

文章编号:1000-582X(2011)12-042-06

## NO 对 CH<sub>4</sub> 氧化化学影响分析

王 迎, 郑朝蕾, 何祖威, 张庆峰, 王 峰

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**采用一个新的 NO-CH<sub>4</sub> 相互作用的化学动力学机理模型,在实验验证的基础上,模拟了 CH<sub>4</sub> 在 PFR (perfectly flow reactor, 充分流动反应器) 和 HCCI (homogeneous charge compression ignition, 均质充量压缩点火) 内燃机内的反应过程,改变 NO 初始摩尔浓度和反应温度,分析了 NO 对 CH<sub>4</sub> 氧化过程的影响,研究表明:NO 主要与 CH<sub>4</sub> 氧化过程中产生的过氧基 ROO· (过氧烷基) 发生反应,将其转化成 RO· (氧烷基)。低浓度 NO 加速了 CH<sub>4</sub> 的氧化,随着其浓度的升高,这种加速燃料氧化的性能逐渐被抑制;低温下,NO 对 CH<sub>4</sub> 氧化有很好的促进作用,高温下,由于过氧基 ROO· 浓度很低,NO 几乎失去作用;NO 对 CH<sub>4</sub> 燃料 HCCI 燃烧着火延迟期的影响与其浓度密切相关,低浓度下缩短着火延迟期,而高浓度下缩短着火延迟期的趋势减缓。以上结果主要基于反应 R126 与 R150 之间的竞争。

**关键词:** 甲烷; NO; 流动反应器; HCCI 内燃机; 氧化

**中图分类号:** TK46

**文献标志码:** A

### Chemical effect of NO on oxidation of CH<sub>4</sub>

WANG Ying, ZHENG Zhao-lei, HE Zu-wei, ZHANG Qing-feng, WANG Feng

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** A new chemical kinetic mechanism model of NO-CH<sub>4</sub> interaction is adopted to simulate the reaction process of CH<sub>4</sub> in the plug flow reactor (PRF) and HCCI engine based on the experimental verification. The initial NO mole concentration and reaction temperature are changed and the effect of NO on CH<sub>4</sub> oxidation is analyzed. The results show that: NO mainly reacts with alkylperoxy ROO· produced in CH<sub>4</sub> oxidative reaction, and alkylperoxy ROO· is transformed into alkoxy radicals RO·. NO accelerates the oxidation of CH<sub>4</sub> at low concentration. With the concentration of NO rising, its performance of speeding up fuel oxidation is inhibited. At low temperature, NO promotes oxidation of CH<sub>4</sub>. But at high temperature, due to low concentration of alkylperoxy ROO·, NO almost loses its effects. The effect of NO on ignition delay of HCCI combustion is closely related to its concentration. The ignition delay reduces when NO is at low concentration, and the trend reducing the ignition delay slows down at high concentration. These results are mainly based on competition between R126 and R150.

**Key words:** methane; nitric oxide; plug flow reactor; HCCI internal combustion engine; oxidation

最近几十年,由于环境污染不断加剧,世界各国都采取了更加严格的措施来限制内燃机的污染物排

放量,为此一种全新的燃烧模式——HCCI(均质充量压缩燃烧),引起了燃烧界的广泛关注,它结合了

收稿日期:2011-07-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51006128);国家科技支撑计划项目(2009BAG13B01)

作者简介:王迎(1982-),男,重庆大学博士研究生,主要研究方向为燃烧系统仿真,(E-mail)wy-7850@163.com。

火花点火和压缩点火 2 种模式的优点<sup>[1-6]</sup>,实现了低温稀薄燃烧,部分负荷时燃烧效率高,PM 和 NO<sub>x</sub> 排放量低,燃料选择范围广,但是,由于 HCCI 燃烧模式受燃料化学动力学控制,其着火时刻和燃烧速率难以直接控制,制约了 HCCI 规模化应用,因此,探索可靠控制 HCCI 着火时刻的策略是当前研究的热点问题。

