

二甲醚掺混对氨高温着火延迟期的影响

张齐英, 姜雪, 刘曦宇, 张天琦, 黄佐华

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对氨燃料化学反应活性低、直接在发动机上使用较难实现可靠着火及高效燃烧的问题,开展了添加高反应活性燃料二甲醚改善氨着火性能的实验及模拟研究。利用激波管实验装置获得了压力为 1 MPa、温度在 1 079~1 667 K 范围内和当量比为 1 条件下氨/二甲醚燃料的着火延迟期的实验数据,揭示了添加二甲醚后的着火促进效果;利用实验数据评价了不同化学反应动力学模型对氨/二甲醚燃料着火延迟期的预测表现;基于 Dai 模型开展了化学反应动力学理论分析,明晰了掺混二甲醚对反应路径、着火敏感反应和自由基产率的影响机制。实验结果表明,高温下掺混二甲醚对氨着火延迟期有显著的非线性促进作用,实际应用中仅掺混少量即可达到着火调控效果。化学反应动力学分析结果表明:添加摩尔分数为 5% 的二甲醚对氨的化学反应路径影响较小,着火过程中两种燃料之间存在自由基的竞争;添加二甲醚在着火初期提高了 OH 自由基生成反应的产率,从而显著缩短了着火延迟期。该研究可为氨燃料发动机的着火调控和性能优化提供参考。

关键词: 着火延迟期;氨;二甲醚;化学反应动力学

中图分类号: TK40 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202309009 **文章编号:** 0253-987X(2023)09-0079-08

Effects of Dimethyl Ether Addition on the High Temperature Ignition Delays of Ammonia

ZHANG Qiyang, JIANG Xue, LIU Xiyu, ZHANG Tianqi, HUANG Zuohua

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing on the problem that ammonia with low chemical reactivity has difficulty achieving reliable ignition and efficient combustion in engine applications, experimental and simulation studies were conducted in the paper to understand the effects of adding active additives, namely dimethyl ether (DME), on the ignition delay times of ammonia. Firstly, experimental measurements of stoichiometric ammonia/DME mixtures were conducted in a shock tube at temperatures of 1 079—1 667 K and with a pressure of 1 MPa to reveal that DME addition can shorten the ignition delay times. Secondly, predictions of the literature chemical kinetic models on the ignition delay times of ammonia/DME mixtures were verified against the experimental results. Thirdly, chemical kinetics analyses, including reaction pathway analysis, sensitivity analysis, and free-radical ROP analysis, were carried out to understand the influence of DME addition on the ignition delay times of ammonia using the Dai model. Experimental results indicate that the

收稿日期: 2022-12-30。 作者简介: 张齐英(1998—),男,硕士生;姜雪(通信作者),女,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51876164);航空航天结构力学及控制国家重点实验室开放课题资助项目(MCMS-E-0323K01)。

网络出版时间: 2023-05-19

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230518.1549.006.html>

addition of DME remarkably promotes the ignition delay of ammonia nonlinearly at high temperatures, revealing that only a small amount of DME addition can reduce the ignition delay times in practical applications. Chemical kinetic analysis reveals that the addition of 5% DME has a limited effect on the reaction pathway of ammonia and the two fuels compete for free radicals during the ignition; DME addition can accelerate the production rate of the OH radical in the early stage of the ignition, thus significantly shortening the ignition delay times. The research can provide a reference for the ignition improvement and performance optimization of ammonia-fueled engines.

Keywords: ignition delay time; ammonia; dimethyl ether; chemical kinetics

为了应对全球气候问题并实现二氧化碳减排,近年来氨(NH_3)燃料受到广泛关注。氨是优良的氢能载体并可解决氢储运的难题。同时,氨更是备受关注的无碳替代燃料,完全燃烧只产生氮气与水。液氨的体积能量密度约为 $13 \text{ MJ/L}^{[1]}$,高于液氢并与化石燃料接近。氨燃料在交通运输、火力发电和船舶海运等领域的推广应用对于实现“碳中和”目标具有重要的意义^[2-4]。特别是,近年来提出了利用可再生能源制备“绿氨”的技术^[5],通过太阳能、风能等清洁能源制氨,有望实现氨燃料全生命周期零碳排放利用。

