

DOI: 10.19666/j.rfd.202505093

# 等离子体耦合甲烷增强氨燃烧特性研究

钟世龙<sup>1,2</sup>, 林启富<sup>2</sup>, 吴殿武<sup>2</sup>, 宋亚伟<sup>2</sup>, 刘成周<sup>2</sup>, 武晨<sup>2,3</sup>,  
陈龙威<sup>2</sup>, 李振阳<sup>2</sup>, 陈维晔<sup>2</sup>, 冯汉升<sup>2,4</sup>, 罗广南<sup>2,4</sup>

(1.安徽工业大学能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243002;

2.合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室), 安徽 合肥 230031;

3.安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001;

4.中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031;

**[摘要]** 针对氨燃料燃烧性能差和尾气 NO<sub>x</sub> 排放量高的问题, 在耦合滑动电弧等离子体发生器的旋流燃烧器上开展增强氨燃烧的实验, 研究了甲烷助燃、等离子体助燃以及等离子体耦合甲烷助燃等不同助燃方式对氨燃烧旋流火焰特性和 NO 生成特性的影响。实验结果表明: 相较于甲烷助燃, 等离子体耦合甲烷助燃和等离子体助燃都能有效提高氨燃烧稳定性, 扩展氨旋流火焰稳燃极限范围, 在 NH<sub>3</sub>/空气当量比为 0~5.0 的范围内均可正常燃烧; 与单一的甲烷助燃及等离子体助燃相比, 等离子体耦合甲烷助燃(等离子体功率为 0.8 kW、甲烷输入量为 1 L/min) 工况下放电产生的 H<sub>α</sub> 及 OH 活性粒子能够得到显著增强, 进而增强了等离子体助燃中的化学效应, 并且在 NH<sub>3</sub>/空气当量比从 0.6 增加至 0.8 时, 尾气中 NO 排放质量浓度从超过 7 000 mg/m<sup>3</sup> 开始快速下降至 100 mg/m<sup>3</sup> 左右。此外, 气体温度只比单纯等离子体助燃工况稍低, 单纯等离子体助燃工况下的氨燃烧火焰温度最高可达 2 030 K 左右。

**[关键词]** 氨稳燃; 等离子体助燃; 燃烧稳定性; 光谱特性; 尾气排放

**[引用本文格式]** 钟世龙, 林启富, 吴殿武, 等. 等离子体耦合甲烷增强氨燃烧特性研究[J]. 热力发电, 2025, 54(8): 131-141. ZHONG Shilong, LIN Qifu, WU Dianwu, et al. Enhancement of ammonia combustion characteristics by coupling methane with plasma[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(8): 131-141.

## Enhancement of ammonia combustion characteristics by coupling methane with plasma

ZHONG Shilong<sup>1,2</sup>, LIN Qifu<sup>2</sup>, WU Dianwu<sup>2</sup>, SONG Yawei<sup>2</sup>, LIU Chengzhou<sup>2</sup>, WU Chen<sup>2,3</sup>,  
CHEN Longwei<sup>2</sup>, LI Zhenyang<sup>2</sup>, CHEN Weiye<sup>2</sup>, FENG Hansheng<sup>2,4</sup>, LUO Guangnan<sup>2,4</sup>

(1.School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China;

2.Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center (Anhui Provincial Energy Laboratory), Hefei 230031, China;

3.School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

4.Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

**Abstract:** To tackle the challenges associated with the poor combustion performance of ammonia fuels and the high NO<sub>x</sub> emissions in exhaust gases, experimental research on enhancing ammonia combustion through the use of a swirling burner combined with a gliding arc plasma generator was carried out. The effects of various combustion enhancement methods, including methane-assisted combustion, plasma-assisted combustion, and plasma-coupled methane-assisted combustion, on the combustion characteristics of NH<sub>3</sub> swirling flames and the generation of NO were investigated. The experimental results indicated that, compared with the methane-assisted combustion, both

收稿日期: 2025-06-06 网络首发日期: 2025-07-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4005705, 2023YFB4005702-03); 国家自然科学基金项目(52207151); 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室)自主立项项目(22KZZ525, 23KZS402, 22KZS301, 22KZS304)

Supported by: National Key Research and Development Program (2023YFB4005705, 2023YFB4005702-03); National Natural Science Foundation of China (52207151); Self-initiated Project of Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center (Anhui Provincial Energy Laboratory) (22KZZ525, 23KZS402, 22KZS301, 22KZS304)

第一作者简介: 钟世龙(2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为滑动电弧等离子体和甲烷强化氨燃烧技术, 2766258206@qq.com.

通信作者简介: 林启富(1987), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为低温等离子体物理、等离子体助燃、氢氨能应用, linqifu@ie.ah.cn.

plasma-coupled methane-assisted combustion and plasma-assisted combustion significantly enhanced the stability of ammonia combustion. This improvement was evidenced by a substantial expansion of the stable combustion limit range of the  $\text{NH}_3$  swirling flame, enabling normal combustion within an  $\text{NH}_3/\text{Air}$  equivalence ratio range of 0~5.0. In comparison to single methane-assisted or plasma-assisted combustion, plasma-coupled methane-assisted combustion (with a plasma power of 0.8 kW and a methane flow rate of 1 L/min) significantly enhanced the active species  $\text{H}_\alpha$  and  $\text{OH}$  generated by the discharge, thereby strengthening the chemical effects in plasma-assisted combustion. Under these conditions, the  $\text{NO}$  emission mass concentration in the exhaust gases rapidly decreased from over 7 000  $\text{mg}/\text{m}^3$  to approximately 100  $\text{mg}/\text{m}^3$  as the  $\text{NH}_3/\text{Air}$  equivalence ratio was increased from 0.6 to 0.8. Furthermore, the gas temperature under these conditions was only slightly lower than that observed in pure plasma-assisted combustion, where the flame temperature of ammonia combustion could reach up to approximately 2 030 K.

**Key words:** ammonia stable combustion; plasma-assisted combustion; combustion stability; spectral characteristics; exhaust emission

在“双碳”战略目标的背景下，亟需以低碳清洁能源替代传统化石燃料。氢作为一种零碳排放、高热值的燃料，正日益受到广泛关注。然而，氢的运输和储存还面临诸多难题，一直未能大规模应用。氨作为一种储氢载体，具备体积能量密度高、辛烷值高和易液化储运等优势<sup>[1]</sup>，且在完全燃烧的情况下，不会产生碳排放，氨能为“双碳”目标的实现提供了新路径。然而，氨气的燃烧速度慢，且高氮量会增加  $\text{NO}_x$  排放风险。因此，提高氨燃烧的稳定性 and 降低  $\text{NO}_x$  排放成为氨燃烧利用的关键<sup>[2]</sup>。

针对氨燃料燃烧性能差等问题，已经发展了系列氨气燃烧强化措施，主要有掺烧高活性燃料<sup>[3-6]</sup>、富氧燃烧<sup>[7]</sup>和等离子体辅助燃烧<sup>[8-10]</sup>等。氨气与甲烷、氢气等高化学反应活性燃料掺烧，不仅可以缩短着火延迟时间、扩展可燃极限范围，还能显著提高火焰传播速度，但存在增加  $\text{NO}_x$  生成量的风险。Giovanni 等人<sup>[11]</sup>采用旋流燃烧器进行纯氨和氨/甲烷混合燃料的 MILD 燃烧实验研究，发现氨/甲烷混合燃料的燃烧极限范围更广，但  $\text{NO}_x$  排放量更高。Filipe 等人<sup>[12]</sup>在预混层流燃烧器进行  $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{空气}$  混合燃烧实验，获得了  $\text{NO}_x$  排放量与燃料混合物中  $\text{NH}_3$  摩尔分数的关联关系，发现在固定  $\text{NH}_3/\text{空气}$  当量比  $\varphi$  下， $\text{NO}_x$  排放量随着  $\text{NH}_3$  摩尔分数的增加呈现先上升后下降趋势，且只要添加  $\text{NH}_3$ ，在  $\text{NH}_3/\text{空气}$  当量比范围内 ( $\varphi=0.8\sim 1.0$ )，所测的  $\text{NO}_x$  排放量都很高 (2 000~4 000  $\text{mg}/\text{m}^3$ )，在所测  $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{空气}$  当量比范围内 ( $\varphi=0.8\sim 1.0$ )  $\text{NO}_x$  排放都很高 (2 000~4 000  $\text{mg}/\text{m}^3$ )，表明  $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{空气}$  混燃虽能提高氨燃烧稳定性，但对  $\text{NO}_x$  生成的控制仍未很好地解决。Yuze 等人<sup>[13]</sup>对具有简化化学动力学机制的预混  $\text{NH}_3/\text{H}_2$  旋流火焰进行了三维数值模拟，发现在同一当量比下，添加  $\text{H}_2$  能显著地提高混合燃

