

$\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料推进剂燃烧化学 反应机理与动力学分析

段志强, 郑 东, 周 斌

(西南交通大学 机械学院, 四川 成都 610031)

摘 要:以验证充分、应用广泛的小碳氢燃料反应机理为基础,通过耦合 N_2O 子机理,对比多种 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料燃烧化学反应动力学模型。进一步的验证结果表明,USC-Konnov 模型能更为准确地用来测算 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 体系着火延迟时间,以及 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_2$ 烃类燃料体系层流火焰的传播速度。对比不同模型预测结果发现:对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料的着火延迟时间而言, C_2 机理影响较小,而 N_2O 子机理影响显著。对其层流火焰传播速度而言, C_2 机理仅在富燃时有一定影响,而 N_2O 子机理在整个化学计量比范围内均有较大影响。进而通过灵敏度分析从化学反应动力学的角度给出了合理解释,确定了对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料着火延迟时间、火焰传播速度影响较大的基元反应。其中,基元反应 $\text{N}_2\text{O} + \text{M} = \text{N}_2 + \text{O} + \text{M}$ 和 $\text{N}_2\text{O} + \text{H} = \text{N}_2 + \text{OH}$ 对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料体系的着火、燃烧过程起着决定性作用。

关键词:氧化亚氮;小碳氢燃料;化学反应机理;灵敏度分析;绿色推进剂

中图分类号:V312 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2021)03-0043-09

Chemical reaction mechanism and kinetic analysis of $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ hydrocarbons propellant

DUAN Zhiqiang, ZHENG Dong, ZHOU Bin

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the fully validated and widely used chemical reaction mechanism of small hydrocarbons, the chemical kinetic models of various $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ hydrocarbons are compared by coupling with N_2O sub-mechanisms. Further validation results show that the USC-Konnov model can be used to calculate the ignition delay time of $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ hydrocarbons and laminar flame velocity of $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_2$ more accurately. For $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ hydrocarbons ignition delay time, the comparison of different model predictions indicates that C_2 mechanism has little effect while N_2O sub-mechanism has significant effect. As for the propagation velocity of laminar flame, C_2 mechanism has a certain effect only under the fuel-rich condition, while N_2O sub-mechanism has important effect under the whole equivalent ratio range. Moreover, a reasonable explanation

收稿日期:2020-12-07;修回日期:2020-12-30

基金项目:国家自然科学基金(51606212)

作者简介:段志强(1995—),男,硕士,研究领域为燃料燃烧强化。

通信作者:郑东(1987—),男,博士,硕士生导师,研究领域为燃料燃烧强化。

is presented through the sensitivity analysis from the point of view of chemical kinetics, and the elementary reactions that have a greater impact on the ignition delay time and laminar flame velocity of $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ hydrocarbons are determined. Among them, the elementary reactions of $\text{N}_2\text{O} + \text{M} = \text{N}_2 + \text{O} + \text{M}$ and $\text{N}_2\text{O} + \text{H} = \text{N}_2 + \text{OH}$ dominate the processes of $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ hydrocarbons ignition and combustion.

Keywords: nitrous oxide; small hydrocarbons; chemical reaction mechanism; sensitivity analysis; green propellant

0 引言

鉴于肼类推进剂具有优良的燃烧化学特性,被广泛应用于空间化学推进系统,但其也存在显著的缺点:毒性大、腐蚀性强、高致癌性、价格昂贵、操作危险等^[1-2]。为满足未来航天技术发展需求,对高性能、低成本、绿色无毒推进系统的研发提出了燃料要求^[3]。 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料单元复合推进剂具有性能高、成本低、绿色无毒、适用范围广、宽温幅、推力可深度调节等诸多优势^[4-6]。以美国和德国为代表的国外众多研究机构对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料推进剂体系已开展深入研究^[7-8] 相比之下国内对与 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料推进剂的研究也正在开展^[9-10]。

$\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料单元复合推进剂体系其燃料与氧化剂共存,且预混燃烧温度接近 3 500 K^[11]。不采取防回火措施的情况下,极易发生回火甚至爆炸^[12-14]。因此,防回火装置、以及燃烧室结构设计是发动机研制的关键技术问题。其中层流火焰的传播速度对于燃烧室稳定性的设计与评价至关重要^[4,15],这就需要对其自点火、火焰传播等基础燃烧特性与化学反应机理进行深入研究,为发动机数值模拟提供准确的燃烧模型。现有文献^[16-18] 大多以 C_0-C_3 反应机理(包含 NO_x 反应机理)作为 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料燃烧反应动力学模型,用于着火延迟时间、火焰传播速度的预测和动力学分析。相对其他推进剂对于 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类体系燃烧反应机理研究较少, Powell 等以 N_2O 热解机理和 $\text{N}_2\text{O}-\text{H}_2$ 机理为基础,耦合小碳氢反应机理,提出了包含 86 组分、588 个反应的一氧化二氮与小分子烃类的 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_{1-3}$ 化学反应机理,并优化了相关 C_1-C_3 的烃类反应的动力学参数^[19-20]。

综上所述, $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料燃烧反应机理是预测高能推进剂低温燃烧特性以及发动机数值模拟