尽管氨具有上述优势,但是与常规化石燃料相比,氨的自着火温度高,着火延迟期长,火焰传播速度仅为常规碳氢燃料的 $1/5^{[6]}$ 。为了实现氨燃料在动力装置中的高效稳定燃烧,使用中往往需要掺混高活性组分。目前,学者们开展了氢气、甲烷、正庚烷等作为氨燃料活性添加剂的研究。近年来,学者们^[7-9]分别在快速压缩机和激波管上研究了甲烷添加对氨燃料着火延迟期的影响,发现甲烷能加速氨的着火,并且氨与甲烷之间没有明显化学交互反应。Yu等^[10]在快速压缩机上测量了温度为 $635\sim 945 \text{ K}$ 、压力为 1 MPa 和 1.5 MPa 、当量比在 $1.0\sim 2.0$ 范围内时添加正庚烷对氨着火延迟期的影响,发现当正庚烷掺混比达 20% 时混合燃料着火延迟期受正庚烷主导。此外,Feng等^[11]开展了柴油添加对氨着火延迟期的研究,发现柴油对氨的着火同样具有非线性促进作用。Pochet等^[12]、Dai等^[13]和Chen等^[14]分别开展了氢气掺混氨的着火延迟期的研究,发现少量氢气添加对氨着火具有显著的非线性促进,仅摩尔分数为 5% 的氢气掺混可以使着火延迟期缩短约 60% ,这表明氢气是优良的氨着火活性添加剂。Li等^[15]在快速压缩机中研究了氨/甲醇的着火延迟期,发现仅摩尔分数为 1% 的甲醇添加就能够明显促进氨燃料着火。此外,相关研究还发现乙醚^[16]和二异丙基酮^[17]的添加也可促进氨燃料着火,缩短着火延迟期。

二甲醚(DME, CH_3OCH_3)是一种高活性的含氧燃

料,其十六烷值为 $55\sim 60$,可显著提高压燃式发动机的冷起动着火性能^[18],添加二甲醚有望促进氨燃料着火并缩短着火延迟期^[19]。最近,一些研究者^[20-21]在快速压缩机上开展了氨掺混二甲醚的着火延迟期实验(温度范围为 $610\sim 1\,180 \text{ K}$)并构建了化学反应动力学模型。着火延迟期是指导发动机燃烧室设计与优化的重要基础数据,也是化学反应动力学模型验证的依据。实际燃烧装置通常要在宽广温度范围内运行,但是目前二甲醚掺混氨的着火延迟期研究覆盖工况有限,特别是 $1\,180 \text{ K}$ 以上的高温工况下二甲醚添加对氨着火延迟期的调节效果还不清楚,缺乏实验数据。

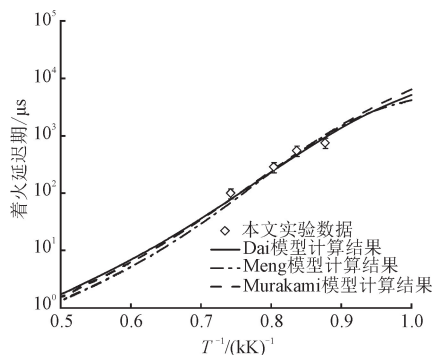
从指导实际应用和发展反应动力学的角度出发,本文基于激波管实验台开展二甲醚添加对氨高温着火延迟期影响的研究。首先,通过实验测量了温度在 $1\,079\sim 1\,667 \text{ K}$ 范围内二甲醚/氨的着火延迟期,揭示二甲醚的着火延迟调节效果;接着,将实验数据与不同化学反应动力学模型预测进行对比,评价模型的适用性;最后,通过化学反应动力学模拟分析,揭示二甲醚掺混对氨着火的化学反应路径、敏感基元反应和关键自由基产率的影响机制。本研究为氨燃料发动机着火调控和优化提供了参考。

