

稀释气体对二甲醚着火延迟特性的影响

张红光^{1,2} 李佳政^{1,2} 石智成^{1,2} 高翔^{1,2}

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100124)

摘要: 在上止点压力 1.5 MPa, 上止点温度 670 ~ 795 K, 当量比为 1 的实验条件下, 利用快速压缩机 (RCM) 研究了 N_2 、 N_2/Ar (50% / 50%) 和 Ar/CO_2 (61.2% / 38.8%) 稀释气体对二甲醚 (DME) 着火延迟期的影响。利用 CHMKIN - PRO 软件在较大温度范围内进行了模拟研究。结果表明: 不同稀释气体组分对二甲醚混合气体第一阶段着火延迟期影响很小, 但对总着火延迟期具有较大的影响, 尤其在负温度系数 (NTC) 区间的起点温度附近。与 N_2 相比, N_2/Ar (50% / 50%) 使得实验中总着火延迟期缩短 30%。稀释气体的化学效应对第一阶段着火延迟期和总着火延迟期的影响均很小。在低温区间和 NTC 区间, 稀释气体的热效应起主导作用, 而当上止点温度超过 NTC 区间时, CO_2 的化学效应影响增强且超过热效应而起到主导作用。随稀释率增加, DME 混合气体第一阶段着火延迟期略有延长, 而总着火延迟期出现明显延长, 且总着火延迟期的 NTC 现象变得更加明显。

关键词: 稀释气体; 二甲醚; 着火延迟期; 快速压缩机

中图分类号: TK401 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2017) 04-0335-07

Effects of Diluent Gases on Ignition Delays Characteristics of Dimethyl Ether

ZHANG Hongguang^{1,2} LI Jiazheng^{1,2} SHI Zhicheng^{1,2} GAO Xiang^{1,2}

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100124, China)

Abstract: Effects of diluent gases composition on ignition delays of dimethyl ether (DME) were investigated at compressed pressure of 1.5 MPa, compressed temperature from 670 K to 795 K and equivalence ratio of 1 by using a rapid compression machine (RCM). The diluent gases considered were nitrogen (N_2), mixture of N_2 and argon (Ar) at mole ratio of 50% to 50% and mixture of Ar and carbon dioxide (CO_2) at mole ratio of 61.2% to 38.8%. The simulation study was performed over a wider temperature range based on CHMKIN - PRO software. The results showed that diluent gases composition had little impact on the first-stage ignition delay. However, significant differences in the total ignition delay were observed, especially in the negative temperature coefficient (NTC) region. Compared with N_2 , mixture of N_2 and Ar decreased the total ignition delay by 30%. The chemical effect of diluent gases composition on the first-stage and total ignition delays was negligible. The thermal effect was dominant factor in the low temperature and NTC regions, however, the chemical effect of CO_2 enhanced and exceeded the thermal effect in the temperature region beyond the NTC region. With the increase of N_2 dilution ratio, the first-stage ignition delay was slightly increased, while a significant increase in the total ignition delay was observed. Moreover, the NTC behavior of total ignition delay was noted to become more pronounced at high N_2 dilution ratio.

Key words: diluent gases; dimethyl ether; ignition delay; rapid compression machine

引言

日益严重的环境问题使得人们更加重视内燃机

的燃烧与污染排放。为了减少内燃机的有害排放, 理解燃料燃烧时发生的化学反应是十分必要的。快速压缩机 (RCM) 能够模拟内燃机中活塞的单次压

收稿日期: 2016-08-01 修回日期: 2016-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51376011)、北京市自然科学基金项目 (3152005) 和北京市教育委员会科技计划重点项目 (KZ201410005003)

作者简介: 张红光 (1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事内燃机燃烧与测试研究, E-mail: zhg5912@263.net

缩过程,且便于精准控制压缩过程中的各项热力学参数,从而成为研究燃料燃烧特性的理想实验平台^[1]。在快速压缩机实验过程中,为达到不同的测试工况,常常通过调节稀释气体混合比例来实现。但是,由于不同稀释气体比热容比、热扩散率、导热性等的不同,相同燃料采用不同稀释气体所得实验结果有所差异。

针对稀释气体对快速压缩机中燃料燃烧过程的影响,已有学者展开相关研究^[2-3]。目前已有研究主要针对单阶段着火或高温燃烧,而稀释气体对于具有两阶段着火及负温度系数(NTC)现象燃料燃烧影响的研究很少,近来只有 DI 等^[4]通过实验和数值模拟研究了稀释气体热效应和化学效应对异辛烷和正庚烷两种燃料着火过程的影响。研究发现:不同稀释气体组分对正庚烷和异辛烷着火影响很大,尤其是在两级着火区间。低到中温范围内,二甲醚(DME)燃料通常具有明显的两阶段燃烧和 NTC 现象,而且,不同燃料对采用稀释气体种类的敏感性不同^[5],稀释气体组分对二甲醚燃料燃烧过程的影响尚不清楚。基于此,本文利用 RCM 开展稀释气体组分对二甲醚着火延迟期影响的实验研究,并结合 CHEMKIN-PRO 软件进行模拟与化学动力学分析。