不可或缺的燃烧模型,然而目前专门针对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类体系燃烧反应机理研究相对有限。因此,本文首先通过整合 N_2O 和小碳氢燃料反应机理,构建多种烃类燃料一氧化二氮与乙烯、乙炔、乙烷的化学反应动力学模型。然后采用相关文献中的对应实验数据对这些反应机理进行了充分验证,并比较了不同机理预测结果的合理性。进而从反应动力学的角度,深入分析了对不同机理预测结果的差异性。

1 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类化学反应机理

1.1 机理的发展

正如引言中所述,现有研究大多以包含 NO_x 子机理的碳氢燃料化学反应机理,作为 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料的燃烧反应动力学模型,其机理预测值与实验结果存在不同程度的偏差。这种偏差是否由碳氢燃料或是 NO_x 子机理引起,尚需进一步研究。因此,本文机理发展思路是:以验证充分、应用广泛的小碳氢燃料反应机理为基础,耦合 N_2O 子机理(源于不同 NO_x 机理),以此构建 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类的化学反应动力学模型。

鉴于已有的小碳氢燃料的反应机理,国内外已经进行了大量的实验研究并论证了其机理的可行性。其中, GRI 3.0 机理^[21]、Aramcomech 2.0 机理^[22] 及 USC-II 机理^[23] 是目前小碳氢燃料燃烧研究中应用最为广泛的化学反应机理。而且,大量的验证结果表明这些机理在预测 C_2 燃料的着火延迟时间、火焰传播速度、火焰结构等基础燃烧特性较为准确。因此,本文选取 GRI 3.0、USC-II 以及 Aramcomech 2.0 机理,作为 C_2 烃类燃料的反应动力学模型。

现有的部分 NO_x 子机理中含有 N_2O 组分以及相关的基元反应,可初步作为 N_2O 子机理。其中, GRI 3.0 机理^[21] 包含 N_2O 相关基元反应,且一定程

度上可以预测 H₂-N₂O 的层流火焰传播速度。Konnov 提出的详细动力学模型^[24]中也包含了较为丰富的 N₂O 基元反应,并验证了 N₂O-Ar 体系着火延迟时间和 H₂-N₂O 体系层流火焰传播速度。此外,Mével 等^[25]发展的 H₂-N₂O 着火动力学模型,并较为准确预测了 H₂-N₂O-Ar 体系的着火延迟时间。因此,本文提取 GRI 3.0 机理^[21]、Konnov 机理^[24]及 Mével 机理^[25]中的 NO_x子机理部分,作为 N₂O 子机理。

整合上述 C₂烃类燃料反应机理和 N₂O 子机理,可获得多种 N₂O-C₂烃类燃料化学反应动力学模型。如表 1 所示,本文选取了两类具有代表性的动力学模型:一是相同 N₂O 子机理(源于 GRI 3.0),不同 C₂机理,如 GRI 3.0、USC-GRI 和 Aram-GRI;二是相同 C₂机理(源于 USC-II)、不同 N₂O 子机理,如 USC-GRI、USC-Konnov 和 USC-Mével。针对反应机理的实验验证以及不同机理预测结果的对比分析将在下一节论述。

表 1 N₂O-C₂烃类燃料化学反应动力学模型

Tab.1 Chemical kinetic models of N₂O-C₂hydrocarbons

机理名称	小碳氢机理	N ₂ O 子机理	组分	反应数
GRI 3.0	来自 GRI 3.0 机理	来自 GRI 3.0 机理	53	325
USC-GRI	来自 USC-II mech	来自 GRI 3.0 机理	128	890
Aram-GRI	来自 Aramcomech 2.0	来自 GRI 3.0 机理	510	2 822
USC-Konnov	来自 USC-II mech	来自 Konnov	147	1 237
USC-Mével	来自 USC-II mech	来自 Mével	132	948

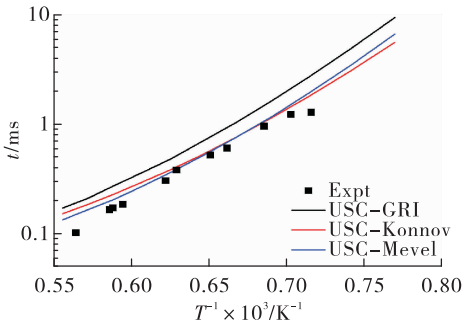
1.2 机理的验证

依据现有文献的反应机理与对应的实验数据,本文将从 N₂O-C₂烃类燃料体系的层流火焰传播速度和着火延迟时间等两个方面对上述反应机理的准确性进行验证。化学反应动力学的数值计算在 CHEMKIN 程序上完成,其实验条件与文献[16]中的给定条件保持一致。

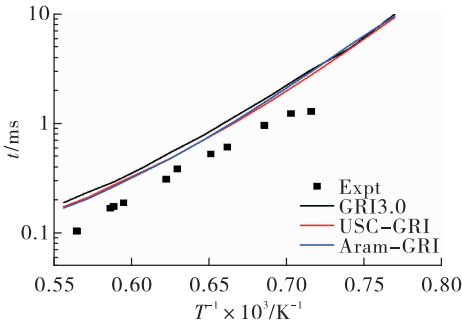
1.2.1 着火延迟时间

Mével 等采用激波管台架,测量了初始压力 0.32 MPa、初始温度 1 399 ~ 1 862 K,0.549% C₂H₂/3.447% N₂O/96.004% Ar 和 0.4% C₂H₆/3.598% N₂O/96.002% Ar(摩尔分数)体系的着火延迟时间^[16]。图 1 分别给出了相同 N₂O 子机理、不同 C₂机理以及不同 N₂O 子机理、相同 C₂机理的反应动力学模型预测的着火延迟时间,并与对比了 R. Mével 的实验结果数据^[16]。

