

富氧燃烧对氨氢预混旋流火焰特性与氮氧化物排放的影响 机制研究

蔡羽杰^{1,2}, 杜衍飞¹, 李智锐¹, 于洲¹, 杜建国¹, 王宇^{1,2}

(1. 佛山仙湖实验室, 广东 佛山 528200; 2. 武汉理工大学 汽车工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 面向高温工业低碳转型, 氨作为零碳燃料具有广阔应用前景, 但低反应活性制约了其应用。富氧燃烧通过提升氧化剂(O₂)含量, 可有效提升燃烧稳定性。然而, 目前针对高温工业工况下氨氢预混旋流火焰的研究仍显不足。基于kW级工业旋流燃烧器实验平台, 结合雷诺平均模拟与化学反应器网络模型, 研究了空气助燃(氧气体积分数为21%)与富氧条件(氧气体积分数为25%)对低裂解率氨氢预混旋流火焰稳燃及排放特性的影响。结果表明, 富氧燃烧显著拓宽了稳燃极限, 随着氧气体积分数升高, 火焰形态由“V”形转变为直筒形; 烟气中未燃NH₃与NO之间呈竞争-抑制关系, 协同低排放窗口由过量空气系数(λ) \approx 1.2(氧气体积分数为21%)前移至 $\lambda \approx$ 1.1(氧气体积分数为25%)。数值模拟结果表明, 富氧条件相较空气助燃使火焰OH峰值提升约24%, 通过NH₃ + OH \rightleftharpoons NH₂ + H₂O(R278)等反应加速氨氧化, 同时抑制NH₂中间体向N₂转化, 促使活性氮更多流向NO生成方向。相关研究结果阐明了富氧强化氨燃烧的机制及其排放权衡关系, 可为高温工业氨燃料清洁高效应用提供理论与实验依据。

关键词: 氨氢燃料; 富氧燃烧; 火焰形态; 氮氧化物; 化学反应器网络

中图分类号: TK91 文献标志码: A 文章编号: 2097-2547(XXXX)XX-001-08

Mechanism study on effects of oxygen-enriched combustion on flame characteristics and nitrogen oxides emissions of ammonia-hydrogen premixed swirling flames

CAI Yujie^{1,2}, DU Yanfei¹, LI Zhirui¹, YU Zhou¹, DU Jianguo¹, WANG Yu^{1,2}

(1. Foshan Xianhu Laboratory, Foshan 528200, Guangdong, China; 2. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: To address the low-carbon transition in high-temperature industries, ammonia has broad application prospects as a zero-carbon fuel, yet its low reactivity restricts its application. Oxygen-enriched combustion, which increases the oxidant (O₂) content in the oxidizer, can effectively enhance combustion stability. However, current studies on ammonia-hydrogen premixed swirling flames under high-temperature industrial conditions remain insufficient. Based on a kW-scale industrial swirling combustor experimental platform, combined with Reynolds-averaged simulation and a chemical reactor network model, the effects of air-assisted combustion (oxygen volume fraction of 21%) and oxygen-enriched condition (oxygen volume fraction of 25%) on the flame stabilization and emission characteristics of low-cracking-ratio ammonia-hydrogen premixed swirling flames were investigated. The results show that oxygen-enriched combustion significantly broadens the flame stability limits. As the oxygen content increases, the flame shape changes from a “V” shape to a cylindrical shape. A competitive-inhibition relationship between unburned NH₃ and NO in the flue gas is observed, and the synergistic low-emission window shifts forward from an excess air ratio (λ) of approximately 1.2 (oxygen volume fraction of 21%) to $\lambda \approx$ 1.1 (oxygen volume fraction of 25%). Numerical simulation results indicate that, compared with air-assisted combustion, oxygen-enriched condition increases the peak OH concentration of the flame by approximately 24%, accelerating ammonia oxidation through reactions such as NH₃ + OH \rightleftharpoons NH₂ + H₂O (R278), while suppressing the conversion of NH₂ intermediates to N₂, thereby promoting more reactive nitrogen toward NO formation. The relevant results clarify the mechanism of oxygen-enriched enhancement of ammonia combustion and its emission trade-off relationship, providing theoretical and experimental support for the clean and efficient application of ammonia fuel in high-temperature industries.

Keywords: ammonia-hydrogen fuel; oxygen-enriched combustion; flame morphology; nitrogen oxides; chemical reactor network

收稿日期: 2026-01-15; 修回日期: 2026-02-26。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目C类(12402342); 广东省基础与应用基础研究基金重点项目(2023B1515120012)。

第一作者: 蔡羽杰(2001—), 硕士研究生, 研究方向为氨氢燃烧特性, E-mail: caiyujie2023@163.com。

通信作者: 于洲(1991—), 博士, 副研究员, 研究方向为氨氢燃烧特性, E-mail: yuzhou@xhlab.cn。

推动高温工业减排,助力实现“碳达峰、碳中和”目标已成为普遍共识^[1]。高温工业碳排放主要来源于化石燃料燃烧,因此采用零碳燃料从源头降低碳排放,成为一条关键的技术路径^[2]。氨既能作为零碳燃料,也可充当氢能载体,并能通过可再生能源制备^[3-6]。在高温工业中推广氨燃烧,既能促进新能源消纳,又能实现源头降碳,因而日益受到重视。然而,与常规化石燃料相比,氨的化学反应活性较弱,火焰传播速度较慢(约7 cm/s),导致其燃烧稳定性不足^[7-8]。此外,氨含有氮元素,燃烧过程中易产生燃料型氮氧化物^[9]。这些技术问题一定程度上制约了氨在高温工业中的规模化应用。