1 实验及模拟方法

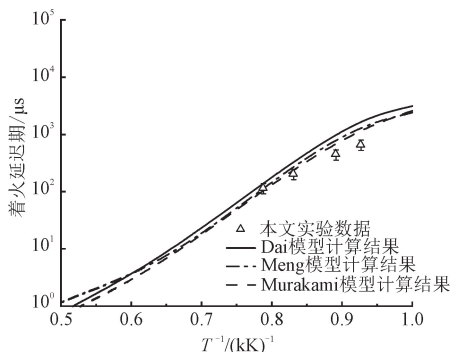
1.1 实验平台及实验方法

本研究实验工作在西安交通大学激波管平台上开展,该平台简图如图1所示。激波管的材质为 304 不锈钢,管体被双膜夹膜机构分为驱动段(6 m)和被驱动段(6 m),实验过程中破膜产生激波获得接近等容绝热的实验环境^[22]。

本实验研究中,着火延迟期定义为入射激波到达激波管端面的时刻与羟基自由基(OH^*)自发光信号上升斜率峰值的延长线到基线间的时间间隔,如图2所示。着火延迟期数据与模型验证如图3所示。实验中非理想效应引起的压力升高率(dp/Pd)为每毫秒 2% ,着火延迟期实验误差为 $\pm 20\%^{[23]}$,如图3所示。



(c) 混合物 3



(d) 混合物 4

图 3 着火延迟期数据与模型验证结果的对比

Fig. 3 Ignition delay data and model validation

总的来说,只有 Dai 模型可较为准确地预测本研究实验数据,因此本文选取 Dai 模型进行模拟分析。可以看出,在 1 350 K 附近,Dai 模型对混合物 1 的着火延迟期的预测比实验数据略长。这主要是由于该模型中着火敏感反应 $\text{NH}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{NO} + \text{OH}$ 的速率系数存在一定的不确定性,由于缺乏高水平理论计算结果,Dai 模型中对该反应的速率系数进行了估计,其估计值约为 Cheskis 等^[28]实验结果的 1/3。此外,在 1 350 K 附近 Dai 模型对混合物 4 的着火延迟期的预测也存在略微偏差。主要原因是 Dai 模型中反应 $\text{CH}_3\text{OCH}_2 = \text{CH}_3 + \text{CH}_2\text{O}$ 的速率常数采纳了 Gao 等^[29]的理论计算结果,但是该理论计算值比 Sehested 等^[30]的实验值偏快约 2 倍,该反应是生成相对稳定产物甲醛的着火抑制反应通道,其速率常数偏快导致了模型的预测结果比实际着火延迟期更长。由此可以看出,目前氨/二甲醚模型还不完善,有待进一步发展和优化。

2.2 二甲醚添加对着火延迟期的影响

图 4 所示是 4 种混合物的着火延迟期实验及模拟结果。可以看出,添加摩尔分数为 5% 的二甲醚就可以显著缩短氨燃料的着火延迟期。当二甲醚的摩尔分数增加至 25% 时,混合物 3 的着火延迟期与

混合物 4 接近。

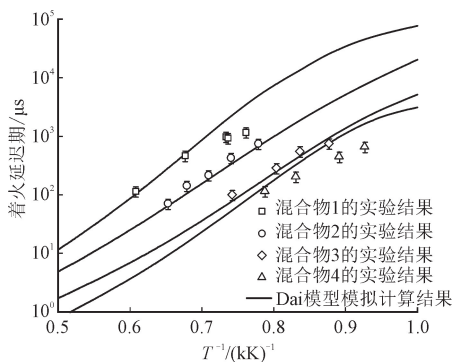


图 4 氨/二甲醚着火延迟期

Fig. 4 Ignition delay times of ammonia/DME mixtures

本文定义了缩短因子 τ_r 来定量分析二甲醚添加对氨着火延迟期的影响程度, τ_r 的定义如下

$$\tau_r = \frac{\tau_{\text{DME/NH}_3} - \tau_{\text{NH}_3}}{\tau_{\text{NH}_3}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\tau_{\text{DME/NH}_3}$ 表示不同掺混比的二甲醚/氨混合燃料的着火延迟期; τ_{NH_3} 表示纯氨燃料的着火延迟期。