由图 1 可见,采用 GRI 3.0 的 N₂O 子机理的反应动力学模型(如 GRI 3.0、USC-GRI 和 Aram-GRI)预测结果均偏高,而采用 Konnov^[24]和 Mével^[25]的 N₂O 子机理的反应动力学模型(如 USC-Konnov 和 USC-Mével)预测结果与实验结果基本吻合。



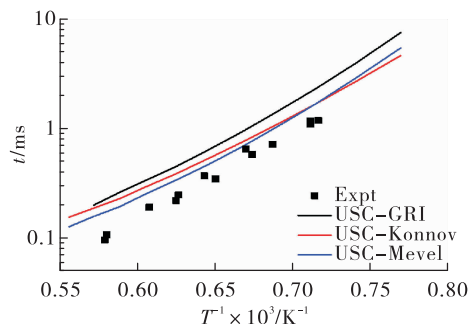
(a) 相同的N₂O子机理



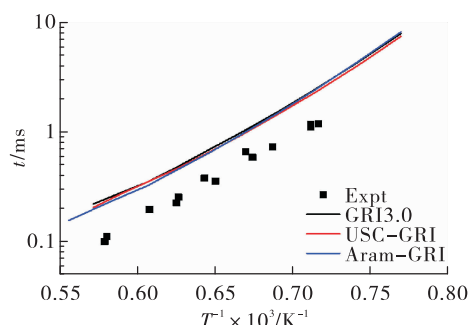
(b) 不同的N₂O子机理

图 1 N₂O-C₂H₂-Ar 着火延迟时间实验值与预测值
Fig.1 Predicted and experimental results for N₂O-C₂H₂-Ar ignition delay time

综合对比图 1, 不难发现, 相同 N_2O 子机理的反应动力学模型预测的着火延迟时间基本一致, 而不同 N_2O 子机理的反应动力学模型预测的着火延迟时间存在较大偏差。这说明了 C_2 机理对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{Ar}$ 的着火延迟时间影响较小, 而 N_2O 子机理却对其有显著影响。与之类似的结论也体现于 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_6-\text{Ar}$ 燃烧体系(见图 2)^[11]。



(a) 相同的 N_2O 子机理



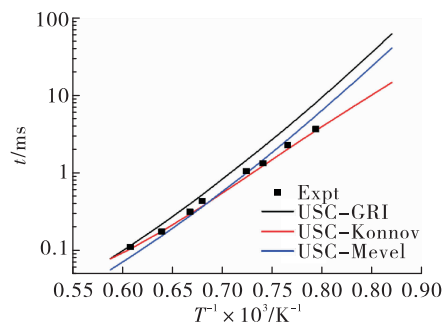
(b) 不同的 N_2O 子机理

图 2 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_6-\text{Ar}$ 着火延迟时间
实验值与预测值

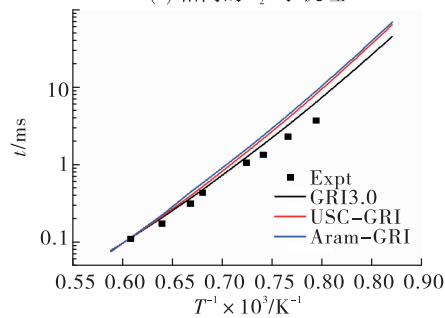
Fig. 2 Predicted and experimental results for
 C_2H_6 ignition delay time

图 3 给出了初始压力 0.4 MPa、初始温度 1 150 ~ 1 700 K、化学计量比 1.0, 上述两类 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ 体系着火延迟时间与 Deng 等的激波管实验结果的对标^[18]。由图 4 可见, 总体而言两类 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ 反应动力学模型均能较好预测 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{Ar}$ 着火延迟时间, 其中 USC-Konnov 模型预测的准确度最高。综合对比图 3 中 (a) 和 (b) 同样可见, C_2 机理对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{Ar}$ 的着火延迟时间影响较小, 而 N_2O 子机理却对其有较大影响^[17]。与之相似的结论也体现于 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{Ar}$ (化

学计量比 2.0) 富燃工况(见图 4)^[18]。



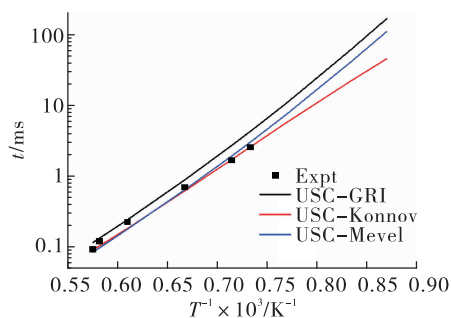
(a) 相同的 N_2O 子机理



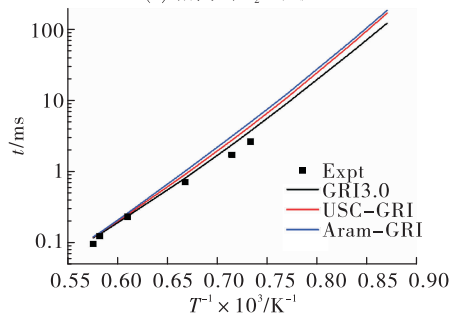
(b) 不同的 N_2O 子机理

图 3 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ ($\phi = 1.0$) 着火
延迟时间实验值与预测值^[12]