最新研究发现,废气再循环(EGR)对控制 HCCI 的着火时刻和降低 NO<sub>x</sub> 排放有很好作用。由于燃烧产生的废气成分复杂,包括 UHC、NO<sub>x</sub>、CO 等气体,当这些废气进入气缸,会对燃料的氧化过程和 HCCI 的着火时刻产生重要影响。Glarborg、Dagaut、Bromly 等通过激波管、搅拌器、流反应器的试验研究发现,在 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 氧化过程中加入微量的 NO,能显著降低氧化反应起始温度,提高氧化效率<sup>[7-8]</sup>。Dubreuil 等人以正庚烷为燃料,进气中加入微量的 NO,发现其对冷焰着火时刻和燃烧持续期影响非常大<sup>[9]</sup>。尽管对 NO 化学作用的研究很多,但是大多限于试验研究,数值模拟分析相对较少,而且,对 NO 化学作用的分析大多采用简化谢尔多维奇三步机理。文中以最简单的碳氢化合物 CH<sub>4</sub> 为燃料,在 Bromly 等人试验研究的基础上,采用详细的 NO 与碳氢化合物相互作用的化学动力学模型,着重分析 NO 对碳氢燃料氧化分解的化学影响。采用 Faravelli、Ranzi 等人开发的 NO-C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> 相互作用详细机理<sup>[10-11]</sup>,着重分析了 NO 对 CH<sub>4</sub> 氧化和燃烧过程的影响,为深刻理解大分子碳氢化合物和汽油柴油燃料 EGR 在 HCCI 燃烧中的化学作用提供理论基础。

## 1 计算模型

### 1.1 模拟对象简介

数值模拟对象为恒温石英流动反应器和单缸、四冲程、水冷 HCCI 发动机。PRF(流动反应器)长 19 cm,内径 0.9 cm,内部覆盖电热丝,能够维持反应温度不变,反应气体由上部的 4 个入口分别进入反应器内,经混合区混合,在反应区充分反应,然后经冷空气冷却后流出,详细介绍见文献[12]。HCCI 发动机汽缸内径 85 mm,行程 88 mm,排量 499 cm<sup>3</sup>,压缩比 17,进气门关闭时刻 142CAD BTDC,排气门开启时刻 126CAD ATDC。

### 1.2 化学动力学模型

试验在定温、定压条件下进行,采用美国 SANDIA 国家实验室开发的 CHEMKIN 程序中的 SENKIN<sup>[13]</sup> 模块来模拟,数值计算采用的甲烷机理来自 Berkeley 大学 GRI-Mech Version 3.0<sup>[14]</sup>,该版

本是目前为止最新的、得到广泛认可的甲烷反应机理,包含 53 种组分,325 个反应,NO 详细氧化机理取自 Faravelli、Ranzi 等人研究成果,包含 30 种组分,260 个反应,该 NO 详细氧化机理经过大量的实验验证,与试验结果符合很好。

### 1.3 控制方程

质量控制方程为

$$\frac{dY_k}{dt} = \nu \dot{\omega}_k W_k, \quad (1)$$

式中:  $\frac{dY_k}{dt}$  为第  $k$  种物质质量分数的变化速率;  $\nu$  为系统容积;  $\dot{\omega}_k$  为基元反应中第  $k$  种物质的摩尔生成速率;  $W_k$  为第  $k$  种物质的摩尔质量。

能量控制方程为

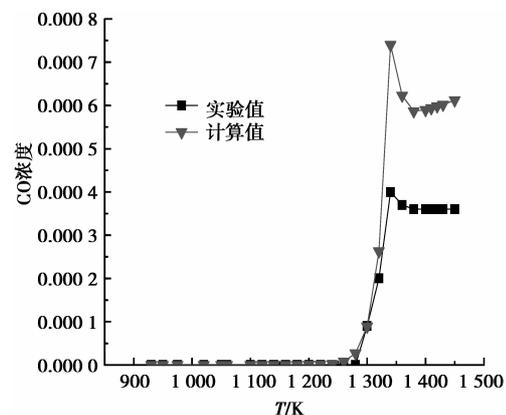
$$c_v \frac{dT}{dt} + \sum_{k=1}^k e_k \frac{dY_k}{dt} + p \frac{dv}{dt} = 0, \quad (2)$$

其中,  $c_v = \sum_{k=1}^k Y_k c_{v,k}$ 。以上 2 个方程,结合状态方程,便可计算出压力、温度以及各物质的反应速率。

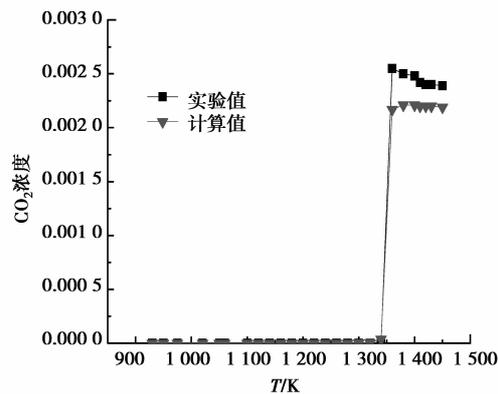
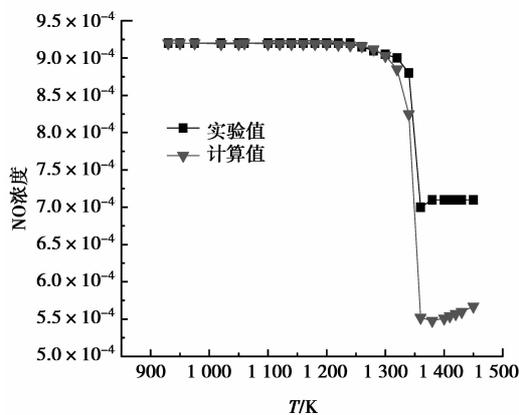
## 2 结果与分析