料的层流燃烧速度，且与纯  $\text{NH}_3$  相比， $\text{NH}_3/\text{H}_2$  混合燃烧的  $\text{NO}$  排放量更高，并随着氢燃料的增加而升高。此外，Liu 等人<sup>[14]</sup>在单旋流燃气轮机模型燃烧室中进行了富氧环境中的氨燃烧，发现富氧可以增强燃烧强度和火焰稳定性，使火焰根部稳定在燃烧器出口处。但纯氧生产成本较高，限制了其实际的工业燃烧应用。由于活性自由基可以通过加速关键路径的反应速率来增强燃烧，因此也有学者采用等离子体助燃的方式来提高氨燃烧的稳定性。Sun 等人<sup>[15]</sup>研究了滑动电弧等离子体放电对  $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{空气}$  混合燃料燃烧特性的实验研究，发现施加滑动电弧放电不仅能提供高频重复点火，还可以产生更多的  $\text{OH}$  自由基，提高了火焰稳定性，使得  $\text{NH}_3/\text{CH}_4$  预混燃烧的贫燃极限显著提高 56%。Tang 等人<sup>[16]</sup>研究了有无滑动电弧等离子体助燃方式对贫燃条件  $\text{NH}_3/\text{空气}$  燃烧特性的影响，发现使用等离子体助燃方式能显著扩展贫燃吹熄极限。当空气流量为 50 L/min 时，火焰吹熄极限从约 0.7 扩宽到约 0.3，且  $\text{NH}_3/\text{空气}$  当量比为 0.40~0.55 时，等离子体辅助氨燃烧的  $\text{NO}$  排放量可以下降到小于 100  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。Kim 等人<sup>[17]</sup>研究了介质阻挡放电等离子体对  $\text{NH}_3/\text{空气}$  预混火焰的稳定性及  $\text{NO}_x$  排放特性的影响，研究表明，添加等离子体能更有效地稳定火焰和扩大吹熄极限，并且在  $\text{NH}_3/\text{空气}$  当量比为 1.0 时，有等离子体助燃下的  $\text{NO}_x$  排放量比无等离子体助燃时降低了约 320  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

综上所述，甲烷助燃和等离子体助燃均可显著提高氨火焰的稳定性，并扩展其吹熄极限。然而，现有研究中尚无将这 2 种助燃方式相结合，对其助燃效果进行对比分析的工作。此外，不同助燃方式对氨燃料旋流火焰的燃烧特性及  $\text{NO}_x$  排放特性的影响不够明确。为此，本文在自主研发的一种滑动

电弧等离子体发生器与旋流燃烧器相结合的燃烧装置中进行了  $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{空气}$  燃烧的实验研究,开展了旋流火焰结构拍摄、燃烧稳定域测量、光谱强度诊断、火焰温度测量、尾气排放分析的工作。揭示不同助燃方式(甲烷助燃和等离子体助燃以及等离子体耦合甲烷助燃)对氨燃烧特性及污染物排放特性的影响,以期为实现氨燃料的清洁高效燃烧提供实验依据。

## 1 实验装置及研究方法

本文设计了一套滑动电弧等离子体发生器与旋流燃烧器相耦合来辅助氨燃烧的实验装置,其示意如图 1 所示。实验装置由等离子体发生器、旋流燃烧器、高频高压电源、供气系统和测量诊断系统组成。等离子体发生器是由内置棒状高压电极、接地电极和旋流气环 1 构成。旋流燃烧器则是由电弧喷嘴、圆柱形石英管以及旋流气环 2 构成。燃烧器的旋流强度用旋流数  $S$  来表征,  $S$  由电弧喷嘴与旋流气环 2 的几何结构决定,其定义式为:

$$S = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - (D_i/D_o)^3}{1 - (D_i/D_o)^2} \right] \tan \theta \quad (1)$$

式中:  $D_o$  和  $D_i$  分别为旋流气环 2 和电弧喷嘴的外径, mm;  $\theta$  为旋流器的叶片倾斜角度, °; 旋流数  $S$  是一个无量纲参数。本文中,  $D_o=23.4$  mm,  $D_i=8$  mm,  $\theta=30^\circ$ , 代入式(1)中计算得出该燃烧器的旋流数  $S$  为 0.42。

实验过程中通过质量流量计来控制所需气体流量,包括空气、氨气和甲烷,其测量精度为  $\pm 1\%$ 。燃烧火焰图像使用一台数码相机(佳能 EOS 60D)拍摄,实验过程中,感光度(ISO=100),曝光时间为 1/8 s。采用 2 种测温方式相组合的方式来测量火焰与电弧喷嘴处轴向距离的火焰温度: 1) 轴向距离 5 mm 处的温度从 OH 谱线拟合中获得; 2) 使用 B 型热电偶得到轴向距离为 25、65、105、165、225 mm 的火焰温度。采用 8 通道光纤光谱仪(AvaSpec-2048, 光强测量精度  $\pm 0.5\%$  FS, 光学分辨率 0.1 nm, FS 表示的是满量程)在旋流燃烧器喷嘴上方 5 mm 处测得等离子体助燃产生的发射光谱,波长测量范围为 200~900 nm。采用烟气分析仪(HORIBA, MEXA-584L, 分辨率 0.1 mg/m<sup>3</sup>)测量燃烧器出口的废气成分,包括 NO(测量精度  $\pm 1\%$  FS)和 O<sub>2</sub>(测量精度  $\pm 0.1\%$  FS)。

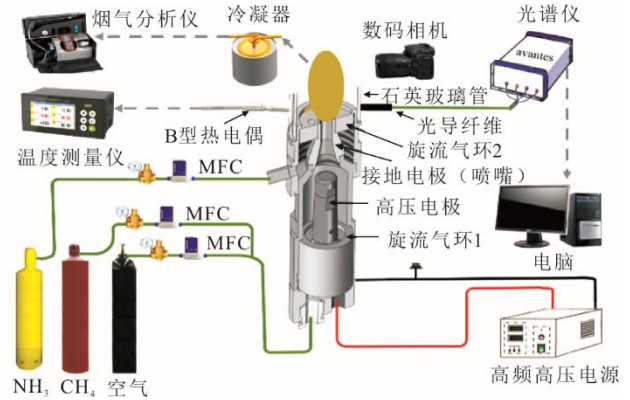


图 1. 滑动电弧等离子体耦合旋流燃烧器增强氨燃烧示意  
Fig.1 Schematic diagram of a sliding arc plasma-coupled swirling burner that enhances ammonia combustion

为对比等离子体助燃、甲烷助燃以及等离子体耦合甲烷助燃对  $\text{NH}_3$  旋流火焰燃烧特性及 NO 生成特性的影响,本文设计了 6 种不同的助燃方式。需要指出的是,本文中等离子体放电功率最大设置为 1 kW,这是基于前期实验过程中氨助燃效果及等离子体放电稳定性确定的,而甲烷的流量是依据甲烷能够稳定助燃氨燃烧时所需要的流量确定的。在本文中,甲烷流量最大值设定为 5 L/min,并且各种工况下甲烷燃烧所需要的空气量均为理想当量比  $\varphi=1.0$  下所对应的流量,不随氨燃烧的当量比发生变化而改变,如无特殊说明,本文中的当量比均为氨燃烧所对应的当量比。此外,考虑等离子体放电及氨燃烧的稳定性的,  $\text{NH}_3$  所需的空气流量固定为 25 L/min。

实验中,6 种助燃方式见表 1,具体如下。

表 1 氨燃烧实验工况  
Tab.1 Ammonia combustion experimental conditions

助燃方式	等离子体功率/kW	甲烷流量/(L·min <sup>-1</sup> )
甲烷助燃 (Case1)	0	5
等离子体耦合甲烷助燃 (Case2)	0.2	4
等离子体耦合甲烷助燃 (Case3)	0.4	3
等离子体耦合甲烷助燃 (Case4)	0.6	2
等离子体耦合甲烷助燃 (Case5)	0.8	1
等离子体助燃 (Case6)	1.0	0

