

氨滑动弧等离子体激励的数值建模

赵凝秋¹, 朱益飞², 李振阳¹, 尹博¹

(1. 西安交通大学机械学院, 西安, 710079; 2. 空军工程大学航空动力系统与等离子体技术全国重点实验室, 西安, 710038)

摘要 在双碳背景下, 氨的使用及其燃烧难题的解决受到国内外学者的重视。针对改善氨燃烧问题, 研究了二维流体动力学-零维反应动力学-燃烧动力学思路, 分析了滑动弧等离子体条件下氨的裂解和燃烧特性。利用 COMSOL 计算软件建立了考虑电磁的二维流体计算模型, 研究了滑动弧在反应器中的演化; 建立了适用于氨的零维滑动弧模型, 研究了滑动弧中全电离-转换-非平衡 3 个阶段的温度和组分演化规律; 利用 CHEMKIN 计算软件建立了燃烧模型, 评估了等离子体对 NH₃/air 混合气燃烧特性的影响, 此外对在混合气中添加 CH₄ 进行了分析。结果表明, 等离子体能够促进氨的裂解, 降低氨的点火延迟时间, 并且提高其层流燃烧速度, 但是在混合气中将部分等离子体条件下的 NH₃ 替换为 CH₄ 后, 整体燃烧效果有所下降。

关键词 氨裂解; 滑动弧; 等离子体调控燃烧; 数值模拟

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.02.002

中图分类号 V231 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)02-0010-07

Numerical Modeling of Ammonia Gliding Arc Plasma Actuation

ZHAO Ningqiu¹, ZHU Yifei², LI Zhenyang¹, YIN Bo¹

(1. Institute of Aero-engine, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048, China;

2. National Key Lab of Aerospace Power System and Plasma Technology,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract The use of ammonia and the solution of its combustion challenges in a two-carbon context have received attention from domestic and foreign scholars. To address the problem of improving ammonia combustion, this study developed a two-dimensional fluid dynamics-zero-dimensional reaction dynamics-combustion dynamics idea to analyze the cracking and combustion characteristics of ammonia under gliding arc plasma conditions. A two-dimensional fluid calculation model considering electromagnetism was developed using COMSOL calculation software to study the evolution of gliding arc in the reactor; A zero-dimensional gliding arc model applicable to ammonia was developed to study the evolution of temperature and components in the three stages of total-ionization, transition and non-equilibrium in the gliding arc; A combustion model was developed using CHEMKIN calculation software to evaluate the effect of plasma on the combustion characteristics of NH₃/air mixture, and in addition the addition of CH₄ to the mixture was also investigated. The results show that plasma can promote the cracking of ammonia, reduce the ignition delay time of ammonia, and increase its laminar burning velocity, but the overall combustion effect decreases after replacing NH₃ with CH₄ in the mixture under partial plasma conditions.

收稿日期: 2022-09-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51907204, 52277168)

作者简介: 赵凝秋(1997-), 男, 河南商丘人, 硕士生, 研究方向为等离子体点火助燃。E-mail: 1106237411@qq.com

引用格式: 赵凝秋, 朱益飞, 李振阳, 等. 氨滑动弧等离子体激励的数值建模[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(2): 10-16. ZHAO Ningqiu, ZHU Yifei, LI Zhenyang, et al. Numerical Modeling of Ammonia Gliding Arc Plasma Actuation [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(2): 10-16.

Key words ammonia pyrolysis; gliding arc; plasma-assisted combustion; numerical model

全球气候变化成为越来越多人关注的议题,减少碳排放,改善温室效应成为人们共同的祈愿。2020 年我国发布的《新时代的中国能源发展》白皮书中明确提到,中国要大力推动化石能源到非化石能源的转化^[1]。在此背景下,可替代的低污染燃料被众多学者提出,如乙醇、二甲醚(DME)、生物柴油和氢气等^[2-5],与此同时新型无碳燃料氨(NH₃)的使用发展同样吸引了人们的兴趣。氨(NH₃)是一种氮氢化合物,是重要的氢基燃料,燃烧产物仅有水、氮气和少量的氮氧化物是氨气的巨大优势^[6]。由于氨产业基础较强,并且 0.8 MPa 的条件下就可以压缩成液体,氨气可大规模地用于地方能源储存以及持续运输^[7-10]。此外氨气相比于氢气储存成本更低,相同条件下纯氢气的储存成本大约是氨气的 27 倍^[11]。氨中氢的质量分数达到 17.6%,并且能量密度为 22.5 MJ/kg,可与化石能源媲美。氨气由于刺激性气味的特性,发生泄露时很容易被察觉,能够在危机发生时极大的减少损失。但是想要将氨气发展为运输燃料,仍然要解决 2 个主要问题:一是燃烧质量差、层流燃烧速度慢、可燃性范围窄和点火极限较高,导致燃烧时循环变异性高^[12];二是 NO_x 排放量较高,超过了制定的标准排放量^[9]。但这些问题都可以借助等离子体激励燃烧进行解决。