### 2.1 模拟与实验结果对比

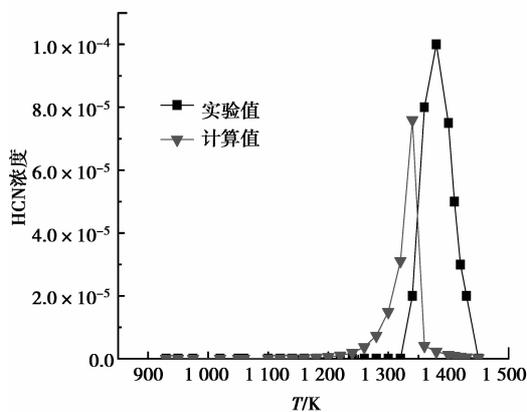
图 1 是 Glarborg 等人 PFR 试验结果和文中模拟结果对比,试验条件为压力  $1.05 \times 10^5$  Pa, CH<sub>4</sub> 浓度比  $2.800 \times 10^{-3}$ , O<sub>2</sub> 浓度比  $4.83 \times 10^{-3}$ , NO 浓度比  $9.2 \times 10^{-4}$ , H<sub>2</sub>O 浓度比  $1.9829 \times 10^{-2}$ , N<sub>2</sub> 浓度比  $9.71621 \times 10^{-1}$ 。从图中发现,在初始温度 1 300 K 以下,甲烷的氧化反应过程非常缓慢,CO 在这个温度下开始缓慢生成,超过 1 300 K,CO 快速生成,在 1 350 K 达到最大值,随着初始温度继续升高,NO 浓度很快降低,CH<sub>4</sub> 转化成 CO<sub>2</sub> 和 CO, HCN 浓度在 1 380 K 左右达到最大值,随后随初始温度升高迅速降低为零,从 2 种结果看,文中所采用的 NO 机理很好的反映了试验结果的趋势。



(a) CO 浓度曲线

(b) CO<sub>2</sub>浓度曲线

(c) NO浓度曲线

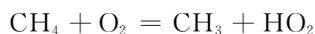


(d) HCN浓度曲线

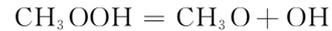
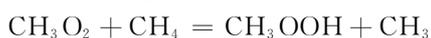
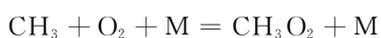
图 1 试验结果与模拟结果对比

## 2.2 CH<sub>4</sub> 氧化机理分析

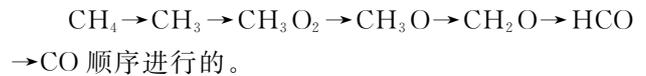
CH<sub>4</sub> 的氧化特性与其它碳氢化合物不相同,在低温下,化学反应通常是以 CH<sub>4</sub> 与 O<sub>2</sub> 的反应引发的<sup>[15]</sup>。



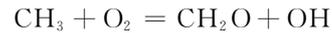
低温下,CH<sub>3</sub> 与 HO<sub>2</sub> 活性很低,CH<sub>3</sub> 还需经过以下系列链分支反应。



接下来 CH<sub>3</sub>O 可反应形成 CH<sub>2</sub>O。低温下 CH<sub>4</sub> 转换过程主要是按



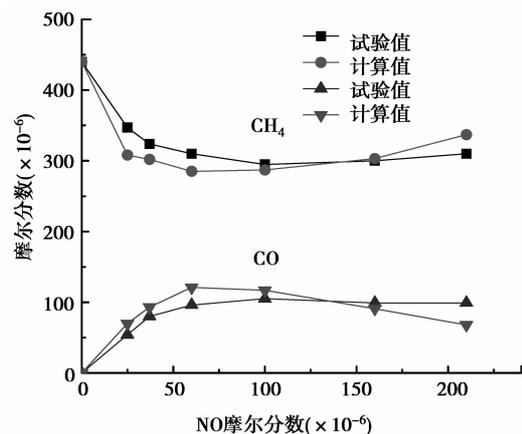
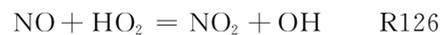
高温下,H、O、OH 等活性基浓度很高,CH<sub>4</sub> 在这些活性基作用下脱氢后形成 CH<sub>3</sub> 链传播反应中 CH<sub>3</sub> + O<sub>2</sub> 直接反应生成 CH<sub>2</sub>O。