甲烷助燃 (Case1) 空气和甲烷通过旋流气环 1 进入实验装置,氨气由旋流气环 2 供给,点火方式采用 1 kW 滑动电弧等离子体,放电时间为 3 s。

等离子体耦合甲烷助燃 (Case2—Case5) 空气和甲烷同样由旋流气环 1 进入,氨气通过旋流气环 2 供给,等离子体放电在点火结束后持续存在。

在这 4 种工况中, 等离子体功率从 0.2 kW 逐步增加至 0.8 kW,  $\text{CH}_4$  流量相应由 4 L/min 减至 1 L/min。

等离子体助燃 (Case 6) 仅采用等离子体作为助燃手段, 空气由旋流气环 1、氨气由旋流气环 2 喷入, 等离子体放电在点火结束后持续存在。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同助燃方式下氨燃烧火焰稳定性

图 2 展示了甲烷助燃、等离子体耦合甲烷助燃以及等离子体助燃下的氨燃烧火焰图像随当量比的变化。由图 2a) 可见, 当量比为 0 时表示只有甲烷燃烧而没有氨燃烧, 此时火焰呈现蓝色, 主要是  $\text{CH}^*$  光谱发射带引起的<sup>[18]</sup>。随着当量比的进一步增加 ( $\varphi=0.2\sim 0.8$ ), 可以观察到火焰由先前的蓝色火焰转变为橙蓝相间火焰, 橙色主要来源于氨燃烧分解时产生  $\text{NH}_2^*$  光谱发光产生颜色<sup>[19]</sup>。当量比为 1.0~1.2 时的火焰颜色逐渐变为以橙色为主, 其颜色明亮强度随着当量比增加而增强。对于火焰形态而言, 随着当量比的增加 ( $\varphi=0\sim 1.2$ ), 火焰长度逐渐拉长, 当  $\varphi=1.2$  时, 火焰长度最长, 并且随着当量比的进一步增加时, 火焰快速熄灭。

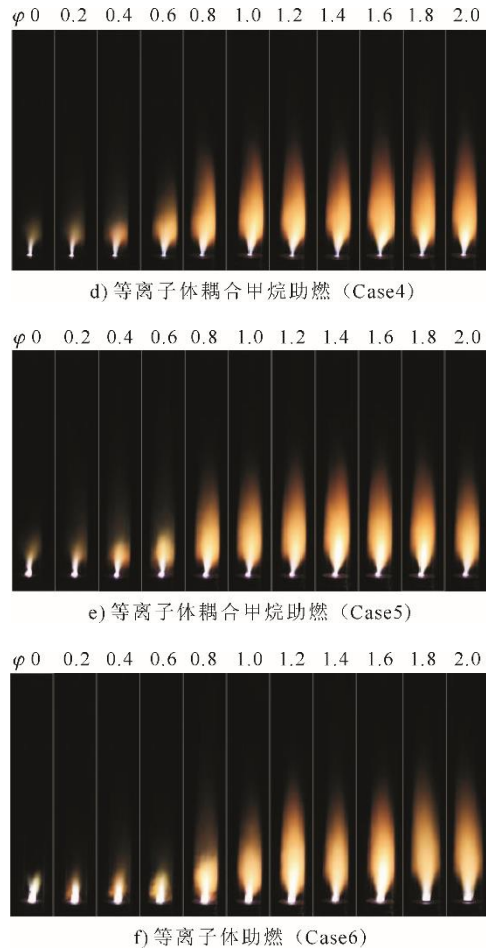
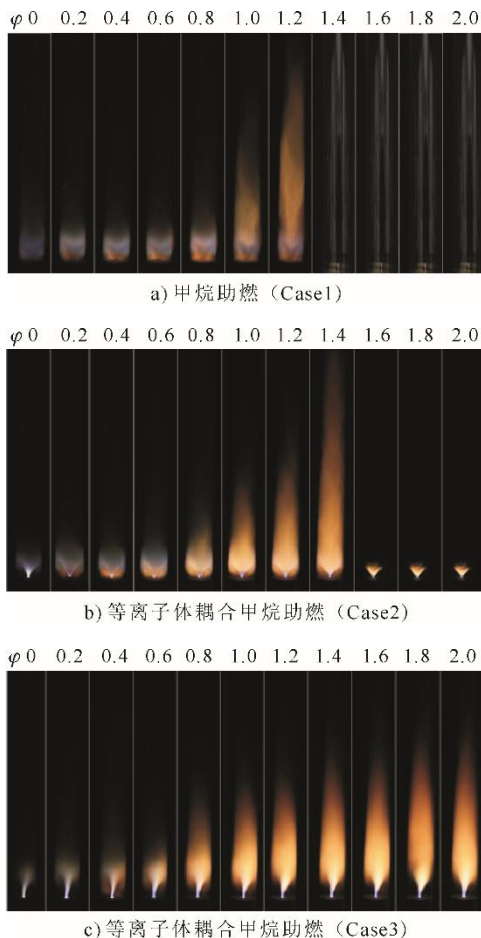


图 2 不同助燃方式下氨燃烧火焰图像随当量比变化  
Fig.2 Changes of ammonia combustion flame images with equivalence ratio in different combustion enhancement methods

为了说明等离子体耦合甲烷助燃下的氨火焰燃烧特性, 图 2b)~图 2e) 展示了 4 种不同工况下的氨火焰图像。与图 2a) 相比, 当甲烷耦合等离子体助燃时, 氨火焰稳定燃烧的当量比由 0~1.2 显著扩展到 0~2.0。由图 2b) 可见, 当量比为 1.6~2.0 时, 在滑动电弧放电周围形成了微弱火焰, 大部分氨气未燃尽, 而当等离子体耦合甲烷助燃中等离子体助燃的比例进一步提升时, 即 Case3—Case5 工况 (图 2c)~图 2e)), 不仅火焰的亮度得到了明显提升, 而且在  $\varphi=1.6\sim 2.0$ , 氨火焰性能得到了显著提升。因此, 与甲烷助燃相比, 等离子体耦合甲烷助燃下的氨火焰亮度明显提升, 燃烧极限显著增加。图 2f) 进一步展示了等离子体助燃下的氨燃烧火焰图像, 在  $\varphi\leq 1.2$  时, 随着当量比的增加, 也就是氨气流量的增加, 火焰高度逐渐升高。然而, 当量比进一步增加时, 火焰结构并未明显改变。此外, 通过图 2a)~图 2f) 对比还可发现, 相比于 Case1—Case4, Case5

和 Case6 工况下氨燃烧的火焰明亮强度更强, 火焰长度在相同的当量比下更短, 这表明此工况下的氨燃烧速度更快, 并快速燃尽。

综上所述, 相比于单纯的甲烷助燃 Case1, 等离子体耦合甲烷助燃 Case2—Case5 和等离子体助燃 Case6 既能明显地扩展氨燃烧极限, 又能提升火焰发光强度, 这表明等离子体助燃是一种有效的氨助燃手段。

图 3 展示了在甲烷助燃和等离子体助燃下的氨燃烧火焰稳定域。由图 3a) 可见, 当甲烷助燃时, 甲烷流量从 1 L/min 增加到 5 L/min 时, 氨火焰稳定燃烧的当量比由 0.6~0.8 显著扩展到了 0~1.2。因此, 甲烷助燃时, 增加一定的甲烷可以有效增加氨燃烧火焰稳定性。相比于图 3a) 下的甲烷助燃, 图 3b) 等离子体助燃对提升氨燃烧稳定域的拓展更加有效, 当等离子体放电为 1 kW 时, 氨燃烧的稳定域拓展为 0.1~5.0。

