

# 面向燃气轮机的氨/氢燃料掺混设计及其燃烧特性研究

王堃旗<sup>1</sup>, 李树豪<sup>2</sup>, 席双惠<sup>3</sup>, 李尚俊<sup>4</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院 材料学院, 河南 郑州 450046; 2. 郑州航空工业管理学院 航空发动机学院, 河南 郑州 450046;  
3. 郑州航空工业管理学院 航空宇航学院, 河南 郑州 450046; 4. 四川大学 化学工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**为推进零碳燃料氨/氢掺混燃烧在燃气轮机中的应用, 针对氨/氢燃料的掺混设计和燃烧性能开展研究。以氨/氢掺混燃烧设计为目标, 以天然气的燃烧性能为参照, 采用可靠的燃烧反应机理, 在较宽工况范围和不同掺氢比下开展了氨/氢掺混燃烧特性及其可行性的数值研究, 并确定了氨/氢混燃用于燃气轮机仿真实验研究的合理配比; 同时系统分析了氨/氢掺混燃烧过程中NO的生成路径以及影响氨和氨/氢掺混燃烧温度变化的关键反应。结果表明: 在点火延迟时间、绝热火焰温度、火焰传播速度等典型基础燃烧特性的判据下, 氨/氢燃料在掺氢比为50%~55%范围内的燃烧性能与天然气相当; 另外, 氢气的掺混显著拓宽了氨气的稳定燃烧范围, 为进行实际的燃气轮机工程燃烧仿真研究提供可行的掺混方案。

**关键词:**燃气轮机; 氨/氢燃料; 掺混燃烧; 燃烧特性; 数值研究

中图分类号: V231.1 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.07.006

[引用本文格式] 王堃旗, 李树豪, 席双惠, 等. 面向燃气轮机的氨/氢燃料掺混设计及其燃烧特性研究 [J]. 热能动力工程, 2024, 39(7): 46-53. WANG Kunqi, LI Shuhao, XI Shuanghui, et al. Ammonia/hydrogen fuel blending design and its combustion characteristics for gas turbines [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(7): 46-53.

## Ammonia/Hydrogen Fuel Blending Design and Its Combustion Characteristics for Gas Turbines

WANG Kunqi<sup>1</sup>, LI Shuhao<sup>2</sup>, XI Shuanghui<sup>3</sup>, LI Shangjun<sup>4</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou, China, Post Code: 450046;  
2. School of Aero Engine, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou, China, Post Code: 450046;  
3. School of Aerospace Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou, China, Post Code: 450046;  
4. School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu, China, Post Code: 610065)

**Abstract:** In order to promote the application of zero-carbon ammonia/hydrogen blending combustion in gas turbines, the design and combustion performance of ammonia/hydrogen blending were studied. Taking the ammonia/hydrogen blending combustion design as the goal, taking the combustion performance of natural gas as the reference, and using the reliable combustion reaction mechanism, the numerical study of the combustion characteristics and feasibility of ammonia/hydrogen blending under a wide range of working conditions and different hydrogen blending ratios was carried out, and the reasonable ratio of ammonia/hydrogen blending combustion for gas turbine simulation experiments was determined. Meanwhile,

收稿日期: 2023-10-20; 修订日期: 2024-01-15

基金项目: 河南省自然科学基金项目(242300420050); 河南省高等学校重点科研项目计划(24A590006, 24B470010); 2023年郑州航院研究生教育创新计划基金项目(2023CX57); 郑州航空工业管理学院科研团队支持计划专项(23ZHTD01004)

**Fund-supported Project:** Henan Provincial Natural Science Foundation of China (242300420050); Henan Provincial Department of Education Science and Technology Research Key Project (24A590006, 24B470010); 2023 Zhengzhou University of Aeronautics Graduate Education Innovation Program Fund (2023CX57); Scientific Research Team Plan of Zhengzhou University of Aeronautics (23ZHTD01004)

作者简介: 王堃旗(1997-), 男, 郑州航空工业管理学院硕士研究生。

通信作者: 李树豪(1986-), 男, 郑州航空工业管理学院副教授。

the formation path of NO during ammonia/hydrogen blending combustion and the key reactions affecting the temperature change of ammonia and ammonia/hydrogen blending combustion were systematically analyzed. The results show that the combustion performance of ammonia/hydrogen fuel in the range of 50% - 55% hydrogen blending ratio is comparable to that of natural gas under the criterion of typical basic combustion characteristics such as ignition delay time, adiabatic flame temperature and flame propagation velocity. In addition, the blending of hydrogen significantly broadens the stable combustion range of ammonia, which provides a feasible blending scheme for actual combustion simulation research in gas turbine engineering.