1 实验装置与参数定义

1.1 快速压缩机

使用的 RCM 参见文献[6],主要由气压驱动系统、液压控制系统、燃烧系统、配气系统、数据采集系统组成。燃烧缸直径 50 mm,驱动气压 0.2~0.8 MPa,压缩比 8.42~16.9。本文 RCM 的燃烧活塞采用文献[7-13]中的“creviced piston”,这种活塞设计可有效减小活塞运动过程中引起的涡流对燃烧室的影响,保证“绝热核心假设”的成立,从而精确地计算上止点温度 T_c 。 T_c 计算公式为

$$\int_{T_0}^{T_c} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{dT}{T} = \ln \frac{p_c}{p_0} \tag{1}$$

式中 p_0 ——混合气体的初始压力,MPa
 T_0 ——初始温度,K
 p_c ——上止点压力,MPa
 γ ——混合气体的比热容比

图 1 为实验台架原理图。

1.2 着火延迟期定义

二甲醚混合气着火延迟期的定义如图 2 所示,定义时间 0 点为活塞到达上止点的时刻,从时间 0 点到燃烧压力变化率的第一个峰值定义为第一阶段着火延迟期,从燃烧压力变化率的第一个峰值到第二个峰值定义为第二阶段着火延迟期。从图中可以

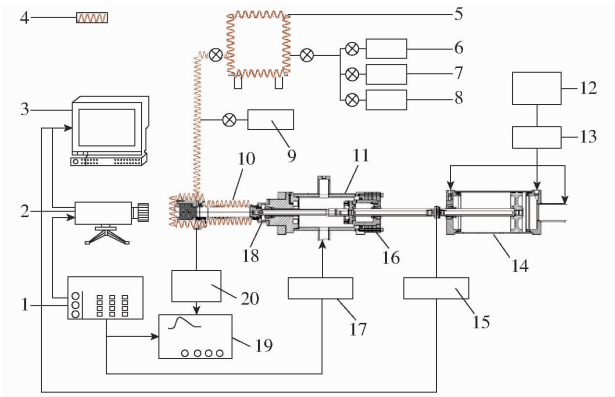


图 1 RCM 实验台架原理图

Fig. 1 Schematic diagram of rapid compression machine (RCM) test bench

1. 同步信号发生器 2. 高速摄影机 3. 数据采集 4. 加热保温系统 5. 磁力预混罐 6. 氮气 7. 氧气 8. 二甲醚 9. 真空泵 10. 燃烧缸 11. 液压缸 12. 空气压缩机 13. 储气缸 14. 驱动气缸 15. 位移传感器 16. 限位垫片 17. 液压控制站 18. 余隙垫片 19. 示波器 20. 电荷放大器

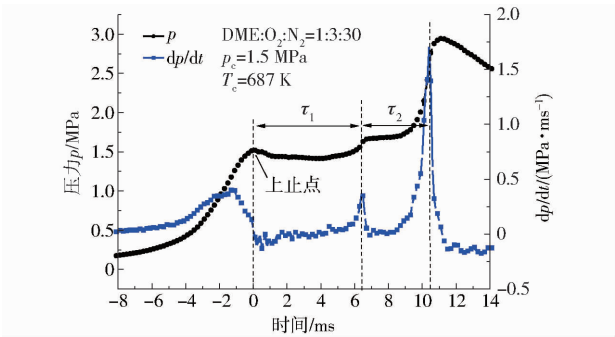


图 2 着火延迟期的定义

Fig. 2 Definition of ignition delay

明显看出,二甲醚混合气体燃烧呈现出明显的两阶段放热和两阶段着火延迟,总着火延迟期 $\tau = \tau_1 + \tau_2$ 。

1.3 实验条件及实验可重复性

稀释气体对着火过程的影响分为热效应(比热容)、化学效应(第三体碰撞)和稀释效应(燃料和 O_2 浓度)。本文利用快速压缩机研究 N_2 、 N_2/Ar (50%/50%) 和 Ar/CO_2 (61.2%/38.8%) 稀释气体对二甲醚着火延迟期的影响。为了将稀释气体热效应和化学效应区分开研究,将 Ar 和 CO_2 以 61.2%/38.8% 的摩尔比例混合,其比热容与 N_2 基本相同。实验中气体纯度依次为: DME 99.5%、 O_2 99.999%、 N_2 99.999%、 Ar 99.999%、 CO_2 99.999%。实验中上止点压力通过调节混合气体初始压力来控制,上止点温度通过调节压缩比和混合气体初始温度来控制,实验条件如表 1 所示。

实验过程中,缸内燃烧压力数据由 kistler6125C 型缸压传感器与 kistler5011 型电荷放大器进行采集,并用 TektronixMS04000 型示波器记录数据。每

表 1 实验条件

Tab.1 Experiment conditions

摩尔比例	稀释率/%	φ	P_c /MPa	T_c /K
DME: O ₂ : N ₂ = 1: 3: 20	36.31			
DME: O ₂ : N ₂ : Ar = 1: 3: 10: 10	36.31			
DME: O ₂ : Ar: CO ₂ = 1: 3: 12.245: 7.755	36.31	1	1.5	670 ~ 795
DME: O ₂ : N ₂ = 1: 3: 25	47.29			
DME: O ₂ : N ₂ = 1: 3: 30	55.04			