等离子体是区别于物质固态、液态、气态 3 种状态之外的第 4 种状态^[13],其在流动控制^[14-15]和点火助燃^[16]领域都有广泛的研究和应用。作为等离子体点火助燃应用的形式之一,滑动弧是一种由于气流作用,在 2 个或者多个电极之间发生的具有周期性自振荡的放电过程,因具有的气体快速加热能力和丰富的反应动力学特性,有望成为激励燃烧的主流方案,越来越受到研究团队的青睐。

近年来,Hong 等人建立了低电子能的 N₂/H₂ 等离子体动力学模型来进行非平衡等离子体对合成氨的研究^[17]。Taneja 等人利用 NH₃ 分子与 CH₄ 分子的相似性,将经过实验验证的 CH₄/O₂/He 等离子体机理通过简单地取代转化为 NH₃/O₂/He 机理,并在此机理中加入目前已知仅有的 2 个包含 NH₃ 电子碰撞截面的数据库:LXCat(www.lxcat.net)网站上的 Morgan 和 Hayashi 数据库,最终模拟了等离子体辅助裂解和燃烧的纳秒放电过程,得出等离子体具有降低点火延迟时间的功效^[18],而后其研究团队也对反应路径进行了分析^[19]。Faingold 等人首先组装建立了 NH₃/O₂/He 机理,并且运用

ZDPlasKin 代码和 CHEMKIN 代码相结合的零维求解器进行了测试,运用不同的脉冲放电频率和脉冲数,在常压和中高温(600 K~1 500 K)的条件下分析了其对点火延迟时间的影响,结果分析较高数量的脉冲数可以显著减少点火延迟时间,较高的脉冲频率可以允许较低的初始点火温度^[20]。Sun 等人研究了在预混式旋流燃烧器与滑动弧放电系统中不同氨含量与空气流量对预混 NH₃/CH₄/AIR 火焰稳定性和排放特性的影响,得到放电增加了 OH 自由基浓度,提高了火焰稳定性,在氨含量较高时,滑动弧可以有效的减少 NO_x 排放最高达到 30%^[21]。

但是对于等离子体激励氨气点火助燃的数值模拟仍然困难重重,主要是由于等离子体反应动力学机理以及计算模型的缺乏,并且等离子体激励氨燃料裂解的研究少之又少,等离子体条件下氨的燃烧特性更是鲜有报道。基于此,本文研究了氨在等离子体条件下的裂解和燃烧特性,省略了等离子体通道导通并初步形成平衡电弧的阶段,重点关注电弧形成后其演化过程、对燃料的裂解作用和对燃烧的影响。

1 模型构建

1.1 二维流体动力学模型

使用基于有限元法的商用软件 COMSOL Multiphysics 建立了考虑电磁的二维流体计算模型,此模型计算滑动弧的时空演化,以此得到零维滑动弧模型的输入条件。反应器三维几何结构如图 1 所示,反应器由高压电极和地电极构成,入口半径 9 mm,高压电极半径 4 mm,出口半径 4 mm,入口流速 245 m/s,腔体总深度 38 mm。

结合实验估算平衡电弧的温度和体积作为此模型的初始条件。在局域温度平衡假设下,电导率可以看成是温度和压力的函数^[22-23],所以滑动弧的温度可以根据实验截取到的平均功率和电导率估算获得:

$$P = V_{pl} \sigma E^2 \quad (1)$$

式中: P 为滑动弧电源功率; E 为滑动弧内部的电场强度; V_{pl} 为滑动弧体积。其中电导率可从数据库获得(如 GPLAS,见西安交通大学电气工程学院气体放电等离子体数据库。http://plasma-data.net)。