Fig. 3 Predicted and experimental results for C_2H_4-
 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}_2$ ($\phi = 1.0$) ignition delay time



(a) 相同的 N_2O 子机理



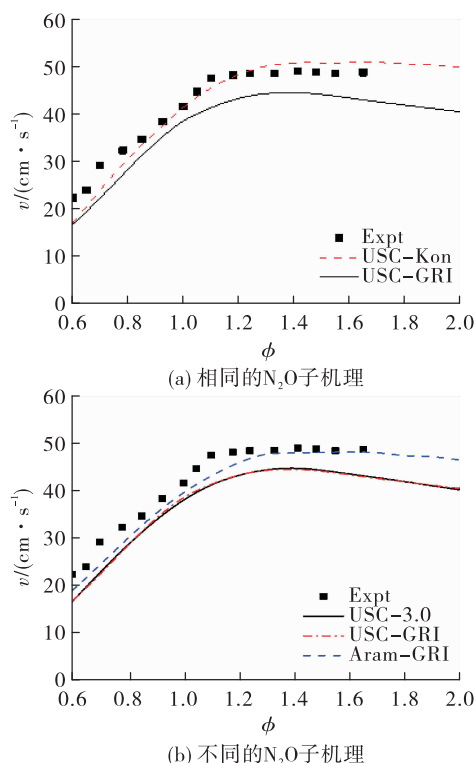
(b) 不同的 N_2O 子机理

图 4 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ ($\phi = 2.0$) 着火
延迟时间实验值与预测值

Fig. 4 Predicted and experimental results for C_2H_4-
 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}_2$ ($\phi = 2.0$) ignition delay time

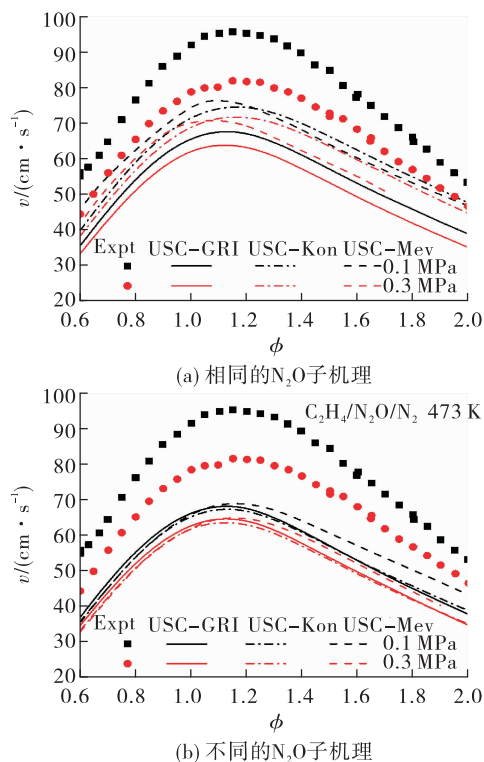
1.2.2 层流火焰传播速度

Powell 等在层流火焰传播速度测量中用平面火焰热流法,在初始温度 298 K、化学计量比 0.56 ~ 1.6、压力 0.08 MPa,进行测量 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_2-\text{N}_2$ 体系的绝热层流火焰的传播速度^[20]。图 5 分别给出了两类 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 反应动力学模型预测的层流火焰传播速度,通过实验结果^[20] 比较如下。由图 5 可见, GRI3.0 和 USC-GRI 模型预测值偏低, USC-Konnov 模型预测值与实验测量值最为接近。对比图 5 不难发现, C_2 机理仅在富燃工况下对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_2-\text{N}_2$ 层流火焰的传播速度有一定影响,而 N_2O 子机理在整个化学计量比范围内对其均有较大影响。

图 5 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_2-\text{N}_2$ 层流火焰传播速度预测值与实验值Fig. 5 Predicted and experimental results for $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_2-\text{N}_2$ laminar flame velocity

Naumann 等采用与平面火焰热流法不同的本生灯火焰方法,在初始温度 473 K、化学计量比 0.6 ~ 2.0、压力 0.1 MPa 和 0.3 MPa,测量 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ 体系的层流火焰传播速度^[17]。图 6 中为两类 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 反应动力学模型预测的层流火焰传播速度与实验结果的对比,可见两类 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 反应动力学模型的预测值均远低于实验值。对比图 6 同样可以发现,对于 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ 层流火焰传播速度而言, C_2 机理

仅在富燃工况下有一定影响,而 N_2O 子机理在整个化学计量比范围内均有较大影响。

图 6 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ 层流火焰传播速度预测值与实验值Fig. 6 Predicted and experimental results for $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ laminar flame velocity