组实验条件根据情况重复 3 ~ 5 次,以保证实验数据的可靠性。本文中同一工况实验可重复性按着火延迟期相对误差 $\Delta\alpha$ 来评价^[4],经计算图 3 中着火延迟期相对误差 $\Delta\alpha$ 为 2.5%,误差在可接受范围内,且从图中可以看出,DME 混合气体压缩及燃烧曲线吻合较好,即基于本 RCM 的燃烧实验可重复性良好。

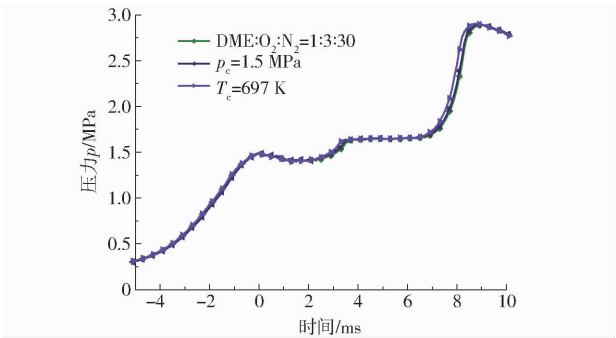


图 3 实验可重复性

Fig.3 Repeatability of experiment

2 数值模拟

利用 CHEMKIN - PRO 软件模拟二甲醚混合气在快速压缩机内燃烧时的物理及化学反应条件,模拟过程中采用 ZHAO 机理^[14],该机理包含 55 种组分和 290 步可逆基元反应,是国际上公认的、可靠的二甲醚燃烧详细机理,并在快速压缩机^[15]、激波管^[16]和流动反应器^[17]等燃烧装置中得到验证。由于快速压缩机压缩过程非常快,若忽略压缩过程中的传热损失,则活塞到达上止点后近似为绝热定容反应,因此,本文反应模型采用 0 - D 均质定容绝热反应器。

反应器初始参数设为实验中 RCM 压缩上止点的参数,利用 MITTAL 等^[18]采用的“体积膨胀法”来模拟传热损失。在计算中将压力的变化以等熵假设转换为体积的变化。瞬时体积计算公式为

$$V_{\text{eff}}(t) = V_{\text{eff}}(0)v_p(t) \quad (t > 0) \quad (2)$$

式中 $V_{\text{eff}}(0)$ ——活塞达到上止点时的燃烧室体积
 $V_{\text{eff}}(t)$ ——活塞达到上止点后的瞬时体积
 $v_p(t)$ ——体积膨胀系数

具体方法参见文献[19]。

3 结果与讨论

3.1 稀释气体的热效应与化学效应

图 4 为稀释气体组分对二甲醚第一阶段着火延迟期和总着火延迟期影响的实验与模拟结果。如图 4 所示,ZHAO 机理能够较好地预测稀释气体组分对 DME 着火延迟期的影响,但是在较高上止点温度下,尤其对于第一阶段着火延迟期,计算值较实验值偏高。这主要是由于实验过程中采用加热的方法提高混合气体初始温度,而第一阶段着火延迟期较短,是因为在压缩过程中存在潜在的化学反应。

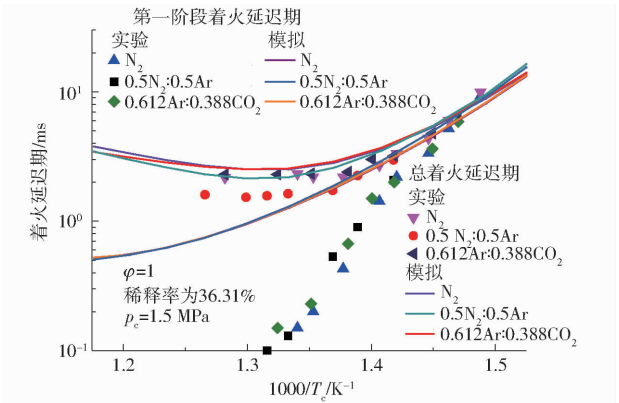


图 4 稀释气体对二甲醚着火延迟期的影响

Fig.4 Effects of diluent gas composition on ignition delays of DME

如图 4 所示,不同稀释气体组分下,二甲醚混合气体第一阶段着火延迟期基本相同,即稀释气体组分对二甲醚混合气体第一阶段着火延迟期影响很小。从图中还可以看出,二甲醚混合气体总着火延迟期呈现明显的 NTC 现象。在低温区间,稀释气体组分对二甲醚总着火延迟期的影响同样很小,但在 NTC 区间,稀释气体组分对总着火延迟期具有较大的影响,尤其在 NTC 区间的起点温度附近。与 N₂相比,N₂/Ar(50%/50%)使得实验结果与模拟结果总着火延迟期分别缩短 30% 和 15%。