二甲醚添加对氨着火延迟期的影响如图 5 所示,在 1 250 K 和 1 500 K 时,添加摩尔分数为 5% 的二甲醚可将氨着火延迟期分别降低约 86% 和 72%,这表明二甲醚对氨的着火起到了显著的非线性促进作用。文献[14]中高温下添加摩尔分数为 5% 的氢气可使得氨燃料着火延迟期缩短约 60%。从图 5 中可以看出,添加二甲醚与添加氢气对于氨着火延迟期的促进效果相当,因此实际应用中仅少量掺混即可达到较好的着火调控作用。

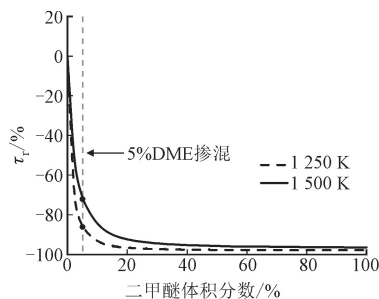


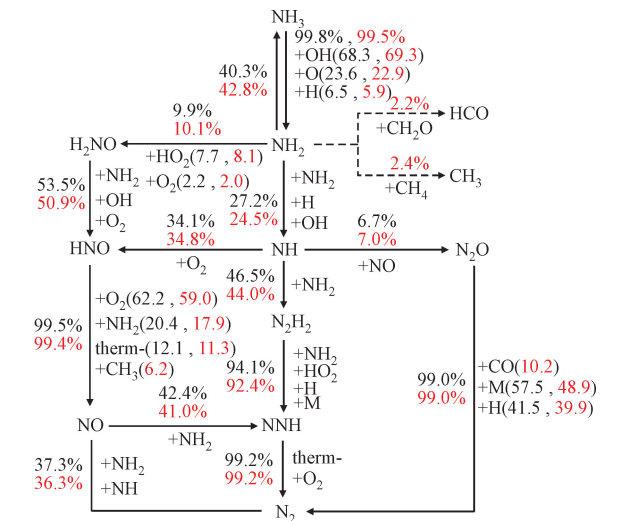
图 5 氨着火延迟期缩短因子随二甲醚添加的变化

Fig. 5 Effect of DME addition on ammonia ignition delay

2.3 化学反应动力学分析

2.3.1 反应路径分析

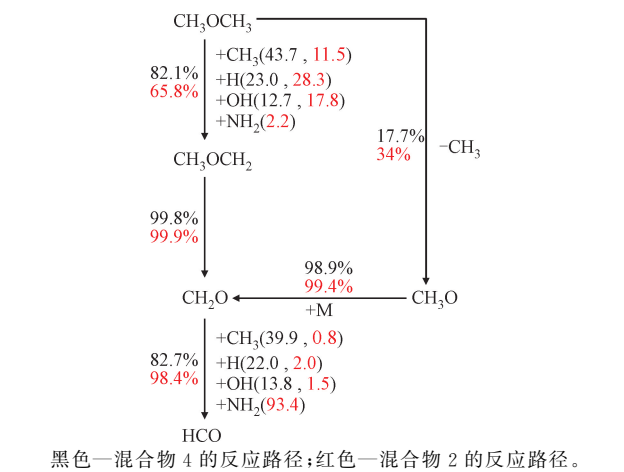
为揭示二甲醚与氨掺混后的化学交互影响,本文开展了反应路径分析。图 6 和图 7 是压力为 1 MPa、温度为 1 500 K、当量比为 1 工况下总燃料消耗 20% 时刻混合物 1 和 2 的化学反应路径。



黑色—混合物 1 的反应路径;红色—混合物 2 的反应路径;+—该路径中某物种或自由基参与了反应;—该路径中产生了某个物种或自由基;黑体百分比表示路径的总分占比;括号内数值表示两种反应通道的路径分支比。

图 6 氨燃料化学反应路径

Fig. 6 Reaction pathway of ammonia. The percentages represent the path branching ratio of each reaction channel