综上验证与对比分析表明:对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料的着火延迟时间而言, C_2 机理影响较小,而 N_2O 子机理却有显著影响。对其层流火焰传播速度而言, C_2 机理仅在富燃工况下有一定影响,而 N_2O 子机理在整个化学计量比范围内均有较大影响。为此,本文将在下一节中从反应动力学的角度进行深入系统的分析研究,通过 CHEMKIN1 进行灵敏性分析和给出一个合理的解释。

2 动力学分析

针对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ 体系,分别进行着火时刻的温度灵敏度分析和火焰传播速度灵敏度分析,并取灵敏度系数绝对值最大(即对着火、燃烧过程影响较大)的前 10 个基元反应。灵敏度分析计算通过上述化学反应动力学软件进行分析,并选择 GRI 3.0、USC-GRI 和 USC-Konnov 反应动力学模型。

2.1 温度灵敏度分析

图 7 ~ 图 9 分别给出了初始温度 1 000 K 和

1 500 K、压力 0.4 MPa、化学计量比 1.0 条件下,由 GRI 3.0、USC-GRI 和 USC-Konnov 反应动力学模型计算的 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ 体系温度灵敏度分析结果。

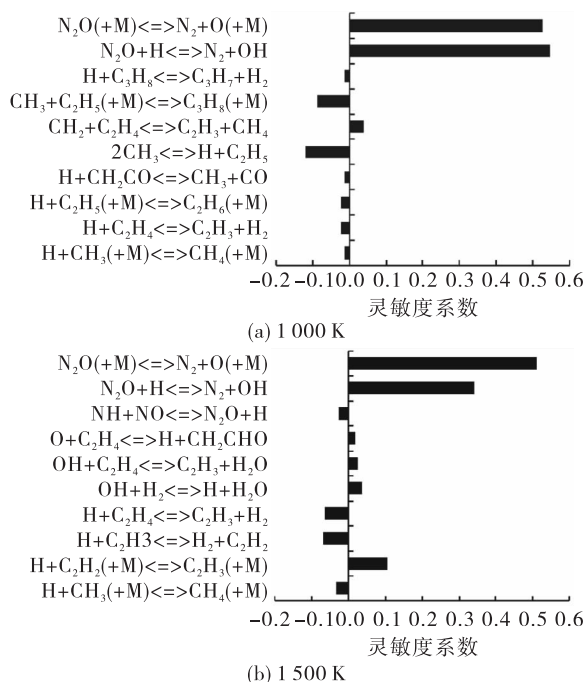


图 7 GRI 3.0 温度灵敏度分析系数

Fig. 7 Sensitivity coefficients of temperature using GRI 3.0 model

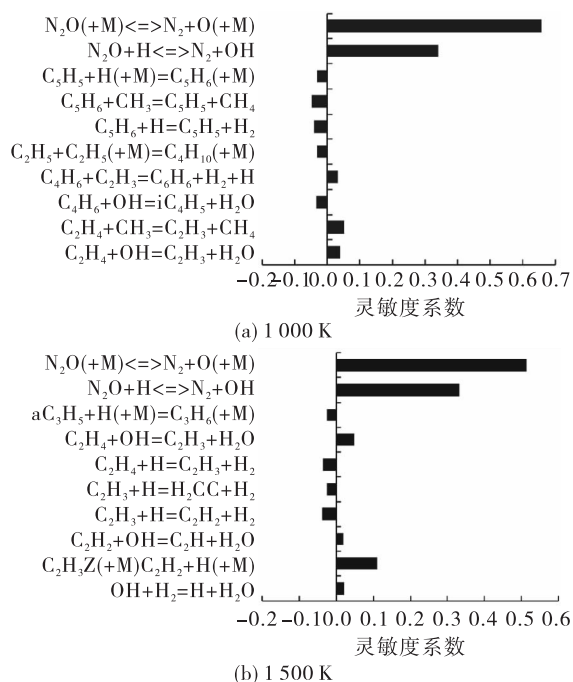


图 8 USC-GRI 温度灵敏度分析系数

Fig. 8 Sensitivity coefficients of temperature using USC-GRI model

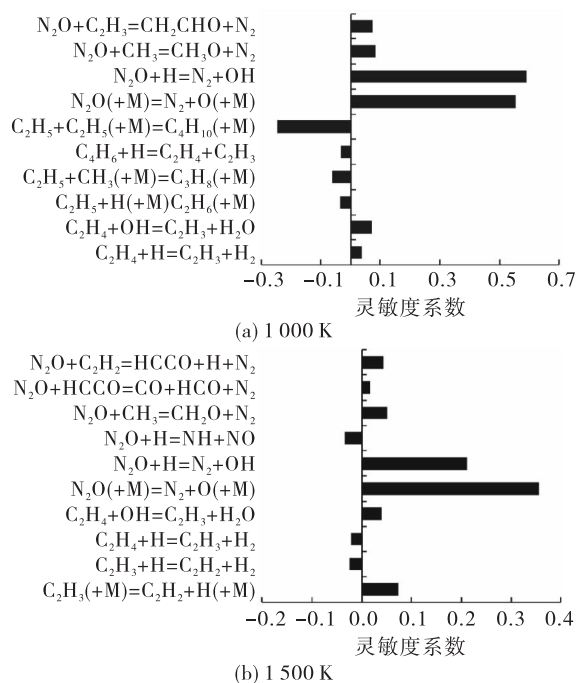
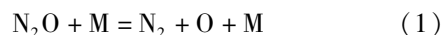