改善氨燃烧的稳定性,目前主要有两种强化路径:一是提升燃料侧的反应活性,如采用氨裂解等方式引入高活性燃料;二是强化氧化剂侧,如采用富氧燃烧提高氧化剂活性。在燃料侧改性方面,阿斯娜等^[10]通过实验研究发现,在氨中掺混甲烷可有效改善其燃烧稳定性,并显著拓宽管状火焰的稳定燃烧极限。MEI等^[11]提出了基于氨部分裂解的强化燃烧策略,并分析了其对层流火焰传播特性的影响。研究表明,化学效应是提升火焰传播速度的主要因素,且因裂解气中含氢,基元反应 $\text{H} + \text{O}_2 (+\text{M}) \rightleftharpoons \text{HO}_2 (+\text{M})$ 的作用显著增强。此外,随着氨裂解率升高,NO生成呈现非单调变化,这源于燃料的化学性质从纯氨主导向裂解气主导转变。在氧化剂侧强化方面,富氧燃烧采用氧含量更高(相比空气)的气体作为氧化剂,旨在提升燃烧效率、增强火焰稳定性或减少污染物排放。HUANG等^[12]通过实验证实富氧条件能大幅提升氨的层流火焰传播速度,并且在较高压力下促进作用更明显。富氧环境加速了主导反应路径($\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_2 \rightarrow \text{NH} \rightarrow \text{N} \rightarrow \text{N}_2$),但也导致氮氧化物排放量增大。基于燃烧与排放特性的综合分析,作者认为氨在高温高压应用场景中采用富氧燃烧策略具备可行性。LIU等^[13]在氨旋流火焰中发现,富氧条件下自促进氨裂解能同步实现燃烧强化与污染物控制,可同时拓宽稳定燃烧窗口与低排放窗口。AN等^[14]研究了近燃气轮机工况下富氧策略的影响,发现随氧气含量增加火焰形态由“V”形转为“M”形,提高了热释放率与熄灭应变率,从而增强了火焰稳定性。此外,富氧燃烧会促进NO和NO₂的生成,但会减少N₂O的排放。CHEN等^[15]在类似工况下开展研究,指出富氧燃烧虽会增大NO_x排放(以NO为主),但在化学计量比及富燃条件下可有效减少未燃NH₃和H₂的排放,从而大幅提升燃烧

效率。高继录等^[16]针对不同稀释剂对氨富氧层流燃烧的影响,开展数值模拟,发现蒸汽稀释下氨富燃火焰较氮气稀释具有更低的熄火抗力,其熄灭拉伸极限变窄。

但是,目前关于氨富氧燃烧的研究多集中于基础燃烧特性层面,针对高温工业实际工况的系统性探索仍相对缺乏,难以为工业应用提供直接指导。值得指出的是,在实际高温工业场景下,火焰形态直接影响工质的加热性能,稳燃极限决定实际燃烧装置的调节范围,污染物排放特性则关乎烟气后处理工艺的设计与运行成本。因此,开展面向实际工况的氨富氧燃烧研究具有重要的工程应用价值。为填补这一空白,本文首次将氨富氧燃烧技术应用于工业级燃烧器,基于kW级旋流燃烧器测试平台,对不同氧气体积分数下低裂解率氨氢预混火焰的燃烧特性及污染物协同排放行为开展系统实验研究。在此基础上,结合雷诺平均模拟(RANS)与化学反应器网络模型(CRN),揭示富氧条件对火焰形态演变及NO_x生成路径的内在调控机理。本研究旨在阐明氨富氧燃烧在实际高温工业工况下的稳燃机制与排放特性,获得燃烧稳定性、氨逃逸及氮氧化物排放协同控制的最佳运行参数范围,为高温工业场景下氨燃料的清洁高效利用提供理论依据与技术支撑。

1 实验和数值模拟方法

1.1 实验装置与烟气检测方法

实验装置(kW级燃烧器测试平台)示意图见图1。实验装置主要由供气系统、流量控制系统、燃烧器和烟气检测系统等部分组成。由供气系统提供实验所需的氨气、氢气、氧气、氮气和空气。其中,氨气由液氨气化制得,纯度(体积分数)为99.9%(依据GB/T 536—2017标准);氢气、氧气和氮气采用高纯气瓶供应,纯度均为99.999%,上述气体均由佛山市科的气体化工有限公司提供。空气采用永磁变频螺杆机压缩,经冷冻式干燥机后供应。

燃烧器主要由带旋流叶片的燃烧器外筒与碳化硅(SiC)套筒构成。燃烧器外筒内径为31 mm、高度为55 mm、入口内径为25 mm, SiC套筒内径为40 mm。旋流叶片厚度为6 mm,与端面的安装夹角为40°。燃烧器安装于带石英观测窗的实验平台上,顶部设有烟气采样套筒。火焰形态采用尼康Z50 CMOS相机进行记录。

为模拟部分氨裂解策略,对实验进行如下设

置。通过调节氨气、氢气和氮气3种气体的配比,实现5%的固定裂解率,并维持燃烧功率为8 kW。同时,通过调整氮气、氧气与空气的配比模拟富氧条件,以氧化剂中氧气与氮气的体积比(X_{O_2} ,%)表征氧气体积分数。预混气体由燃烧器进气口喷出后,在出口附近经高压电极点燃,形成旋流火焰。本文以纯空气(氧气体积分数为21%)为对照,开展不同氧气体积分数下氨氢预混旋流燃烧实验。通过调节过量空气系数(λ),系统考察火焰形态与烟气排放特性的变化,进而评估不同工况的性能差异。具体实验工况见表1。