CH<sub>4</sub> 转换过程主要是按 CH<sub>4</sub> → CH<sub>3</sub> → CH<sub>2</sub>O → HCO → CO → CO<sub>2</sub> 顺序进行的。

## 2.3 NO 浓度对 CH<sub>4</sub> 氧化影响

图 2 为不同 NO 浓度下 CH<sub>4</sub> 氧化模拟结果与实验结果对比,从该图可发现,NO 能明显促进 CH<sub>4</sub> 的氧化,但这种促进燃料氧化的能力和它的浓度密切相关,低浓度时,促进 CH<sub>4</sub> 氧化的能力很强,但随着浓度的不断升高,促进氧化的能力不断下降。理论分析发现,CH<sub>4</sub>/NO/O<sub>2</sub> 反应系统中,NO 主要与过氧活性基 RO<sub>2</sub> 发生反应,包括 HO<sub>2</sub>、CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub> 等,Faravelli 等人研究表明,NO 转化 NO<sub>2</sub> 过程中,80% 的 NO 与 HO<sub>2</sub> 反应,将其氧化成 OH。稳定的 HO<sub>2</sub> 基被转化成了活性很强的 OH 基,系统活性提高,从而大大加快了 CH<sub>4</sub> 的氧化速率,增强了氧化程度。图 3 是最主要的几个消耗 NO 的基元反应,由图中可发现,大部分 NO 经由



注: CH<sub>4</sub> (440 × 10<sup>-6</sup>) + O<sub>2</sub> (5%) + NO + N<sub>2</sub> (平衡)

t = 2.8 s, P = 1 × 10<sup>5</sup> Pa, T = 843 K.

图 2 模拟结果与试验结果比较

消耗,反应形成的 NO<sub>2</sub> 可通过与 H 的反应再循环成 NO,从而使链反应快速进行下去



同时,NO 还与 CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub> 发生如下反应

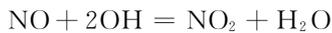


这个反应与 CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub> 的其他反应相互竞争,提供了一个快速生成 CH<sub>3</sub>O 的途径,对 CH<sub>4</sub> 的消耗也具有一定促进作用。

当系统中 NO 过多时,促进 CH<sub>4</sub> 氧化的能力随其浓度的升高而降低,由图 3 知,NO 浓度增大,R150 反应速率升高很快。



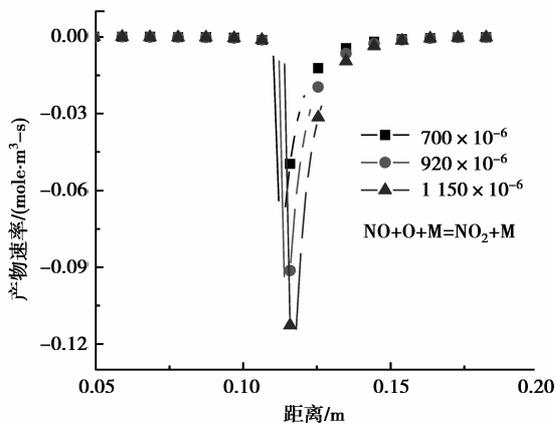
以上 2 个反应总的效果相当于



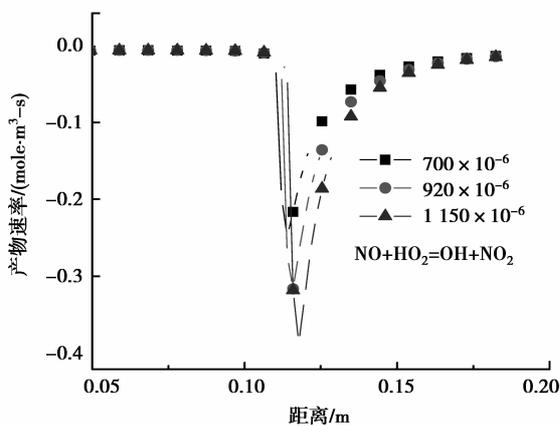
形成的 NO<sub>2</sub> 和 HO<sub>2</sub> 作用



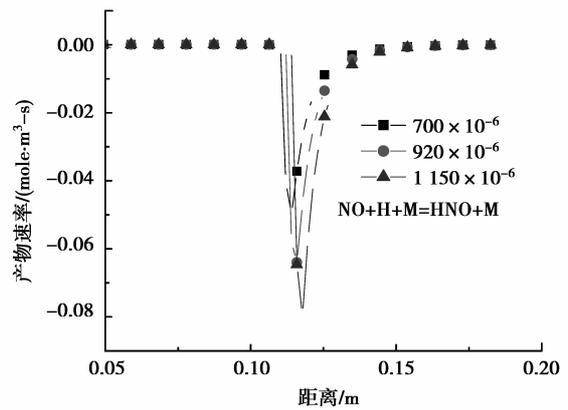
其中,R71 与 R126 之间的竞争是第 1 种抑制作用,R72 消耗 OH 是第 2 种抑制作用,当 NO+OH 与 CH<sub>4</sub>+OH 速率之比大于 1 时,系统反应速率会迅速下降。通过以上基元反应的作用,系统内 OH、HO<sub>2</sub> 等活性基浓度迅速降低,同时,NO<sub>x</sub> 还可发生以下几个基元反应:



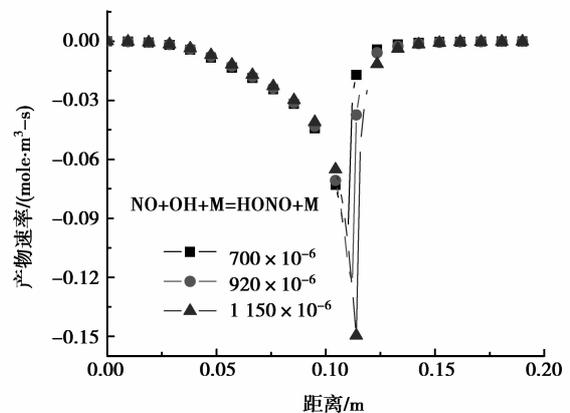
(a) NO 反应速率



(b) NO 反应速率



(c) NO 反应速率



(d) NO 反应速率

图 3 NO 反应速率曲线



从图 3 可看出,随着 NO 浓度增大,R150、R137、R38 反应速率都加快,这些反应共同作用的结果是整个系统内活性基元浓度下降,削弱了 NO 的氧化作用,抑制了 CH<sub>4</sub> 氧化。

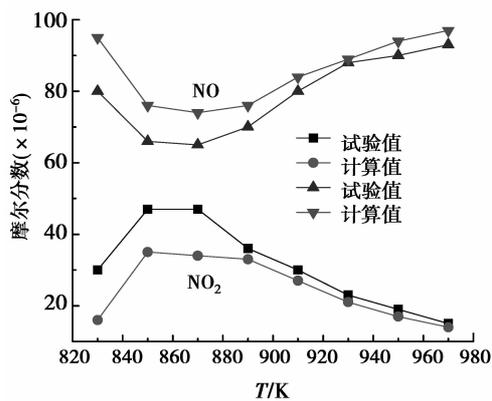
## 2.4 温度对 NO-CH<sub>4</sub> 系统的影响

温度是影响 NO 氧化性能很重要的因素。图 4 是不同温度下 NO-CH<sub>4</sub> 系统 PRF 模拟结果与试验结果对比,从图中可看出,当初始温度超过 900 K 时,NO⇌NO<sub>2</sub> 转化的效率开始降低,970 K 左右时,NO 总量接近初始状态,该曲线说明,在高温下,NO 几乎已失去其氧化活性。

如前所述,低温下,甲基 CH<sub>3</sub> 主要是与氧重组形成过氧化甲基 CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub>



NO 的加入,与 CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub> 按照 R278 发生反应,为链的传播提供了一条新的途径,同时 R126 生成的 NO<sub>2</sub> 还可发生以下基元反应



条件:  $\text{CH}_4(200 \times 10^{-6}) + \text{O}_2(5\%) + \text{NO}(112 \times 10^{-6}) + \text{N}_2(\text{平衡})$   $t=2.8 \text{ s}$ ,  $P=1 \times 10^5 \text{ Pa}$

图 4 模拟结果与试验结果比较



这些基元反应共同作用下,  $\text{CH}_3$  迅速转化成甲氧基  $\text{CH}_3\text{O}$ , 然后经脱氢反应生成  $\text{CH}_2\text{O}$  并最终形成  $\text{CO}$ 。

高温下,  $\text{CH}_3$  经 R41 反应生成  $\text{CH}_2\text{O}$



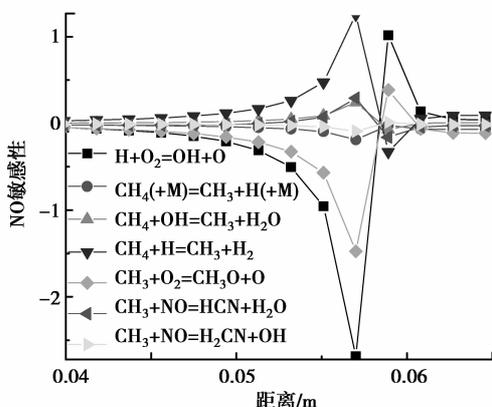
活性基库建立以后,  $\text{CH}_3$  主要在与  $\text{O}$  原子的反应中被消耗