滑动弧体积则需要依托于实验图像计算,也可以进行估算得到(见式 2)。

$$D = \frac{k}{p} \quad (2)$$

式中: D 为滑动弧直径,单位为 m; p 为环境压力,单位为 Pa;参数 k 取决于电极结构和气体混合物。

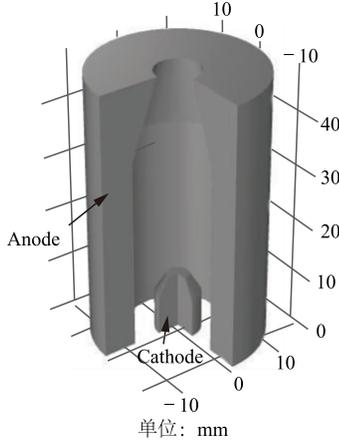


图 1 反应器模型三维视图

COMSOL 多物理场模型计算的是平衡滑动弧,虽然不能准确的计算出滑动弧的温度,但可以模拟出滑动弧的形态和长度,此模型需要求解斯托克斯方程组:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \nabla \{-p \mathbf{I} + \mu [(\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T]\} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad (4)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T_g}{\partial t} + (\rho C_p \nabla T_g \cdot \mathbf{u}) - \nabla(k \cdot \nabla T_g) = Q_p + Q_{\text{Joule}} + Q_h + Q_{\text{rad}} + \tau : \nabla \mathbf{u} \quad (5)$$

式中: ρ 为密度; \mathbf{u} 为流体的速度; p 为压力; μ 为流体黏度; \mathbf{I} 为单位矩阵, $\mathbf{F}_L = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$ 为动量守恒方程中的洛伦兹力项; C_p 为气体的比热容; T_g 为气体温度; k 为热导率。

除此之外,还需在模型中添加麦克斯韦方程组以描述电磁场的变化。

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (6)$$

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (7)$$

$$\nabla \mathbf{j} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (9)$$

式中: σ 为电导率; \mathbf{B} 为磁感应, $\mathbf{B} = \nabla \mathbf{A}$, \mathbf{A} 是磁矢量势。气体物理参数(μ 、 C_p 、 k 、 σ)取自气体放电等离子体数据库(GPLAS)。模型使用的边界条件如表 1 所示。入口流场为流量 245 m/s,平均功率 P 分布在阴极上,速度在壁面处具有无滑移条件,在出口处压力为 101 325 Pa(1 atm)。

表 1 COMSOL 模型的边界条件

位置	流场	热传递	电场	磁场
阳极	0	$\mathbf{n} \cdot \nabla T = 0$	$V = 0$	$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$
阴极	0	$\mathbf{n} \cdot \nabla T = 0$	$P = 535 \text{ W}$	$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$
入口	245 m/s	$\mathbf{n} \cdot \nabla T = 0$	$\mathbf{n} \cdot \nabla \phi = 0$	$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$
出口	101 325 Pa	$\mathbf{n} \cdot \nabla T = 0$	$\mathbf{n} \cdot \nabla \phi = 0$	$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$
壁面	0	$\mathbf{n} \cdot \nabla T = 0$	$\mathbf{n} \cdot \nabla \phi = 0$	$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$

1.2 纯氨气等离子体机理构建

整合建立的氨气等离子体机理主要包括电子碰撞反应、带电粒子反应中的电荷转移反应和解离复合反应、激发态反应。其中电子碰撞反应来自 LX-Cat 网站上的 Morgan(见 Morgan Database; www.lxcat.net, 1987)和 Hayash(见 Hayashi Database; www.lxcat.net, 1987)数据库,带电粒子和激发态反应主要来源文献整合,并且根据一些计算方法验证,激发态反应均采用 Fridman 和 Starik 估算。

1.3 零维反应动力学模型

结合零维等离子体动力学求解器 ZDPlsKin^[24] 建立了适用于氨气的零维滑动弧等离子体计算模型,此模型忽略掉滑动弧内部温度和粒子的不均匀性,以一个点来表示整段弧,考虑了反应加热、滑动弧与周围空气对流换热、滑动弧的增长对温度的影响等。使用此模型可以得到滑动弧 1 个重燃周期随时间的温度演化和组分演化规律。此处建立的滑动弧的等离子体反应动力学模型,方程如下:

$$\frac{d[N_i]}{dt} = \sum_{j=1}^{j_{\max}} Q_{ij}(t) \quad i = 1, 2, \dots, i_{\text{speciesmax}} \quad (10)$$

$$\frac{N_g}{\gamma - 1} \frac{dT_g}{dt} = \sum_{j=1}^{j_{\max}} \pm \delta \epsilon_j \cdot R_j + Q_{\text{heat}} \quad (11)$$