**Key words:** gas turbine, ammonia/hydrogen fuel, blending combustion, combustion characteristics, numerical research

## 引言

近年来,随着化石能源的过度消耗,全球气候日益恶化。为应对气候变化,各个国家和地区相继提出了低碳发展的战略目标<sup>[1]</sup>。在此背景下,燃气轮机所用替代传统燃料的新燃料的发展及其燃烧技术的提升变得十分迫切;氨、氢作为典型零碳燃料,得到了世界各国的广泛关注,其应用也是实现零碳燃气轮机的关键技术之一<sup>[2-3]</sup>。

氢(H<sub>2</sub>)的燃烧产物只有水,不会对环境造成破坏,且氢能具有超高的质量能量密度,被视为替代化石燃料和减少温室气体排放的最佳选择。然而,由于氢反应极端,加之储存运输困难,极大地限制了其大规模应用,于是各种掺氢燃料的使用成为了利用氢最有效的途径之一<sup>[4-5]</sup>。氨(NH<sub>3</sub>)作为一种具有较好潜力的零碳燃料,是化石能源的有利替代者。氢能利用已被国际能源署列为实现全球碳减排的有效途径之一。但氨燃料的燃烧存在可燃极限窄、层流燃烧速度低、燃烧稳定性差、NO<sub>x</sub>排放高等不足<sup>[6-9]</sup>,氨的高效燃烧技术研究急待加强。其中较为有效的解决途径是掺氢强化燃烧;通过氨/氢掺混燃烧,可极大地改善氨的燃烧性能,也能实现氨的有效利用<sup>[10-11]</sup>。目前,全球多家燃气轮机厂商已开始探索传统燃气轮机掺氢技术<sup>[12]</sup>。

在基础燃烧研究方面:He等人<sup>[13]</sup>对氨/氢的点火延迟时间进行了研究,发现氢气的加入可显著促进氨的着火,且随着掺入到氨中的氢气量增多,氨/氢混合燃料的点火延迟时间逐渐变短;Li等人<sup>[14]</sup>研究了不同掺混比下氢/氨的燃烧速度,结果表明,随

着氢的增加火焰速度也增加,并发现氨含量在54.5%时与甲烷有相同的燃烧速度;Ichikawa等人<sup>[15]</sup>在5个标准大气压下对氨/氢掺混燃烧火焰速度进行了实验和数值研究,发现随着H<sub>2</sub>的增加火焰速度呈非线性增加,而随着压力的增加,火焰速度则呈现减小趋势;Koike等人<sup>[16]</sup>对氨/氢掺混燃烧的层流火焰速度也进行了研究,发现掺入氢气越多层流火焰速度越大,且氨/氢混合燃料的掺混比在40%~50%时能达到与碳氢化合物相当的水平;Zhang等人<sup>[17]</sup>在燃烧室中测量了氨/空气、氨/甲烷/空气和氨/氢/空气燃烧后产生的NO<sub>x</sub>排放量,发现掺入10%的氢,NO和NO<sub>2</sub>排放量与纯氨相当,但随着氢气的增加NO<sub>x</sub>排放量增多;Rocha等人<sup>[18]</sup>探究了氨气掺氢后的点火延迟时间、火焰速度、NO<sub>x</sub>排放等性能,发现掺氢可明显改善氨燃烧特性,但NO<sub>x</sub>排放量也随着增加。

在工程燃烧研究方面:Kurata等人<sup>[19]</sup>首次将氨燃料用于50 kW微型燃气轮机进行发电,且燃烧效率在89%~96%之间,但由于NO<sub>x</sub>排放量大,需通过SCR设备并结合二次燃烧来降低NO<sub>x</sub>排放量;Mashruk等人<sup>[20]</sup>探究了NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>混合燃料的燃烧,发现富油燃烧-猝熄-贫油燃烧(RQL)与加湿气氨可有效减少NO<sub>x</sub>排放;宋权斌等人<sup>[21]</sup>模拟了80 kW微型燃机轮机的氨掺氢燃烧试验,发现掺氢比在35%~50%时可实现氨/氢混合燃料的高效稳定燃烧;Valera-Medina等人<sup>[22]</sup>研究了氨/氢燃料和氨/甲烷燃料在燃气轮机中的燃烧,发现当量比较小时,两种燃料均可实现稳定燃烧。

综上,目前对于氨/氢掺混燃烧的研究比较广泛,且已展现出掺氢燃烧的优势和潜力。基于现有

燃烧室技术条件,氨/氢燃料可直接用于目前主流燃气轮机,但面向实际需求的氨/氢合理掺混配比的研究较少。本文以氨/氢混合燃料为研究对象,并以天然气燃烧性能为参照,在宽工况范围对氨/氢燃料的基础燃烧特性进行了分析,得到了氨/氢燃料的合适配比,并采用路径分析、敏感度分析等方法,对氨生成 NO 的主要反应路径、燃烧过程中氨的消耗路径、温度敏感度等进行了分析。

## 1 氨/氢混燃研究

### 1.1 研究方案

采用 Chemkin-Pro 软件<sup>[23]</sup>进行氨/氢燃烧仿真,选取 5% ~ 60% 的掺氢比范围,以天然气(天然气的主要组成为甲烷,且所占体积一般在 90% 以上,本文以甲烷作为其替代物)燃烧性能为基准,结合 Junichiro 等人<sup>[24]</sup>开发的氨/氢燃烧模型和 Gri-Mech 3.0 天然气燃烧模型<sup>[25]</sup>,探究氨/氢混燃的强化燃烧技术在燃气轮机中应用的可行性,得到可应用于燃气轮机的最佳掺氢比(Hydrogen ratio,  $X_{H_2}$ ),并采取路径分析、敏感度分析等手段对氨/氢燃料进行动力学分析。