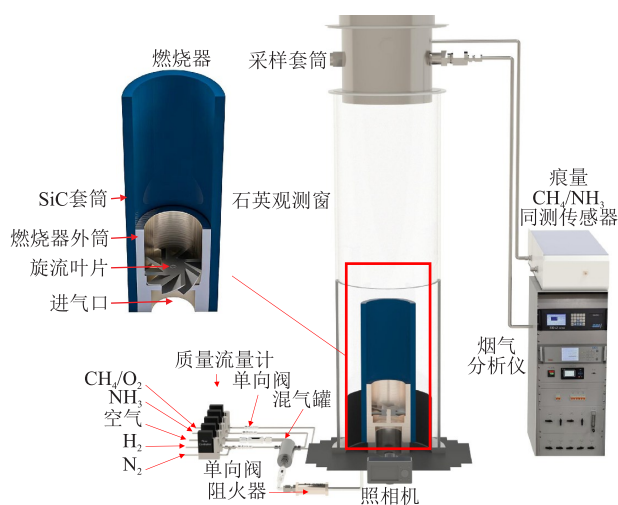


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

表1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

编号	功率/kW	X_{O_2} /%	λ
1	8	21	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
2	8	25	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2

采用如下仪器检测烟气中各组分的体积分数。 NH_3 和NO使用课题组自研的痕量 CH_4/NH_3 同测传感器^[17-18]检测,NO体积分数量程为 $0\sim 4000 \times 10^{-6}$, NH_3 体积分数量程为 $60 \times 10^{-6}\sim 5000 \times 10^{-6}$; N_2O 使用CAI 700型烟气分析仪(美国California Analytical Instruments公司)检测, N_2O 体积分数量程 $0\sim 30 \times 10^{-6}$; O_2 和CO使用S700系列烟气分析仪(德国SICK公司)检测,氧气体积分数为 $0\sim 25\%$,CO体积分数量程为 $0\sim 1000 \times 10^{-6}$ 。

1.2 数值模拟方法与模型

在实验基础上,本文采用数值模拟方法揭示富氧燃烧对氨氢预混旋流火焰的影响机制。针对不同研究目标,选用两种互补方法:(1)基于Ansys

Fluent开展雷诺平均模拟(RANS),从宏观层面揭示氧气体积分数对火焰流场与温度场的影响;(2)基于Ansys Chemkin构建化学反应器网络(CRN)模型,从反应动力学层面解析氧气体积分数对NO生成路径及关键基元反应的作用,从而系统阐明富氧燃烧对火焰特性与排放行为的影响机理。

三维RANS模拟的计算域见图2(a),涵盖燃烧器与石英观测窗。网格采用非结构与结构网格相结合的方式划分,节点数约638000。网格无关性验证表明,将节点数增至1240000对计算结果无明显影响。湍流模型采用可实现 $k-\varepsilon$ 模型,燃烧模型采用涡耗散概念(EDC)模型,模型系数均采用默认值。辐射换热选用P1模型。混合气体的关键物性参数(如导热系数和动力黏度)依据质量加权混合定律计算。化学反应源项求解过程通过原位自适应建表(ISAT)算法加速,收敛误差容限设定为 10^{-5} 。计算域边界条件设置:燃烧器入口设为速度入口边界,套筒出口设为压力出口边界,静止固体壁面采用无滑移边界条件。预混燃气的入口速率及组分浓度由燃烧器的输出功率、氧含量及过量空气系数共同确定。入口湍流边界条件通过指定水力直径和5%的湍流强度来定义。参考已有研究^[19],本文采用的模型能够有效模拟氨氢预混旋流燃烧过程,确保了数值方法的可靠性。

CRN模型结构见图2(b),由3个搅拌反应器(PSR)和1个平推流反应器(PFR)构成。

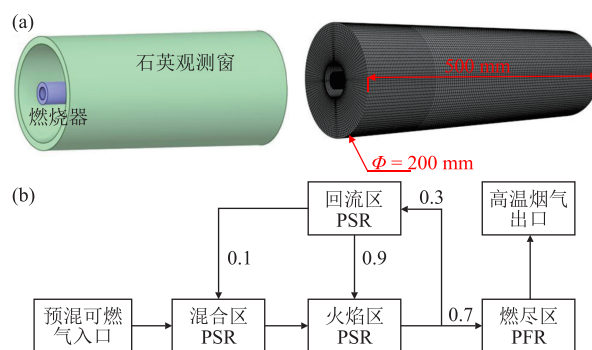


图2 RANS计算域和网格划分(a)及CRN模型结构(b)

Fig. 2 Computational domain and mesh of RANS (a) and structure of CRN model (b)

其中,回流区PSR与火焰区PSR并联组合,共同模拟主燃区内的回流混合与火焰驻留特性;火焰区出口气流按0.7:0.3的比例(体积比,下同)分别进入燃尽区PFR和回流区PSR,以反映高温烟气向回流区的卷吸过程;回流区出口气流则按0.9:0.1的比例返回火焰区PSR或进入混合区PSR,用于模拟回

