

## 添加 H<sub>2</sub> 对 NH<sub>3</sub>/空气旋流火焰 OH<sup>\*</sup>化学发光的影响

陈达南<sup>1,2</sup>, 李 军<sup>1,2,3</sup>, 李 兴<sup>1</sup>, 郭怡君<sup>1</sup>, 赖诗妮<sup>1,2</sup>, 黄宏宇<sup>1,2</sup>, 小林敬幸<sup>4</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学技术大学能源科学与技术学院, 广州 510640;

3. 江西省碳中和研究中心, 南昌 330096; 4. 名古屋大学化学工程系, 名古屋 464-8603)

**摘要:** 火焰的化学发光特性是了解氨作为无碳替代燃料时的火焰结构和反应机理的基本方法。本研究通过实验获得了不同当量比和 H<sub>2</sub> 添加量的 NH<sub>3</sub>/空气旋流火焰中的 OH<sup>\*</sup>化学发光分布和形成特征, 比较了不同条件下 OH<sup>\*</sup>层分布特性及火焰燃烧现象的影响。结果表明, 随着当量比的增加, OH<sup>\*</sup>辐射峰增加, 且当量比的增加显著增强了 OH<sup>\*</sup>的整体化学发光强度。在贫燃料火焰中, 当量比效应大于 NH<sub>3</sub> 稀释效应, 而在当量和富燃料条件下, 这两种效应相当。随着掺氢比例的增加, OH<sup>\*</sup>化学发光强度逐渐增加, OH<sup>\*</sup>峰值位置逐渐从下游火焰向上游移动。

**关键词:** OH<sup>\*</sup>化学发光; 氨燃烧; 当量比; 加氢比例; 旋流火焰

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2024)05-0466-07

## Effects of H<sub>2</sub> Addition on the OH<sup>\*</sup> Chemiluminescence of NH<sub>3</sub>/Air Swirl Flame

Chen Da'nan<sup>1,2</sup>, Li Jun<sup>1,2,3</sup>, Li Xing<sup>1</sup>, Guo Yijun<sup>1</sup>, Lai Shini<sup>1,2</sup>,

Huang Hongyu<sup>1,2</sup>, Kobayashi Noriyuki<sup>4</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. School of Energy Science and Engineering, University of Science and Technology of China,

Guangzhou 510640, China;

3. Jiangxi Carbon Neutralization Research Center, Nanchang 330096, China;

4. Department of Chemical Engineering, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan)

**Abstract:** The chemiluminescence properties of flames are fundamental to understanding the flame structure and reaction mechanism of ammonia as a carbon-free alternative fuel. In this study, the distribution and formation characteristics of OH<sup>\*</sup> chemiluminescence in NH<sub>3</sub>/air swirling flames with different equivalence ratios and H<sub>2</sub> addition ratios were obtained experimentally, and the effects of OH<sup>\*</sup> layer distribution characteristics and flame combustion phenomena were compared under different conditions. The results show that the peak value of OH<sup>\*</sup> radiation increases with the increase of equivalence ratio, and the increase of equivalence ratio significantly enhances the overall chemiluminescence intensity of OH<sup>\*</sup>. In a lean fuel flame, the equivalence ratio effect is greater than the NH<sub>3</sub> dilution effect, while the two effects are comparable under equivalence and rich fuel conditions. With the increase of hydrogen addition ratio, the OH<sup>\*</sup> chemiluminescence intensity gradually increases, and the position of maximum OH<sup>\*</sup> gradually moves from the downstream flame to the upstream.

收稿日期: 2023-09-01.

基金项目: 江西省碳中和研究中心双碳科技创新项目(2022JXST03); 广东省基础与应用基础研究基金(2022B1515120047).

作者简介: 陈达南(1995—), 男, 博士研究生, chendn@ms.giec.ac.cn.

通信作者: 李 军, 男, 博士, 研究员, lijun@ms.giec.ac.cn.