黑色—混合物 4 的反应路径;红色—混合物 2 的反应路径。

图 7 二甲醚化学反应路径

Fig. 7 Reaction pathway of ammonia

由反应路径分析可以看出,纯氨着火时燃料分子首先与 OH、O 和 H 自由基发生氢提取反应生成 NH₂。约 40.3% 的 NH₂ 又转化成了 NH₃,剩下的 NH₂ 主要通过与 NH 和 NH₂ 进行反应生成了 N₂H₂ (路径分支比为 30.6%,下文同),还有一部分 NH₂ 生成了 H₂NO。随后,绝大部分 N₂H₂ (94.1%)生成了 NNH,最终转化为 N₂。生成的 H₂NO 主要通过 H₂NO→HNO→NO 的反应路径消耗,最终产生 N₂。

添加摩尔分数为 5% 的二甲醚后,虽然燃料的着火延迟期降低约 72%,但氨的主要反应路径分支

比没有发生明显变化。二甲醚添加后,含碳物种对氨的反应路径的影响主要体现在 3 个方面:①少量 NH₂ (4.6%)与 CH₂O 和 CH₄ 发生反应;②约 6% 的 HNO 与 CH₃ 反应生成 NO;③10.2% 的 N₂O 与 CO 反应并生产 N₂。总的来说,摩尔分数为 5% 的二甲醚添加对氨的化学反应路径影响较小。

图 7 所示为二甲醚的着火化学反应路径,可以看出约有 82.1% 的二甲醚燃料分子与 CH₃、H 和 OH 等发生氢提取反应生成 CH₃OCH₂,约有 17.7% 的二甲醚热解生成 CH₃ 和 CH₃O。随后,CH₃OCH₂ 裂解产生 CH₂O 与 CH₃,CH₃O 也生成了 CH₂O,几乎所有的 CH₂O 反应生成 HCO。

当摩尔分数为 5% 的二甲醚与氨掺混后,二甲醚氢提取反应的路径分支比从 82.1% 降低到 65.8%,与此同时,燃料热解反应路径分支比由 17.7% 上升至 34%,掺混后二甲醚的反应路径受到明显影响。可以看出,着火过程中两种燃料之间存在自由基的竞争,二甲醚的反应活性较高,其在着火初期产生的自由基被氨氧化所消耗促进了氨燃料着火,这也导致了掺混后二甲醚氢提取反应路径分支比下降。此外,由于掺混后氨浓度远高于二甲醚占主导地位,此时 CH₂O 的消耗路径也发生明显变化,93.4% 的 CH₂O 与 NH₂ 反应生成 HCO。

2.3.2 敏感性分析

图 8 是压力为 1 MPa、温度为 1 500 K、当量比为 1 工况下混合物 1 和 2 的着火延迟的敏感性分析。敏感性系数定义与文献[23]中一致,当基元反

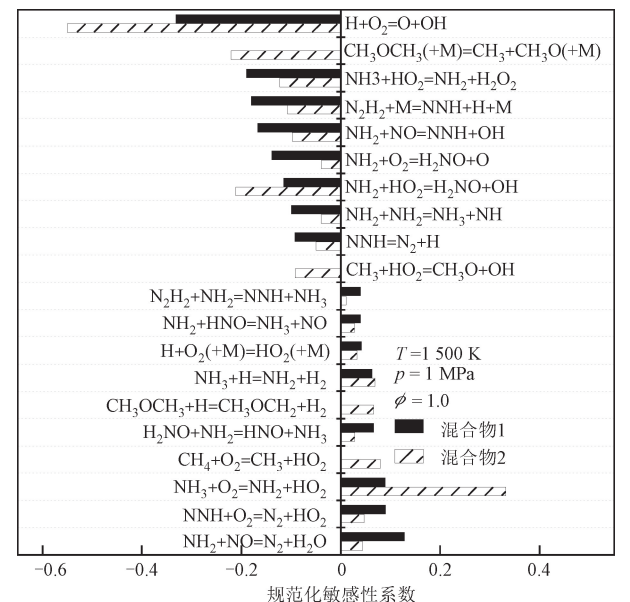


图 8 着火敏感性分析

Fig. 8 Normalized ignition sensitivity analysis

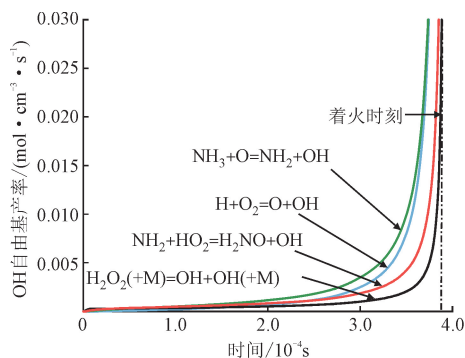
应敏感性系数为负数表示该反应对着火起促进作用,当敏感性系数为正数表示该反应抑制着火。