流区与主燃区之间的质量与热量交换。该网络模型参考文献^[20]的工作构建,充分考虑了旋流火焰回流区-火焰区-燃尽区的空间分布特征,能够准确反映氨氢预混旋流燃烧的反应动力学特性,为分析富氧条件下NO生成路径提供了可靠基础。需说明的是,上述RANS与CRN模拟均采用Okafor详细化学反应机理^[21],包含59种组分与356步基元反应。

2 结果与讨论

2.1 富氧燃烧对火焰形态及NH₃-NO_x协同排放的影响

本节基于kW级旋流燃烧器测试平台,分析不同工况下火焰形态演变特征及烟气污染物排放规律。不同氧气体积分数下的氨氢火焰形态(由CMOS相机拍摄)见图3,其中刻度“0”对应SiC套筒出口。由图3可知,火焰整体呈橙黄色,这主要源于富氨燃烧产生的大量NH₂与H₂O激发态自由基所发出的543~665 nm波段辐射^[22]。值得注意的是,在氧气体积分数为21%的条件下,富燃工况($\lambda < 1$)无法形成稳定火焰;而氧气体积分数提升至25%时,可观察到稳定的火焰形态,表明富氧燃烧能够有效拓宽氨燃料的稳燃范围。这主要归因于富氧燃烧可提高燃烧温度,并降低石英观测窗壁面附近的温度梯度,从而缓解由壁面热损失引起的不稳定现象。此外,所有氧气体积分数条件下,靠近富燃极限的火焰均呈“V”形,其顶端受壁面回流作用影响显著,横向展宽较大,且接触壁面的部分火焰有向根部延伸的趋势。在氧气体积分数为21%工况下,随着过量空气系数增大,火焰横向展宽逐渐受到抑制,宽度减小,而纵向高度变化不大。这可能是由于空气流量增大,一方面提高了混合气的径向流速,从而抑制了壁面回流效应;另一方面,更高的空气体积分数促使燃料燃烧更充分,火焰趋于稳定。相比之下,氧气体积分数为25%工况下氧气的体积分数更高,对氨火焰的强化作用更强。当 $\lambda = 0.9$ 时,火焰横向宽度迅速减小,形态由“V”形转为直筒形,表明强化燃烧使火焰更快进入稳定状态。在 $\lambda = 0.9\sim 1.0$ 范围内,火焰形态变化不大;而当 $\lambda = 1.1$ 时,火焰可视高度降低,顶端波动明显减弱,旋流作用进一步加强,火焰根部可见清晰的旋流锋面。

不同氧气体积分数下烟气中NH₃、NO、N₂O和CO的排放体积分数见图4。由图4可知,所有工况中N₂O体积分数均低于 20×10^{-6} ,远低于NO水平,且未呈现明显变化规律。实验中检测到微量CO排放,CO主要源自空气中CO₂与火焰中H、OH等自由

基的还原反应,这一现象与COLE等^[23]的研究结果一致。在富燃条件下,CO体积分数最高可达 109×10^{-6} 。对比相同工况,富氧燃烧下CO生成量更高,说明富氧环境通过提升燃烧温度,加速了CO₂的还原动力学过程,从而促进了CO的生成。需要说明的是,排放分析的核心在于未燃NH₃与NO的协同演变关系。在 $\lambda \leq 1.0$ 的富燃区间,两种氧气体积分数下均未检出大量NO,这主要归因于高体积分数未燃NH₃对NO的还原作用。具体而言,在氧气体积分数为21%工况下, $\lambda = 1.0$ 时,未燃NH₃体积分数已超过仪器量程(5000×10^{-6}),有效抑制了NO生成;而当氧气体积分数提升至25%,相同 λ 下未燃NH₃体积分数降至 4339×10^{-6} ,燃烧充分性有所改善,但仍足以维持对NO的抑制。

