

氨气/甲烷贫预混旋转湍流火焰稳定性及NO生成

王永倩¹, 王平¹, 程康¹, 毛晨林¹, 刘文锋¹, 尹智成¹, Antonio Ferrante^{1,2}

(¹ 江苏大学能源研究院, 江苏 镇江 212013; ² 能源与环境中心, 意大利, Gioia del Colle(BA), 米兰 70023)

摘要: 为了研究氨气/甲烷掺混燃气在贫预混旋转湍流状态下的火焰稳定性及NO的排放特性, 设计建造了一个可视化的旋转湍流燃烧装置, 开展了一系列的实验测量研究。研究表明: 随着当量比增大, 氨气火焰稳定燃烧的范围有所扩大, 但当氨气掺混比大于0.60时火焰出现上下振荡现象, 继续增加将导致火焰吹熄; NO的排放水平随当量比增加而提高; 但在相同的当量比下, NO的排放随氨气掺混比的增加先升高再下降。此外, 分别采用化学反应器网络(CRN)方法和一维层流预混火焰计算方法, 对相应的火焰状态进行了数值计算分析, 虽然计算结果与实验结果误差较大, 但其预测的NO排放特性随氨气掺混比、当量比的变化趋势是一致的, 对三者之间误差的来源进行了分析。

关键词: 氨气燃烧; 贫燃预混湍流火焰; 一氧化氮排放; 燃烧实验测量; 数值模拟

中图分类号: TK 16

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2022) 09-4087-08

Stability and NO production of lean premixed ammonia/methane turbulent swirling flame

WANG Yongqian¹, WANG Ping¹, CHENG Kang¹, MAO Chenlin¹, LIU Wenfeng¹,
YIN Zhicheng¹, Antonio Ferrante^{1,2}

(¹Institute for Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

²Centro Combustione Ambiente Srl, Via Milano, Gioia del Colle (BA) 70023, Italy)

Abstract: To study the flame stability and NO emission characteristics of lean premixed ammonia/methane turbulent swirling flame, a visual swirling turbulent combustion device was designed and built, and a series of experimental measurements was carried out. The results show that the range of stable combustion of ammonia flame became wider with the increase of equivalence ratio, but when the ammonia mixing ratio was greater than 0.60, the flame oscillated up and down in the chamber and finally blow out; with the increase of equivalence ratio, the NO emission increased; under the same equivalence ratio, NO emission first increased and then decreased with the increase of ammonia mixing ratio. In addition, the chemical reactor network (CRN) method and the one-dimensional laminar flow premixed flame calculation method were used to numerically analyze the corresponding flame states. Although there was a large deviation between the calculated results and the experimental results, the predicted variation trend of NO emission with the ammonia mixing ratio and equivalence ratio was consistent with the

收稿日期: 2022-03-28 修回日期: 2022-05-21

通信作者: 王平(1972—), 男, 博士, 教授, pingwang@ujs.edu.cn

第一作者: 王永倩(1997—), 女, 硕士研究生, 972258645@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(91741117, 51576092)

引用本文: 王永倩, 王平, 程康, 毛晨林, 刘文锋, 尹智成, Antonio Ferrante. 氨气/甲烷贫预混旋转湍流火焰稳定性及NO生成[J]. 化工学报, 2022, 73(9): 4087-4094

Citation: WANG Yongqian, WANG Ping, CHENG Kang, MAO Chenlin, LIU Wenfeng, YIN Zhicheng, Antonio Ferrante. Stability and NO production of lean premixed ammonia/methane turbulent swirling flame[J]. CIESC Journal, 2022, 73(9): 4087-4094

experimental results. The sources of the deviation among the three results were analyzed.

Key words: ammonia combustion; lean premixed turbulent flame; NO emission; combustion experimental measurement; numerical simulation

引 言

随着经济高速发展,能源消耗量急剧上升,而以化石燃料为主的能源结构带来的能源安全问题及温室气体排放形成的环境污染问题,严重限制了经济的可持续发展^[1]。NH₃作为一种零碳燃料^[2],得到了广泛重视和深入研究。NH₃在常压下冷却或常温下加压均可实现液化,易于储存和运输^[3-4]。作为一种标准的工业化学品,氨的生产、储存、运输和利用的流程已经成熟和完善^[5]。但NH₃作为燃料仍存在燃烧不稳定、燃烧效率低和NO_x排放高的问题。为了实现NH₃的清洁燃烧,人们对NH₃的基本性质及其在燃烧装置上的应用进行了大量的研究^[6-8]。

为研究NH₃湍流燃烧特性,Somarathne等^[9]采用大涡模拟(LES)方法,计算了某燃气轮机燃烧室内氨气/空气预混旋转湍流火焰,发现在该燃烧器中不添加任何助燃剂就可以实现氨气的稳定燃烧。Hayakawa等^[10]则对室温和常压条件下燃烧器结构对火焰稳定性和排放特性的影响进行了探究,测量了不同当量比和进口流速下,NH₃/空气预混旋流火焰的稳定性,同时验证了旋流燃烧器可以稳定氨气火焰的结论。Zhou等^[11]研究了旋流数、叶片数等因素对NH₃预混旋转湍流火焰的稳定性和可燃界限的影响,实验表明:随着旋流数的增大或叶片数的增加,火焰更易失稳及发生回火。NH₃火焰由于燃烧强度弱,容易被吹灭,为改善NH₃火焰燃烧特性,Li等^[12]研究了不同O₂含量对NH₃燃烧特性的影响,发现富氧燃烧可有效提高NH₃的层流燃烧速度和火焰温度。