图 9 USC-Konnov 温度灵敏度分析系数

Fig. 9 Sensitivity coefficients of temperature using USC-Konnov model

由图 7 ~ 图 9 可以看出下面两个基元反应对这反应动力学模型影响最大。



基元反应式(1)和式(2)的温度灵敏度系数最高,对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料的着火过程起决定性的作用。其中式(1)为 N_2O 初始裂解反应,生成 N_2 和重要的 O 自由基,决定了燃烧系统的氧化进程。式(2)为 N_2O 与 H 自由基反应,是重要的放热反应,对着火过程系统温升起关键性作用。而反应中 OH 自由基浓度是着火时刻的重要判据,上述反应的作用是促进生成高活性 OH 自由基和促进 N_2 的链传递反应。

对比图 7 和图 8 可见,对于相同 N_2O 子机理、不同 C_2 机理 GRI 3.0 和 USC-GRI 反应动力学模型而言,其温度灵敏度分析结果基本一致。除了 N_2O 相关反应式(1)和式(2)外,其他均是碳氢相关反应,且温度灵敏度系数相对较低。因此,GRI 3.0 和 USC-GRI 预测的着火延迟时间基本一致。

对比图 8 和图 9 可见,对于相同 C_2 机理、不同 N_2O 子机理的 USC-GRI 和 USC-Konnov 反应动力学模型而言,其温度灵敏度分析结果却有较大差异。对于 USC-Konnov 模型除了反应式(1)和式(2)外,

还有一些 N_2O 氧化碳氢组分 (如 CH_3 、 C_2H_2 、 C_2H_3 等) 的反应也具有一定的温度灵敏度系数。因此, USC-GRI 和 USC-Konnov 预测的着火延迟时间差距较大。

上述动力学分析表明:对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料的着火延迟时间而言, C_2 机理影响较小, 而 N_2O 子机理却有显著影响, 其中基元反应(1)和(2)对 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2$ 烃类燃料的着火过程起决定性的作用。

2.2 火焰传播速度灵敏度分析

图 10 ~ 图 12 分别给出了初始温度 473 K、压力 0.1 MPa、化学计量比 0.6 和 2.0 条件下,由 GRI 3.0、USC-GRI 和 USC-Konnov 反应动力学模型计算的 $\text{N}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{N}_2$ 体系火焰传播速度灵敏度分析结果。由图 10(a)、图 11(a) 和图 12(a) 可见,贫燃料工况时灵敏度分析的反应几乎全部体现在 N_2O 子机理。其中,基元反应式(1)的灵敏度系数最高,对层流火焰传播速度起主导作用。



反应式(2)~式(4)也具有较高的灵敏度系数。其中,反应式(3)为负影响,这是由于反应式(3)消耗氧化剂 N_2O ,同时还消耗了重要的 O 自由基,并生成稳定组分 NO。反应式(4)为正影响,不仅生成能促进火焰传播的 H 自由基,而且 CO 被氧化为 CO_2 时放出大量热量^[26]。