对于纯氨,最重要的着火促进反应是 $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$,该反应也是着火关键自由基 OH 生成的主要路径^[31];而链终止反应 $\text{NH}_2 + \text{NO} = \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$ 是最显著的着火抑制反应。

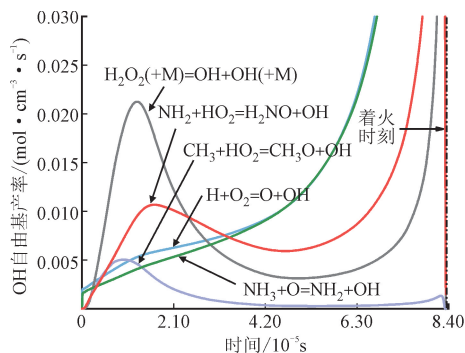
添加摩尔分数为 5% 的二甲醚后,反应 $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$ 、 $\text{HO}_2 + \text{NH}_2 = \text{H}_2\text{NO} + \text{OH}$ 、 $\text{CH}_3 + \text{HO}_2 = \text{CH}_3\text{O} + \text{OH}$ 等 OH 自由基生成反应的敏感性系数明显增大, OH 是主导高温着火的关键自由基,这表明二甲醚的添加对上述反应产生了重要的促进作用。此外,随着二甲醚的添加,氨燃料相关的着火促进反应敏感性有所降低,而二甲醚的分解反应 $\text{CH}_3\text{OCH}_3 (+\text{M}) = \text{CH}_3 + \text{CH}_3\text{O} (+\text{M})$ 成为最重要的着火促进反应之一。此外,二甲醚添加后最显著的着火抑制反应变为 $\text{NH}_3 + \text{O}_2 = \text{HO}_2 + \text{NH}_2$,该反应与 $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$ 争夺氧气,对着火起到显著的抑制作用。

2.3.3 自由基产率分析

为了揭示二甲醚添加对着火过程关键自由基 OH 自由基产率的影响,图 9 是压力为 1 MPa、温度为 1 500 K、当量比为 1 工况下混合物 1 和 2 的着火过程 OH 自由基产率分析。



(a) 混合物 1



(b) 混合物 2

图 9 OH 自由基产率分析

Fig. 9 Rate of production of OH radical

如图 9(a)所示,对于纯氨着火, OH 自由基主要通过 $\text{NH}_3 + \text{O} = \text{NH}_2 + \text{OH}$ 、 $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$ 、 $\text{NH}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{NO} + \text{OH}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2 (+\text{M}) = \text{OH} + \text{OH} (+\text{M})$ 等反应进行累积。可以看出,在着火初期 OH 自由基的产率增长缓慢,直到临近着火时刻 OH 自由基的产率才快速增加。

如图 9(b)所示,当摩尔分数为 5% 的二甲醚掺混后, OH 自由基在着火初期可通过 $\text{H}_2\text{O}_2 (+\text{M}) = \text{OH} + \text{OH} (+\text{M})$ 、 $\text{NH}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{NO} + \text{OH}$ 、 $\text{CH}_3 + \text{HO}_2 = \text{CH}_3\text{O} + \text{OH}$ 3 条反应通道快速累积从而促进着火。二甲醚在着火早期可通过反应 $\text{HCO} + \text{O}_2 = \text{CO} + \text{HO}_2$ 快速产生 HO_2 ,促进了上述 OH 自由基生成反应的产率提升。 OH 自由基是主导着火的关键自由基^[32],二甲醚添加可加速 OH 的累积从而缩短着火延迟期。