**Keywords:** OH\* chemiluminescence; ammonia combustion; equivalence ratio; hydrogen addition ratio; swirl flame

近几十年来, 鉴于能源危机和污染物排放, 替代和清洁燃料研究引起了越来越多的关注. 学者们提出了许多替代燃料并对其进行了研究, 如生物燃料、天然气、氨(NH<sub>3</sub>)和氢气(H<sub>2</sub>)等<sup>[1-3]</sup>. 在这些候选者中, 氨是一种无碳燃料, 具有高能量密度、易液化、储氢能力高达 17.8%<sup>[4-5]</sup>等特点. 工业上氨主要是在 450 ~ 500 °C、20 MPa 的高温高压条件下, 通过成熟的 Haber-Bosch 工艺合成. 该工艺的原料是来自天然气、煤或石油的氢气, 以及来自空气的氮气<sup>[6-7]</sup>. 随着合成氨技术的发展, 在未来甚至可以通过太阳能等可再生能源合成氨, 从而实现无碳的环保工艺生产氨<sup>[8]</sup>. 与丙烷相似, 氨可以以液态形式在室温和 0.8 MPa 条件下储存, 且其单位储存能量的成本仅为氢气的三分之一<sup>[9]</sup>. 现有成熟的氨生产工艺和运输技术将大大降低投资成本, 从而提高氨作为替代化石燃料的竞争力.

然而, 氨燃料的有效利用仍然非常具有挑战性. 与传统的碳氢燃料相比, 纯氨具有相对较低的层流燃烧速度和热值、较长的点火延迟、较高的点火能量和较窄的可燃极限范围, 这些特性使纯氨的燃烧更加困难<sup>[10-13]</sup>. 有学者认为氢气所具有的高燃烧速度、扩散性好、低点火能等特点非常适合与氨混合燃烧, 以强化氨燃烧. 实验研究表明, 在氨中加入燃烧性能更好的氢气, 可以有效改善氨燃料的燃烧, 提高燃烧速度, 拓宽燃烧极限<sup>[14-18]</sup>. 与此同时, 对氨燃烧器设计的进一步优化也是十分必要的. 旋流燃烧器由于其高火焰稳定性, 会产生一个再循环区, 在不同压力下稳定氨/空气湍流火焰, 因此旋流燃烧器用于氨燃烧具有一定前景<sup>[19-20]</sup>.

对于氨旋流火焰, 火焰稳定和熄火的过程在很大程度上取决于火焰的流动结构和特性. 光学诊断技术是一种快速发展的基于化学发光的火焰监测方法. 激发自由基(如 OH\*, CH\*)去激发产生的辐射发射不仅可以反映燃烧现象的变化, 还可以提供与火焰燃烧状态相关的特征参数<sup>[21-23]</sup>. 通过检测和分析这些自由基的发射信息, 可以得到火焰结构和反应特性<sup>[24-25]</sup>. 李新宇等<sup>[26]</sup>利用紫外成像系统研究了不同气体流速下火焰中的 OH\* 排放分布, 结果表明 OH\* 分布与氧气流速密切相关, 可用于表征火焰的反应区.

然而, 文献中有关 NH<sub>3</sub>/空气旋流火焰化学发光的实验研究很少. 本研究利用 CCD 相机成像系统获得了不同当量比和 H<sub>2</sub> 添加比例的 NH<sub>3</sub>/空气预混旋流燃烧火焰的化学发光 OH\* 分布, 分析了 OH\* 化学

发光的分布和形成特征. 比较了当量比和 H<sub>2</sub> 添加比例对 OH\* 层分布特性和燃烧现象的影响.

## 1 实验方法

### 1.1 燃烧装置

本研究构建了一套 NH<sub>3</sub>/空气旋流火焰 OH\* 化学发光监测系统, 研究使用的实验装置如图 1 所示. 本实验使用的 NH<sub>3</sub>/空气旋流燃烧器直径为 5 cm, 高度为 8 cm, 10 组旋流叶片, 旋流角约为 45°, 旋流数为 0.778. 燃料和空气的预混合气体从 4 均匀分布且对称的入口进入燃烧器内.