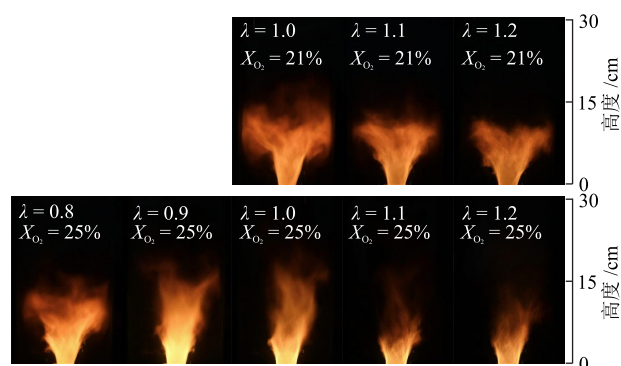


图3 不同氧气体积分数下火焰形态

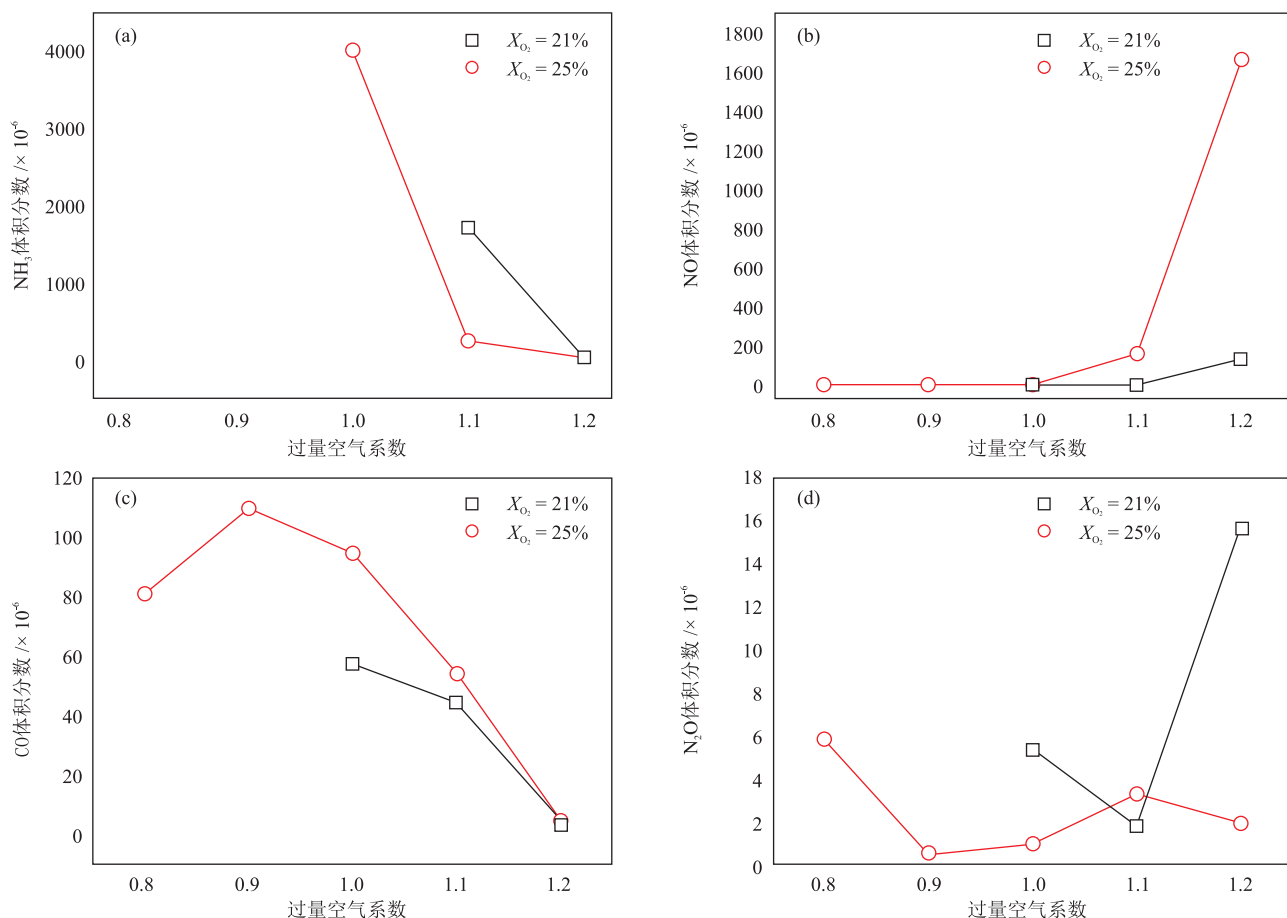
Fig. 3 Flame morphologies at different oxygen volume fractions

随着 λ 升高,未燃NH₃消耗进程与NO生成呈现此消彼长的关系。在氧气体积分数为21%工况下, $\lambda = 1.1$ 时,未燃NH₃体积分数降至 1883.9×10^{-6} ,NO仍维持极低水平;直至 $\lambda = 1.2$ 时,NH₃完全消耗(体积分数低于仪器量程下限, 60×10^{-6}),NO体积分数才上升至 136.4×10^{-6} 。相比之下,富氧条件(氧气体积分数为25%)加速了这一转变: $\lambda = 1.1$ 时,未燃NH₃已迅速消耗至 277.3×10^{-6} ,此时NO开始生成(168.8×10^{-6});至 $\lambda = 1.2$ 时,NH₃完全燃烧的同时NO急剧攀升至 1754.7×10^{-6} 。这表明,富氧环境大幅促进了NH₃的氧化消耗进程,从而使NO排放的临界 λ 值提前(即 λ 值减小),并在氨完全燃烧后呈现出更高的NO生成量。

综上,实验发现未燃NH₃与NO排放之间存在明显的竞争抑制机制。富氧燃烧在有效拓宽氨氢预混火焰稳燃极限(有效缓解高温工业场景下氨燃烧易熄火、脱火的问题)的同时,也使NO的生成窗口明显前移(NO大量生成时的 λ 值减小),且排放峰值(实验中相同过量空气系数工况下,NO所达到的

最大排放)升高。具体而言,在氧气体积分数为21%的工况下, NH_3 与NO协同处于低排放状态时对应的过量空气系数约1.2;而在氧气体积分数提高至25%后,对应的过量空气系数则提前至1.1左右。在 NH_3 -NO协同排放的最佳过量空气系数窗口下,

25% O_2 对应的NO排放体积分数为 168.8×10^{-6} ($\lambda = 1.1$),虽略高于21% O_2 的 136.4×10^{-6} ($\lambda = 1.2$),但仍处于可接受范围。后续可结合空气分级、燃料分级等低氮燃烧技术,进一步从燃烧源头降低氮氧化物生成量,实现稳燃与减排的协同优化。



基准氧体积分数为3.5%。

图4 不同氧气体积分数下烟气中 NH_3 (a)、NO (b)、 N_2O (c)和CO(d)的体积分数随过量空气系数的变化

Fig. 4 Variations in volume fractions of NH_3 (a), NO (b), N_2O (c) and CO (d) in flue gas with excess air ratio at different oxygen volume fractions