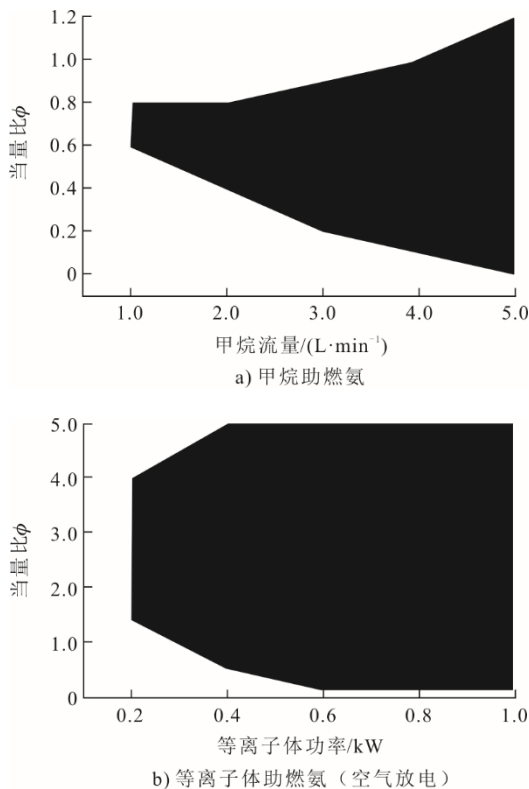


图 3 不同助燃工况下的氨燃烧火焰稳定域  
Fig.3 Stability regions of ammonia combustion flames under different combustion enhancement conditions

图 4 展示了甲烷助燃 Case1、等离子体助燃 Case6 和等离子体耦合甲烷助燃 Case2—Case5 工况下的氨燃烧火焰稳定域。由图 4 可见, Case2 (等离子体功率 0.2 kW、甲烷 4 L/min) 和 Case3 (等离子

体功率 0.4 kW、甲烷 3 L/min) 使得氨火焰稳定燃烧的当量比均为 0~5.0。然而, 图 3 中甲烷流量为 4、3 L/min 助燃氨的稳定燃烧当量比分别为 0.1~1.0 和 0.2~0.9; 等离子体功率为 0.2、0.4 kW 助燃氨的稳定燃烧当量比分别为 1.4~4.0 和 0.5~5.0。因此, 与只有甲烷助燃相比, 等离子体耦合甲烷助燃可以有效地增加氨燃烧火焰稳定性。

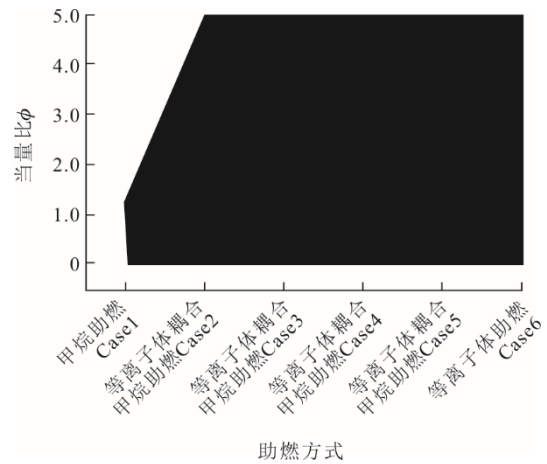


图 4 甲烷助燃、等离子体耦合甲烷助燃和等离子体助燃下氨燃烧火焰稳定域

Fig.4 Stability region of ammonia combustion flames in methane-assisted combustion, plasma-coupled methane-assisted combustion, and plasma-assisted combustion

## 2.2 不同助燃方式下氨燃烧动力学效应

等离子体放电产生的活性物质对氨燃烧具有重要作用, 为了进一步探讨等离子体耦合甲烷助燃 Case4—Case5 和等离子体助燃 Case6 对氨燃烧的助燃效果, 图 5 展示了纯空气放电和不同助燃方式下等离子体放电产生的发射光谱。由图 5a) 可见, 纯空气等离子体放电发射谱主要由 NO (220~300 nm)、OH (308 nm)、O (777 nm 和 844 nm) 和 Cr 的原子光谱组成。与之相比, Case4 (图 5b)) 发射光谱出现新的活性物质, 如 NH (336 nm)、CN (388 nm)、CH (431 nm) 和  $H_{\alpha}$  (656 nm)。Case5 (图 5c)) 的发射光谱各种活性粒子的强度都比 Case4 的更强, 表明 Case5 能够进一步提升氨燃烧性能。与纯空气放电相比, 当添加  $NH_3$  后, Case6 (图 5d)) 的发射光谱有较为明显的变化, OH 和 O 的强度也显著增强, 并且出现了新的 NH、 $H_{\alpha}$  活性粒子。此外, 与 Case6 相比, Case5 的 OH 和  $H_{\alpha}$  谱线强度显著增强, 但是 O 谱线强度有所下降。这表明等离子体助燃 Case6 和等离子体耦合甲烷助燃 Case5 下的活性粒子较多, 能够有效地增强等离子体助燃中的化学效应。

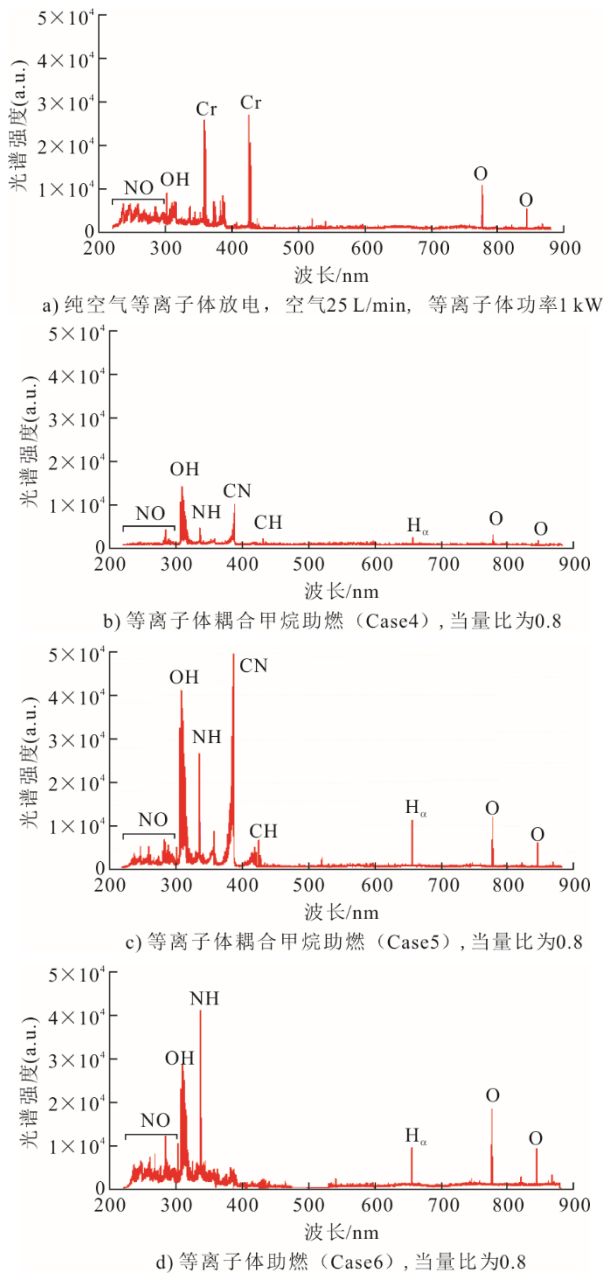


图 5 等离子体放电产生的光谱

Fig.5 A spectrogram generated by plasma discharge

电子密度  $N_e$  是确定等离子体电离率及电子碰撞反应的关键参数, 可以通过  $H_\alpha$  谱线的斯塔克展宽方法来获得<sup>[20]</sup>。图 6 展示了  $H_\alpha$  谱线按照 Voigt 函数进行拟合的实验曲线。谱线的洛伦兹展宽的半高宽为 0.073 nm, 斯塔克展宽约为 0.061 nm,  $N_e$  约为  $1.63 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 。图 7 进一步展示了不同助燃方式下等离子体中电子数密度随当量比的变化。各种助燃方式下的电子数密度都随着当量比的增加而增加, 并且等离子体助燃 Case6 的电子数密度比等离子体耦合甲烷助燃 Case4—Case5 的高, 这是由于等离子体放电功率增加会导致电子数密度增大<sup>[21]</sup>。