图 5 为 N₂、N₂/Ar (50%/50%) 和 Ar/CO₂ (61.2%/38.8%) 作为稀释气体,上止点压力为 1.5 MPa、上止点温度为 700 K 时压缩及燃烧过程的实验压力曲线。不同稀释气体组分下,二甲醚混合气体第一阶段着火延迟期基本相同,但是第一阶段着火后的压力和温度升高差异很大。第一阶段着火后的压力和温度升高由混合气体的累计放热量和比热容决定,而比热容起到主导作用。相同实验条件下,N₂ 累计放热量更高^[4],但是 Ar 具有更小的比热容,从而第一阶段着火后压力和温度升高幅度更大。

如图 5 所示, N_2 作为稀释气体时, 第一阶段着火后压力升高 0.32 MPa, 对应温度升高 223 K, 而 N_2/Ar (50%/50%) 为稀释气体时压力升高 0.42 MPa, 对应温度升高 293 K。由于第二阶段着火延迟与第一阶段着火相耦合, 第一阶段着火后压力和温度的升高直接影响第二阶段着火延迟, 进而影响总的着火延迟期。与 N_2 相比, N_2/Ar (50%/50%) 作为稀释气体时第一阶段着火后的压力、温度升高幅度更大, 化学反应速率加快, 第二阶段着火延迟期缩短, 进而总着火延迟期缩短。在低温区间, 第一阶段着火延迟期较长, 而第二阶段着火延迟期较短, 第一阶段着火后温度和压力升高对第二阶段着火延迟期影响很小, 因此总着火延迟期基本相同。而在 NTC 区间, 由于第二阶段着火延迟期较长, 第一阶段着火后温度和压力升高对第二阶段着火延迟期影响增加, 因此, 与 N_2 相比, N_2/Ar (50%/50%) 使得总着火延迟期出现明显缩短。

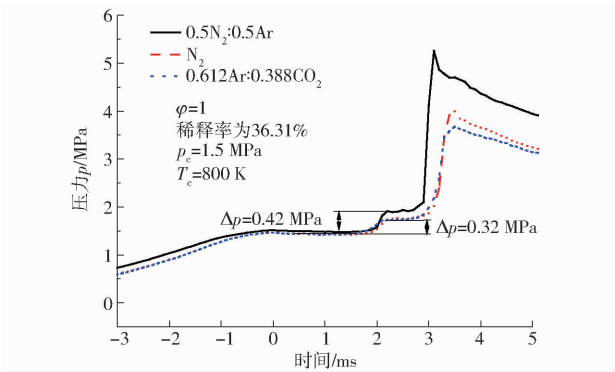


图 5 稀释气体组分对二甲醚着火过程影响的实验结果
Fig. 5 Experiment results of effects of diluent gas composition on ignition process of DME

已有研究表明^[15], 对二甲醚着火延迟期和放热影响较大的 2 个三体碰撞反应为

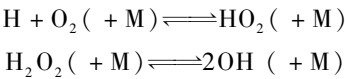


表 2 为 ZHAO 机理中几种稀释气体在这 2 个反应中的三体碰撞系数, 从表中可以看出, Ar/CO_2 (61.2%/38.8%) 与 N_2 作为稀释气体时三体碰撞系数差异很大, Ar/CO_2 (61.2%/38.8%) 的三体碰撞系数在 2 个反应中分别为 N_2 的 2.09 倍和 1.87 倍。而从图 4 中可以看出, Ar/CO_2 (61.2%/38.8%) 作为稀释气体时, 其第一阶段着火延迟期和总着火延迟期与 N_2 几乎相同, 说明在本文实验温度范围内由第三体碰撞反应引起的化学效应对二甲醚着火延迟期的影响很小。值得注意的是, 模拟上止点温度高于 830 K 时总着火延迟期有所差异, 即稀释气体的化学效应开始变得明显。

表 2 三体反应碰撞系数				
Tab. 2 Collision coefficient of third-body reaction				
反应	N_2	Ar	CO_2	Ar/CO_2 (61.2%/38.8%)
$H + O_2 (+M) \rightleftharpoons HO_2 (+M)$	1	1	3.8	2.09
$H_2O_2 (+M) \rightleftharpoons 2OH (+M)$	1	0.64	3.8	1.87

为进一步研究稀释气体对 DME 第一阶段着火延迟期和总着火延迟期的影响, 将 N_2 的比热容 C_p 设置为分别与 Ar 和 CO_2 相同, 在上止点温度 800 K 时进行数值模拟。热效应指数定义为 $\Delta\tau_{t,Ar}(\tau_{\text{modified}N_2} - \tau_{N_2})$ 和 $\Delta\tau_{t,CO_2}(\tau_{\text{modified}N_2} - \tau_{N_2})$, 化学效应指数定义为 $\Delta\tau_{c,Ar}(\tau_{Ar} - \tau_{\text{modified}N_2})$ 和 $\Delta\tau_{c,CO_2}(\tau_{CO_2} - \tau_{\text{modified}N_2})$ 。如图 6 所示, 稀释气体的热效应和化学效应对 DME 第一阶段着火延迟期影响均很小。Ar 的热效应使得总着火延迟期缩短 0.79 ms, 而 CO_2 的热效应使得总着火延迟期延长 2.02 ms。这主要是由于不同稀释气体比热容的差异引起的, 如与 N_2 相比, CO_2 具有较高的比热容, 第一阶段着火后压力和温度升高幅度较小, 化学反应速率降低, 第二阶段着火延迟期延长, 从而总着火延迟期延长。从图中还可以看出, Ar 的化学效应使得总着火延迟期延长 0.14 ms, 而 CO_2 的化学效应使得总着火延迟期缩短 0.28 ms。这主要是由于不同稀释气体三体碰撞系数的差异引起的, 如与 N_2 相比, CO_2 具有更高的三体碰撞系数 (该系数是 N_2 的 3.8 倍), 从而化学反应速率加快, 着火延迟期缩短。

