烷掺混比增加, CH_3OCH_2 自由基和 $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{O}_2$ 自由基的浓度降低, 即二甲醚的低温反应受到抑制. 而二甲醚比例的增加使得 C_2H_5 自由基和 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$ 自由基的浓度增加, 同时呈现两阶段消耗特性, 即二甲醚的存在促进了乙烷的氧化过程. 但是, 反映整个系统活性的 H、O 和 OH 自由基浓度和降低. 从图 8 中可以更直观地看出: 乙烷添加使得整体混合气低温反应阶段的放热率和温度增长显著降低, 且随着乙烷掺混比的增加这种着火抑制效果更加显著. 因此, 乙烷的添加使得混合气着火延迟期延长.



(a) 实线: CH_3OCH_2 和 $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{O}_2$ 自由基浓度和; 短点线: C_2H_5 和 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$ 自由基浓度和



(b) H 、 O 、 OH 自由基浓度和

图 7 不同乙烷掺混比下二甲醚/乙烷混合气重要物种摩尔浓度分析

Fig.7 Mole fraction analysis of important species for DME/ C_2H_6 mixtures at different C_2H_6 blending ratios

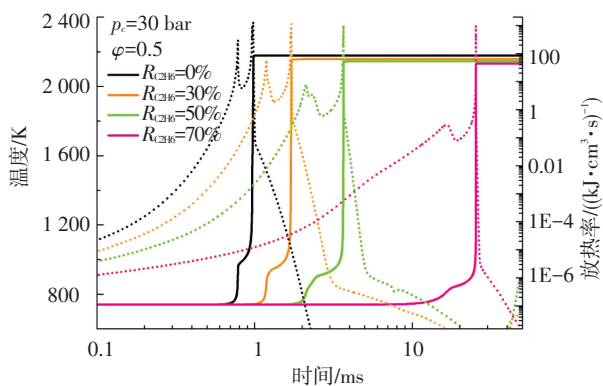


图 8 不同乙烷掺混比下二甲醚/乙烷混合气温度和放热率曲线 (实线: 温度; 短点线: 放热率)

Fig.8 Temperature and heat release rate profiles for DME/ C_2H_6 mixtures at different C_2H_6 blending ratios (Full line: temperature; Short line: heat release rate)

4 结 论

1) NUIG Aramco Mech 2.0 整体能够较好地预测二甲醚/乙烷混合气在低温下的着火延迟期. 本文乙烷掺混比(0~70%)下,二甲醚/乙烷混合气呈现两阶段着火与 NTC 现象,二甲醚着火化学主导混合气的着火过程.

2) 上止点压力和当量比的增加使得二甲醚/乙烷混合气的第一阶段和总着火延迟期均呈现缩短趋势,尤其在 NTC 区间. 且在较低的上止点压力下, NTC 现象更加明显.

3) 乙烷添加显著抑制了二甲醚的低温着火过程,混合气的第一阶段和总着火延迟期显著延长. 化学动力学分析表明:乙烷竞争由二甲醚低温氧化过程中主导产生的 OH 自由基进而抑制二甲醚的整个氧化过程,而乙烷自身氧化过程得到促进甚至呈现两阶段着火特性. 但是,随着乙烷掺混比的增加,二甲醚/乙烷整体混合气的着火过程受到抑制,着火延迟期延长.

参考文献

- [1] YAO Mingfa, ZHENG Zhaolei, LIU Haifeng. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(5): 398. DOI:10.1016/j.pecs.2009.05.001
- [2] KIM M Y, YOON S H, RYU B W, et al. Combustion and emission characteristics of DME as an alternative fuel for compression ignition engines with a high pressure injection system[J]. Fuel, 2008, 87(12): 2779. DOI:10.1016/j.fuel.2008.01.032
- [3] YEOM K, BAE C. Knock characteristics in liquefied petroleum gas (LPG)-dimethyl ether (DME) and gasoline-DME homogeneous charge compression ignition engines[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(4): 1956. DOI:10.1021/ef800846u
- [4] LU Xingcai, HAN Dong, HUANG Zhen. Fuel design and management for the control of advanced compression-ignition combustion modes[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 741. DOI:10.1016/j.pecs.2011.03.003
- [5] KONG, S C. A study of natural gas/DME combustion in HCCI engines using CFD with detailed chemical kinetics[J]. Fuel, 2007, 86(10-11): 1483. DOI:10.1016/j.fuel.2006.11.015
- [6] TANAKA H, KOBAYASHI K, SAKO T, et al. Ignition characteristics of ethane and its roles in natural gas for HCCI engine operation [J]. SAE Technical Papers, 2015. DOI: 10.4271/2015-01-0811
- [7] MITTAL G, SUNG C J. A rapid compression machine for chemical kinetics studies at elevated pressures and temperatures[J]. Combustion Science and Technology, 2007, 179(3): 497. DOI:10.1080/00102200600671898
- [8] COOK R D, DAVIDSON D F, HANSON R K. Shock tube measurements of ignition delay times and OH time-histories in dimethyl ether oxidation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 189. DOI:10.1016/j.proci.2008.06.113
- [9] LI Zhenhua, WANG Weijing, Huang Zhen, et al. Dimethyl ether