掺氢比定义式为:

$$X_{H_2} = n_{H_2} / (n_{H_2} + n_{NH_3}) \quad (1)$$

式中: $n_{H_2}$ —氢气物质的量, mol;  $n_{NH_3}$ —氨气物质的量, mol。

在燃烧特性研究方面,选取零维均相反应器和火焰反应器开展点火延迟时间和层流火焰速度等基础燃烧特性数值仿真模拟。针对低温 ~ 高温(初始温度 298 ~ 1 600 K)、低压 ~ 高压(初始压力 0.1 ~ 1.0 MPa)、贫油 ~ 富油(当量比 0.5 ~ 1.5)宽工况下的不同氨、氢配比和甲烷的燃烧特性进行较全面的对比研究。

### 1.2 氨/氢混合燃料燃烧模型的验证

为了获取合适的氨/氢混合燃料,达到碳减排的目标,在进行燃料设计前应对所选的氨/氢燃烧模型的准确性、合理性进行验证。因此,采用文献[24]的燃烧反应机理并在其基础上进行了扩充验证,分别对氢气、氨气、氨/氢混合燃料的点火延迟时间和层流火焰速度进行了数值模拟,并与相应工况下的实验数据进行了对比,如图 1 和图 2 所示。

从图 1 可以看出,不管是纯氢、纯氨还是二者的混合物,其点火延迟时间模拟值与 Chen 等人<sup>[26]</sup>和 Man 等人<sup>[27]</sup>提供的实验数据吻合较好。从图 2 可以看出,纯氨、氨/氢混合燃料的层流燃烧速度与 Han 等人<sup>[28]</sup>和 Lhuillier 等人<sup>[29]</sup>提供的实验数据吻合良好,纯氢模拟值虽有少数数据与 Ghosh 等人<sup>[30]</sup>提供的实验数据有点差距,但整体上模拟值与实验值较为吻合。总体来说,选用该模型能较好地再现氨/氢混合燃料燃烧特性。因此,本文基于 Junichiro 模型对氨/氢混合燃料的仿真模拟是合理可靠的。

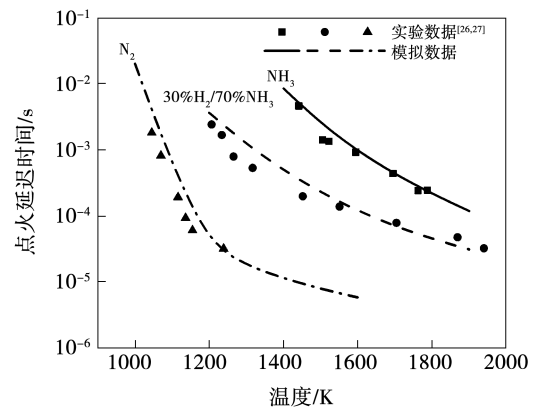


图 1 采用 Junichiro 模型的  $NH_3$ 、 $H_2$  和  $NH_3/H_2$  混合物在 1 MPa 下的点火延迟时间

Fig. 1 Ignition delay time of  $NH_3$ ,  $H_2$  and  $NH_3/H_2$  mixture using Junichiro model at 1 MPa

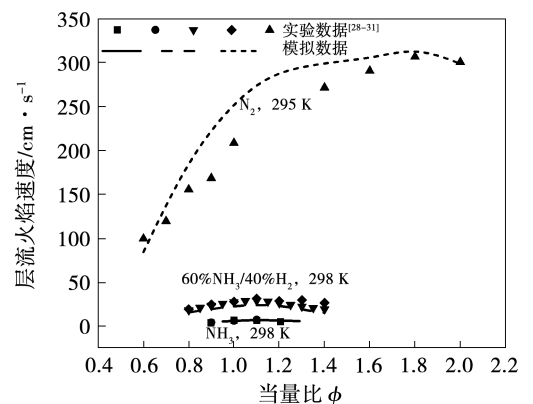


图 2 采用 Junichiro 模型的  $NH_3$ 、 $H_2$  和  $NH_3/H_2$  混合物在 0.1 MPa 下的层流火焰速度

Fig. 2 Laminar flame velocity of  $NH_3$ ,  $H_2$  and  $NH_3/H_2$  mixture using Junichiro model at 0.1 MPa