与甲烷等常规烃火焰相比,NH₃的燃烧速度很低^[13],可以在氨气中添加适量的CH₄来提高含NH₃燃料的燃烧速度,扩大其稳定燃烧的范围。Xiao等^[14]对NH₃/CH₄共燃进行了数值分析,研究实际燃气轮机燃烧室工况下两者的掺混燃烧现象,探索工业上NH₃/CH₄共燃的可行性。Kurata等^[15]对NH₃/CH₄燃气轮机发电系统在不同功率输出时的情况进行了研究,证实混合CH₄可改善NH₃的低燃烧强度,有效提高燃气轮机燃烧器的火焰稳定性。Valera-Medina等^[15]则采用一个通用的切向旋流燃烧器测定了NH₃/CH₄混

合物在不同当量比下的火焰稳定性和排放,提出了低涡流和不同的喷射策略来优化氨气混合燃料发电。

虽然迄今已开展了许多氨气燃烧研究,但主要是对层流场中的NH₃火焰进行测量和计算^[16-19]。然而,工程实际中的燃烧过程几乎都是湍流燃烧,且湍流涡旋对氨气火焰结构的影响要比对甲烷火焰结构的影响大得多^[20]。因此,为实现氨气在燃气轮机中的清洁燃烧,有必要对NH₃旋转湍流火焰的燃烧特性进行实验测量和数值模拟研究。

本文针对一个可视化旋转湍流燃烧装置开展实验测量,结合NH₃/CH₄/Air反应机理^[21]的数值模拟,分析不同氨气掺混比下贫预混湍流NH₃/CH₄火焰的稳定燃烧范围和NO排放特性,以加深对NH₃/CH₄湍流贫预混合燃烧特性的认识。

1 实验装置与测量方法

本文研究对象是一个包含径向旋流器的可视化全预混旋转湍流燃烧装置(图1),主要由预混管道、径向旋流器、石英玻璃圆柱形燃烧室和出口管道组成。NH₃、CH₄和空气经减压阀、质量流量控制器(MFC)进入预混管道,在预混管道中完全混合形成一定当量比的预混气,到达旋流器出口后由点火枪点燃产生旋转湍流火焰。

为了便于观察和测量旋流火焰,燃烧室侧壁使用耐高温的石英玻璃,其内径为80 mm,壁厚为

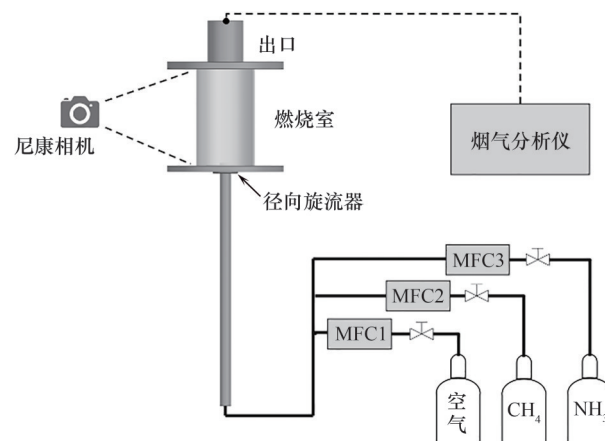


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of the experimental set-up

3 mm, 高度为 150 mm。如图 2 所示, 燃烧室出口采用了圆锥收缩结构, 减小了气流的流通截面, 增加了燃烧室内压力, 消除燃烧室上游由于旋流作用而产生的逆压梯度, 避免了燃烧室出口的回流现象^[22]。