在整个  $\text{CH}_3$  氧化过程中, 几乎不生成  $\text{CH}_3\text{O}_2$ , 并且最重要的  $\text{HO}_2$  在高温下分解, 故由于过氧自由基的极度缺乏,  $\text{NO}$  失去了它对  $\text{CH}_4$  氧化的促进作用。在此条件下,  $\text{NO}$  最主要的消耗途径为



图 5 是  $\text{NO}$  的敏感性分析, 既反映了  $\text{NO}$  的消



注:  $T=1450 \text{ K}$ ,  $P=1.05 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $\text{CH}_4(2.800 \times 10^{-6}) + \text{O}_2(4.830 \times 10^{-6}) + \text{NO}(9.20 \times 10^{-6}) + \text{H}_2\text{O}(2\%) + \text{N}_2(\text{平衡})$

图 5  $\text{NO}$  敏感性分析.

耗途径, 也同时显示了系统的活性主要来自于链分支反应( $\text{H} + \text{O}_2$ ,  $\text{CH}_3 + \text{O}_2$ )与  $\text{CH}_3$  化合反应之间的竞争, 同时, R335 与 R336 之间的竞争, 对整个系统的活性也产生了重要影响。

## 2.5 $\text{NO}$ 对 $\text{CH}_4$ 均质压燃着火延迟的影响

在 PFR 实验基础上, 探讨了  $\text{NO}$  对  $\text{CH}_4$  燃料 HCCI 燃烧着火延迟的影响。试验条件  $T=450 \text{ K}$ ,  $P=1 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 转速为  $1500 \text{ r/min}$ , 当量比  $0.3$ 。定义着火延迟为最大放热率的  $10\%$  所对应的曲轴转角。图 6 是不同  $\text{NO}$  摩尔浓度下的着火延迟的实验与计算对比曲线。由该图可知, 文中机理所预测的着火延迟与实际着火延迟基本一致, 最大误差为  $2.5 \text{ CAD}$ , 能基本反应  $\text{NO}$  对 HCCI 着火延迟的影响。

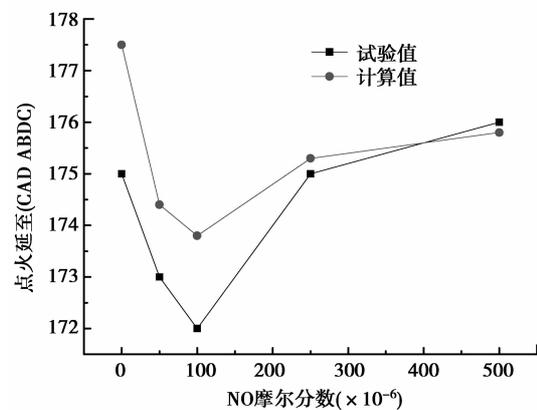


图 6  $\text{NO}$  浓度对着火延迟影响实验与计算对比

图 7 为添加  $50 \times 10^{-6}$   $\text{NO}$  条件下的缸内  $\text{NO}$  摩尔分数曲线。由该浓度曲线可看出, 上止点前, 加入的  $\text{NO}$  参与了  $\text{CH}_4$  的氧化分解,  $\text{NO}$  浓度逐渐降低, 上止点后, 随着缸内温度升高, 在高温作用下,  $\text{N}_2$  被分解, 随后经一系列的转化, 最终生成  $\text{NO}$ 。

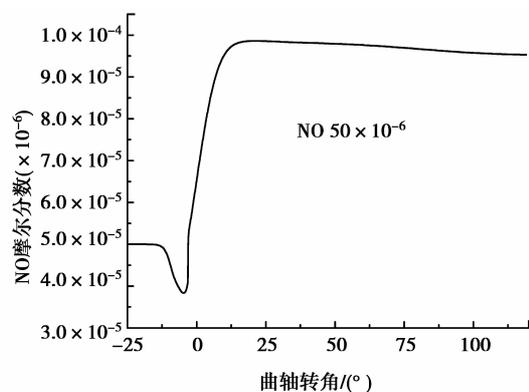


图 7  $\text{NO}$  摩尔分数曲线

图 8 为缸内温度曲线, 由图可见,  $\text{NO}$  对  $\text{CH}_4$  的

HCCI 燃烧产生了明显影响。当 NO 浓度较低时, CH<sub>4</sub> 的着火时刻有一定程度的提前,随着加入的 NO 量增多,着火时刻角度的提前量呈现逐渐减弱的趋势,这个模拟结果和文中 PRF 模拟结果相同:微量的 NO 促进了 CH<sub>4</sub> 的氧化,随着其浓度的增加,促进 CH<sub>4</sub> 氧化的能力下降。