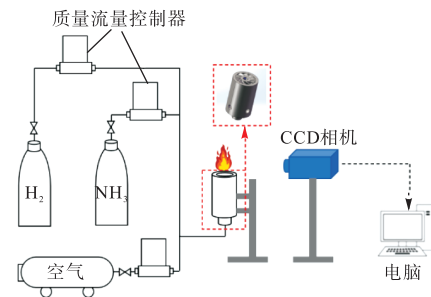


图 1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

对于 NH<sub>3</sub>/空气火焰, 当量比在 0.8 ~ 1.2 的范围内变化, 火焰逐渐从贫燃料转变为富燃料. 当量比由公式(1)计算:

$$\Phi = \frac{m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}}}{(m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}})_{\text{stoic}}} \quad (1)$$

式中:  $m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}}$  是基于燃料和空气实际流量的气体质量比,  $(m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}})_{\text{stoic}}$  是燃料完全消耗时的化学计量比.

实验燃料采用纯度为 99.999% 的 NH<sub>3</sub>(粤佳气体公司)及纯度为 99.999% 的 H<sub>2</sub>(盛盈气体公司), 压缩的干燥空气(21.0% O<sub>2</sub>和 79.0% N<sub>2</sub>)由空气压缩机供应. H<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>和空气流量由商业质量流量控制器(Azbil, CMS0050)调节, 精度为满量程的 ±1.0%. 实验条件、燃料、进气速度和雷诺数总结在表 1 中. 表 1 中的雷诺数  $Re$  由公式(2) ~ (3)计算:

$$Re = \frac{D\bar{v}\bar{\rho}}{\bar{\mu}} \quad (2)$$

$$\bar{\mu} = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum y_i M_i^{1/2}} \quad (3)$$

式中:  $D$  为喷嘴等效直径;  $\rho$  为燃料和氧化剂的平均密度;  $v$  为平均速度;  $\mu$  为燃料和氧化剂的平均黏度;  $y_i$  为组分  $i$  的摩尔分数;  $M_i$  为组分  $i$  的摩尔质量<sup>[27]</sup>.

表 1 不同 H<sub>2</sub> 添加比例的入口实验条件  
Tab.1 Inlet experimental conditions with different H<sub>2</sub> addition ratios

序号	当量比	$v_{\text{NH}_3} / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_{\text{H}_2} / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_{\text{air}} / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	$X_{\text{NH}_3} / \%$	$Re$	$P/\text{kW}$
1	1.2	4	1	13.9	80	1 390	1.18
2		3.5	1.5	13.4	70	1 310	1.16
3		3	2	12.9	60	1 240	1.15
4	1.1	4	1	15.1	80	1 480	1.18
5		3.5	1.5	14.6	70	1 410	1.16
6		3	2	14.1	60	1 330	1.15
7	1.0	4	1	16.7	80	1 600	1.18
8		3.5	1.5	16.1	70	1 520	1.16
9		3	2	15.5	60	1 440	1.15
10	0.9	4	1	18.5	80	1 740	1.18
11		3.5	1.5	17.9	70	1 650	1.16
12		3	2	17.2	60	1 570	1.15
13	0.8	4	1	20.8	80	1 910	1.18
14		3.5	1.5	20.1	70	1 820	1.16
15		3	2	19.3	60	1 730	1.15

### 1.2 化学发光测量方法

火焰的化学发光是通过一个由 1 056 × 1 027 风冷 CCD 摄像机 (FLI, e2v CCD 47-10) 和一个滤光片的紫外透镜组成的成像系统获得的. 相机的光谱响应范围为 200 ~ 1 100 nm, 滤光片的响应波长为 (310 ± 10) nm. 主要的 OH\* 辐射存在于 UV 区域 (280 ~ 350 nm), 最强的辐射出现在 309 nm 处<sup>[28]</sup>. 在本研究中, 图像的空间分辨率约为 0.084 mm.

## 2 结果与讨论

### 2.1 光谱发射

NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/空气火焰的 OH\* 的化学发光的二维分布如图 2 所示. 本研究的 OH\* 的发光分布是在 1 500 ms