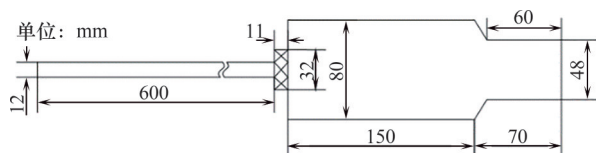


图2 燃烧器几何示意图

Fig.2 Geometric sketch of the burner

径向旋流器安装于管道与燃烧室之间, 其具体结构如图 3 所示, 它采用了 8 个固定偏置型平板叶片(厚度 1 mm), 沿周向均匀布置, 可产生旋流以稳定火焰。

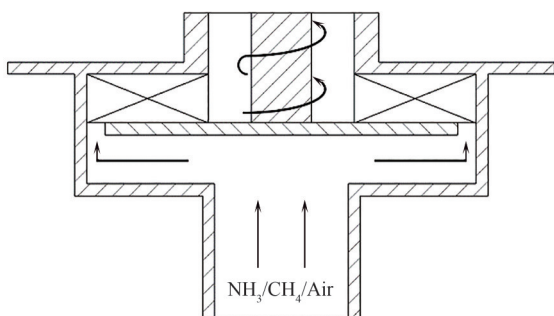


图3 径向旋流器示意图

Fig.3 Schematic of radial swirler

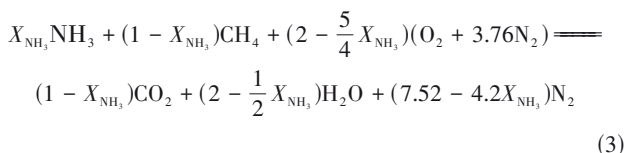
径向旋流数 S 表征旋流强度^[23], 经计算本径向旋流器 $S=0.71$ 。实验中, 当量比(ϕ)为实际的燃料/空气比例与符合化学计量比时的燃料/空气比例之比。燃料中 NH_3 掺混比(X_{NH_3})为 NH_3 的体积流量与总的燃气体积流量之比。甲烷和氨气的热值分别为 40 MJ/m^3 和 14 MJ/m^3 (标准状况下), 从氨气的体积掺混比可以计算得到氨气的热量掺混比。

$$\phi = \frac{(V_{\text{NH}_3} + \text{CH}_4/V_{\text{Air}})_{\text{real}}}{(V_{\text{NH}_3} + \text{CH}_4/V_{\text{Air}})_{\text{stoich}}} \quad (1)$$

$$X_{\text{NH}_3} = \frac{V_{\text{NH}_3}}{V_{\text{NH}_3} + V_{\text{CH}_4}} \quad (2)$$

式中, V_{NH_3} 为 NH_3 的体积流量; V_{CH_4} 为 CH_4 的体积流量; V_{Air} 为空气的体积流量。

$\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{Air}$ 的化学计量整体反应如式 (3) 所示。



实验均在常温常压条件下进行(温度 $T=294 \text{ K}$, 压强 $P=0.1 \text{ MPa}$)。本文研究的状态如表 1 所示, 当量比 ϕ 从 0.65 递增至 0.80。继续增加 ϕ , NO 排放值将超过烟气分析仪的量程范围, 因此本文未做测量。所测 X_{NH_3} 从 0 以 0.05 的间隔递增至 0.60, 如继续增大 X_{NH_3} , 火焰开始变得不稳定, 形成抬升火焰直至熄火。在所有实验条件下, 空气流量均保持在 100 L/min (0°C , 1 atm 状态下, $1 \text{ atm}=101325 \text{ Pa}$), 依据进气管道的直径和平均流速计算得到的 Reynolds 数在 13500~14500 之间。

表1 本实验研究的状态参数

Table 1 The state parameters studied in the experiment

ϕ	X_{NH_3}
0.65	0~0.60
0.70	0~0.60
0.75	0~0.60
0.80	0~0.60

采用德国益康 ecom-J2KN 型烟气分析仪测量出口截面中心处的 NO_x 排放。该烟气分析仪采用电化学传感器, 测量精度为测量值的 5%, 分辨率为 1 mg/L , NO 和 NO_2 的测量范围分别为 $0\sim5000 \text{ mg/L}$ 和 $0\sim1000 \text{ mg/L}$ 。通过日本 HORIBA 公司 S600 数字式质量流量控制器快速精确地控制气体流量, 其对氨气、甲烷和空气的最大量程分别为 30、30 和 250 L/min , 误差在 1% 以内。使用尼康相机拍摄火焰图像, 其像素可达 6240×4160 。

实验中每个工况都须等待烟气分析仪数值稳定后才记录数据。为减小误差, 所有实验在该条件下重复进行 3 次, 取其平均值。燃烧器出口下游 5 cm 处布置一个长明火, 点燃未燃尽的燃料, 以消除安全隐患。

2 数值计算方法

2.1 化学反应器网络分析法

采用化学反应器网络(CRN)模型对 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{Air}$ 贫预混燃烧进行计算。如图 4 所示, 本文所使用的 CRN 由两种理想反应器组成: 完全搅拌反应器(PSR)和塞流反应器(PFR)。PSR 反应器是一种假定流场完全紊流, 混合速率高的理想反应器。PFR 是假定理想气体稳定、一维、无黏流的理想反应器^[24]。反应器网络采用 PSR 表示入口附近的混合区、中央回流区、主火焰区; 采用 PFR 表示火焰后区域^[25]。在旋转

湍流燃烧室的主区域,由于回流区较强,反应物和温度分布较均匀,选择PSR可以保持足够的停留时间和高湍流水平^[26]。各区域稳态条件下的燃烧模型用相应的化学反应器表示:PSR1表示入口出口附近的混合区;PSR2代表主火焰区,设置为20%再循环;PSR3代表中央再循环区,设置为30%再循环;PFR表示火焰后区域,如图4所示。设置PSR1反应温度为294 K,PSR2和PSR3反应温度为1700 K,停留时间均为3 ms。毛晨林等^[27]研究认为Okafor机理^[21]模拟 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{Air}$ 火焰精度更高,所以本研究采用Okafor机理在ANSYS-Chemkin平台上进行CRN计算分析。进气条件与实验状态相一致,温度 $T=294\text{ K}$,压强 $P=0.1\text{ MPa}$ 。其验证范围为当量比0.65~0.80,掺混比0~0.80。