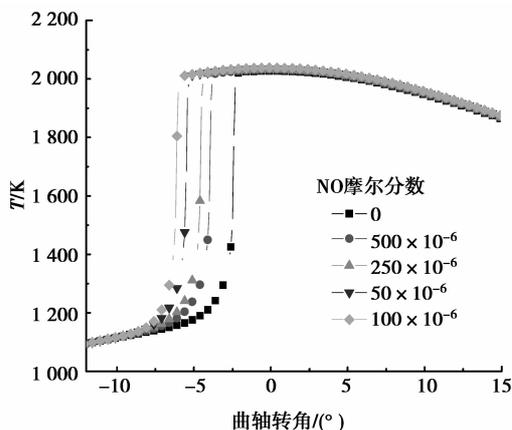


图 8 NO 浓度对 CH<sub>4</sub> 燃烧温度影响曲线

图 9 是 CH<sub>4</sub> 燃料在不同 NO 摩尔浓度下的着火延迟期。由图可看出,NO 浓度对着火延迟期影响很大,当浓度小于 0.01%,NO 量越大,着火越早,当浓度大于 0.025%,CH<sub>4</sub> 燃料着火提前,但是提前的幅度随 NO 浓度的增大而逐渐减小。

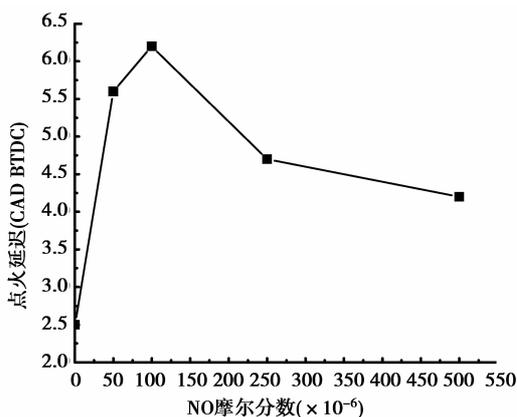


图 9 NO 浓度对 CH<sub>4</sub> 着火延迟期影响

分析可知,CH<sub>4</sub> 燃料 HCCI 燃烧着火延迟期的缩短,来自于低摩尔浓度 NO 对 CH<sub>4</sub> 氧化的加速作用,即通过基元反应 R126:  $\text{NO} + \text{HO}_2 = \text{NO}_2 + \text{OH}$ ,增加了缸内活性基 OH 的浓度。随着 NO 摩尔浓度的逐渐升高,这种加速作用受到了抑制,最主要的基元反应 R150:  $\text{NO} + \text{OH} + \text{M} = \text{HONO} + \text{M}$ ,该反应同 R126 产生竞争,削弱其加速作用。

当 EGR 气体中存在 NO 时,对燃料的 HCCI 燃烧产生了重要影响,为寻找有效控制 HCCI 着火时刻提供了一种可能的途径。

### 3 结 论

在对 CH<sub>4</sub> 氧化路径分析的基础上,探讨了 NO 浓度和反应温度对 NO—CH<sub>4</sub> 反应系统的影响,以及 NO 对 CH<sub>4</sub> 均质压燃的影响,可得出以下结论。

1)文中所采用的 CH<sub>4</sub>/NO 反应机理能够很好的描述实验过程。CH<sub>4</sub> 氧化过程中,NO 主要与过氧基 ROO· 反应,将其转化为 RO·。

2)NO 浓度对其氧化性有重要影响,低浓度下,NO 对 CH<sub>4</sub> 氧化有很好的促进作用,而随着浓度的升高,促进 CH<sub>4</sub> 氧化的作用逐渐消失。

3)温度也是影响 NO 氧化性的重要条件。低温下,NO 将过氧基(CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub>·、HO<sub>2</sub>·)氧化成活性更强的基团,提高了系统的活性。高温下,由于过氧基浓度很低,NO 作用减弱,大部分和 CH<sub>3</sub>· 结合生成 HCN、H<sub>2</sub>CN。

4)NO 浓度较低时,CH<sub>4</sub> 燃料 HCCI 燃烧着火时刻有一定程度的提前,而高浓度下着火时刻提前趋势减弱,主要是基于反应 R126 和 R150 之间的竞争。