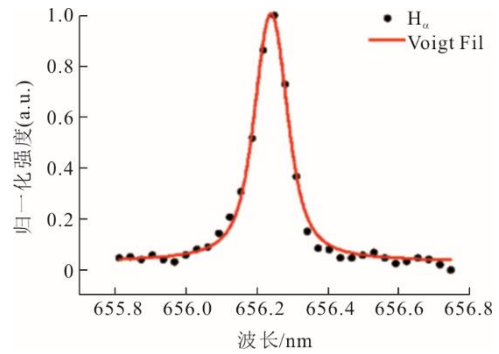
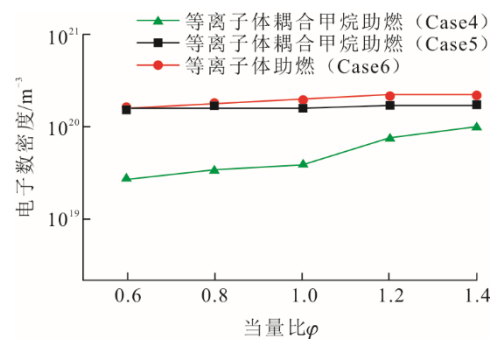
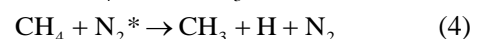
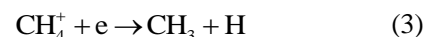
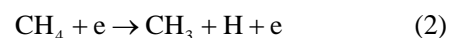
图 6  $H_\alpha$  (656 nm) 基团谱线斯塔克展宽的 Voigt 拟合, Case5, 当量比为 0.8Fig.6 Voigt fitting of the Stark broadening of the  $H_\alpha$  (656 nm) spectral line in plasma-coupled methane combustion (Case 5) with an equivalence ratio of 0.8

图 7 等离子体耦合甲烷助燃和等离子体助燃的电子数密度随当量比的变化

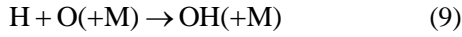
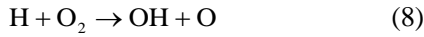
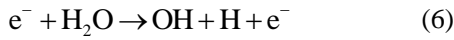
Fig.7 Changes of the electron number density with equivalence ratio in plasma-coupled methane combustion and plasma-assisted combustion

图 8 展示了在不同助燃方式下 OH (308 nm)、O (777 nm)、 $H_\alpha$  (656 nm)、NH (336 nm) 活性物质产生的光谱强度随当量比的变化。在固定助燃方式下, 活性物质 OH (308 nm)、O (777 nm) 和 NH (336 nm) 强度随当量比缓慢增加, 而  $H_\alpha$  (656 nm) 的强度对当量比特别敏感, 在更高的当量比下会获得更多的  $H_\alpha$  (656 nm)。由图 8a)、图 8b) 发现, 相比于等离子体助燃 Case6 和等离子体耦合甲烷助燃 Case4, 等离子体耦合甲烷助燃 Case5 的  $H_\alpha$  (656 nm)、OH (308 nm) 光谱辐射强度更大。这是因为 Case5 相比与 Case6 的燃料里存在甲烷, 并且比 Case4 有更多的电子数密度。Case5 主要是通过  $\text{CH}_4$  分子或离子与高能电子或激发态  $\text{N}_2^*$  之间的碰撞来产生更多的 H, 反应式<sup>[22]</sup>为:



此外, Case5 会产生更多的  $\text{H}_2\text{O}$ <sup>[22-23]</sup>, 氧或高能电

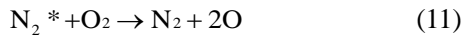
子与水的碰撞和活性粒子 H 与氧的碰撞都会更有效地形成 OH, 具体反应式为:



式中: M 表示第三体, 在化学反应中不参与净反应, 但能通过碰撞吸收或提供能量, 从而影响反应速率的任何分子或原子, 其作用是维持系统的能量守恒。

因此, 等离子体耦合甲烷助燃 Case5 产生了比等离子体助燃 Case6 和等离子体耦合甲烷助燃 Case4 更多的 OH 和 H, 从而显著加快了 NH<sub>3</sub> 氧化过程中的链式分支反应。

等离子体助燃 Case6 的辐射强度比等离子体耦合甲烷助燃 Case4—Case5 的辐射强度高 (图 8c)、图 8d)。因为相比于 Case4 和 Case5 而言, 从尾气分析中测得的 O<sub>2</sub> 可知, Case6 在燃烧过程中消耗氧气较慢, 并且电子数密度较高。使得产生 O 自由基的反应路径增强, 主要反应为高能电子与 O<sub>2</sub> 直接碰撞反应和激发态 N<sub>2</sub>\* 与 O<sub>2</sub> 反应<sup>[24]</sup>。



Case4—Case6 产生 NH 的主要途径是高能电子与基态 NH<sub>3</sub> 的碰撞<sup>[25]</sup>, 反应为:



由于 Case6 的电子数密度比 Case4 和 Case5 高, 因此产生了更多的 NH。

总体而言, 等离子体耦合甲烷助燃 Case5 产生了比等离子体助燃 Case6 和等离子体耦合甲烷助燃 Case4 更多的活性物质 OH 和 H, 同时加速了氨燃料与 O<sub>2</sub> 的反应速率, 改善了 NH<sub>3</sub> 的燃烧特性。

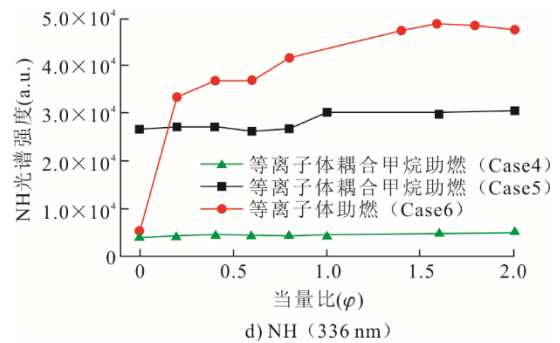
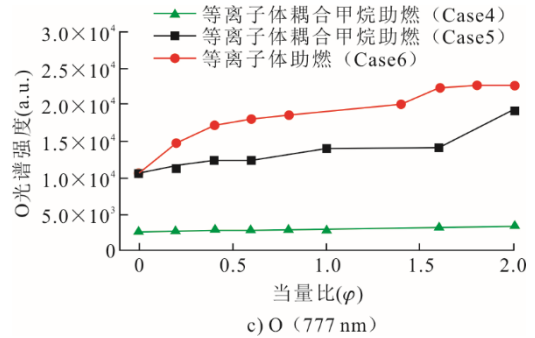
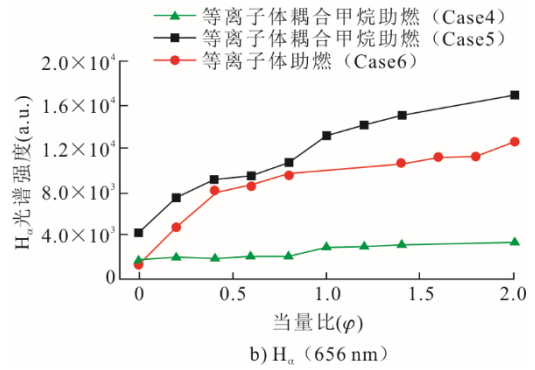
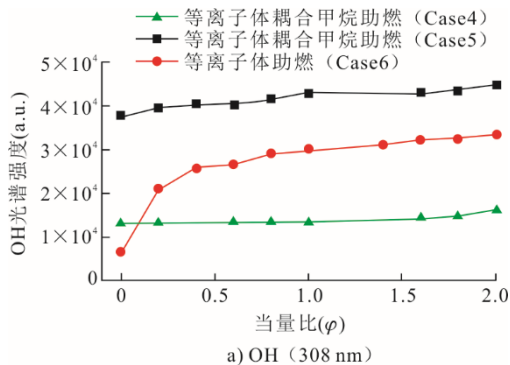


图 8 不同助燃方式下活性粒子发射光谱强度随当量比变化  
Fig.8 Changes of the emission spectral intensity of active particles with equivalence ratio in different combustion enhancement methods

### 2.3 不同助燃方式下氨燃烧热效应

在氨燃烧机理研究中, 温度分布的精确表征对于深入探究其燃烧热效应特性具有核心评价作用。图 9 展示了 Case5 等离子体耦合甲烷助燃 φ=0.8 时, OH 谱线拟合下的气体温度。由图 9 可见, 经实验值与模拟值拟合得到气体温度为 4 200 K, 表明等离子体射流区域的温度较高。图 10 为 Case4—Case6 工况下等离子体射流区域气体温度随当量比变化 (距燃烧器喷嘴 5 mm 处)。由图 10 可见, 在当量比为 0.6 时, 等离子体耦合甲烷助燃 Case5 的温度要高于 Case4 和等离子体助燃 Case6 的温度。在当量比为 0.8~1.4 时, Case5 工况下烟气最高温度达到了 4 200 K, 而 Case6 工况下烟气温度进一步上升至 4 350 K。