式中: $Q_{ij}(t)$ 是第 j 个反应对第 i 个粒子的源项; T_g 为气体温度; N_g 为等离子体总密度; γ 为比热比; $\sum_{j=1}^{j_{\max}} \pm \delta \epsilon_j \cdot R_j$ 为反应热源项; Q_{heat} 为其他热源,在不同的阶段有不同的源项。

此处使用实验和 COMSOL 流体仿真结合的形式确定模型的输入条件。零维滑动弧计算模型需要以下输入条件:

- 1)有效输入功率;
- 2)滑动弧随时间变化的长度;
- 3)滑动弧随位置变化的速度;
- 4)滑动弧平均温度。

当电压足够时,反应器中高压电极和地电极在距离最短处附近击穿,进而形成电弧放电。在形成电弧后,随着纯氨气流的推动使滑动弧拉长以及对流换热和辐射等产生热损失,当输入功率增加的能量不足以抵消热损失时,气体温度开始下降。但是

电场依然存在,导致电弧中电子温度远高于气体温度,当电弧被拉长到一定长度时,电弧熄灭并开始在电极最短处重燃。

结合这个物理过程对零维模型做了简化和设计,图 2 给出了模型的阶段所对应的滑动弧物理过程。模型在第 1 阶段赋值较大的电子温度和根据式(1)估算到的气体温度,使电极间的物质在较短时间内发展成为平衡电弧的物理状态。在第 2 阶段时电弧(局部热平衡等离子体)已经形成,此时电子温度等于气体温度,气体温度来源考虑了不同的热增加和热损失,此时功率输入的能量还能维持电弧稳定。随着电弧长度继续增长,在达到一定的转换条件后,滑动弧进入第 3 阶段非平衡阶段。此时电弧中热损失远大于热输入,气体温度迅速下降,但是由于依然存在电场可以给电子输入能量,导致电子温度远大于气体温度。最后到达 1 个时间节点后电弧熄灭,完成 1 个周期的循环。其中前 2 个阶段电子能量基于麦克斯韦分布,在第 3 阶段电子温度则是基于玻尔兹曼分布。

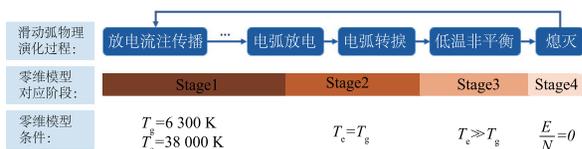


图 2 滑动弧物理过程和模型阶段对应图

滑动弧一个周期的持续时间可以从实验功率中得到,部分实验功率如图 3 所示,图中有较多功率增长而后降低的峰值,表示着滑动弧发生多次重燃熄灭周期。在每个周期中功率最低时,标志着滑动弧开始重燃,随着弧长增加,功率也随之增大。为了使用求解器进行计算,此处需要截取一段滑动弧重燃到熄灭的功率,本次研究截取的是图中粉红色背景下的功率,红色较深处代表滑动弧开始重燃,颜色变淡后表示滑动弧长度增加弧内温度下降,在功率最高时滑动弧熄灭。从图 3 中可以看出,滑动弧在 1 个重燃周期内时间范围为 13.66 ~ 20.49 ms,从重燃到熄灭持续了 6.8 ms。

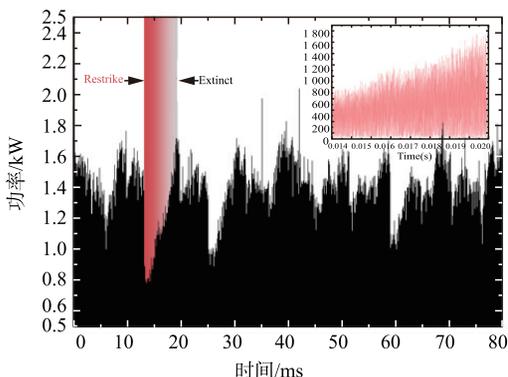


图 3 滑动弧反应器的实验功率

2 模型计算结果与讨论

2.1 二维流体模型计算结果

在二维流体计算模型中得到的滑动弧的演化情况,在 20.49 ms 时刻的位置和温度如图 4 所示,此时刻对应着滑动弧长度为最大值,即将熄灭,温度在 1 500 ~ 2 000 K 附近。