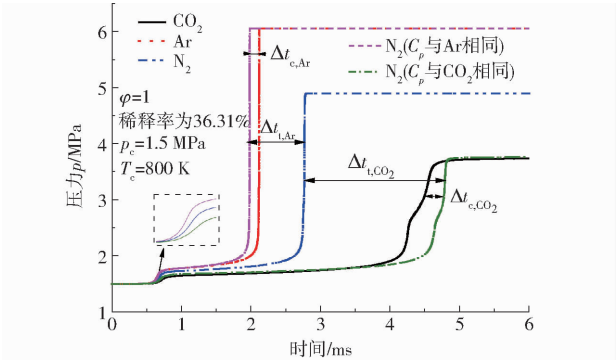


图 6 热效应和化学效应对二甲醚着火延迟期影响
Fig. 6 Thermal and chemical effects on ignition delays of DME

为进一步研究不同温度工况下稀释气体对 DME 着火延迟期的影响, 在 650 ~ 1 000 K 温度范围内进行模拟研究, 并将结果进行归一化处理。归一化处理公式为

$$\eta = \Delta\tau / \tau_{\text{total}} \quad (3)$$

式中 $\Delta\tau$ ——前文中提到的 $\Delta\tau_{t,Ar}$ 、 $\Delta\tau_{c,Ar}$ 、 $\Delta\tau_{t,CO_2}$ 和 $\Delta\tau_{c,CO_2}$
 τ_{total} ——Ar 和 CO_2 作为稀释气体时的总着火延迟期

如图 7 和图 8 所示,稀释气体的热效应和化学效应对第一阶段着火延迟期影响很小。从图 7 可以看出,随上止点温度增加,Ar 的热效应和化学效应均呈现先增强后减小趋势,但是在整个温度区间,Ar 的热效应对 DME 总着火延迟期的影响起主导作用。从图 8 可以看出,与 Ar 类似,在低温区间和 NTC 区间 CO_2 的热效应起主导作用。但是,当上止点温度超过 NTC 区间时(大于 930 K), CO_2 的化学效应影响增强且超过热效应而起到主导作用, CO_2 作为稀释气体时的总着火延迟期小于 N_2 。

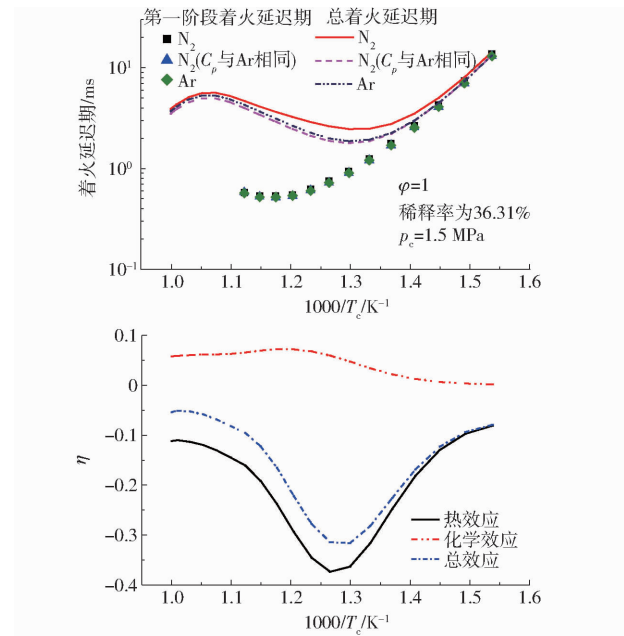


图 7 Ar 的热效应和化学效应对二甲醚着火延迟期的影响

Fig. 7 Thermal and chemical effects of Ar on ignition delays of DME

3.2 稀释气体的稀释效应

图 9 为 N_2 稀释率对二甲醚第一阶段着火延迟期和总着火延迟期影响的实验与模拟结果。由图 9 可得,ZHAO 机理能够较好地预测 N_2 稀释率对 DME 着火延迟的影响,但是在较高上止点温度下,第一阶段着火延迟期计算值明显高于实验值。如图 9 所示,随着 N_2 稀释率增加,第一阶段着火延迟期略有延长,但是总着火延迟期出现明显延长。