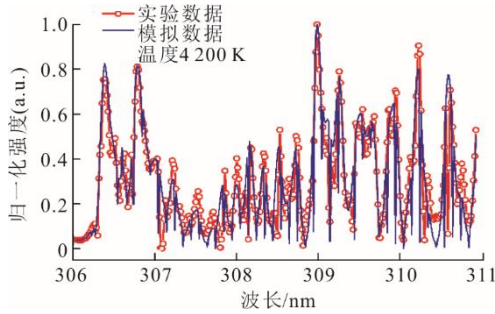


图9 OH 辐射谱线实验值与理论值拟合的气体温度  
Fig.9 The gas temperatures from the fitting of the experimental and theoretical values of the OH radiation spectrum line

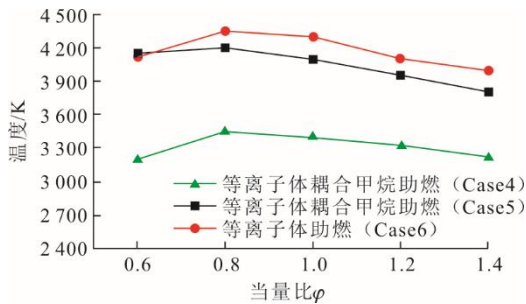
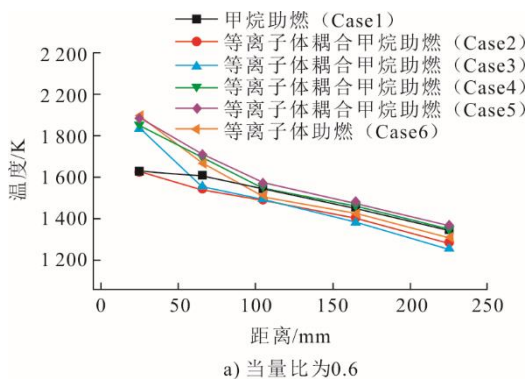
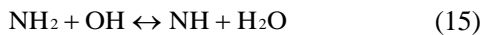
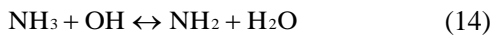
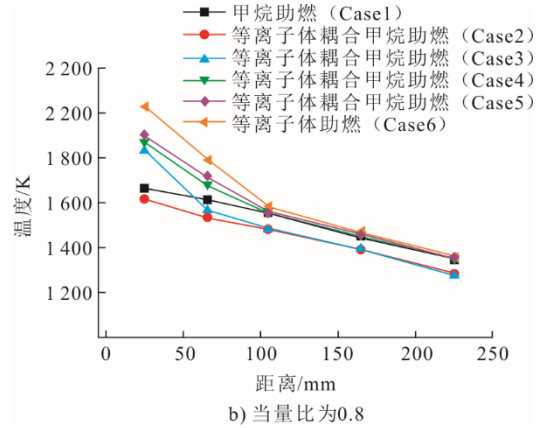


图 10 Case4—Case6 工况下等离子体射流区域气体温度随当量比变化  
Fig.10 Changes of the gas temperature in the plasma jet region with equivalence ratio in Case 4 to Case 6

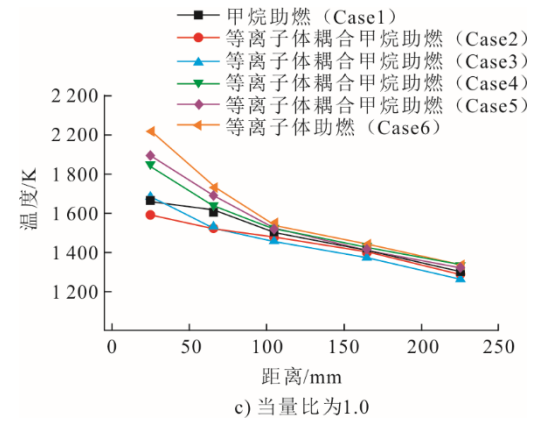
图 11 展示了当量比在 0.6~1.2 时不同助燃方式下的氨燃烧火焰温度随轴向距离和当量比的变化。由图 11 可见,氨火焰温度随轴向距离的增加而降低。在固定的助燃方式下,火焰轴向最高温度随着当量比的增加呈现先升高后降低的变化趋势,在当量比为 0.8 左右时,火焰温度达到最大值,在 Case6 工况下的火焰温度可达 2 030 K 左右。当量比为 0.6 时,等离子体耦合甲烷助燃 Case5 工况的火焰温度最高,根据 2.2 节中光谱诊断结果,可能与此工况下生成了大量的 OH、H 自由基有关,由 OH 自由基引发反应(式(14)、式(15))对热释放有显著的促进作用<sup>[26]</sup>。



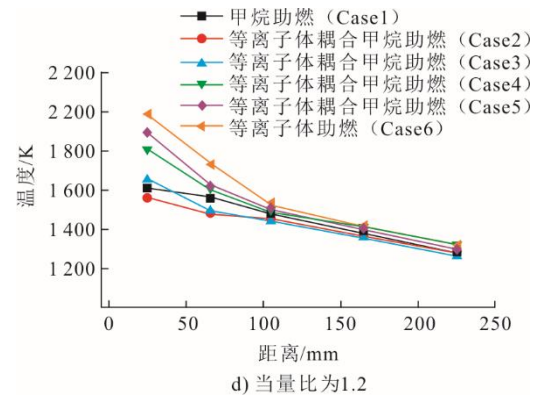
a) 当量比为0.6



b) 当量比为0.8



c) 当量比为1.0



d) 当量比为1.2

图 11 不同助燃方式下氨火焰温度随轴向距离和当量比变化  
Fig.11 Changes of the ammonia flame temperature with axial distance and equivalence ratio in different combustion enhancement methods

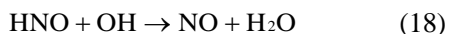
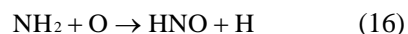
这些自由基在 NH<sub>3</sub> 燃烧的过程中都起着重要作用,有利于提高燃料燃烧反应速率。此外,在当量比为 0.6,从整体温度分布来看,等离子体耦合甲烷助燃 Case2 和 Case3 的火焰温度比较低,可能是由于此时等离子体功率比较低,产生的活性基团较少,等离子体助燃下的化学效应减弱,导致火焰温度较低。当当量比分别为 0.8、1.0 和 1.2 时的氨火焰温度随着轴向距离的增加,Case6 工况下氨燃烧的火焰温度最高,火焰最高温度相较于 Case1 工况

的氨燃烧高 21.8% 左右, 但比 Case5 工况下的温度仅高出 100 K 左右。总之, Case5 和 case6 工况对提升氨的燃烧性能比较有利。

## 2.4 不同助燃方式下氨燃烧尾气排放

$\text{NO}_x$  的生成量作为氨燃烧过程的核心表征参数, 是评估氨燃烧清洁性的重要指标。图 12 展示了不同助燃方式下氨燃烧尾气中  $\text{NO}$  排放质量浓度和  $\text{O}_2$  体积分数随着当量比的变化规律。由图 12a) 可见, 不同助燃工况下  $\text{NO}$  排放质量浓度都随着当量比的增加表现出先上升后下降的变化趋势, 最大  $\text{NO}$  质量浓度对应的当量比为 0.6 左右, 当量比进一步增加时,  $\text{NO}$  排放量显著减少, 在  $\varphi=2.0$  时基本可以实现  $5 \text{ mg/m}^3$  的相对较低的  $\text{NO}$  排放量。当量比  $\varphi=0$  时, 即未向燃烧器添加氨燃料时, 纯甲烷燃烧产生的  $\text{NO}$  几乎为 0, 而添加了等离子体的甲烷燃烧尾气  $\text{NO}$  质量浓度在  $855\sim 4\,000 \text{ mg/m}^3$ , 这表明热态  $\text{NO}$  是在空气中形成的, 滑动电弧的应用增加了纯甲烷火焰的  $\text{NO}$  排放量。在类似的等离子体辅助甲烷燃烧火焰研究中, Choe<sup>[27]</sup>和 Wookyung<sup>[28]</sup>等人发现纳秒脉冲等离子体会显著增加  $\text{NO}_x$  排放量, 这和本研究的实验结果是相符合的。对于不添加氨的甲烷旋流火焰, 应用滑动电弧后  $\text{NO}$  排放量升高的原因可能是火焰温度的升高。在氨燃烧热效应分析中可知, 采用  $\text{OH}$  谱线拟合获得等离子体射流区火焰温度可达 3 000 K 以上, 高温会促进热力型  $\text{NO}$  的生成<sup>[29]</sup>, 因此滑动电弧作用下会导致尾气中  $\text{NO}$  排放量的增加。