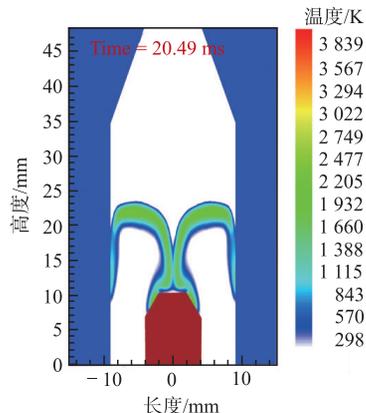


图 4 滑动弧温度

在整个周期内长度和速度演化如图 5、图 6 所示。在此重燃周期内的起始点 13.66 ms 时刻时滑动弧重燃,此时滑动弧在整个周期内长度最短,平均温度最高。随着时间的推移,滑动弧长度开始增加伴随着温度下降,速度则是主要由结构和入口流量决定,由于出口相较于入口较小,所以在位置接近出口距离处速度骤增。滑动弧经过 6.8 ms 的演化,在 20.49 ms 时再次熄灭。

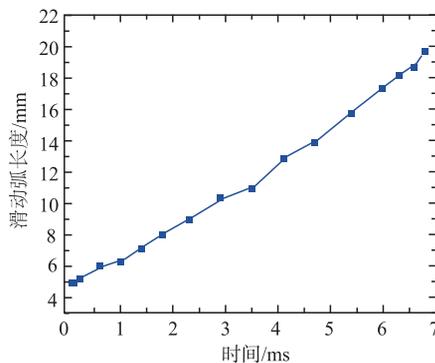


图 5 滑动弧长度演化

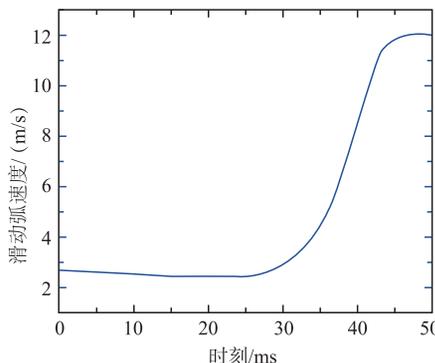


图 6 滑动弧速度演化

2.2 零维滑动弧模型计算结果

在零维滑动弧模型中得到该段滑动弧温度演化、粒子密度演化等数据。

在截取的重燃周期内,得到的滑动弧气体温度如图7所示,0.8 μs前设置的电子温度和气体温度都较高且保持不变,滑动弧内为高度电离状态,对应滑动弧的重燃时刻,此时模型处于全电离阶段,在本文中此阶段并不是关注的重点。随后滑动弧进入平衡-转捩阶段,滑动弧会受到滑长度增大等影响产生热损失,气体温度开始降低,但是此阶段电子温度仍等于气体温度。在6.8 ms时滑动弧熄灭,滑动弧熄灭之前气体温度维持在4 200~5 000 K的高温并且持续下降,滑动弧熄灭之后温度迅速下降至900 K,与同功率相似结构的实验^[25]对比(见图8)良好。

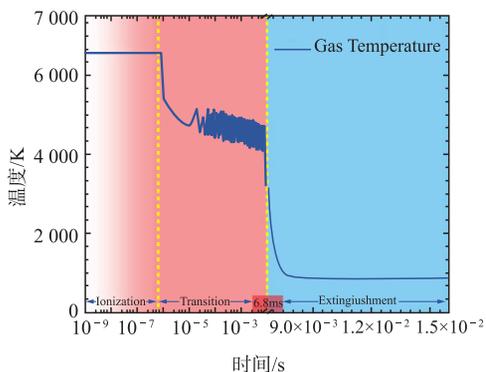


图7 一个周期内滑动弧气体温度演化

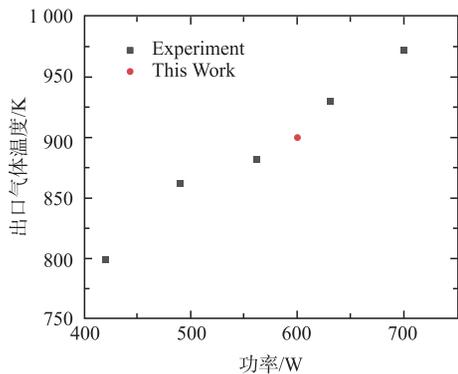


图8 反应器出口处气体温度实验与仿真对比

由于入口处通入的是纯氨气体,所以主要聚焦于等离子体对氨的裂解作用。气体从入口到出口大约需要16 ms,此时间范围内主要分子密度的演化如图9所示。其中NH₃在等离子体的作用下分解成了大量的燃料碎片NH₂和NH,而它们中的一部分又会在等离子体作用下继续分解,最终形成大量的H₂和N₂。约化电场的大小在全电离阶段为150 Td左右,在此阶段较高的电子温度使总粒子数密度快速增加,因此约化电场大小急剧降低;在平衡-转捩阶段总粒子数密度变化较小,约化电场变化同样较小;6.8 ms时滑动弧熄灭等离子体通道断开,此后作用在粒子上的电场强度为0 Td。16 ms后粒子