### 参考文献:

- [1] CHEN Z, KONNO M, OGUMA M, et al. Experimental study of CI natural-gas /DME homogeneous charge engine [C]. SAE Paper, No. 2000-01-0329, 2000.
- [2] YAMADA H, SUZAKI K, SAKANASHI H, et al. Kinetic measurements in homogeneous charge compression of dimethylether; role of intermediate formaldehyde controlling chain branching in the low-temperature oxidation mechanism[J]. Combustion and Flame 2005,140(1-2):24-33.
- [3] CHEN Z, KONNO M, MIKI K. Computational and experimental study on the influence of formaldehyde on HCCI combustion fueled with dimethylether[C]. SAE Paper, No. 2003-01-1826, 2003.
- [4] TANAKA S, AYALA F, KECK J C, et al. Two-stage ignition in HCCI combustion and HCCI control by fuels and additives[J]. Combustion and Flame, 2003, 132(1-2): 219-239.
- [5] TANAKA S, AYALA F, KECK J C. A reduced chemical kinetic model for HCCI combustion of primary reference fuels in a rapid compression machine [J]. Combustion and Flame, 2003,133(4):467-481.

- (8):1153-1169.
- [ 8 ] MARAGOS P, SCHAFER R W. Morphological filters-part II: their relation to median, order-statistic, and stack filters [J]. *Signal Processing*, 1987, 35 (8): 1170-1184.
- [ 9 ] 赵林度,盛昭瀚. 离散余弦变换在轴心轨迹自动识别中的应用[J]. *振动测试诊断*, 1999, 19(1):35-38.  
ZHAO LIN-DU, SHENG ZHAO-HAN. Application of discrete cosine transform to automatic identification of shaft centerline orbit [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 1999, 19(1):35-38.
- [10] 王海,郑莉媛. 水轮发电机组轴心轨迹自动识别方法研究[J]. *水力发电学报*, 2002, 78(3):73-79.  
WANG HAI, ZHENG LI-YUAN. Automatic identification of shaft orbit of hydraulic power sets[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2002, 78 (3): 73-79.
- [11] DAVID T, RACHID D. Vector-valued image regularization with PDE's: a common framework for different applications[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(4):1-12.
- [12] YOU Y-L, KAVEH M. Fourth-order partial differential equations for noise removal [J]. *Image Processing*, 2000, 7(10):1723-1730.
- [13] 吴宏钢,尹爱军,秦树人. 基于 PDE 的振动信号去噪研究[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(5):91-94.  
WU HONG-GANG, YIN AI-JUN, QIN SHU-REN. Vibration signal denoising based on partial differential equation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(5):91-94.
- [14] AHMED N U, RADAIDEH S M. A powerful numerical techniques solving zakai equation for nonlinear filtering[J]. *Dynamics and Control*, 1997, 7 (3):293-308.
- [15] RADAIDEH S M, ROUSAN M A. A new numerical technique for solving the nonlinear filtering problem[J]. *International Journal of Electronics*, 2002, 89 (7): 561-573.

(编辑 张小强)

(上接第 47 页)

- [ 6 ] CHEN R, MILOVANOVIC N. A computational study into the effect of exhaust gas recycling on homogeneous charge compression ignition combustion in internal combustion engines fuelled with methane[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2002, 41(9):805-813.
- [ 7 ] BROMLY J H, BAMES F J, MURIS S. Kinetic and thermodynamic sensitivity analysis of the NO-sensitized oxidation of methane [J]. *Combustion science and technology*, 1996, 115: 259-271.
- [ 8 ] BENDTSEN A B, GLARGORG P. Low temperature oxidation of methane: the influence of nitrogen oxides[J]. *Combustion science and technology*, 2000, 151:31-71.
- [ 9 ] DUBREUIL A, FOUCHER F, CHRISTINE M R. HCCI combustion: effect of NO in EGR [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2879-2886.
- [10] FARAVELLI T, FRASSOLDATI A, RANZI E. Kinetic modeling of the interactions between NO and hydrocarbons in the oxidation of hydrocarbons at low temperatures[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 132(1-2):188-207.
- [11] FARAVELLI T, FRASSOLDATI A, RANZI E. Kinetic modeling of the interactions between NO and hydrocarbons at high temperatures[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 135(1-2):97-112.
- [12] ALZUETA M U, GLARBORG P, JOHANSEN K D. Low temperature interactions between hydrocarbons and nitric oxide: an experimental study[J]. *Combustion and Flame*, 1997, 109(1-2):25-36.
- [13] ANDREW L, ROBERT K, JAMES M. SENKIN: a fortran program for predicting Homogenous gas chemical kinetics with sensitivity analysis[R]. Sandia: Sandia National Laboratories Report, 1991.
- [14] FRENKLACH M, BOWMAN T, Smith G, et al. GRI-Mech [EB/OL]. (2000-02-01) [2010-09-18]. [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
- [15] 蒋德明,陈长佑,杨嘉林,等. 高等车用内燃机原理[M]. 下册. 西安:西安交通大学出版社, 2006.

(编辑 陈移峰)