## 2 氨/氢掺混基础燃烧特性

### 2.1 点火延迟时间

点火延迟时间是燃料着火能力的重要参数。本文探究了当量比为 1.0 时,不同压力下氨气、氨/氢燃料和甲烷的点火延迟时间随温度的变化,如图 3 所示。

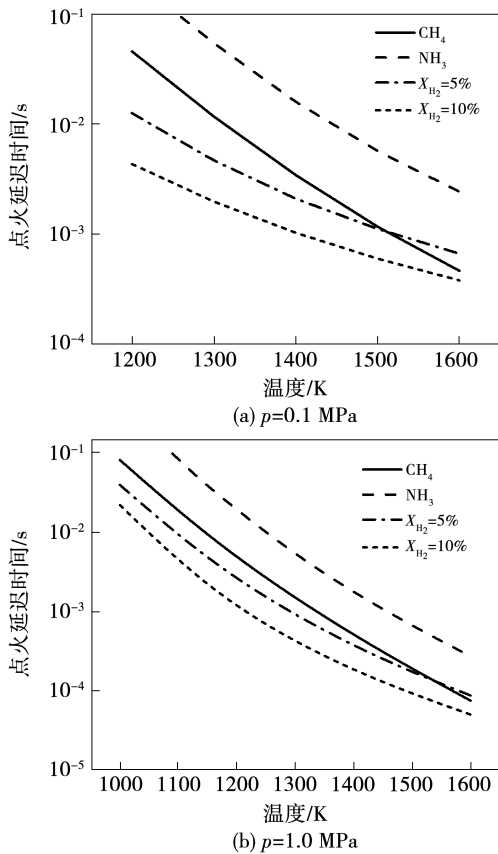


图 3 不同燃料的点火延迟时间

Fig. 3 Ignition delay time for different fuels

由图 3 可知,纯氨的点火延迟时间明显长于甲烷;压力为 0.1 MPa 时掺混 5% (摩尔分数) 的氢气可显著改善氨的点火能力,氨/氢掺混的点火延迟时间达到了与甲烷相当的水平;温度大于 1 500 K 时混合燃料的点火仍比甲烷慢,而掺混 10% 的氢气时氨/氢混合燃料的点火延迟时间始终短于甲烷;在 1.0 MPa 时氨气掺氢燃烧性能也得到了类似的结果。由此可以推断,后续混合燃料的掺氢比高于 10% 时,可认定其点火性能满足要求。

### 2.2 绝热火焰温度

作为衡量燃料燃烧性能的重要参数之一,绝热火焰温度能够表征燃料在燃烧时燃气轮机对外输出能量的潜力。图 4 在压力为 1.0 MPa 时,分析了不同当量比下绝热火焰温度随初始温度的变化,重点探究了不同掺氢比(20% ~ 60%) 的氨/氢燃料与甲烷的绝热火焰温度变化。

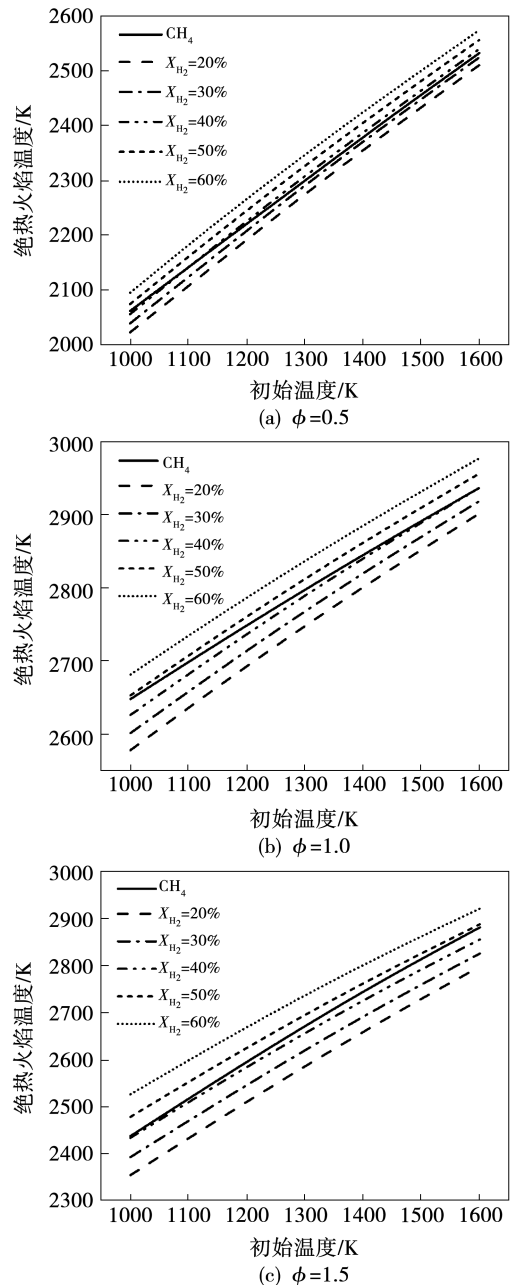


图 4 不同当量比下的绝热火焰温度

Fig. 4 Adiabatic flame temperatures at different equivalent ratios

结果显示:随着掺氢量的增加,氨/氢燃料绝热火焰温度在增大;在贫油条件下,掺氢比在30%~40%范围时可接近甲烷燃烧水平,而在化学当量比条件下,掺氢比为40%时,能与甲烷保持较好的一致性;在富油条件下,掺氢比在40%~50%时可达到与甲烷燃烧相当的水平。因此,在氨/氢燃料的掺氢比高于40%时,均可认为其燃烧温度能满足要求。

### 2.3 可燃极限

图5为压力为0.1 MPa、温度为1 150 K时氨/氢混合燃料和甲烷的富可燃极限。在此工况下,纯氨的富可燃极限仅约为5.6,而甲烷的富可燃极限约为9.6,远大于纯氨。掺混20%的氢气便可将氨的富可燃极限提高到12.2左右,远高于甲烷富可燃极限,且随着掺入氢气量的增加,可燃极限范围逐渐增大。同样,在其他温度下,掺入20%~60%的氢气均可扩大氨燃料的可燃极限范围,且随掺氢量的增加而拓宽。