到达反应器出口处,与空气结合进行燃烧。

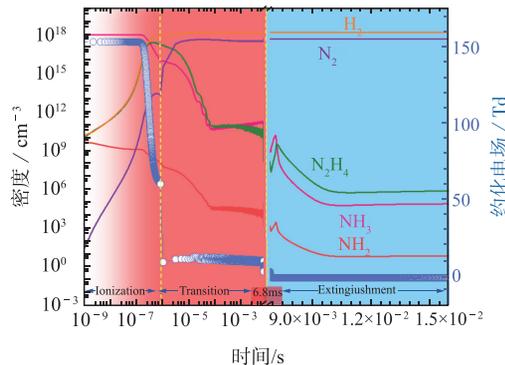


图9 滑动弧中主要分子演化

2.3 燃烧模型计算结果

在燃烧模型中采用Wang Z H等人组建的以氨气为主要成分的新型氨气机理——CEU-NH₃^[26],此机理包括H₂/CO合成气子机理、NH₃反应子机理、以及含碳氢化合物反应的C₁-C₄子机理。将纯氨气体经滑动弧裂解后的产物(反应器出口的粒子密度)代入到燃烧模型中进行计算,通过在模型中设置燃料和空气当量比的不同,研究有无等离子体混合气火焰传播速度和点火延迟时间变化情况。

2.3.1 层流火焰燃烧速度

在反应器出口处,经滑动弧等离子体裂解后的氨气与氧化物空气结合燃烧,此研究设置未燃气体温度值为300 K。在不同当量比下的层流传播速度如图10所示,横坐标为当量比,纵坐标为层流火焰传播速度。随着当量比从0.85增加到1.25,火焰传播速度整体上先增大后减小。未施加等离子体时,当量比为1.1左右其火焰传播速度最大,施加等离子体后此当量比向着更大的数值推移。

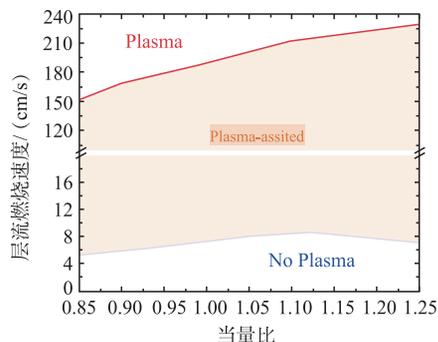


图10 NH₃/air混合气在不同当量比下的层流传播速度(未燃气体温度300 K)

与未加等离子体相比,其层流火焰燃烧速度相差1~2个数量级。等离子体对NH₃的层流火焰燃烧速度作用明显,主要原因可能是NH₃在等离子体条件下大量裂解成了H₂。

在NH₃/air的混合气中加入CH₄,使燃料中NH₃与CH₄的比例为1:1,研究将裂解后的氨燃料部分替换为甲烷后,在不同当量比下其层流燃

速度的变化情况,结果如图 11 所示。对比结果发现,未施加等离子体时,在 NH_3/air 混合气中添加 CH_4 其层流燃烧速度增加;施加等离子体后,添加 CH_4 对燃烧速度效果仍有提升,但与未添加 CH_4 相比整体效果有所下降,主要原因可能是加入的 CH_4 稀释了等离子体对氨裂解的影响。

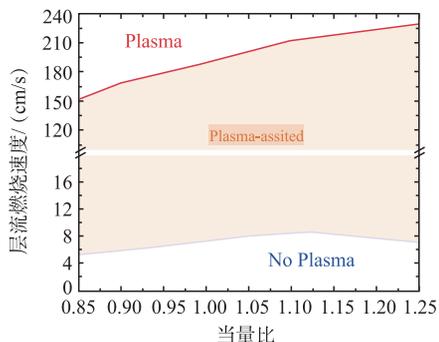


图 11 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{air}$ 混合气(燃料比例 1 : 1)在不同当量比下的层流传播速度(未燃气体温度 300 K)