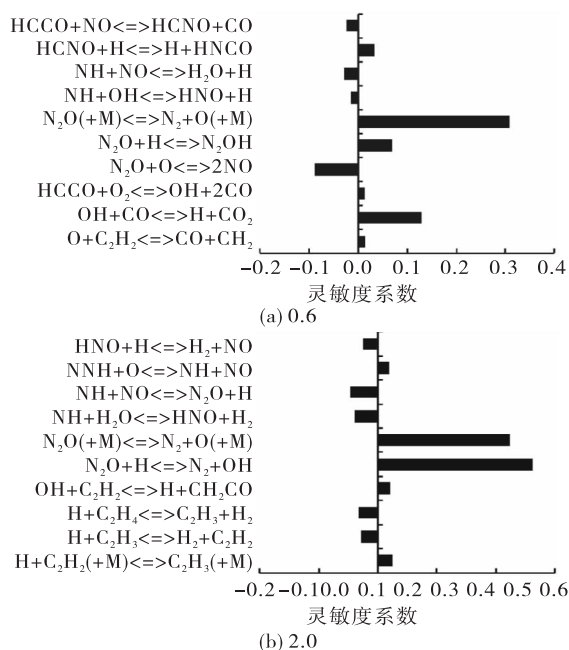


图 10 GRI 3.0 层流火焰传播速度灵敏度分析系数

Fig. 10 Sensitivity coefficients of laminar flame velocity using GRI 3.0 model

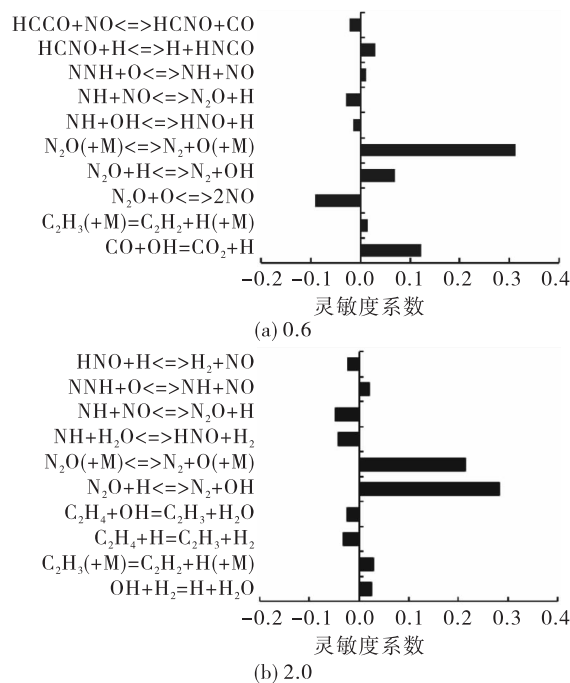


图 11 USC-GRI 层流火焰传播速度灵敏度分析系数

Fig. 11 Sensitivity coefficients of laminar flame velocity using USC-GRI model

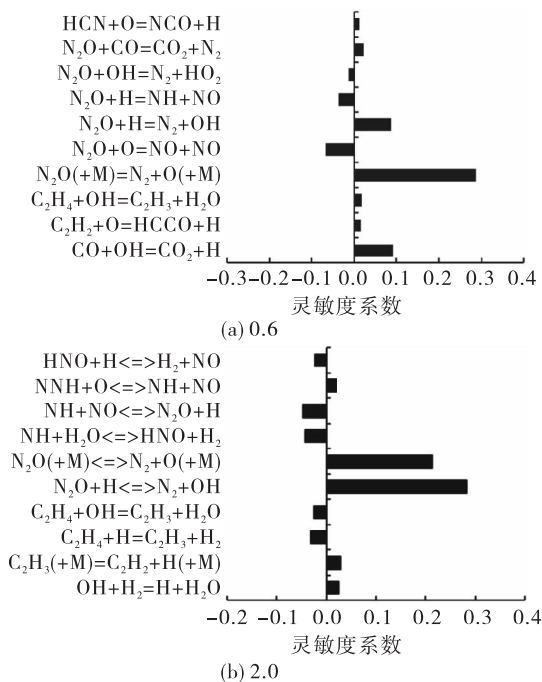


图 12 USC-Konnov 层流火焰传播速度灵敏度分析系数

Fig. 12 Sensitivity coefficients of laminar flame velocity using USC-Konnov model

而由图 10(b)、图 11(b)和图 12(b)可见,富燃料工况时基元反应式(2)的灵敏度系数最高,式(1)

和式(2)共同对层流火焰传播速度起主导作用。且除 N_2O 子机理相关基元反应外, C_2 机理部分反应也有一定的灵敏度系数, 并对火焰传播速度产生一定的影响。主要表现为 C_2 组分脱氢反应(自由基攫氢、裂解脱氢), 其中消耗 H 自由基的反应灵敏度系数为负值, 生成 H 自由基的反应灵敏度系数为正。

上述动力学分析表明: 对 N_2O-C_2 烃类燃料的火焰传播速度而言, C_2 机理仅在富燃工况下有一定影响, 而 N_2O 子机理在整个化学计量比范围内均有较大影响。贫燃料工况时基元反应(1)的灵敏度系数最高, 而富燃料工况时式(2)的灵敏度系数最高。

3 结论

本文以验证充分、应用广泛的小碳氢燃料反应机理为基础, 耦合 N_2O 子机理(源于不同 NO_x 机理), 进而构建了多种 N_2O-C_2 烃类燃料燃烧化学反应动力学模型。其中, USC-Konnov 模型能更为准确地预测 N_2O-C_2 体系着火延迟时间以及 $N_2O-C_2H_2$ 体系层流火焰传播速度, 为进一步发展 NOFBX 燃烧反应机理奠定基础。

预测结果的对比分析表明: 对 N_2O-C_2 烃类燃料的着火延迟时间而言, C_2 机理影响较小, 而 N_2O 子机理却有显著影响。对其层流火焰传播速度而言, C_2 机理仅在富燃工况下有一定影响, 而 N_2O 子机理在整个化学计量比范围内均有较大影响。

通过灵敏度分析确定了对 N_2O-C_2 烃类燃料着火延迟时间、火焰传播速度影响较大基元反应, 并解释上述结论。其中, 基元反应 $N_2O + M = N_2 + O + M$ 和 $N_2O + H = N_2 + OH$ 对 N_2O-C_2 烃类燃料体系的着火、燃烧过程起着决定性作用。

参考文献:

- [1] LIU Y, ZYBIN S V, GUO J, et al. Reactive dynamics study of hypergolic bipropellants: monomethylhydrazine and dinitrogen tetroxide[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2012, 116(48): 14136-14145.
- [2] 巴延涛, 侯凌云, 毛晓芳, 等. 甲基胍/四氧化二氮反应化学动力学模型构建及分析[J]. 物理化学学报, 2014, 30(6): 1042-1048.
- [3] 贺芳, 方涛, 李亚裕, 等. 新型绿色液体推进剂研究进展[J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 54-57.
- [4] 朱成财, 韩伟, 于忻立, 等. 氧化亚氮基单元复合推进剂技术研究述评[J]. 火箭推进, 2016, 42(2): 79-85.
ZHU C C, HAN W, YU X L, et al. Review of nitrous-oxide-based composite monopropellants technology[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(2): 79-85.
- [5] 宋长青, 徐万武, 张家奇, 等. 氧化亚氮推进技术研究进展[J]. 火箭推进, 2014, 40(2): 7-15.
SONG C Q, XU W W, ZHANG J Q, et al. Research progress of nitrous oxide propulsion technology[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(2): 7-15.
- [6] 韩伟, 王永忠, 单世群, 等. 氧化亚氮基氧燃一体化推进剂及推进系统研究进展[J]. 火箭推进, 2020, 46(5): 1-9.
HAN W, WANG Y Z, SHAN S Q, et al. Research progress of nitrous-oxide-based oxidizer-fuel integrated propellant and propulsion system[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(5): 1-9.
- [7] VOZOFF M, MUNGAS G. NOFBXTM: a non-toxic, "green" propulsion technology with high performance and low cost [C]//AIAA SPACE 2012 Conference & Exposition. Pasadena, California. Reston, Virginia: AIAA, 2012.
- [8] WERLING L, LAUCK F, FREUDENMANN D, et al. Experimental investigation of the flame propagation and flashback behavior of a green propellant consisting of N_2O and C_2H_4 [J]. Journal of Energy and Power Engineering, 2017, 11(12): 36-42.
- [9] 李智鹏, 孙海云, 蒋榕培, 等. 乙烯-氧化亚氮层流预混燃烧过程研究[J]. 火箭推进, 2018, 44(5): 37-42.
LI Z P, SUN H Y, JIANG R P, et al. Study on premixed laminar combustion process of ethylene/nitrous oxide mixture [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(5): 37-42.
- [10] 张锋, 杨伟东, 胡洪波, 等. 氧化亚氮/乙烯推进剂预混燃烧特性试验研究[J]. 火箭推进, 2019, 45(3): 41-47.
ZHANG F, YANG W D, HU H B, et al. Experimental investigation of premixed combustion characteristics of N_2O/C_2H_4 propellants [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(3): 41-47.
- [11] TAYLOR R. Safety and performance advantages of nitrous oxide fuel blends (NOFBX) propellants for manned and unmanned spaceflight applications[Z]. 2012.
- [12] 李玉艳, 蒋榕培, 李智鹏, 等. C_2H_4/N_2O 预混气体的爆轰性能与火焰淬熄特性[J]. 高压物理学报, 2020,

- 34(4): 166-174.
- [13] 李玉艳,王红松,蒋榕培,等. N₂O-C₂H₄预混气体火焰的传播特性[J]. 爆破器材, 2019, 48(6): 33-38.
- [14] 曾祥敏,张玉刚,蒋榕培,等. N₂O/C₂H₄/CO₂预混气体火焰传播及爆炸特性的试验研究[J]. 火炸药学报, 2018, 41(5): 501-505.
- [15] 王栋,梁国柱. 氧化亚氮双组元发动机热力性能计算分析[J]. 火箭推进, 2012, 38(1): 44-50.
- WANG D, LIANG G Z. Calculation and analysis of thermodynamic performance for nitrous oxide bipropellant engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 38(1): 44-50.
- [16] MÉVEL R, SHEPHERD J E. Ignition delay-time behind reflected shock waves of small hydrocarbons-nitrous oxide (-oxygen) mixtures [J]. Shock Waves, 2015, 25(3): 217-229.
- [17] KICK T, STARCKE J H, NAUMANN C. Green propellant substituting hydrazine: investigation of ignition delay time and laminar flame speed of ethene/dinitrogen oxide mixtures[C]// 8th European Combustion Meeting. Dubrovnik, Croatia: [s. n.], 2017.
- [18] DENG F Q, PAN Y S, SUN W C, et al. Comparative study of the effects of nitrous oxide and oxygen on ethylene ignition[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(12): 14116-14128.
- [19] POWELL O, MILLER J, DREYER C, et al. Characterization of hydrocarbon/nitrous oxide propellant combinations [C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2008.
- [20] POWELL O A, PAPAS P, DREYER C. Laminar burning velocities for hydrogen-, methane-, acetylene-, and propane-nitrous oxide flames [J]. Combustion Science and Technology, 2009, 181(7): 917-936.
- [21] SMITH G P, GOLDEN D M, FRENKLACH M, et al. GRI-mech release 3.0[EB/OL]. [2007-05-21]. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- [22] METCALFE W K, BURKES M, AHMED S S, et al. A hierarchical and comparative kinetic modeling study of C₁-C₂ hydrocarbon and oxygenated fuels [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2013, 45(10): 638-675.
- [23] WANG H, YOU X, JOSHI A V, et al. USC mech version II. high-temperature combustion reaction model of H₂/CO/C₁-C₄ compounds. [EB/OL]. [2007-05-21]. http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm.
- [24] KONNOV A A. Implementation of the NCN pathway of prompt-NO formation in the detailed reaction mechanism [J]. Combustion and Flame, 2009, 156(11): 2093-2105.
- [25] MÉVEL R, JAVOY S, LAFOSSE F, et al. Hydrogen-nitrous oxide delay times: Shock tube experimental study and kinetic modelling [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 359-366.
- [26] ZHONG B J, ZHENG D. Chemical kinetic mechanism of a three-component fuel composed of iso-octane/n-heptane/ethanol [J]. Combustion Science and Technology, 2013, 185(4): 627-644.