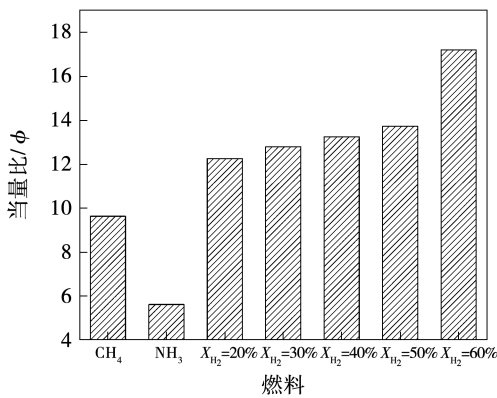


图5 氨/氢混合物与甲烷的燃烧极限

Fig. 5 Combustion limit of ammonia/hydrogen mixture and methane

### 2.4 层流火焰速度

多种燃料在不同压力下的层流火焰速度如图6所示。由图6可知:掺氢可显著提高氨的层流火焰速度,且随着掺氢量的增加,层流火焰速度显著增大,同时峰值向富油侧偏移;压力从0.1 MPa增加至0.5 MPa时压力的升高使得燃料层流火焰速度均有所下降,氨掺20%~40%的氢时,层流火焰速度随当量比的分布比较平缓;掺50%~60%的氢气时,层流火焰速度峰值显著增加。需要指出的是,在贫油工况下,甲烷与掺混50%氢气的氨/氢混合燃料

曲线贴合得较好,而在富油条件下,甲烷火焰传播速度下降较快,两者差异显著。由于燃气轮机燃烧室主要在贫油状态下工作,因此在氨/氢燃料的掺氢比高于50%时,均可认为其火焰性能满足要求。

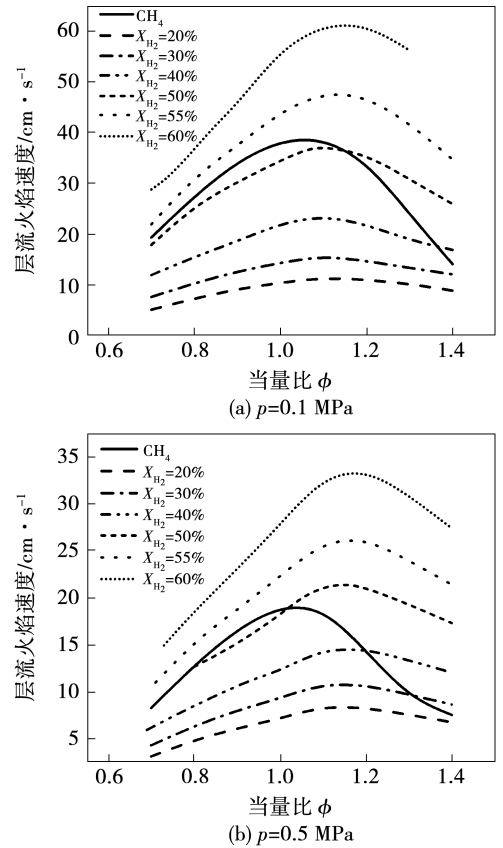


图6 不同压力下的层流火焰速度

Fig. 6 Laminar flame velocities at different pressures

### 2.5 NO排放

由于氨本身含氮元素,其燃烧必然会导致NO<sub>x</sub>排放大于甲烷。图7显示了压力0.3 MPa、温度298 K时的氨/氢混合燃料NO<sub>x</sub>和甲烷的NO排放情况。可以看出,NO<sub>x</sub>中的主要成分是NO,氨/氢混合燃料的NO排放量高于甲烷两个数量级,且随着掺入氢气量的增加,氨/氢燃料的NO排放量随之增加。值得注意的是,氨/氢混合燃料的NO排放量在当量比约为0.9时达到峰值,而甲烷则偏向于在当量比为1.0时达到峰值,且在富燃料条件下,NO排放量下降得较快,在当量比1.2~1.4之间时掺20%~40%的氨/氢燃料能达到与甲烷相当的排放水平。这可能是由于,氧氛围不足制约了其燃烧温度及NO的形成,也会导致大量未燃的氨/氢燃料排出。

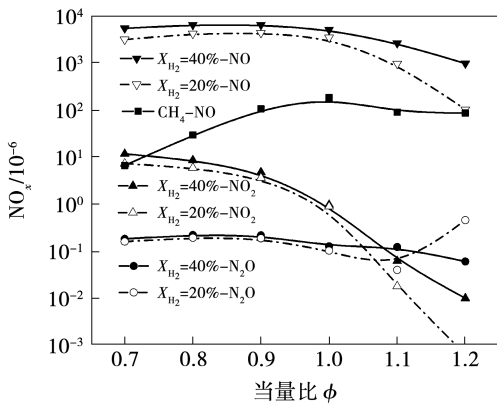


图 7 0.3 MPa、298 K 时 NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub> 混合燃料燃烧 NO<sub>x</sub> 生成量和 CH<sub>4</sub> 燃烧 NO 生成量变化曲线

Fig. 7 NO combustion yield curve of CH<sub>4</sub> and NO<sub>x</sub> in NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub> mixed fuel at 0.3 MPa and 298 K