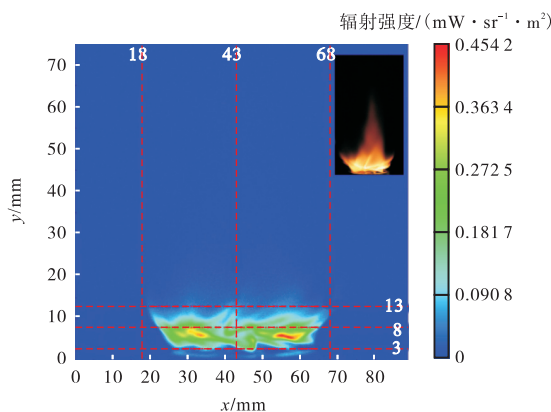


图 2  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$ 、 $\Phi = 0.8$  时 NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/空气火焰的 OH\* 的辐射分布  
Fig.2 Radiation distribution of OH\* of NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/air flame at  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$ ,  $\Phi = 0.8$

的 CCD 曝光时间内对同一火焰进行 10 次平均得到的. 从图 2 中的直接拍摄可以看出, NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/空气火焰呈现橙色/黄色色调, 这通常是由于 NH<sub>2</sub>\* 激发自由基和过热水蒸气光谱的发射<sup>[29]</sup>. 为直观地得出不同径向位置的 OH\* 分布, 本研究分别设置了离燃烧器表面 3 mm、8 mm、13 mm 处以代表火焰的上游、剧烈反应区及火焰末端. OH\* 的主要分布区域在内燃烧器表面 3 ~ 8 mm 之间.

从图 3 可以看出, 每个峰对应每个通道形成的火焰. 水平位置 3 mm 时, OH\* 峰最窄, 而 13 mm 处则相反, 火焰整体形状向下游逐渐扩大. 3 mm 和 8 mm 处的 OH\* 分布峰值高于 13 mm 处的值, 说明该条件下火焰的强反应区在 3 ~ 8 mm 之间.

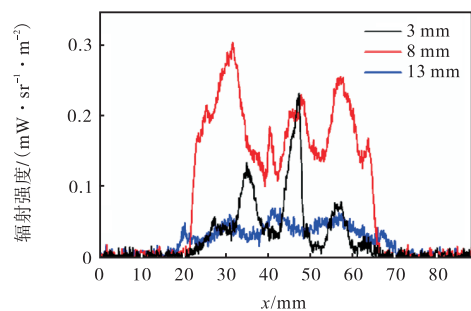


图 3  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$ 、 $\Phi = 0.8$  时 NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub> 空气火焰的 OH\* 的径向分布  
Fig.3 Radial OH\* radiation distribution at  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$ ,  $\Phi = 0.8$

### 2.2 当量比的影响

图 4 显示了代表贫燃料、富燃料和当量比 3 种条件的 OH\* 分布和直拍火焰图像. 从直拍的图像来看,

随着当量比的增加, NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/空气火焰的末端延伸得更长, 在火焰的中心形成了一个循环区, 这是由于轴向动量小于中心再循环产生的反向压力而形成的. 随着当量比的增加, OH<sup>\*</sup> 辐射峰值越大. 从 OH<sup>\*</sup> 分布图可以看出, 这 3 种情况下的 OH<sup>\*</sup> 分布差异很大. 贫燃料条件下, 整体火焰相对伸长, 各通道火焰长度较长, OH<sup>\*</sup> 高浓度区域相对分散. 随着当量比的增加, OH<sup>\*</sup> 浓度梯度的变化也更加显著. 在等效条件下, OH<sup>\*</sup> 分布比较集中; 而在富燃料状态下, 火焰底部