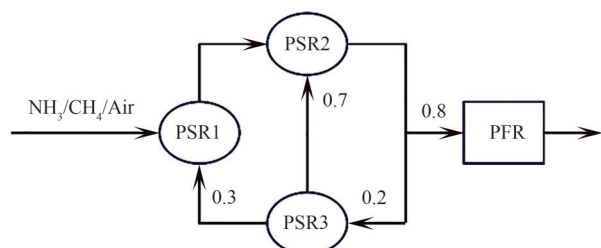


图4 化学反应器网络模型布局图

PSR1—混合区; PSR2—主火焰区; PSR3—中央回流区;
PFR—后火焰区

Fig.4 Layout of chemical reactor network model

2.2 一维层流预混火焰计算

采用Cantera程序^[28]并结合Okafor机理^[21],对一维的 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{Air}$ 预混层流火焰进行计算。Cantera是一个面向对象工具的开源包,可进行层流火焰、点火、化学动力学分析和其他燃烧问题的研究。

一维计算域长度取为40 mm,初始网格数为200个,计算过程中网格根据相关参数自动优化,入口温度和压强与实验状态相一致。使用Newton积分算法,可计算得到整个计算域网格节点处的温度、速度、机理所包含组分的摩尔分数等数值^[27,29]。

3 结果与分析

3.1 实验结果

3.1.1 火焰宏观结构的改变 图5显示了 $\phi=0.70$ 时 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{Air}$ 预混旋流火焰在不同氨气掺混比下的火焰图像。纯甲烷空气火焰呈蓝色,当向燃料中添加部分氨气,火焰的蓝色逐渐被橙色取代。继续增加氨气含量, $\text{NH}_2\alpha$ 光谱效应增强^[30],火焰橙色加深。

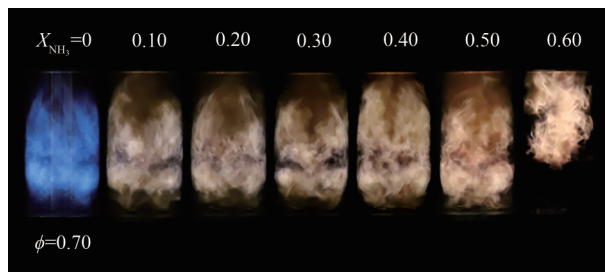


图5 $\phi=0.70$ 时不同氨气掺混比下的火焰图像

Fig.5 Flame images for different mixing ratio of NH_3 at $\phi=0.70$

如图5所示,距燃烧室底部约1/3高度处存在一个颜色暗淡的间隔区,其产生是由于冷态可燃混合气从旋流器出口高速旋转射出,气流撞壁,一部分向上流动形成中央回流区并在其中得到一个主火焰区,另一部分向下流动并燃烧,而在撞壁处没有燃烧反应。此外,燃烧室横截面积在旋流器出口处突然扩大,也导致燃烧室下方外侧形成一个角落回流区,此处的火焰与燃烧室不锈钢底座接触,导致较大的壁面热损失,在实际应用中还可能会导致部件损坏。随着混合燃料中氨气掺混比升高,甲烷含量减少,可燃气体燃烧速度、火焰温度均降低,在旋流器出口高速气流的驱动下,火焰向下游传播,高度升高并逐渐充满整个燃烧室。继续增加氨气含量,火焰开始出现不稳定现象,上下振荡,其火焰根部也开始脱离旋流器出口表面,火焰抬升直至发生吹熄。

实验发现,当 $\phi=0.60$ 时,旋转湍流情况下 NH_3/CH_4 火焰无法点燃;当 $\phi=0.65$ 时,火焰在 $X_{\text{NH}_3} \leq 0.4$ 时能够稳定存在,但继续增大 X_{NH_3} 火焰开始变得不稳定;对 $\phi=0.70, 0.75, 0.80$ 情况,其稳定燃烧边界分别是 $X_{\text{NH}_3}=0.50, 0.60, 0.60$ 。周永浩等^[31]有类似的燃烧极限研究,得到了相同掺混比下,燃烧的贫富燃边界。

在本旋转湍流燃烧器中,随着当量比增加,氨气火焰稳定燃烧的范围有所扩大,但与层流火焰相比^[32],湍流火焰的稳定燃烧范围更窄。相同当量比下,氨气掺混比越高,反应速率越低,在强湍流情况下,旋转湍流对火焰面产生较大的拉伸,导致局部熄火现象的出现,情况严重时甚至出现整体熄火。本实验中,当量比为0.70且掺混比大于0.60时,湍流火焰难以稳定燃烧,而在文献^[29,33]中,当量比为0.70且掺混比为0.80时,对于层流火焰,燃烧仍能继续进行。

3.1.2 NO排放 氨气作为燃料时, NO_x 排放是一个

突出的问题^[15,29]。燃烧室内产生的 NO_x 主要为 NO ，其数量级远大于 NO_2 和 N_2O ，所以本文仅关注 NO 的排放特性，对火焰废气中的 NO 浓度进行测量，以深入了解 NO_x 排放特性。