### 3 氨/氢燃烧动力学分析

#### 3.1 反应路径分析

为进一步研究氨/氢燃料燃烧机制及氢气对氨燃烧的作用,需要开展其燃烧动力学分析,探究了掺氢比、当量比等对反应路径的影响。图 8 分析了压力 1.0 MPa、温度 1 600 K、不同当量比下氨和掺氢比为 40% 的氨/氢燃料燃烧过程中 NH<sub>3</sub> 的主要反应路径,列出了部分重要的反应通道占比大于 2% 的反应。

图中每个通道的第 1, 2, 3 个数值分别代表着当量比为 0.5, 1.0 和 1.5 时相应的反应通道比,裂解反应(Lysis Reaction, LR)。可发现,纯氨和掺氢燃烧过程整体重要燃烧路径基本不变,只是 H<sub>2</sub>NO 在纯氨燃烧过程中较为重要,在掺氢燃烧时 H<sub>2</sub>NO 重要性下降被 N 所取代,重要路径也由 NH<sub>2</sub>→H<sub>2</sub>NO 和 H<sub>2</sub>NO→HNO, 被 NH→N, N→NO 和 N→N<sub>2</sub> 所取代。两者燃烧过程中,各反应通道占比也存在较大差异。氨燃烧中 NH<sub>3</sub> 与 OH, O, H 初始反应的通道总占比随当量比增大由 95.1% 下降到 90.7%。掺氢 40% 的氨/氢燃料也出现类似现象,相应反应通道比由 97.0% 下降到 92.2%, 但其在不同当量比下该通道总占比总是高于氨。在各次级反应通道中反应出不一样的现象:OH 参与的反应通道占比会随着当量比的增大而下降;H 参与的反应通道比一般在贫油和化学恰当比时的值大于富油工况;NH, NH<sub>2</sub> 参与的反应通道占比会随着当量比的增大而增

大;O<sub>2</sub>, NO, H<sub>2</sub>O 等稳定组分参与的反应通道占比对当量比的变化不太敏感。对比图 8 (a) 和 8 (b) 可知,掺氢会提升 H 参与反应通道的正向燃烧路径(从 NH<sub>3</sub> 至 NO 方向)的影响。

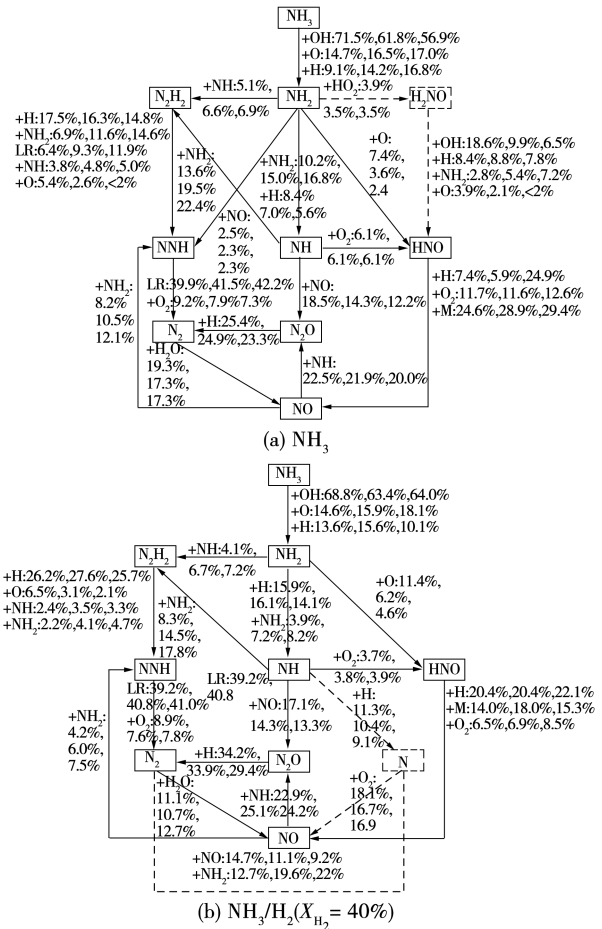


图 8 1.0 MPa 和 1 600 K 时的 NH<sub>3</sub> 反应路径

Fig. 8 NH<sub>3</sub> reaction paths at 1.0 MPa and 1 600 K

#### 3.2 敏感度分析

图 9 在压力为 0.5 MPa、温度为 1 600 K、当量比为 1.0 时对温度进行了敏感度分析。在氨燃烧过程中, H + O<sub>2</sub> = O + OH 和 NH<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> = H<sub>2</sub>NO + O 反应是促进氨燃烧最主要的反应, 而 NH<sub>2</sub> + NO = N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> + H = NH<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> 反应是抑制氨消耗的最主要反应。掺入氢气后, 由于 H<sub>2</sub> 和 H 的增加使得与 H<sub>2</sub> 和 H 基的基元反应变得敏感, 如反应 O + H<sub>2</sub> = OH + H, 且此时 H + O<sub>2</sub> = O + OH 的敏感度系数远大于其他基元反应的敏感度系数, 同时有 NH<sub>2</sub> 参与的反应 NH<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> = H<sub>2</sub>NO + O 的作用已被严重削弱, 同时 NH<sub>3</sub> + OH = NH<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O 成为抑制燃烧的最主要反应。但无论是氨还是氨/氢混合燃料, H + O<sub>2</sub> = O +