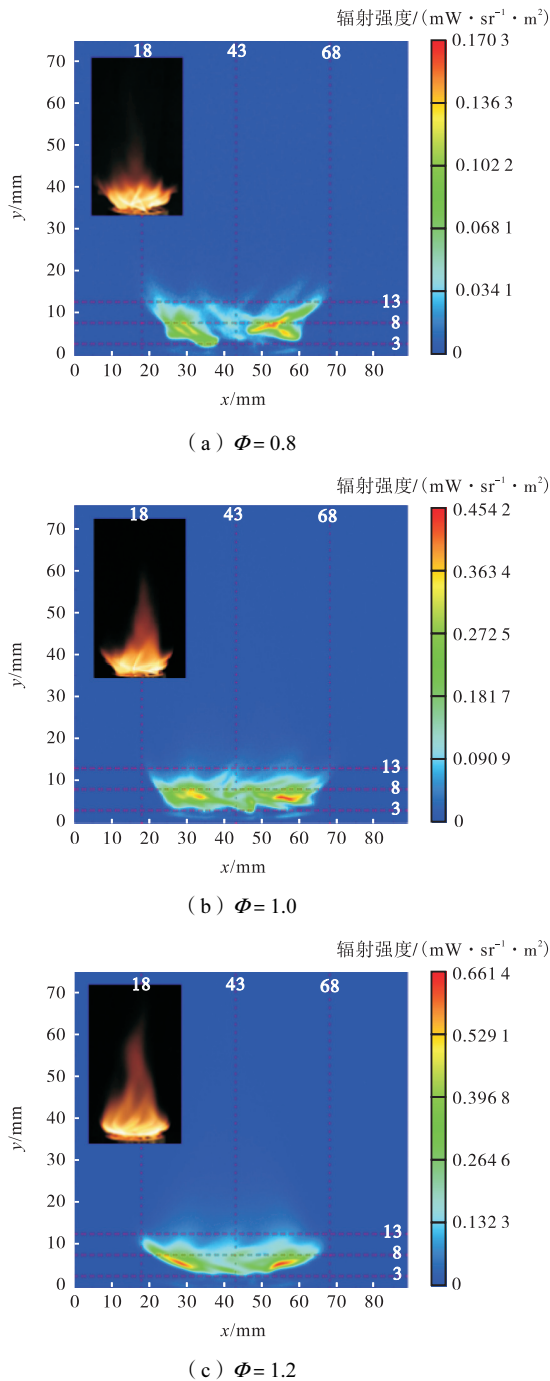


图 4  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$  时 NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/空气火焰 OH<sup>\*</sup> 分布

Fig.4 NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/air flame OH<sup>\*</sup> distribution when  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$

有较明显的上升, 且火焰底部两端较窄, 形成“倒锥”形状. 在同等条件下, 火焰外缘与火焰根部形成的夹角角度最小, 而在富燃料条件下最大.

图 5 显示了  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$  时, NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/空气火焰在不同径向位置的 OH<sup>\*</sup> 分布. 图 5(a) 显示, 在距离燃烧器表面 3 mm 处, 当量比为 1 时, OH<sup>\*</sup> 强度最高, 表明此时火焰的强烈反应区域更靠近燃烧器. 火焰底部的宽度在同等条件下也是最宽的, 在燃料丰富的情况下只有 22 mm 左右. 在距离燃烧器表面 8 mm 处, 强度峰值随当量比的增大而增大, 火焰宽度趋势相同, 但富燃料的火焰宽度和 OH<sup>\*</sup> 峰值最大, 贫燃料的火焰宽度和 OH<sup>\*</sup> 峰值最大. 在距离燃烧器表面 13 mm 处, 仍有少量 OH<sup>\*</sup> 分布, 其趋势与 8 mm 处基本相同.

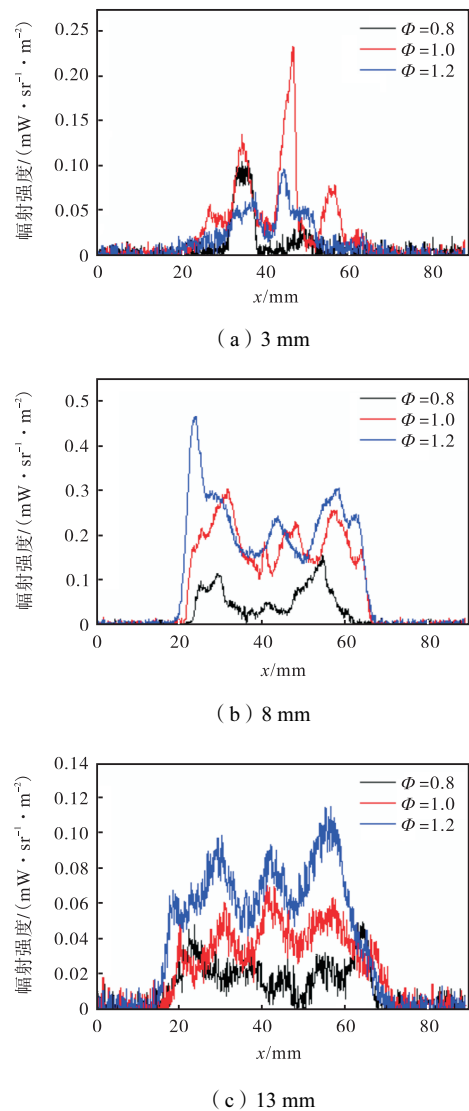


图 5  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$  时 NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/空气火焰在不同径向位置的 OH<sup>\*</sup> 分布