3 结 论

本文开展了二甲醚掺混对氨燃料高温着火特性影响的实验和化学动力学研究,得到以下主要结论。

(1)在激波管上开展了当量比为 1、压力 1 MPa、温度 1 079~1 667 K 范围内氨/二甲醚燃料的着火延迟期的实验测量,发现二甲醚对氨燃料着火具有显著的非线性促进作用。在 1 250 K 和 1 500 K 时,摩尔分数为 5% 的二甲醚添加可使氨着火延迟期分别降低约 86% 和 72%,表明实际应用中仅掺混少量二甲醚即可达到着火延迟调控效果。利用实验结果验证了文献^[13,26-27]中 3 个近年发表的氨/二甲醚化学动力学模型,发现只有 Dai 模型可以准确预测本研究的着火延迟期数据。

(2)开展了二甲醚掺混氨燃料的化学动力学分析,发现摩尔分数为 5% 的二甲醚添加对氨的化学反应路径影响较小,着火过程中两种燃料之间存在自由基的竞争。二甲醚添加在着火初期提高了 $\text{H}_2\text{O}_2 (+\text{M}) = \text{OH} + \text{OH} (+\text{M})$ 、 $\text{NH}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{NO} + \text{OH}$ 、 $\text{CH}_3 + \text{HO}_2 = \text{CH}_3\text{O} + \text{OH}$ 等 OH 自由基生成反应的产率,从而缩短了氨的着火延迟期。

参考文献:

- [1] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1): 109-133.
- [2] 郭朋彦,申方,王丽君,等. 氨燃料发动机研究现状及发展趋势 [J]. 车用发动机, 2016(3): 1-5, 13.

- GUO Pengyan, SHEN Fang, WANG Lijun, et al. Research status and development trend for ammonia-fueled engines [J]. *Vehicle Engine*, 2016(3): 1-5, 13.
- [3] 刘伟, 王琮, 郭娅, 等. 氨燃料在船舶行业应用及标准需求研究 [J]. *中国标准化*, 2021(18): 39-43.
- LIU Wei, WANG Cong, GUO Ya, et al. Research on the application of ammonia fuel and standard development requirements in the shipbuilding industry [J]. *China Standardization*, 2021(18): 39-43.
- [4] 陈磊, 方世东, 沈洁, 等. 氨燃料发电研究进展 [J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(8): 2212-2224.
- CHEN Lei, FANG Shidong, SHEN Jie, et al. Research progress in ammonia fuel for power generation [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(8): 2212-2224.
- [5] WANG Bowen, NI Meng, JIAO Kui. Green ammonia as a fuel [J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(15): 1530-1534.
- [6] KURATA O, IKI N, MATSUNUMA T, et al. Performances and emission characteristics of NH_3 -air and NH_3CH_4 -air combustion gas-turbine power generations [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 3351-3359.
- [7] DAI Liming, GERSEN S, GLARBORG P, et al. Autoignition studies of NH_3/CH_4 mixtures at high pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 218: 19-26.
- [8] SHU B, HE X, RAMOS C F, et al. Experimental and modeling study on the auto-ignition properties of ammonia/methane mixtures at elevated pressures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(1): 261-268.
- [9] XIAO Hua, LAI Shini, VALERA-MEDINA A, et al. Experimental and modeling study on ignition delay of ammonia/methane fuels [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(8): 6939-6949.
- [10] YU Liang, ZHOU Wei, FENG Yuan, et al. The effect of ammonia addition on the low-temperature autoignition of n-heptane: an experimental and modeling study [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 217: 4-11.
- [11] FENG Yuan, ZHU Jizhen, MAO Yebing, et al. Low-temperature auto-ignition characteristics of NH_3 /diesel binary fuel: ignition delay time measurement and kinetic analysis [J]. *Fuel*, 2020, 281: 118761.
- [12] POCHET M, DIAS V, MOREAU B, et al. Experimental and numerical study, under LTC conditions, of ammonia ignition delay with and without hydrogen addition [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(1): 621-629.
- [13] DAI Liming, HASHEMI H, GLARBORG P, et al. Ignition delay times of NH_3 /DME blends at high pressure and low DME fraction: RCM experiments and simulations [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 227: 120-134.
- [14] CHEN Jundie, JIANG Xue, QIN Xiaokang, et al. Effect of hydrogen blending on the high temperature auto-ignition of ammonia at elevated pressure [J]. *Fuel*, 2021, 287: 119563.
- [15] LI Mengdi, HE Xiaoyu, HASHEMI H, et al. An experimental and modeling study on auto-ignition kinetics of ammonia/methanol mixtures at intermediate temperature and high pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 242: 112160.
- [16] ISSAYEV G, GIRI B R, ELBAZ A M, et al. Combustion behavior of ammonia blended with diethyl ether [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(1): 499-506.
- [17] LIN Qianjin, ZOU Chun, DAI Lingfeng. High temperature ignition of ammonia/di-isopropyl ketone: a detailed kinetic model and a shock tube experiment [J]. *Combustion and Flame*, 2023, 251: 112692.
- [18] CUNG K, BHAGAT M, ZHANG Anqi, et al. Numerical study on emission characteristics of high-pressure dimethyl ether (DME) under different engine ambient conditions [C]//SAE 2013 World Congress & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2013: 2013-01-0319.
- [19] GROSS C W, KONG S C. Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia-DME mixtures [J]. *Fuel*, 2013, 103: 1069-1079.
- [20] DAI Liming, HASHEMI H, GLARBORG P, et al. Ignition delay times of NH_3 /DME blends at high pressure and low DME fraction: RCM experiments and simulations [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 227: 120-134.
- [21] ISSAYEV G, GIRI B R, ELBAZ A M, et al. Ignition delay time and laminar flame speed measurements of ammonia blended with dimethyl ether: a promising low carbon fuel blend [J]. *Renewable Energy*, 2022, 181: 1353-1370.
- [22] SUN Wuchuan, HUANG Wenlin, QIN Xiaokang, et al. Water impact on the auto-ignition of kerosene/air mixtures under combustor relevant conditions [J]. *Fuel*, 2020, 267: 117184.
- [23] ZHANG Yingjia, HUANG Zuohua, WEI Liangjie, et al. Experimental and modeling study on ignition delays