- autoignition at engine-relevant conditions[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(5): 2811. DOI:10.1021/ef400293z
- [10] PAN Lun, HU Erjiang, TIAN Zeming, et al. Experimental and kinetic study on ignition delay times of dimethyl ether at high temperatures[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(5): 3495. DOI:10.1021/acs.energyfuels.5b00436
- [11] HU Erjiang, CHEN Yizhen, ZHANG Zihang, et al. Experimental study on ethane ignition delay times and evaluation of chemical kinetic models[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(7): 4557. DOI:10.1021/acs.energyfuels.5b00462
- [12] ZHANG Jiaxiang, HU Erjiang, PAN Lun, et al. Shock-tube measurements of ignition delay times for the ethane/dimethyl ether blends[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(10): 6247. DOI:10.1021/ef4017762
- [13] GERSEN S, DARMEVEIL H, LEVINSKY H. The effects of CO addition on the autoignition of H_2 , CH_4 and CH_4/H_2 fuels at high pressure in an RCM[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(12): 3472
- [14] 张红光, 刘昊, 李嘉辰, 等. 快速压缩机试验台架设计与性能试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 289. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.043
- ZHANG Hongguang, LIU Hao, LI Jiachen, et al. Development and performance of rapid compression machine test bench[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 289. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.043
- [15] DI Haisheng, HE Xin, ZHANG Peng, et al. Effects of buffer gas composition on low temperature ignition of iso-octane and n-heptane[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(10): 2531. DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.04.014
- [16] HE X, DONOVAN M T, ZIGLER B T, et al. An experimental and modeling study of iso-octane ignition delay times under homogeneous charge compression ignition conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2005, 142(3): 272. DOI:10.1016/j.combustflame.2005.02.014
- [17] SHI Zhicheng, ZHANG Hongguang, LU Haitao, et al. Autoignition of DME/ H_2 mixtures in a rapid compression machine under low-to-medium temperature ranges[J]. *Fuel*, 2017, 194: 50. DOI:10.1016/j.fuel.2016.12.096
- [18] MITTAL G, CHAOS M, SUNG C J, et al. Dimethyl ether autoignition in a rapid compression machine; experiments and chemical kinetic modeling[J]. *Fuel Process Technology*, 2008, 89(12): 1244. DOI: 10.1016/j.fuproc.2008.05.021
- [19] SHI Zhicheng, ZHANG Hongguang, LIU Hao, et al. Effects of buffer gas composition on autoignition of dimethyl ether[J]. *Energies*, 2015, 8(9): 10198. DOI:10.3390/en80910198
- [20] LI Yang, ZHOU Chongwen, SOMERS K P, et al. The oxidation of 2-butene: a high pressure ignition delay, kinetic modeling study and reactivity comparison with isobutene and 1-butene[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(1): 403. DOI:10.1016/j.proci.2016.05.052
- [21] BURKE U, METCALFE W K, BURKE S M, et al. A detailed chemical kinetic modeling, ignition delay time and jet-stirred reactor study of methanol oxidation[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 165(5): 125. DOI:10.1016/j.combustflame.2015.11.004
- [22] HASHEMI H, JACOBSEN J G, RASMUSSEN C T, et al. High-pressure oxidation of ethane[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 182: 150. DOI:10.1016/j.combustflame.2017.03.028
- [23] YANG Zheng, QIAN Yong, YANG Xin, et al. Autoignition of n-butanol/n-heptane blend fuels in a rapid compression machine under low-to-medium temperature ranges[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(12): 7800. DOI:10.1021/ef401774f

(编辑 王小唯)