如图6所示，不同当量比下的 NO 排放曲线呈现相同的趋势，随着 NH_3 掺混比的增加先升高后下降。与 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{Air}$ 火焰相比， CH_4/Air 火焰的 NO 排放几乎为零。在燃料中加入少量氨气， NO 排放显著增加，此时 NO 主要来自于氨气中 N 的燃烧(燃料型 NO)和空气中 N_2 的燃烧(热力型 NO)。继续增加 NH_3 掺混比，火焰燃烧温度降低，热力型 NO 开始下降，因此总体 NO 增加的趋势趋于缓慢，直至到达一个峰值后 NO 开始下降。贫燃状态下，当量比的升高导致 NO 的总体排放量明显增加；而在不同的当量比下， NO 排放的峰值也不同，峰值对应的 NH_3 掺混比也略有增大。例如， $\phi=0.70$ 时，最大值出现在约 $X_{\text{NH}_3}=0.30$ 处，而 $\phi=0.80$ 时，最大值出现在约 $X_{\text{NH}_3}=0.40$ 处。这表明当量比对 NO 排放的影响非常明显，这与文献^[34-35]中的结论相一致。

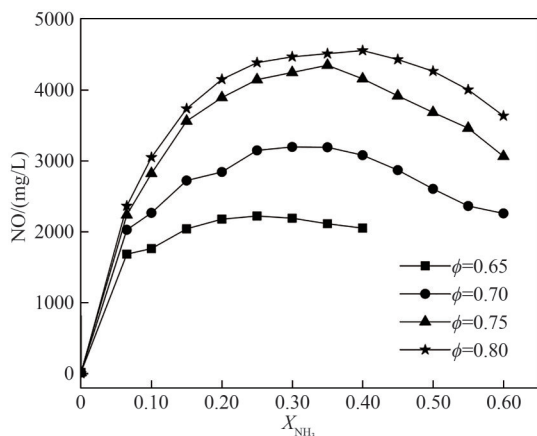


图6 实验测得的 NO 排放随 X_{NH_3} 和 ϕ 的变化

Fig.6 Experimentally measured NO emission as function of X_{NH_3} and ϕ

3.2 计算结果与实验结果对比

图7为不同当量比下 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{Air}$ 掺混火焰的 NO 排放计算结果与实验结果的对比，其中计算结果分别来自于CRN分析和Cantera一维火焰的计算，两者采用的反应机理都是Okafor机理^[21]。由图可见，不同方法计算得到的 NO 排放趋势相同，随着 NH_3 掺混比的增加先增加后下降，且随当量比的增加， NO 排放量峰值对应的氨气掺混比也增大。氨气燃烧产生燃料型 NO 和热力型 NO ， NO 的排放趋势是两者共同作用的结果。相较于纯 CH_4 火焰， NH_3

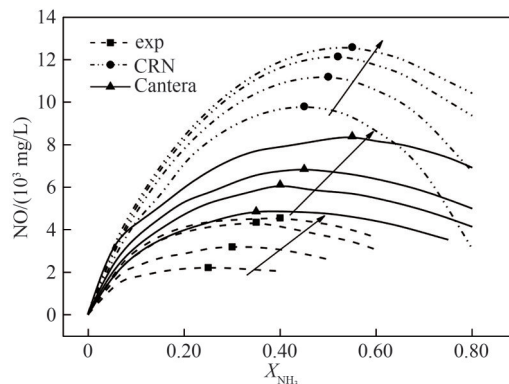


图7 实验测量与数值计算得到的 NO 排放量对比 (沿箭头方向 $\phi=0.65, 0.70, 0.75, 0.80$)

Fig.7 Comparison of experimental and simulated NO emissions (along the arrow direction $\phi=0.65, 0.70, 0.75, 0.80$)

掺混比较低时，增加 NH_3 掺混比，燃料中 N 元素增加， NO 排放增加，此时燃料型 NO 的增加更加敏感。然而，继续增加 NH_3 掺混比， NO 的排放开始下降，这是由于随 NH_3 掺混比的增加，燃烧温度下降，产生的热力型 NO 下降；同时燃烧室内的 N 、 NH 、 NH_2 含量增加，与 NO 发生反应，导致 NO 排放整体呈下降趋势。

此外如图7所示， NO 排放的计算结果与实验值出现倍数级的误差，CRN模拟 NO 排放量是实验结果值的3~4倍，Cantera模拟结果约为实验值的2倍， NO 排放量峰值所对应的氨气掺混比也有一定的偏移。这个误差产生的原因可能包括：在CRN和Cantera计算中没有考虑到实验中的辐射散热和火焰接触壁面导致的壁面热损失效应；旋转湍流燃烧器中复杂的湍流-火焰相互作用关系，在计算中也未能加以考虑。

图8所示为不同状态参数下，CRN与Cantera计算得到的火焰温度对比。相同当量比下， X_{NH_3} 较低时，CRN模拟得到的火焰温度高于Cantera，而温度升高将导致 NO 排放增加^[36]，这解释了对应状态下CRN分析得到的 NO 生成量大于Cantera计算结果(图7)。随着氨气掺混比增加，两者温度逐渐接近， NO 的生成量也逐渐接近。