OH 总是促进氨燃烧的关键反应,且生成 OH, O, H 的反应基本都是促进氨正向消耗的反应;而最主要抑制反应,无论是  $\text{NH}_3 + \text{H} = \text{NH}_2 + \text{H}_2$  还是  $\text{NH}_3 + \text{OH} = \text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$ , 都是由活泼自由基生成非活泼自由基的过程;随着掺氢比的增大,主要反应的敏感度也会增加。

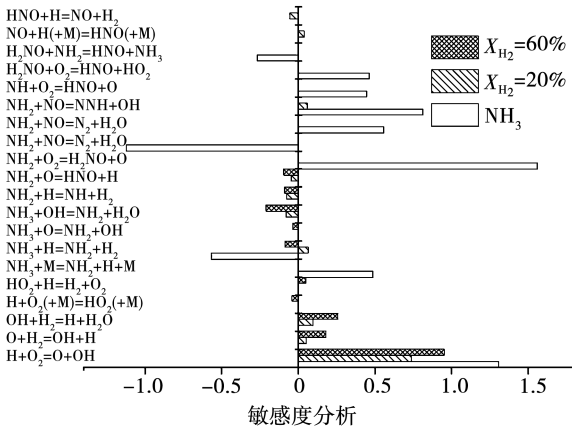


图9 温度敏感度分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of temperature

综上,基于多工况下的燃烧仿真和动力学分析,并综合考虑燃料的多种燃烧特性,选择合理掺氢比的氨/氢燃料整体燃烧性能应与甲烷相当;同时结合燃气轮机燃烧室中燃料主要在贫油状态下工作,最终得到面向燃气轮机的氨/氢燃料较为理想的掺氢比范围是 50% ~ 55%。同时,化学动力学分析表明掺氢对于氨的燃烧有积极的作用,仍保留了氨的主要反应路径和微观机制。

## 4 结论

本文以燃气轮机常用燃料天然气中主要成分甲烷的燃烧性能为参照,探究了氨/氢掺混燃烧特性,并开展了相关动力学分析,获得了适用于燃气轮机的最佳氨氢配比,得到以下结论:

(1) 掺氢比为 10% 的氨/氢燃料的点火性能已优于甲烷,掺氢 20% 及以上的氨/氢混合燃料的可燃范围比甲烷也更加宽泛;掺氢比大于 40% 的氨/氢混合燃料的绝热火焰温度均可达到或高于甲烷的火焰温度;在贫燃料至轻微富燃料范围内,混合燃料掺 50% ~ 55% 氢时,其层流火焰传播速度与甲烷一致,在富燃料条件下氨/氢燃料的层流火焰速度要略低于甲烷;另外,由于氨自身含氮较多,其燃烧

时明显 NO 等排放量要高于甲烷。

(2) 综合考虑燃料多种燃烧特性,同时结合燃烧室中燃料主要在贫油状态下工作,最终选取掺氢 50% ~ 55% 的氨/氢混合燃料可达到与天然气相当的燃烧水平。该掺氢比范围可为进行实际的燃气轮机工程燃烧仿真研究提供可行的掺混方案。

(3) 动力学分析表明,纯氨和氨掺氢燃烧过程涉及的重要燃烧物质只在  $\text{H}_2\text{NO}$  和 N 上存在差别,但各反应通道占比差异较大;随着掺氢量的增加,氨和氨/氢混合燃料的重要燃烧路径和关键反应通道均有所变化;氨掺氢后,涉及  $\text{H}_2$  和 H 的关键基元反应的影响增大,其敏感度系数也随之增加。

## 参考文献:

- [1] 杨 斌,刘仲铠,林柯利,等. 面向碳中和与先进动力的燃烧反应动力学研究方法进展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(4): 663-677.  
YANG Bin, LIU Zhongkai, LIN Keli, et al. Towards carbon neutrality and advanced engines: Progress in combustion kinetics research methods[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(4): 663-677.
- [2] WANG Z, JI C W, ZHANG T Y, et al. Experimental and numerical study on laminar premixed  $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{air}$  flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(39): 14885-14895.
- [3] 边志坚,王金华,赵浩然,等. 氨/氢气湍流预混火焰传播特性实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(6): 551-557.  
BIAN Zhijian, WANG Jinhua, ZHAO Haoran, et al. Experimental study on turbulent premixed flame propagation characteristics of ammonia/hydrogen mixtures[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 26(6): 551-557.
- [4] TANG G, JIN P F, BAO Y L, et al. Experimental investigation of premixed combustion limits of hydrogen and methane additives in ammonia[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(39): 20765-20776.
- [5] 周永浩,张宗岭,胡思彪,等.  $\text{NH}_3/\text{H}_2$  预混旋流火焰稳定性及燃烧极限实验研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(1): 246-253.  
ZHOU Yonghao, ZHANG Zongling, HU Sibiao, et al. Experimental studies on flame stability and combustion limit of  $\text{NH}_3/\text{H}_2$  swirl combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(1): 246-253.
- [6] KANG L W, PAN W G, ZHANG J K, et al. A review on ammonia blends combustion for industrial applications[J]. Fuel, 2022, 332(2): 126150.
- [7] 许焕焕,葛 一,李 强,等. 氨燃料及应用技术研究进展[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(2): 1-13.  
XU Huanhuan, GE Yi, LI Qiang, et al. Research progress of ammo-