- of lean mixtures of methane, hydrogen, oxygen, and argon at elevated pressures [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(3): 918-931.
- [24] HE X, SHU B, NASCIMENTO D, et al. Auto-ignition kinetics of ammonia and ammonia/hydrogen mixtures at intermediate temperatures and high pressures [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 206: 189-200.
- [25] LUTZ A E, KEE R J, MILLER J A. SENKIN: a Fortran program for predicting homogeneous gas phase chemical kinetics with sensitivity analysis[EB/OL]. (1988-02-01) [2022-11-25]. <https://www.osti.gov/biblio/5371815>.
- [26] MENG Xiangyu, ZHANG Mingkun, ZHAO Chenhan, et al. Study of combustion and NO chemical reaction mechanism in ammonia blended with DME [J]. *Fuel*, 2022, 319: 123832.
- [27] MURAKAMI Y, NAKAMURA H, TEZUKA T, et al. Effects of mixture composition on oxidation and reactivity of DME/ NH_3 /air mixtures examined by a micro flow reactor with a controlled temperature profile [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 238: 111911.
- [28] CHESKIS S G, SARKISOV O M. Flash photolysis of ammonia in the presence of oxygen [J]. *Chemical Physics Letters*, 1979, 62(1): 72-76.
- [29] GAO Jing, GUAN Yulei, LOU Junpeng, et al. Kinetic modeling for unimolecular β -scission of the methoxymethyl radical from quantum chemical and RRKM analyses [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 197: 243-253.
- [30] SEHESTED J, SEHESTED K, PLATZ J, et al. Oxidation of dimethyl ether: absolute rate constants for the self reaction of CH_3OCH_2 radicals, the reaction of CH_3OCH_2 radicals with O_2 , and the thermal decomposition of CH_3OCH_2 radicals [J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 1997, 29(8): 627-636.
- [31] ZHANG Xiaoyuan, MOOSAKUTTY S P, RAJAN R P, et al. Combustion chemistry of ammonia/hydrogen mixtures: jet-stirred reactor measurements and comprehensive kinetic modeling [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 234: 111653.
- [32] JIANG Xue, DENG Fuquan, YANG Feiyu, et al. High temperature ignition delay time of DME/*n*-pentane mixture under fuel lean condition [J]. *Fuel*, 2017, 191: 77-86.

(编辑 武红江)