两种方法相比较，Cantera更接近实验值，且下降的趋势与实验更加吻合，CRN模拟结果下降更加迅速。在本研究中模拟结果均高于实验测量结果，由此可见简化的一维层流火焰计算和CRN分析，虽然能够预测 NO 排放的变化趋势，对实际燃烧状况下的 NO 生成进行定性的估算，但并没有揭示真实燃烧器中旋转湍流流场的进一步细节。本文采用的是文献^[15,25]中提出的CRN网络，结构较为简单，其

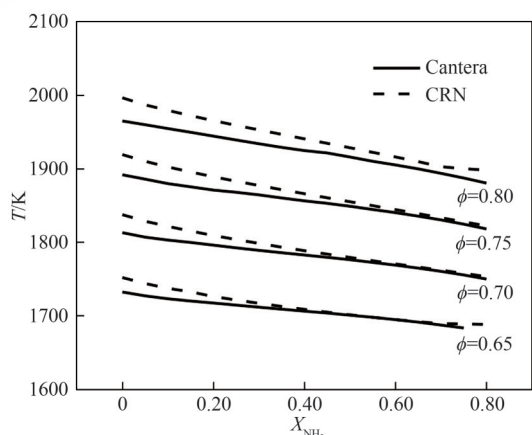


图8 不同当量比下火焰温度随 X_{NH_3} 的变化

Fig.8 Flame temperature as a function of X_{NH_3} at different equivalence ratio

预测精度不甚令人满意。有必要采用更复杂的CRN网络来提升此类简化分析方法的精度,更好地反映湍流-火焰的相互作用关系。

3.3 机理分析

图9显示的是CRN分析中在燃烧主火焰区域主要的10个NO生成和消耗的反应,其中列出的是6个不同状态下的主要反应。 $\phi=0.65$ 时,在纯 CH_4 燃烧中,主要是 NO_2 和H反应生成NO,生成的NO很快与 HO_2 、O和H基团反应被消耗,此时热力型NO占据主要地位,NO生成量很低; $X_{\text{NH}_3}=0.30$ 时,反应温度降低,热力型NO生成速率下降,但为反应物提供了更多的HNO, HNO与OH、H基团反应生成燃料

型NO,燃料型NO生成速率较快,同时氨气含量增加使反应物中NH和 NH_2 基团增加,与NO反应形成稳定的 N_2 、 H_2O 和其他成分,NO的消耗量虽然随着NH和 NH_2 的增加而增加,但增加幅度较小,NO的绝对生成量显著增加; $X_{\text{NH}_3}=0.70$ 时,反应 $\text{HNO}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{H}_2\text{O}$ 成为NO生成的最主要路径。同时,HNO在第三体M存在下分解,更多地参与进NO的生成过程中,而NH、 NH_2 和 HO_2 基团与NO反应,消耗了大量NO,NO的净生成速率下降。 $\phi=0.80$ 时,纯 CH_4 燃烧的温度比 $\phi=0.65$ 高(图8),热力型NO生成量升高,NO的绝对生成量增加; $X_{\text{NH}_3}=0.30$ 时, $\text{HNO}+\text{H}\rightleftharpoons\text{H}_2+\text{NO}$ 成为最主要的NO生成反应,NH与O的反应速率加快,NO净生成速率的增长幅度较 $\phi=0.65$ 更大; $X_{\text{NH}_3}=0.70$ 时,HNO与H、OH基团反应生成大量NO,虽然NH消耗NO的量增加,但NO的净生成速率仍比 $X_{\text{NH}_3}=0.30$ 时增加。

4 结 论

本文对大气压力下旋转湍流 NH_3/CH_4 贫燃预混火焰的火焰稳定性和NO排放特性进行了数值计算和实验测量分析,得到如下结论。

(1) 随着氨气含量增加,火焰橙色加深。继续增加氨气含量,火焰逐渐不稳定,出现抬举现象,上下振荡,直至发生吹熄。氨气掺混比和当量比是决定燃烧室稳定性的关键参数。与层流火焰相比,湍