Fig.5 OH<sup>\*</sup> distribution of NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/air flame at different radial positions when  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$

### 2.3 氢气添加比例的影响

为了探索不同氢气添加比例对  $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{空气}$  火焰的影响,分别在贫燃料、当量燃料和富燃料 3 种条件下添加 20%、30% 和 40% 氢气,获得了不同径向位置的  $\text{OH}^*$  分布,如图 6 所示. 图 6(a) ~ (c)、(d) ~ (f) 和 (g) ~ (i) 分别表示当量比为 0.8、1.0 和 1.2 时在 3 个径向位置的  $\text{OH}^*$  分布. 在距离燃烧器表面 3 mm 处,当  $X_{\text{NH}_3} = 60\%$  时,  $\text{OH}^*$  峰值最高,径向长度最长,尤

其是在富燃料条件下,这意味着当  $X_{\text{NH}_3} = 60\%$  时,火焰更接近燃烧器表面. 在距离燃烧器表面 8 mm 处,当  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$  时,  $\text{OH}^*$  的峰值最高,当燃料贫乏时,径向长度最小,但在同等和富燃料条件下,径向长度最大. 在距离燃烧器表面 13 mm 处,  $X_{\text{NH}_3} = 80\%$  的  $\text{OH}^*$  峰值仍然最高,表明在该氢气添加比例下火焰高度最高. 在燃料丰富的条件下,火焰呈倒锥形,因此在距离燃烧器表面 13 mm 位置时,径向长度较长.