图 10 所示为不同 N_2 稀释率下 DME 第一阶段着火放热(用压力升高代表)的实验与模拟结果,模拟与实验结果趋势一致,实验值小于模拟值。如前文所述,第二阶段着火延迟与第一阶段着火相耦合,第一阶段着火产生的活性分子数量主导第二阶段着火过程。随 N_2 稀释率增加,DME 和 O_2 浓度降低,第一阶段着火延迟期略有延长,但如图 10 所示,DME 第一阶段着火放热明显降低,累计活性分子数量降低,从而第二阶段着火延迟期延长。因此,随 N_2 稀释率增加总着火延迟期

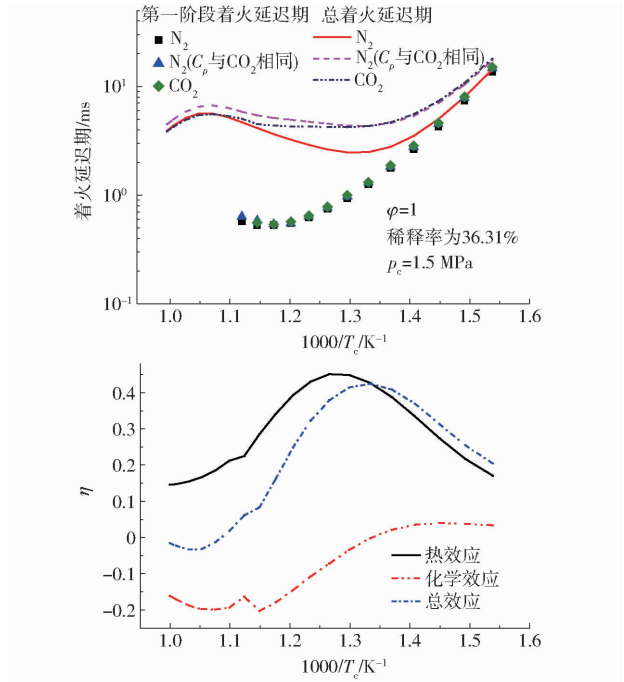


图 8 CO_2 的热效应和化学效应对二甲醚着火延迟期的影响

Fig. 8 Thermal and chemical effects of CO_2 on ignition delays of DME

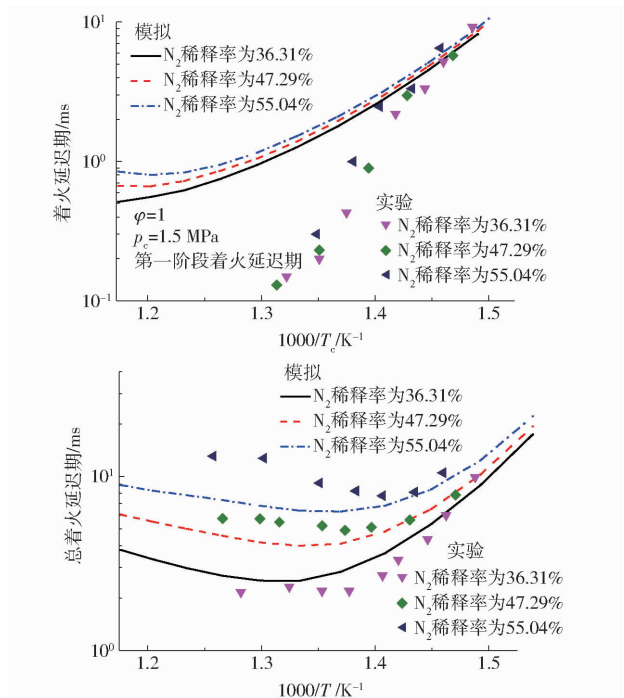


图 9 N_2 稀释率对二甲醚着火延迟期的影响

Fig. 9 Effects of N_2 dilution ratio on ignition delays of DME

明显延长。从图 10 还可以看出,随上止点温度增加,DME 第一阶段着火放热近似呈线性变化降低,且不同 N_2 稀释率下第一阶段着火放热差异缩小。

从图 9 还可以看出,DME 总着火延迟期出现明显的 NTC 现象,且随 N_2 稀释率增加,NTC 现象变得更加明显。已有研究结果表明^[20]形成过氧烷基

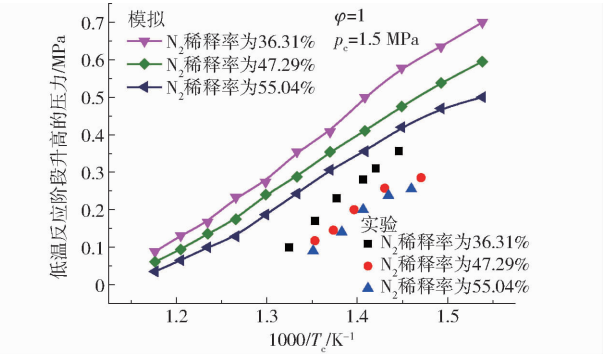


图 10 N₂ 稀释率对第一阶段着火压力升高的影响

Fig. 10 Effects of N₂ dilution ratio on pressure rise during the first-stage ignition

(RO₂) 和烷基 (R) 反应的比例决定 NTC 现象。随 N₂ 稀释率增加,O₂ 浓度降低,更易形成稳定分子烷基。因此,随 N₂ 稀释率增加,NTC 区间向低温方向移动,NTC 现象变得更加明显。