2.2 富氧燃烧对流场、温度场及关键自由基体积分数分布的影响

为了从宏观层面揭示富氧燃烧的影响机制,本节基于RANS模拟,系统分析了不同氧气体积分数下火焰流场、温度场及关键自由基体积分数分布的变化规律。过量空气系数为1.1时,通过RANS模拟得到的温度、轴向速度云图(图5)直观呈现了氧气体积分数变化对氨氢预混旋流火焰的影响。由图5可知,不同氧气体积分数下SiC套筒内的轴向速度分布基本一致,表明氧气体积分数的增加并未显著改变回流区结构。温度分布则呈现出明显差异:氧气体积分数为21%时,温度呈“V”形分布,火焰长度约10 cm;氧气体积分数为25%时,温度分布转变为

直筒形,火焰长度延伸至20 cm左右。这一变化趋势与实验观测的火焰形态(图3)相符。同时,燃烧峰值温度由2111 K提升至2170 K。

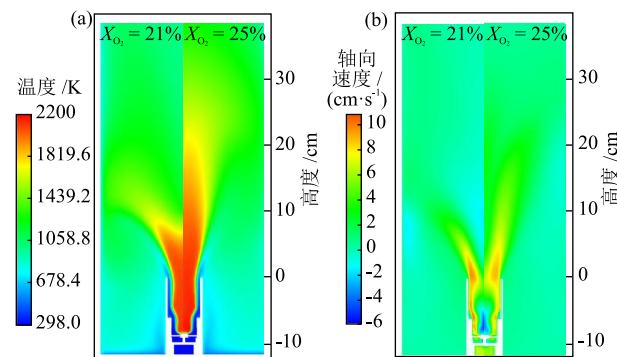


图5 不同氧气体积分数下的温度(a)和轴向速度(b)云图
Fig. 5 Contours of temperature (a) and axial velocity (b) at different oxygen volume fractions

过量空气系数为1.1时,通过RANS模拟得到了OH及NO体积分数云图,结果见图6。

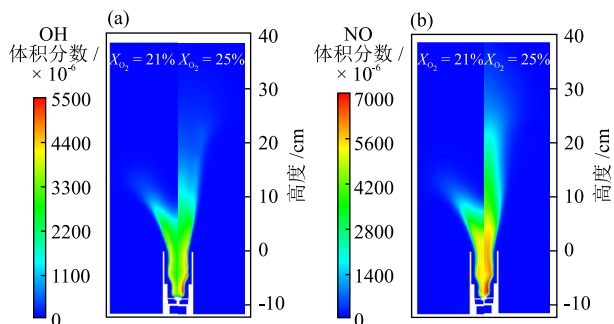


图6 不同氧气体积分数下的OH (a)和NO (b)体积分数云图
Fig. 6 Contours of OH (a) and NO (b) volume fractions at different oxygen volume fractions

由图6可知,富氧条件下OH体积分数升高,氧气体积分数为25%时其峰值体积分数较氧气体积分数为21%时增加约24%。OH体积分数的提升促进了氨的脱氢过程(如 $\text{NH}_3 + \text{OH} \rightleftharpoons \text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$, R278),从而加速了氨的整体氧化反应进程。这表明,通过提高氧气体积分数以强化由OH主导的反应链,能够有效改善燃烧稳定性。另一方面,局部温度的升高与OH的富集也导致富氧工况下NO生成量增加。模拟结果显示,氧气体积分数提高后,NO峰值体积分数由 5860×10^{-6} 上升至 7033×10^{-6} 。该趋势与实验测量结果一致,说明富氧燃烧在强化

燃烧稳定的同时,也会促进氮氧化物的生成,在实际应用中需对其排放加以控制。

2.3 富氧燃烧对NO_x生成/抑制路径的影响

基于CRN模拟,进一步对2.2节所述工况下的NO生成特性进行分析。富氧条件下,实验测得未燃NH₃体积分数为 277.3×10^{-6} 、NO体积分数为 168.8×10^{-6} ,而CRN模拟结果分别为 314×10^{-6} 和 336×10^{-6} ,可正确反映实验趋势。不同氧气体积分数下主燃区氨氢燃烧过程中氮氧化物的生成路径见图7。图7中箭头标注的百分数定义为各反应路径反应速率与氨脱氢过程反应速率的比值,以定量表征反应路径的相对强度^[14]。图7围绕氮元素绘制,重点呈现了对氮组分转化具有主要贡献的反应通道(阈值设置为0.01)。红色与黑色百分数分别对应氧气体积分数为25%与氧气体积分数为21%的工况。由图7可知,NH₃首先脱氢生成NH₂,NH₂进一步脱氢生成NH;NH既可向NO_x转化,也可向N₂转化。不同氧气体积分数下NH₃至NO过程的总体路径相似,均主要通过NH_i机制(经由NH₂、NH等中间体)与HNO机制(经由HNO中间体)生成NO,其中HNO机制占主导地位,且被富氧条件强化。值得注意的是,在富氧条件下,NH_i中间体向N₂的转化路径(NH₂ → NH → N₂H₂ → NNH → N₂)受到明显抑制,导致更多活性氮中间体流向NO生成方向。