- nia fuel and application technology[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42(2): 1-13.
- [8] 毛晨林,王平,Prashant S,等.含氨燃料预混火焰的层流火焰速度及NO排放特性[J].化工学报,2021,72(10): 5330-5343.
- MAO Chenlin, WANG Ping, PRASHANT S, et al. Laminar flame speed and NO emission characteristics of premixed flames with different ammonia-containing fuels[J]. CIESC Journal, 2021, 72(10): 5330-5343.
- [9] 王智化,余作超,陈晨霖,等.新型零碳氨燃料的燃烧特性研究进展[J].华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(7): 24-40,78.
- WANG Zhihua, YU Zuocho, CHEN Chenlin, et al. Research progress on combustion characteristics of new zero carbon ammonia fuel[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(7): 24-40, 78.
- [10] 陈达南,李军,黄宏宇,等.氨燃烧及反应机理研究进展[J].化学通报,2020,83(6):508-515.
- CHEN Danan, LI Jun, HUANG Hongyu, et al. Progress in ammonia combustion and reaction mechanism[J]. Chemistry, 2020, 83(6): 508-515.
- [11] CHAI W S, BAO Y L, JIN P F, et al. A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 147: 111254.
- [12] 李祥晟,郭茜,郁鸿飞,等.掺氢对燃气轮机燃烧室燃烧和排放性能的影响研究[J].西安交通大学学报,2022,56(6): 9-16.
- LI Xiangsheng, GUO Han, YU Hongfei, et al. Study on combustion and emission performance of hydrogen fuel gas turbine combustor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 9-16.
- [13] 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.
- [14] LI J, HUANG H Y, KOBAYASHI N, et al. Study on using hydrogen and ammonia as fuels: Combustion characteristics and NO<sub>x</sub> formation[J]. International Journal of Energy Research, 2014, 38(9): 1214-1223.
- [15] ICHIKAWA A, HAYAKAWA A, KITAGAWA Y, et al. Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/hydrogen/air premixed flames at elevated pressures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(30): 9570-9578.
- [16] KOIKE M, SUZUOKI T. In-line adsorption system for reducing cold-start ammonia emissions from engines fueled with ammonia and hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(60): 32271-32279.
- [17] ZHANG M, AN Z H, WANG L, et al. The regulation effect of methane and hydrogen on the emission characteristics of ammonia/air combustion in a model combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(40): 21013-21025.
- [18] ROCHA R C, COSTA M, BAI X S. Chemical kinetic modelling of ammonia/hydrogen/air ignition, premixed flame propagation and NO emission[J]. Fuel, 2019, 246: 24-33.
- [19] KURATA O, IKI N, MATSUNUMA T, et al. Performances and emission characteristics of NH<sub>3</sub>-air and NH<sub>3</sub>-CH<sub>4</sub>-air combustion gas-turbine power generations[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3): 3351-3359.
- [20] MASHRUK S, XIAO H, VALERA-MEDINA A. Rich-lean model comparison for the clean use of humidified ammonia/hydrogen combustion systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(5): 4472-4484.
- [21] 宋权斌,赵仙娟,宋彦庆,等.微型燃气轮机改烧氨气/氢气混合燃料的数值模拟研究[J].热能动力工程,2023,38(5): 146-153.
- SONG Quanbin, ZHAO Xianjuan, SONG Yanqing, et al. Numerical simulation of micro-combustion engine to burn ammonia/hydrogen mixed fuel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 146-153.
- [22] VALERA-MEDINA A, MORRIS S, RUNYON J, et al. Ammonia, methane and hydrogen for gas turbines[J]. Energy Procedia, 2015, 75: 118-123.
- [23] Reaction Design Inc. CHEMKIN PRO: A chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics[R]. San Diego: Reaction Design Inc., 2008.
- [24] JUNICHIRO O, MITSUO K, TERUO M, et al. Chemical kinetic modeling of ammonia oxidation with improved reaction mechanism for ammonia/air and ammonia/hydrogen/air combustion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(5): 3004-3014.
- [25] <http://combustion.berkeley.edu/Gri-mech>.
- [26] CHEN J D, JIANG X, QIN X K, et al. Effect of hydrogen blending on the high temperature auto-ignition of ammonia at elevated pressure[J]. Fuel, 2021, 287(2): 119563.
- [27] MAN X J, TANG C L, WEI L J, et al. Measurements and kinetic study on ignition delay times of propane/hydrogen in argon diluted oxygen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(5): 2523-2530.
- [28] HAN X L, WANG Z H, COSTA M, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH<sub>3</sub>/air, NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/air, NH<sub>3</sub>/CO/air and NH<sub>3</sub>/CH<sub>4</sub>/air premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2019, 206: 214-226.
- [29] LHUILLIER C, BREQUIGNY P, LAMOUREUX N, et al. Experimental investigation on laminar burning velocities of ammonia/hydrogen/air mixtures at elevated temperatures[J]. Fuel, 2020, 263: 116653.
- [30] GHOSH A, MUNOZ-MUNOZ N M, CHATELAIN K P, et al. Laminar burning velocity of hydrogen, methane, ethane, ethylene, and propane flames at near-cryogenic temperatures[J]. Applications in Energy and Combustion Science, 2022, 12(2): 100094.