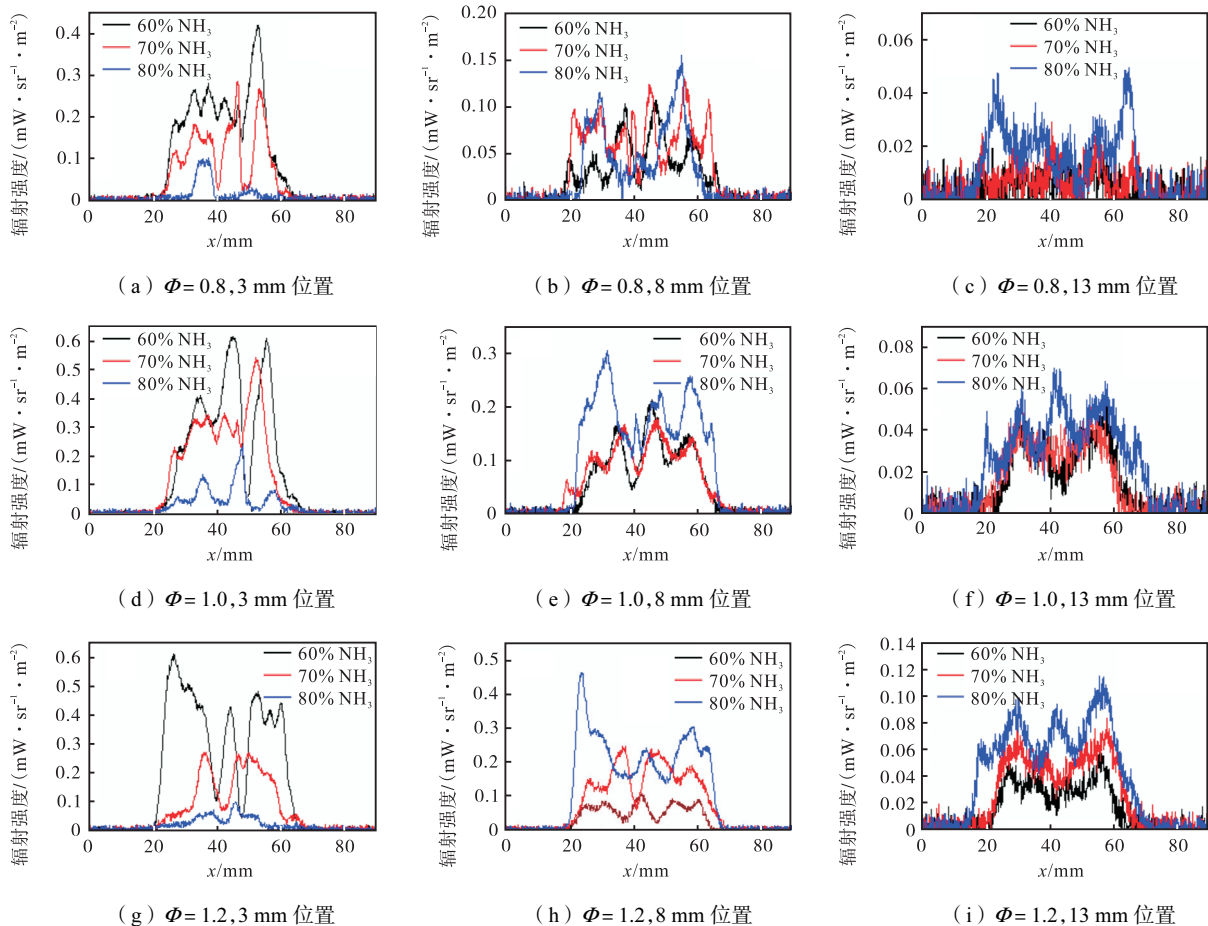


图 6 不同径向位置  $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{空气}$  火焰  $\text{OH}^*$  分布的比较

Fig.6 Comparison of  $\text{OH}^*$  distribution of  $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{air}$  flame at different radial positions

随着  $\text{NH}_3$  浓度的增加,  $\text{OH}^*$  化学发光强度迅速下降,下降梯度逐渐变大,且不趋于稳定,如图 7 所示. 与当量燃料和富燃料相比,贫燃料条件下,辐射峰值随  $\text{NH}_3$  浓度的增加而减小. 当量比分别为 0.8 和 0.9 时,辐射亮度分别降低 57.5% 和 48.2%. 当量比的增加更显著地增强了  $\text{OH}^*$  的整体化学发光强度,但这种增强受到  $\text{NH}_3$  浓度升高的限制. 由于  $\text{NH}_3$  的热效应,火焰温度降低,导致化学反应强度降低. 对于贫燃料火焰,当量比从 0.8 增加到 0.9 时,峰值强度增加 28.3%. 当  $X_{\text{NH}_3}$  从 60% 增加到 70% 时,峰值强度降低 18%,这表明在贫乏火焰中,当量比效应大于  $\text{NH}_3$  稀释效应,而这两种效应在当量和富燃料条件下

具有可比性.

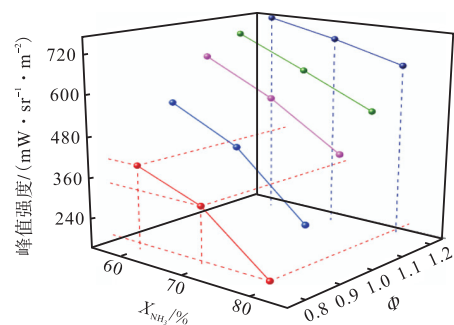


图 7  $\text{OH}^*$  的化学发光峰值强度

Fig.7 Chemiluminescence peak radiance of  $\text{OH}^*$

图 8 显示了不同氢气添加比例火焰中 OH\* 峰值轴向位置的变化. 可以发现, 随着 NH<sub>3</sub> 浓度的增加, OH\* 峰值在轴向上略有上升. 在贫燃料条件下, OH\* 峰值的轴向位置最高, 反观富燃料时 OH\* 峰值轴向位置离燃烧器表面最近, 这是因为在贫燃料条件时空气流量相对较大, 混合气体的总体流量也随之增大, 火焰受到了一定的推举导致 OH\* 峰值轴向位置升高. 进一步发现, OH\* 峰值轴向位置的升高在氨气比例在 70% ~ 80% 时候变化更大.