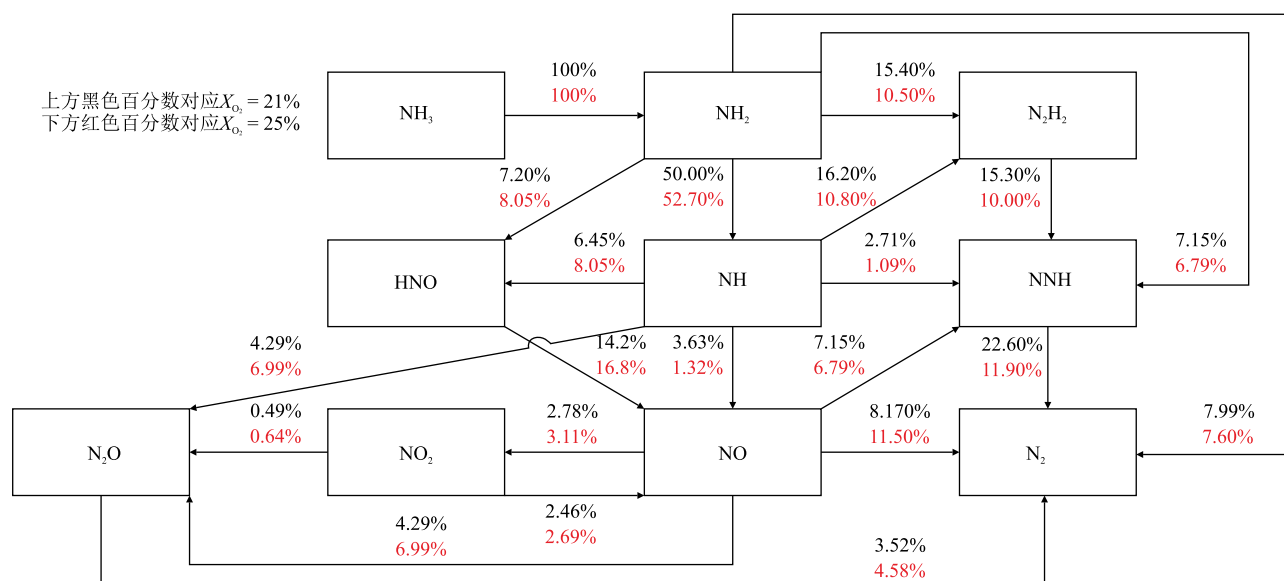


图7 不同氧气体积分数下主燃区NH₃至NO的反应路径

Fig. 7 Reaction pathways from NH₃ to NO in main combustion zone at different oxygen volume fractions

不同氧气体积分数下NO生成速率分析结果见图8。由图8可知,富氧条件下的NO生成速率显著高于空气燃烧工况。这主要归因于富氧火焰中OH

与NH自由基体积分数升高,进而促进了关键基元反应,例如NH_i机制中的关键步骤(如R241)、HNO机制中的关键步骤(如R274、R271)。这些反应通

道的增强共同促进了NO的快速生成,在宏观上表现为富氧燃烧中更高的NO排放速率。

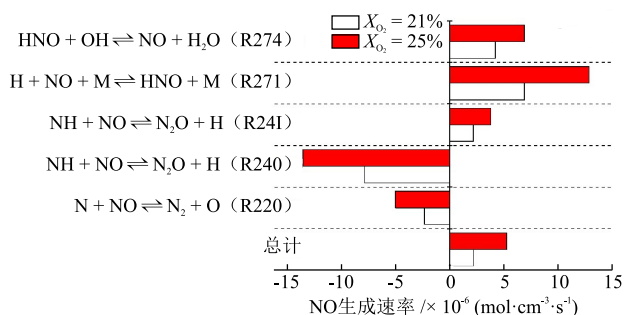


图8 不同氧气体积分数下NO生成速率

Fig. 8 NO formation rates at different oxygen volume fractions

3 结论

本文围绕氨富氧燃烧在高温工业场景下的应用展开了研究,通过实验与数值模拟相结合的手段,揭示了富氧条件对氨氢预混旋流火焰稳燃特性、火焰形态演变及NO_x生成路径的影响机制,获得了燃烧稳定性与污染物排放协同控制的最佳运行参数范围,并得到如下主要结论。

(1)富氧燃烧可有效拓宽氨燃料的稳燃边界,其中未燃NH₃与NO排放呈现明显的竞争-抑制关系。提高氧气体积分数在提升氨燃尽效率的同时,也使NO生成窗口前移、排放峰值升高。对于21%氧气体积分数工况,NH₃与NO协同处于低排放状态对应的过量空气系数约1.2;当氧气体积分数提升至25%,该对应值提前至1.1左右。

(2)RANS模拟表明,富氧条件下火焰中OH自由基体积分数上升,从而促进了NH₃ + OH ⇌ NH₂ + H₂O(R278)等关键脱氢反应,加速了氨的整体氧化进程,这是燃烧稳定性改善的重要机制。

(3)CRN模拟进一步揭示,富氧条件(氧气体积分数为25%)下会抑制NH_i中间体向N₂的转化路径(NH₂ → NH → N₂H₂ → NNH → N₂),导致更多活性氮中间体流向NO生成方向。这从反应路径层面解释了富氧燃烧中NO排放增大的现象。

本研究主要针对氧气体积分数为25%富氧工况开展了初步探索,后续工作将进一步拓展氧气浓度梯度,系统揭示不同富氧程度下的燃烧与排放演化规律。在此基础上,可耦合空气分级、燃料分级等低氮燃烧技术,实现稳燃性能与氮氧化物排放的协同优化,为氨燃料的清洁高效应用提供更完善的技术方案。