一旦当量比大于零 ( $\varphi>0$ ), 即向燃烧器添加氨燃料时, 除了热力型  $\text{NO}$  外, 燃烧火焰中还会生成燃料型  $\text{NO}$ 。在  $0<\varphi\leq 0.6$  条件下, 各种助燃工况下的氨燃烧尾气  $\text{NO}$  质量浓度都随着当量比的增加而显著上升, 基本都达到  $3\,000\sim 7\,000 \text{ mg/m}^3$ 。这主要是因为此时存在大量的  $\text{O}$ 、 $\text{OH}$  自由基,  $\text{N}$ 、 $\text{NH}$ 、 $\text{NH}_2$  与其反应形成  $\text{HNO}$  从而产生  $\text{NO}$ <sup>[30]</sup>。 $\text{HNO}$ 、 $\text{NH}$  和  $\text{N}$  都是  $\text{NO}$  形成的原因, 但是  $\text{HNO}$  对  $\text{NO}$  形成的贡献为 70%, 而  $\text{N}$  自由基对  $\text{NO}$  生成的贡献为 10%~15%<sup>[31]</sup>。上述主要反应路径为:



但在此当量比条件下, 相比于甲烷助燃 Case1 和等离子体助燃 Case6 的氨燃烧, 等离子体耦合甲烷助燃 Case3—Case5 氨燃烧尾气  $\text{NO}$  排放量更高。

可能是因为燃烧火焰中存在大量的  $\text{HCN}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{OH}$  等自由基可将  $\text{HCN}$  转化为  $\text{NO}$ <sup>[32]</sup>, 导致  $\text{NO}$  排放增加。

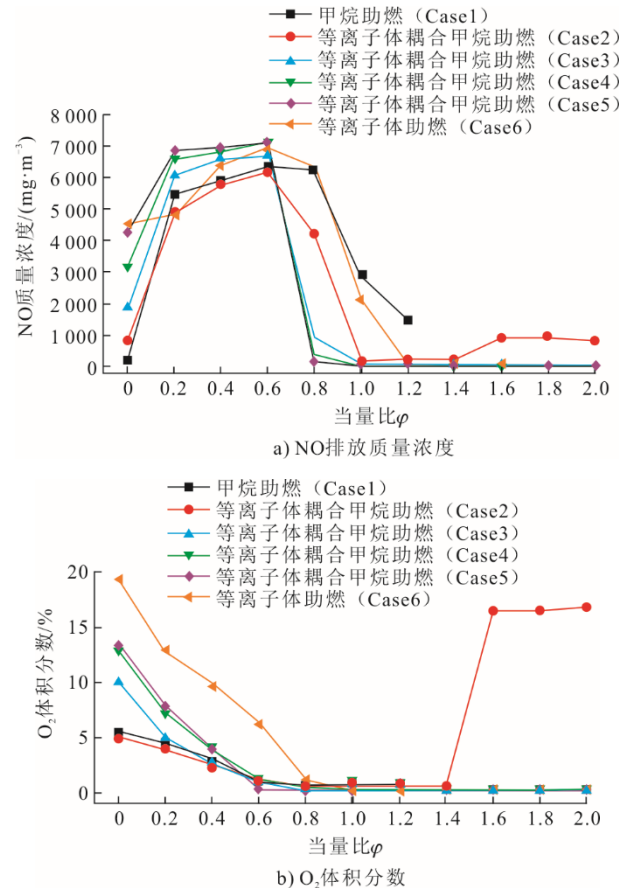
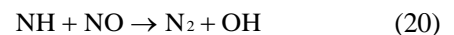
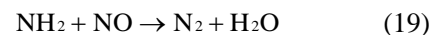


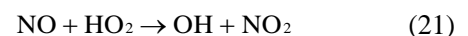
图 12 不同助燃方式下氨火焰尾气中  $\text{NO}$  和  $\text{O}_2$  含量随当量比变化

Fig.12 Changes of  $\text{NO}$  mass concentration and  $\text{O}_2$  volume fraction in ammonia flames with equivalence ratio in different combustion enhancement methods

在  $\varphi>0.6$  时,  $\text{NO}$  质量浓度随着当量比的提高开始呈现显著降低的趋势。这可能是因为  $\text{HNO}$  生成量减少, 导致由  $\text{N}$ 、 $\text{NH}$ 、 $\text{NH}_2$  氧化反应产生的  $\text{NO}$  含量降低。并且在富燃条件下,  $\text{N}$ 、 $\text{NH}$  与  $\text{NH}_2$  会与  $\text{NO}$  直接反应, 导致由该类自由基生成的  $\text{NO}$  质量浓度进一步降低。主要消耗  $\text{NO}$  反应路径为<sup>[33]</sup>:



此外, 相对于应用了等离子体助燃的工况来说, 等离子体区域会形成大量的  $\text{HO}_2$  来消耗  $\text{NO}$ <sup>[34]</sup>。存在如下反应路径来减少  $\text{NO}$  排放:



更为值得注意的是, 当量比为 0.8~1.2 时, 相较于甲烷助燃 Case1 和等离子体助燃 Case6 的氨燃

烧, 等离子体耦合甲烷助燃 Case5 的 NO 质量浓度最低, 可达到  $100 \text{ mg/m}^3$  以下。这可能是两方面原因造成的, 一方面, Case5 产生了比 Case1 更多的  $\text{NH}_2$ 、 $\text{NH}$  自由基, 增强了  $\text{NH}_2$ 、 $\text{NH}$  还原 NO 的化学反应, 从而降低了 NO 排放量<sup>[35]</sup>; 另一方面, Case6 的等离子体射流区温度最高, 产生了更多的热力型 NO, 因此其 NO 排放量也相对较高。当量比为 1.4~2.0 时, Case2 的 NO 质量浓度又上升至  $1000 \text{ mg/m}^3$  左右。

由图 12b) 可见, 尾气中的  $\text{O}_2$  体积分数进一步反映了氨燃烧特性。当量比从 0 增加到约 0.6~0.8 的过程中,  $\text{O}_2$  体积分数几乎呈线性下降。等离子体耦合甲烷助燃 Case5 的  $\text{O}_2$  体积分数低于等离子体助燃 Case6 的。此外, 在  $\varphi < 0.6$  时, 相比于甲烷助燃 Case1, 等离子体耦合甲烷助燃 Case2 条件下氨燃烧的  $\text{O}_2$  消耗更快。但是, 当量比进一步增加时, Case2 的氨火焰尾气中  $\text{O}_2$  体积分数会比较高, 特别是在当量比为 1.6~2.0 下, 氨火焰尾气中  $\text{O}_2$  体积分数达到了 16% 左右, 这是由于此时大部分氨气未燃尽。

### 3 结论

在与高频交流电驱动的旋转滑动电弧等离子体放电装置相耦合的旋流燃烧器上进行了氨燃烧的实验研究, 研究甲烷助燃 Case1 和等离子体助燃 Case6 以及等离子体耦合甲烷助燃 Case2—Case5 对氨燃烧特性及污染物排放特性的影响。从实验结果中得出主要结论如下。

1) 等离子体耦合甲烷助燃 Case2—Case5 以及等离子体助燃 Case6 都可以有效地改善氨的燃烧特性, 扩展稳燃极限范围。与甲烷助燃 Case1 当量比为 0~1.2 的稳燃范围相比, Case2—Case6 的氨燃烧稳燃极限范围均可扩展到当量比为 0~5.0。

2) 在施加了等离子体条件下, 与纯空气放电相比, 添加氨燃料会产生新的  $\text{NH}$  和  $\text{H}_\alpha$  谱线, 并且  $\text{OH}$ 、 $\text{O}$  自由基含量会显著增强。相比于等离子体助燃 Case6, 等离子体耦合甲烷助燃 Case5 不仅生成新的活性物质  $\text{CH}$ 、 $\text{CN}$ , 而且产生了更多的  $\text{OH}$ 、 $\text{H}$  自由基, 从而增强了等离子体助燃中的化学效应。