N₂ 稀释率的实验与模拟结果对比证明 ZHAO 机理能够较好地预测稀释率对 DME 着火延迟期的影响。因此,通过数值模拟进一步研究了 Ar 稀释率和 CO₂ 稀释率对 DME 着火延迟期的影响。如图 11 和图 12 所示,Ar 稀释率和 CO₂ 稀释率对 DME 着火延迟期的影响与 N₂ 呈相似的变化趋势。此外,与 N₂ 和 Ar 相比,CO₂ 作为稀释气体时总着火延迟期的 NTC 现象不明显。

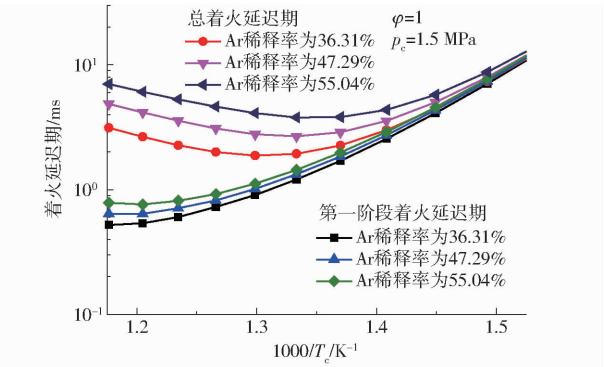


图 11 Ar 稀释率对二甲醚着火延迟期的影响

Fig. 11 Effects of Ar dilution ratio on ignition delays of DME

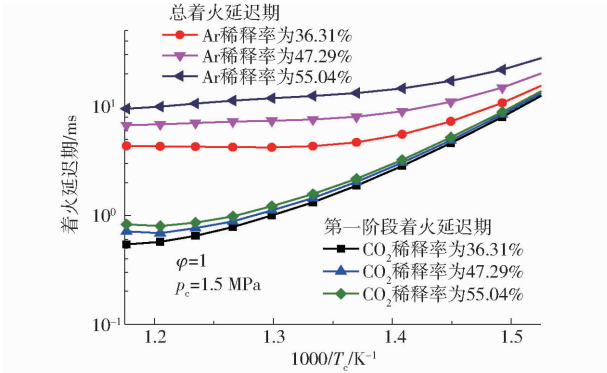


图 12 CO₂ 稀释率对二甲醚着火延迟期的影响

Fig. 12 Effects of CO₂ dilution ratio on ignition delays of DME

4 结论

(1) 实验与模拟结果表明:稀释气体组分对 DME 第一阶段着火延迟期影响很小,在低温区间,稀释气体组分对总着火延迟期的影响同样很小。而在 NTC 区间,稀释气体组分对总着火延迟期具有较大的影响,尤其在 NTC 区间的起点温度附近。与 N₂ 相比,N₂/Ar(50%/50%)使得实验结果与模拟结果总的着火延迟期分别缩短 30% 和 15%。

(2) 对比 N₂ 和 Ar/CO₂(61.2%/38.8%) 作为稀释气体时的 DME 着火延迟期,实验结果表明稀释气体的化学效应对第一阶段着火延迟期和总着火延迟期的影响很小,而模拟结果表明上止点温度超过 830 K 时,化学效应开始变得明显。

(3) 分别用 N₂、Ar 和 CO₂ 作稀释气体的模拟结果表明:在整个温度区间范围内,Ar 的热效应对 DME 总着火延迟期的影响起主导作用;在低温区间和 NTC 区间,CO₂ 的热效应同样起主导作用,但是当上止点温度超过 NTC 区间时,CO₂ 的化学效应影响增强且超过热效应而起到主导作用。

(4) 随稀释率增加,第一阶段着火延迟期略有延长,而总着火延迟期出现明显延长,且随稀释率增加,总着火延迟期的 NTC 现象变得更加明显。

参 考 文 献

1 SUNG C J, CURRAN H J. Using rapid compression machines for chemical kinetic studies [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2014, 44: 1 - 18.

2 WURMEL J, SILKE E J, CERRAN H J, et al. The effect of diluent gases on ignition delay times in the shock tube and in the rapid compression machine [J]. Combustion and Flame, 2007, 151(1 - 2): 289 - 302.

3 SHEN H-P S, VANDEROVER J, OEHLSCHLAEGER M A. A shock tube study of iso-octane ignition at elevated pressures: the influence of diluent gases [J]. Combustion and Flame, 2008, 155(4): 739 - 755.

4 DI H S, HE X, ZHANG P, 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 - 2538.

5 PETERSEN E L, DAVIDSON D F, HANSON R K. Kinetics modeling of shock-induced ignition in low-dilution CH₄/O₂ mixtures at high pressures and intermediate temperatures [J]. Combustion and Flame, 1999, 117(1 - 2): 272 - 290.

6 LIU H, ZHANG H G, SHI Z C, et al. Performance characterization and auto-ignition performance of a rapid compression machine [J]. Energies, 2014, 7(9): 6083 - 6104.

7 MITTAL G, SUNG C J. Aerodynamics inside a rapid compression machine [J]. Combustion and Flame, 2006, 145(1 - 2): 160 - 180.