2.3.2 点火延迟时间

使用均质封闭模型计算点火延迟时间,设置未燃气体温度为 1 200 K,在较高初始温度下研究点火延迟时间的变化,以区分施加等离子体与施加高温的作用。计算结果如图 12 所示,未施加等离子体时,在研究的当量比范围内点火延迟时间变化较小,在百毫秒量级,而经过滑动弧等离子体裂解后,其点火延迟时间在微秒量级,结果表明在较高的初始温度下滑动弧等离子体仍显著的降低了 NH_3 的点火延迟时间,数值大约在 4 个数量级。

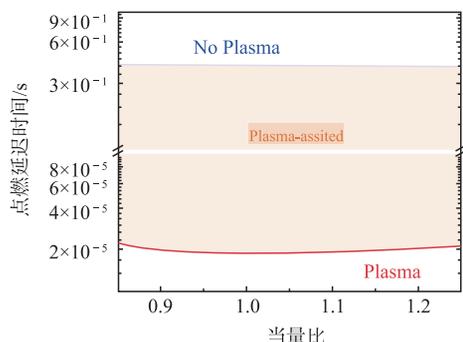


图 12 NH_3/air 混合气在不同当量比下的点火延迟时间(未燃气体温度 1 200 K)

在混合气中加入 CH_4 ,使燃料中 NH_3 与 CH_4 的比例为 1 : 1,研究将裂解后的氨燃料部分替换为甲烷后,在不同当量比下点火延迟时间的变化情况,结果如图 13 所示。在添加 CH_4 后滑动弧等离子体条件对减小点火延迟时间仍然有较好的效果,但是相较未添加 CH_4 整体效果有所下降,可能是因为 CH_4 需要一定的时间进行裂解,从而增加了总的点火延迟时间。对比图 12 发现,两种混合气都未施加等离子体时,在添加 CH_4 后点火延迟时间影响较小。

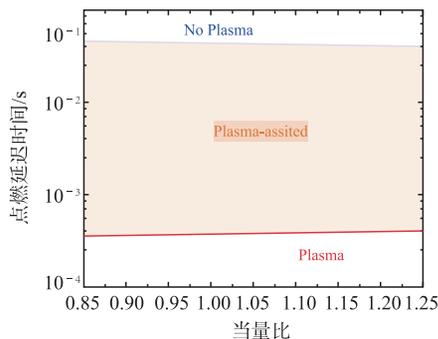


图 13 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{air}$ 混合气(燃料比例 1 : 1)在不同当量比下的点火延迟时间(未燃气体温度 1 200 K)

3 结论

本文结合二维流体动力学模型-零维反应动力学模型-燃烧模型对滑动弧等离子条件下氨裂解和燃烧特性做了研究。建立了考虑电磁的二维流体动力学模型对滑动弧形态进行分析;构建并理论验证了纯氨气等离子体动力学机理,建立了零维滑动弧模型,得到滑动弧中 1 个重燃周期的温度和组分演化规律;最后在燃烧模型中评估了等离子体作用对燃烧的影响。

结果表明,反应器入口通入流量为 245 m/s 的纯氨时,经有效平均功率为 535 W 的滑动弧等离子体裂解后产生大量的 H_2 ,其中零维求解器中得到的反应器出口温度与实验对比良好。相比于未施加等离子体提高了层流燃烧速度 1~2 个数量级以及降低 4 个数量级的点火延迟时间,此外将一部分等离子体条件下氨燃料替换为甲烷后,整体燃烧效果有所减弱。

需要注意的是,在反应器中通入的是纯氨气体并没有氧化物,所以在反应器内部并不考虑燃烧反应;在燃烧模型中燃料并没有考虑滑动弧未作用的部分,考虑的仅是受到滑动弧作用的氨气体,结果可以作为后续研究的参考。此外纯氨等离子体动力学机理仍然处于初步阶段,未来需要对机理更加准确的理论和实验验证。

致谢:本工作由国家自然科学基金(NO. 51907204)和面上基金(NO. 52277168)支持完成,在此也感谢等离子体激励燃烧小组全体人员对于氨气等离子体机理的构建工作和李振阳等人对零维滑动弧代码的开发。

参考文献

- [1] 国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展. [EB/OL]. (2020-12-21)[2022-11-29]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1695117/1695117.htm>.
- [2] PRASAD S, SINGH A, JOSHI H C. Ethanol as an Alternative Fuel from Agricultural, Industrial and