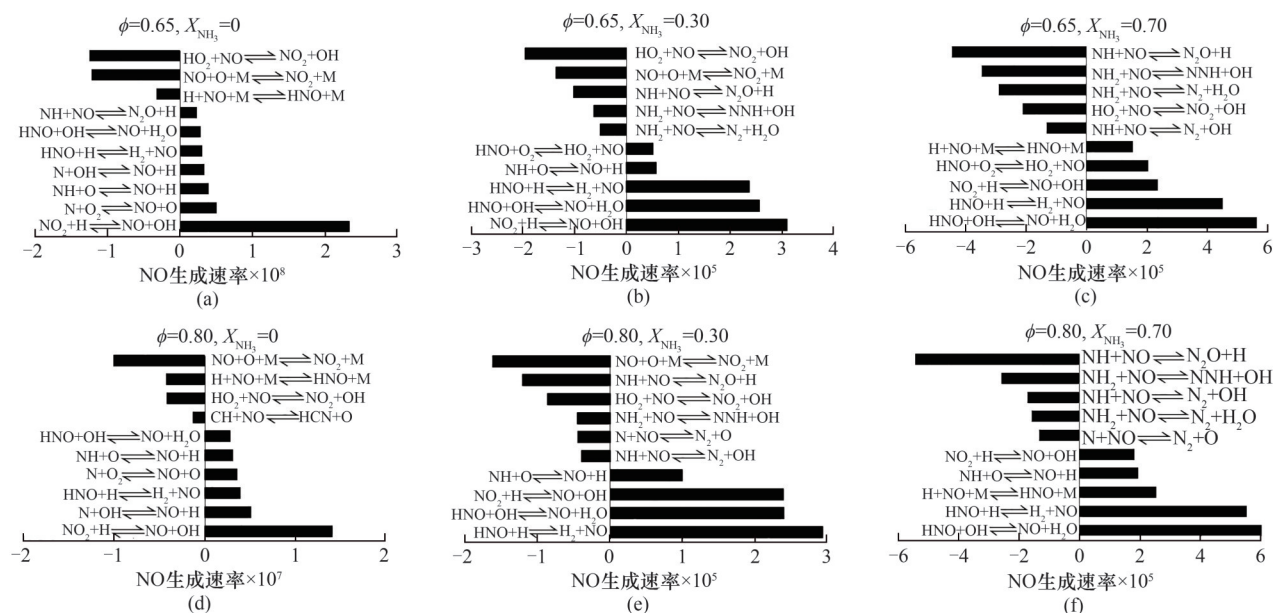


图9 NH_3/CH_4 燃料混合物燃烧主区火焰区域NO生成速率

Fig.9 Rate of NO production in flame zone of primary combustion zone for NH_3/CH_4 fuel mixture

流火焰的稳定范围更窄。

(2) 贫燃状态下,不同当量比NO排放曲线呈现相同的趋势,随着NH₃掺混比的增加先升高后下降。且随着当量比增大,NO排放的峰值对应的NH₃掺混比也增大。

(3) 纯甲烷燃料时,热力型NO占据主要地位,与之相比,含氨燃料燃烧为反应物提供了HNO基团,与OH、H基团反应生成大量燃料型NO,同时NH、NH₂基团含量增加,消耗了NO,但NO的净生成速率仍明显增加。

(4) 实验结果与计算结果变化趋势比较一致,但误差明显,与CRN分析相比,Cantera计算与实验值更接近。在分析复杂的旋转湍流氨气火焰时,简化的计算分析方法有一定的局限性,需要通过更深入的研究来提升此类简化分析方法的精度。

符号说明

S	——旋流数
V	——气体的体积流量, L/min
X_{NH_3}	——燃料中NH ₃ 掺混比
ϕ	——当量比
下角标	
real	——实际
stoich	——化学计量比

参考文献

- [1] Liu T, Zhou N, Wu Q S, et al. Toward a sustainable energy system in China: status and influencing factors[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2022, **40**(2): 580–598.
- [2] 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.
- [3] 翟瑞, 杨昭, 张勇, 等. 可燃工质氨的燃烧及阻燃机理的研究[J]. 化工学报, 2021, **72**(10): 5424–5429.
Zhai R, Yang Z, Zhang Y, et al. Study on combustion and flame retardant mechanism of combustible working fluid ammonia[J]. CIESC Journal, 2021, **72**(10): 5424–5429.
- [4] 王鲁丰, 钱鑫, 邓丽芳, 等. 氮气电催化合成氨催化剂研究进展[J]. 化工学报, 2019, **70**(8): 2854–2863.
Wang L F, Qian X, Deng L F, et al. Recent progress on catalysts about electrochemical synthesis of ammonia from nitrogen[J]. CIESC Journal, 2019, **70**(8): 2854–2863.
- [5] Kobayashi H, Hayakawa A, Somaratne K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, **37**(1): 109–133.
- [6] Lesmana H, Zhu M M, Zhang Z Z, et al. Experimental and kinetic modelling studies of flammability limits of partially dissociated NH₃ and air mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, **38**(2): 2023–2030.