参考文献

- [1] ZHOU J W, YU Z, MA L H, et al. Pure ammonia-fueled roller kiln for the production of ceramic tiles: A first demonstration [J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38: 22593-22604.
- [2] 肖通, 张猛, 宋鹏飞, 等. “双碳”目标下的氨能源利用进展 [J]. *热能动力工程*, 2025, 40(12): 1-19.
XIAO T, ZHANG M, SONG P F, et al. Progress in ammonia energy towards achieving carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2025, 40(12): 1-19.
- [3] 林涌滨, 林嘉豪, 滕霖, 等. 长距离液氨管道泄放回回收规律研究 [J]. *低碳化学与化工*, 2025, 50(11): 150-156.
LIN Y B, LIN J H, TENG L, et al. Study on release and recovery characteristics of long-distance liquid ammonia pipelines [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2025, 50(11): 150-156.
- [4] 谭厚章, 周上坤, 杨文俊, 等. 氨燃料经济性分析及煤氨混燃研究进展 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(1): 181-191.
TAN H Z, ZHOU S K, YANG W J, et al. Economic analysis of ammonia and research progress of coal-ammonia co-firing [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(1): 181-191.
- [5] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 69: 63-102.
- [6] ONG C W, CHANG N, TSAI M L, et al. Decarbonizing the energy supply chain: Ammonia as an energy carrier for renewable power systems [J]. *Fuel*, 2024, 360: 130627.
- [7] CHAI W S, BAO Y, JIN P, et al. A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 147: 111254.
- [8] KANOSHIMA R, HAYAKAWA A, KUDO T, et al. Effects of initial mixture temperature and pressure on laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed laminar flames [J]. *Fuel*, 2022, 310: 122149.
- [9] VALERA-MEDINA A, VIGUERAS-ZUNIGA M O, SHI H, et al. Ammonia combustion in furnaces: A review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 1597-1618.
- [10] 阿斯娜, 陈静怡, 何勇, 等. 管状燃烧器中氨/甲烷掺混燃烧和排放特性 [J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(21): 8486-8493.
A S, CHEN J Y, HE Y, et al. Combustion and emission characteristics of ammonia/methane blends in a tubular flame burner [J]. *Proceedings of The Chinese Society For Electrical Engineering*, 2025, 45(21): 8486-8493.
- [11] MEI B W, ZHANG X Y, MA S Y, et al. Experimental and kinetic modeling investigation on the laminar flame propagation of ammonia under oxygen enrichment and

- elevated pressure conditions [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 210: 236-246.
- [12] HUANG Y L, XU C S, LI Y T, et al. Enhancing ammonia combustion: Study of laminar burning velocity, flame instability, and NO_x emissions under oxygen-enriched conditions [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2026, 125: 102424.
- [13] LIU Z D, ZHANG Y, LI W, et al. Self-promoted fuel pyrolysis under oxygen enrichment enables clean and efficient ammonia combustion [J]. *Innovation Energy*, 2024, 1(1): 100006.
- [14] AN Z H, WANG R X, MAO R Z, et al. Flame stability and emission characteristics of oxygen-enriched ammonia combustion in a swirl combustor [J]. *Energy*, 2025, 324: 135829.
- [15] CHEN G, ZHANG M, LIU E X, et al. Effects of oxygen-enrichment on the flame and emission characteristics of ammonia combustion in a swirl combustor [J]. *Fuel*, 2026, 409: 137694.
- [16] 高继录, 张屿, 赵义军, 等. $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 和 O_2/N_2 条件下氨富氧燃烧特性[J]. *工程热物理学报*, 2025, 46(9): 3119-3133
GAO J, ZHANG Y, ZHAO Y, et al. Characteristics of ammonia oxygen-enriched combustion under $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ and O_2/N_2 atmosphere [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2025, 46(9): 3119-3133
- [17] 王昊, 马柳昊, 杜建国, 等. 基于频分复用激光吸收光谱技术的高湿烟气中痕量甲烷-氨二元燃料逃逸测量[J]. *化工进展*, 2025, 44(4): 1913-22.
WANG H, MA L H, DU J G, et al. Measurement for trace-level methane-ammonia binary fuel slip in high-humidity flue gases based on frequency-division multiplexing laser absorption spectroscopy [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, 44(4): 1913-1922.
- [18] YAN Y S, MA L H, LI Q, et al. Simultaneous measurement of NO and NH_3 in ultrahigh humidity flue gases from ammonia combustion using mid-infrared laser-absorption spectroscopy [J]. *Energy & Fuels*, 2025, 39(30): 14921-14934.
- [19] XU L B, YU Z, WANG Y. Combustion characteristics and NO_x emissions of jet in hot co-flow combustion of methane/ammonia mixtures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 93: 1031-1041.
- [20] DAVIES J, SATO D, MASHRUK S, et al. Control of emissions from cracked ammonia swirling flames by heat loss management [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 168: 151061.
- [21] OKAFOR E C, NAITO Y, COLSON S, et al. Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of $\text{CH}_4\text{-NH}_3\text{-air}$ premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 187: 185-198.
- [22] ZHEN H S, TAN K, LIU X Y, et al. Experimental investigation on ammonia-hydrogen-air Bunsen flames for impingement heating applications [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 547-559.
- [23] COLE R, JIMENEZ C D A, WU D, et al. Carbon monoxide emissions from combustion of non-carbon-containing fuels [J]. *Combustion and Flame*, 2025, 273: 113913.