3) 相比于甲烷助燃 Case1, 等离子体耦合甲烷助燃 Case5 以及等离子体助燃 Case6 都可以更加有效地提升氨火焰温度。在  $\varphi=0.6$  时, Case5 的火焰温度最高, 可达  $2030 \text{ K}$  左右,  $\varphi=0.8\sim 1.2$  时, Case5 的火焰温度仅比 Case6 低  $100 \text{ K}$  左右。

4) 在  $\varphi=0\sim 0.6$  的条件下, 各种助燃方式下的氨

燃烧 NO 排放质量浓度都在  $3000\sim 7000 \text{ mg/m}^3$ 。然而, 当  $\varphi=0.8\sim 2.0$  时, 等离子体耦合甲烷助燃 Case5 是降低氨燃烧尾气 NO 排放的最佳方式。在  $\varphi=0.6$  增加到  $\varphi=0.8$  时, NO 排放质量浓度从超过  $7000 \text{ mg/m}^3$  快速降低至  $100 \text{ mg/m}^3$  以下。

### [参考文献]

- [1] 丁先, 李汪繁, 马达夫. 燃煤机组耦合氨燃料燃烧特性及经济性探讨[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 20-28.  
DING Xian, LI Wangfan, MA Dafu. Discussion on coal-fired units coupled with ammonia fuel: combustion characteristics and economy[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 20-28.
- [2] 周上坤, 杨文俊, 谭厚章, 等. 氨燃烧研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4164-4182.  
ZHOU Shangkun, YANG Wenjun, TAN Houzhang, et al. Research progress of ammonia combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4164-4182.
- [3] RAHINOV I, GOLDMAN A, CHESKIS S. Absorption spectroscopy diagnostics of amidogen in ammonia-doped methane/air flames[J]. Combustion and Flame, 2006, 145(1/2): 105-116.
- [4] AN Z H, ZHANG M, ZHANG W J, et al. Emission prediction and analysis on  $\text{CH}_4/\text{NH}_3$ /air swirl flames with LES-FGM method[J]. Fuel, 2021, 304: 121370.
- [5] WEI Z, ZHANG X, WANG L, et al. Transport and reactivity effects of  $\text{H}_2$  additive on NO formation of  $\text{NH}_3$ - $\text{H}_2$  counterflow diffusion flames[J]. Fuel, 2024, 375: 132543.
- [6] ZHOU S, CUI B, YANG W, et al. An experimental and kinetic modeling study on  $\text{NH}_3$ /air,  $\text{NH}_3/\text{H}_2$ /air,  $\text{NH}_3/\text{CO}$ /air, and  $\text{NH}_3/\text{CH}_4$ /air premixed laminar flames at elevated temperature[J]. Combustion and Flame, 2023, 248: 112536.
- [7] XU C, QINGMING L, JINXIANG H, et al. The characteristics of flame propagation in ammonia/oxygen mixtures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 363: 187-196.
- [8] WANG S, WEI X, GU M Y, et al. Flame characteristics and NO emission law of sliding arc plasma-assisted ammonia combustion[J]. Combustion and Flame, 2025, 274: 114000.
- [9] WANG Y, SUN J, LIU Q, et al.  $\text{NO}_x$  formation mechanism of plasma assisted ammonia combustion: a reactive molecular dynamics study[J]. Energy, 2024, 293: 130706.
- [10] JINHOON C, WENTING S, TIMOTHY O, et al. Plasma assisted ammonia combustion: simultaneous  $\text{NO}_x$  reduction and flame enhancement[J]. Combustion and Flame, 2021, 228: 430-432.
- [11] GIOVANNI BATTISTA A, GIANCARLO S, RAFFAELE R, et al. Ammonia/Methane combustion: Stability and  $\text{NO}_x$  emissions[J]. Combustion and Flame, 2022, 241: 112071.
- [12] FILIPE R C, ROCHA R C, OLIVEIRA P M R, et al. Experimental and kinetic modelling investigation on NO, CO and  $\text{NH}_3$  emissions from  $\text{NH}_3/\text{CH}_4$ /air premixed flames[J]. Fuel, 2019, 254: 115693.
- [13] YUZE S U N, TAO C A I, MOHAMMAD S, et al. RANS simulations on combustion and emission characteristics of a premixed  $\text{NH}_3/\text{H}_2$  swirling flame with reduced chemical

- kinetic model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(12): 17-27.
- [14] LIU Z, ZHANG Y, LI W, et al. Self-promoted fuel pyrolysis under oxygen enrichment enables clean and efficient ammonia combustion[J]. The Innovation Energy, 2024, 1(1): 100006.
- [15] SUN J, HUANG Q, TANG Y, et al. Stabilization and emission characteristics of gliding arc-assisted  $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{air}$  premixed flames in a swirl combustor[J]. Energy & Fuels, 2022, 36(15): 8520-8527.
- [16] TANG Y, XIE D, SHI B, et al. Flammability enhancement of swirling ammonia/air combustion using AC powered gliding arc discharges[J]. Fuel, 2022, 313: 122674.
- [17] KIM G T, PARK J, CHUNG S H, et al. Synergistic effect of non-thermal plasma and  $\text{CH}_4$  addition on turbulent  $\text{NH}_3/\text{air}$  premixed flames in a swirl combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 49: 521-532.
- [18] MIKOFSKI M, WILLIAMS T, SHADDIX C, et al. Flame height measurement of laminar inverse diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 2006, 146(1/2): 63-72.
- [19] 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.
- [20] NI G, ZHAO P, CHENG C, et al. Characterization of a steam plasma jet at atmospheric pressure[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2012, 21(1): 015009.
- [21] ZHANG J, XIAO D, FANG S, et al. Characteristics of low power  $\text{CH}_4/\text{air}$  atmospheric pressure plasma jet[J]. Plasma Science and Technology, 2015, 17(3): 202-208.
- [22] KONG C, GAO J, ZHU J, et al. Characteristics of a gliding arc discharge under the influence of a laminar premixed flame[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 403-409.
- [23] BRUGGEMAN P, SCHRAM D C. On OH production in water containing atmospheric pressure plasmas[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2010, 19(4): 045025.
- [24] BAK M S, DO H, MUNGAL M G, et al. Plasma-assisted stabilization of laminar premixed methane/air flames around the lean flammability limit[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(10): 3128-3137.
- [25] SUN J, BAO Y, RAVELID J, et al. Application of emission spectroscopy in plasma-assisted  $\text{NH}_3/\text{air}$  combustion using nanosecond pulsed discharge[J]. Combustion and Flame, 2024, 263: 113400.
- [26] XIA Y, SHEN Y, SAKAI K, et al. Emission characteristics of confined non-premixed ammonia-oxygen-nitrogen turbulent jet flames under oxygen-enriched conditions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2024, 40(1/2/3/4): 105704.
- [27] CHOE J, SUN W. Blow off hysteresis, flame morphology and the effect of plasma in a swirling flow[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(36): 365201.
- [28] WOOKYUNG K, JORDAN S, JEFFREY C. Plasma assisted combustor dynamics control[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3479-3486.
- [29] SHANG L, ZHELONG L, YUNLIANG Q, et al. Combustion and emission characteristics of a gasoline/ammonia fueled SI engine and chemical kinetic analysis of  $\text{NO}_x$  emissions[J]. Fuel, 2024, 367: 131516.
- [30] LINDSTEDT R P, LOCKWOOD F C, SELIM M A. Detailed kinetic modelling of chemistry and temperature effects on ammonia oxidation[J]. Combustion Science and Technology, 1994, 99(4/5/6): 253-276.
- [31] 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.
- [32] PER G K, PETER G, KIM D-J. Nitrogen chemistry during burnout in fuel-staged combustion[J]. Combustion and Flame, 1996, 107(3): 211-222.
- [33] AYMAN M E, SHIXING W, THIBAUT F G, et al. Review on the recent advances on ammonia combustion from the fundamentals to the applications[J]. Fuel Communications, 2022, 10: 100053.
- [34] HONGTAO Z, XINGQIAN M, ARIC C R, et al. Kinetic study of plasma-assisted *n*-dodecane/ $\text{O}_2/\text{N}_2$  pyrolysis and oxidation in a nanosecond-pulsed discharge[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 6521-6531.
- [35] KIM G T, PARK J, CHUNG S H, et al. Effects of non-thermal plasma on turbulent premixed flames of ammonia/air in a swirl combustor[J]. Fuel, 2022, 323: 124227.

(责任编辑 杜亚勤)