- [7] Li S, Zhang S S, Zhou H, et al. Analysis of air-staged combustion of NH₃/CH₄ mixture with low NO_x emission at gas turbine conditions in model combustors[J]. Fuel, 2019, **237**: 50–59.
- [8] Kurata O, Iki N, Matsunuma T, et al. Performances and emission characteristics of NH₃-air and NH₃CH₄-air combustion gas-turbine power generations[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, **36**(3): 3351–3359.
- [9] Somaratne K D K A, Hayakawa A, Kobayashi H. Numerical investigation on the combustion characteristics of turbulent premixed ammonia/air flames stabilized by a swirl burner[J]. Journal of Fluid Science and Technology, 2016, **11**(4): JFST0026.
- [10] Hayakawa A, Arakawa Y, Mimoto R, et al. Experimental investigation of stabilization and emission characteristics of ammonia/air premixed flames in a swirl combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, **42**(19): 14010–14018.
- [11] 周永浩, 李艳超, 姜海鹏, 等. 氨气预混旋流燃烧火焰稳定性及燃烧极限研究[J]. 工程热物理论, 2018, **39**(7): 1592–1597.
Zhou Y H, Li Y C, Jiang H P, et al. Experimental studies on flame instability and combustion limit of premixed ammonia swirl combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, **39**(7): 1592–1597.
- [12] Li J, Huang H Y, Kobayashi N, et al. Numerical study on effect of oxygen content in combustion air on ammonia combustion[J]. Energy, 2015, **93**: 2053–2068.
- [13] Hayakawa A, Goto T, Mimoto R, et al. Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures[J]. Fuel, 2015, **159**: 98–106.
- [14] Xiao H, Howard M, Valera-Medina A, et al. Study on reduced chemical mechanisms of ammonia/methane combustion under gas turbine conditions[J]. Energy & Fuels, 2016, **30**(10): 8701–8710.
- [15] Valera-Medina A, Marsh R, Runyon J, et al. Ammonia-methane combustion in tangential swirl burners for gas turbine power generation[J]. Applied Energy, 2017, **185**: 1362–1371.
- [16] Elbaz A M, Giri B R, Issayev G, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar flame speed of dimethoxymethane and ammonia blends[J]. Energy & Fuels, 2020, **34**(11): 14726–14740.
- [17] Ji C W, Wang Z, Wang D, et al. Experimental and numerical study on premixed partially dissociated ammonia mixtures (I): Laminar burning velocity of NH₃/H₂/N₂/air mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, **47**(6): 4171–4184.
- [18] Rocha R C, Zhong S H, Xu L L, et al. Structure and laminar flame speed of an ammonia/methane/air premixed flame under varying pressure and equivalence ratio[J]. Energy & Fuels: an American Chemical Society Journal, 2021, **35**(9): 7179–7192.
- [19] Cheng M Z, Wang H O, Xiao H, et al. Emission characteristics and heat release rate surrogates for ammonia premixed laminar flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, **46**(24): 13461–13470.
- [20] Lhuillier C, Brequigny P, Contino F, et al. Experimental investigation on ammonia combustion behavior in a spark-ignition engine by means of laminar and turbulent expanding flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, **38**(4): 5859–5868.
- [21] Okafor E C, Naito Y, Colson S, et al. Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH₄-NH₃-air premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2018, **187**: 185–198.

- [22] 刘涛. 航空发动机旋流燃烧器性能数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Liu T. Numerical simulation study on performances of swirl burners in aero-engine combustors[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [23] 代威, 林宇震, 张弛. 第2级径向旋流器旋流数对燃烧室点火和贫油熄火性能的影响[J]. 航空动力学报, 2015, **30**(5): 1092–1098.
Dai W, Lin Y Z, Zhang C. Effects of swirl number of second stage radial swirler on combustor ignition and lean blow-out performances [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, **30**(5): 1092–1098.
- [24] de Toni A, Hayashi T, Schneider P. A reactor network model for predicting NO_x emissions in an industrial natural gas burner[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2013, **35**(3): 199–206.
- [25] Xiao H, Valera-Medina A, Marsh R, et al. Numerical study assessing various ammonia/methane reaction models for use under gas turbine conditions[J]. Fuel, 2017, **196**: 344–351.
- [26] Innocenti A, Andreini A, Bertini D, et al. Turbulent flow-field effects in a hybrid CFD–CRN model for the prediction of NO_x and CO emissions in aero-engine combustors[J]. Fuel, 2018, **215**: 853–864.
- [27] 毛晨林, 王平, Prashant Shrotriya, 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 C L, Wang P, Shrotriya P, 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.
- [28] Goodwin D G, Moffat H K, Speth R L. Cantera: an object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes (version 2.3.0) [J/OL]. [2022–03–28]. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1174508>.
- [29] Xiao H, Valera-Medina A, Bowen P J. Study on premixed combustion characteristics of co-firing ammonia/methane fuels[J]. Energy, 2017, **140**: 125–135.
- [30] Hayakawa A, Goto T, Mimoto R, et al. NO formation/reduction mechanisms of ammonia/air premixed flames at various equivalence ratios and pressures[J]. Mechanical Engineering Journal, 2015, **2**(1): 14–00402.
- [31] 周永浩, 张宗岭, 胡思彪, 等. NH₃/H₂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 Y H, Zhang Z L, Hu S B, et al. Experimental studies on flame stability and combustion limit of premixed NH₃/H₂ swirl combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, **42**(1): 246–253.
- [32] Han X L, Wang Z H, Costa M, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH₃/air, NH₃/H₂/air, NH₃/CO/air and NH₃/CH₄/air premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2019, **206**: 214–226.
- [33] 韩昕璐. 新型零碳氨燃料的基础层流燃烧特性及反应动力学机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Han X L. Research on fundamental laminar combustion characteristics and reaction kinetic mechanism of innovative carbon-free ammonia fuel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [34] An Z H, Zhang M, Zhang W J, et al. Emission prediction and analysis on CH₄/NH₃/air swirl flames with LES–FGM method[J]. Fuel, 2021, **304**: 121370.
- [35] Zhang M, An Z H, Wei X T, et al. Emission analysis of the CH₄/NH₃/air co-firing fuels in a model combustor[J]. Fuel, 2021, **291**: 120135.
- [36] Wang Y M, Liang L S, Lin X D, et al. Emissions of nitrogen-based fuel combustion in swirl burner[J]. Energy Procedia, 2019, **158**: 1706–1711.