- Urban Residues[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50(1): 1-39.
- [3] SEMELSBERGER T A, BORUP R L, GREENE H L. Dimethyl Ether (DME) as an Alternative Fuel[J]. Journal of Power Sources, 2006, 156(2): 497-511.
- [4] CARRARETTO C, MACOR A, MIRANDOLA A, et al. Biodiesel as Alternative Fuel: Experimental Analysis and Energetic Evaluations[J]. Energy, 2004, 29(12/13/14/15): 2195-2211.
- [5] CRABTREE G W, DRESSELHAUS M S. The Hydrogen Fuel Alternative[J]. MRS Bulletin, 2008, 33(4): 421-428.
- [6] 夏鑫, 蔺建民, 李妍, 等. 氨混合燃料体系的性能研究现状[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2332-2339.
- [7] VALERA-MEDINA A, AMER-HATEM F, AZAD A K, et al. Review on Ammonia as a Potential Fuel: From Synthesis to Economics[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(9): 6964-7029.
- [8] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for Power[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 69: 63-102.
- [9] 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.
- [10] LI J, LAI S N, CHEN D N, et al. A Review on Combustion Characteristics of Ammonia as a Carbon-Free Fuel[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 760356.
- [11] KOJIMA Y. A Green Ammonia Economy[C]//10th Annual NH₃ Fuel Conference. Hong Kong:[s. n.], 2013.
- [12] DUYNLAEGHER C, JEANMART H, VANDOOREN J. Ammonia Combustion at Elevated Pressure and Temperature Conditions[J]. Fuel, 2010, 89(11): 3540-3545.
- [13] CAVALIERE D E. Blow-off in Gas Turbine Combustors[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2014.
- [14] 周岩, 罗振兵, 王林, 等. 等离子体合成射流激励器及其流动控制技术的研究进展[J]. 航空学报, 2022, 43(3): 98-140.
- [15] 孟宣市, 宋科, 龙玥霄, 等. NS-SDBD 等离子体流动控制研究现状与展望[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(6): 901-916.
- [16] 李应红, 吴云. 等离子体激励调控流动与燃烧的研究进展与展望[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(10): 1252-1273.
- [17] HONG J, PANCHESHNYI S, TAM E, et al. Kinetic Modelling of NH₃ Production in N₂-H₂ Non-Equilibrium Atmospheric-Pressure Plasma Catalysis[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(15): 154005.
- [18] TANEJA T S, YANG S. Numerical Modeling of Plasma Assisted Pyrolysis and Combustion of Ammonia[C]//AIAA Scitech 2021 Forum. Reston, Virginia: AIAA, 2021: 1972.
- [19] JOHNSON P N, TANEJA T S, YANG S. Global Pathway Analysis of Plasma Assisted Ammonia Combustion[C]//AIAA SCITECH 2022 Forum. Reston, Virginia: AIAA, 2022: 0977.
- [20] FAINGOLD G, LEFKOWITZ J K. A Numerical Investigation of NH₃/O₂/He Ignition Limits in a Non-Thermal Plasma[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 6661-6669.
- [21] SUN J G, HUANG Q, TANG Y, et al. Stabilization and Emission Characteristics of Gliding Arc-Assisted NH₃/CH₄/Air Premixed Flames in a Swirl Combustor[J]. Energy & Fuels, 2022, 36(15): 8520-8527.
- [22] RONG M Z, ZHONG L L, CRESSAULT Y, et al. Thermophysical Properties of SF₆-Cu Mixtures at Temperatures of 300-30 000 K and Pressures of 0.01-1.0 MPa; Part 1. Equilibrium Compositions and Thermodynamic Properties Considering Condensed Phases[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(49): 495202.
- [23] ZHONG L L, CRESSAULT Y, TEULET P. Thermophysical and Radiation Properties of High-Temperature C₄F₈-CO₂ Mixtures to Replace SF₆ in High-Voltage Circuit Breakers[J]. Physics of Plasmas, 2018, 25(3): 033502.
- [24] PANCHESHNYI S, EISMANN B, HAGELAAR G J M, et al. Zdplaskin: A New Tool for Plasmachemical Simulations [M/OL]. [2022-12-21]. <http://www.zdplaskin.laplace.univ-tlse.fr/>.
- [25] LIN Q F, JIANG Y M, LIU C Z, et al. Instantaneous Hydrogen Production from Ammonia by Non-Thermal Arc Plasma Combining with Catalyst[J]. Energy Reports, 2021, 7: 4064-4070.
- [26] WANG Z H, HAN X, HE Y, et al. Experimental and Kinetic Study on the Laminar Burning Velocities of NH₃ Mixing with CH₃OH and C₂H₅OH in Premixed Flames[J]. Combustion and Flame, 2021, 229: 111392.

(编辑: 姚树峰)