- 8 SANTE R D. Measurements of the auto-ignition of n-heptane/toluene mixture using a rapid compression machine [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(1): 55–63.
- 9 LEE D, HOCHGREB S. Rapid compression machines: heat transfer and suppression of corner vortex [J]. Combustion and Flame, 1998, 114(3): 531–545.
- 10 WERLER M, CANCINO L R, SCHIESSL R, et al. Ignition delay times of diethyl ether measured in a high-pressure shock tube and a rapid compression machine [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(1): 259–266.
- 11 ALLEN C, MITTAL G, SUNG C J, et al. An aerosol rapid compression machine for studying energetic-nanoparticle-enhanced combustion of liquid fuels [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33: 3367–3374.
- 12 YU Y, VANHOVE G, GRIFFITHS J F, et al. Influence of EGR and syngas components on the autoignition of natural gas in a rapid compression machine: a detailed experimental study [J]. Energy Fuels, 2013, 27(7): 3988–3996.
- 13 AN H, CHUNG J, LEE S, et al. The effects of hydrogen addition on the auto-ignition delay of homogeneous primary reference fuel/air mixtures in a rapid compression machine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(40): 13994–14005.
- 14 ZHAO Z, CHAOS M, KAZAKOV A, et al. Thermal decomposition reaction and a comprehensive kinetic model of dimethyl ether [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2008, 40(1): 1–18.
- 15 ULTAN B, KIERAN P S, PETER O'TOOLE, et al. An ignition delay and kinetic modeling study of methane, dimethyl ether, and their mixtures at high pressures [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(2): 315–330.
- 16 PAN L, HU E J, TIAN Z M, et al. Experimental and kinetic study on ignition delay times of dimethyl ether at high temperatures [J]. Energy Fuels, 2015, 29(5): 3495–3506.
- 17 CURRAN H J, FISCHER S L, DRYER F L. The reaction kinetics of dimethyl ether. II: low-temperature oxidation in flow reactors [J]. International Journal of Chemical Kinetic, 2000, 32(12): 741–759.
- 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 Processing Technology, 2008, 89(12): 1244–1254.
- 19 张红光, 石智成, 卢海涛, 等. 基于快速压缩机的甲烷着火延迟期的研究 [J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(4): 577–584. ZHANG Hongguang, SHI Zhicheng, LU Haitao, et al. Study of ignition delay time of methane based on a rapid compression machine [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(4): 577–584. (in Chinese)
- 20 WAGNON S W, WOOLDRIDGE M S. Effects of buffer gas composition on autoignition [J]. Combustion and Flame, 2014, 161(4): 898–907.

(上接第 270 页)

- 10 RONDON M, LEHMANN J, RAMIREZ J, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions [J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43(6): 699–708.
- 11 WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms [J]. Plant and Soil, 2007, 300(1): 9–20.
- 12 LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: science and technology [M]. London: Earth Scan, 2009.
- 13 MATSUBARA Y, HASEGAWA N, FUKUI H. Incidence of fusarium root rot in asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus as affected by several soil amendments [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2002, 71(3): 370–374.
- 14 SOLAIMAN Z M, BLACKWELL P, ABBOTT L K, et al. Direct and residual effect of biochar application on mycorrhizal root colonisation, growth and nutrition of wheat [J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7): 546–554.
- 15 RILLIG M C, WAGNER M, SALEM M, et al. Material derived from hydrothermal carbonization: effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza [J]. Applied Soil Ecology, 2010, 45(3): 238–242.
- 16 刘舒, 陈春黎, 刘敏, 等. 两种内生真菌对大花蕙兰的共生效应比较 [J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(1): 43–49. LIU Shu, CHEN Chunli, LIU Min, et al. Comparing the symbiotic effects of two endophytes on growth of *Cymbidium hybridum* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016, 35(1): 43–49. (in Chinese)
- 17 孟令男, 许修宏, 李洪涛, 等. 污泥堆肥对氯噻磺隆残留及土壤中真菌群落结构的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 495–501. MENG Lingnan, XU Xihong, LI Hongtao, et al. Effects of sewage sludge compost on chlorimuron-ethyl residue and fungal community structure in soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3): 495–501. (in Chinese)
- 18 王丽娟, 王威威, 吕雪, 等. 鹿蹄草内生真菌的分离鉴定及其对鹿蹄草的生理效应 [J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(8): 87–92. WANG Lijuan, WANG Weiwei, LÜ Xue, et al. Isolation, identification and physiological effects of endophytic fungi from *Pyrola calliantha* H. Andr [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(8): 87–92. (in Chinese)
- 19 郭云中. 毛壳科 Chaetomiaceae 真菌多基因系统演化及分类鉴定研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. GUO Yunzhong. The multi-gene phylogeny and classification of Chaetomiaceae [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- 20 杜衍红, 蒋恩臣, 王明峰, 等. 炭-肥互作对芥菜生长和肥料利用率的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 59–64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160409&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.009. DU Yanhong, JIANG Enchen, WANG Mingfeng, et al. Effect of interaction of biochar–fertilizer on the yield of the mustard and the fertilizer utilization ratio [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 59–64. (in Chinese)