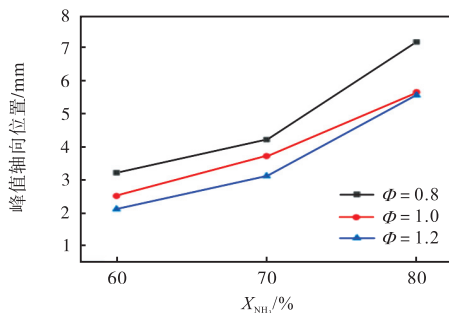


图 8 OH\* 峰值的轴向位置  
Fig.8 Axial position of OH\* peak

### 3 结 论

本研究采用 CCD 摄像机采集 OH\* 发光分布的图像, 探讨了不同当量比和氢气添加比例对氨/空气旋流火焰中 OH\* 化学发光分布特性的影响. 结果如下:

(1) 随着当量比的增大, NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/空气火焰的 OH\* 辐射峰值增大, 火焰中心形成循环区. 在同等条件下, 火焰外缘与火焰根部形成的夹角角度最小, 在富燃料条件下, 角度最大.

(2) 当量比的增加更显著地增强了 OH\* 的整体化学发光强度, 但这种增强受到 NH<sub>3</sub> 浓度升高的限制. 在贫燃料火焰中, 当量比效应大于 NH<sub>3</sub> 稀释效应, 而这两种效应在当量和富燃料条件下相当.

(3) 随着掺氢比例的增加, OH\* 化学发光强度逐渐增加, OH\* 峰值位置逐渐从下游火焰向上游移动.

#### 参考文献:

[1] Crabtree G W, Dresselhaus M S. The Hydrogen Fuel Alternative[J]. *Mrs Bulletin*, 2008, 33(4): 421-428.  
[2] Mendiara T, Glarborg P. Ammonia chemistry in oxy-fuel combustion of methane[J]. *Combustion & Flame*, 2009, 156(10): 1937-1949.  
[3] Lasocki J, Bednarski M, Sikora M. Simulation of ammonia combustion in dual-fuel compression-ignition en-

gine[J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2019, 214(1): 012081.  
[4] Chiuta S, Everson R C, Neomagus H, et al. Reactor technology options for distributed hydrogen generation via ammonia decomposition: A review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(35): 14968-14991.  
[5] 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. Research progress of ammonia combustion and reaction mechanism [J]. *Chemistry*, 2020, 83(06): 508-515 (in Chinese).  
[6] Brandhorst H, Tatarchuk B, Cahela D, et al. Ammonia: It's transformation and effective utilization [C]//6th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). 2008: 5610.  
[7] Li J, Lai S, Chen D, et al. A review on combustion characteristics of ammonia as a carbon-free fuel [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9: 760356.  
[8] Lu W, Xia M, Hong W, et al. Greening Ammonia toward the Solar Ammonia Refinery [J]. *Joule*, 2018, 2(6): 1055-1074.  
[9] Zamfirescu C, Dincer I. Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications[J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(5): 729-737.  
[10] Li J, Huang H, Noriyuki Kobayashi. Study on using hydrogen and ammonia as fuels: combustion characteristics and NO<sub>x</sub> formation[J]. *Int J Energy Res*, 2014, 38: 1214-1223.  
[11] 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.  
[12] 吉龙娟, 王金华, 胡光亚, 等. CH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub>/空气预混稀燃火焰结构及吹熄特性实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(5): 517-526.  
Ji Longjuan, Wang Jinhua, Hu Guangya, et al. Structure and blow-off characteristics of leanpremixed CH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub>/air flames[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(5): 517-526 (in Chinese).  
[13] 张芮琳, 王智化, 陈晨霖, 等. 氨煤掺混燃烧减碳方案经济性分析[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(6):

- 667-675.
- Zhang Ruilin, Wang Zhihua, Chen Chenlin, et al. Economic analysis of carbon reduction scheme for ammonia-coal blending combustion[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(6): 667-675 (in Chinese).
- [14] Lee J H, Kim J H, Park J H, et al. Studies on properties of laminar premixed hydrogen-added ammonia/air flames for hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(3): 1054-1064.
- [15] Mørch C S, Bjerre A, Gottrup M P, et al. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system[J]. *Fuel*, 2011, 90(2): 854-864.
- [16] Ezzat M F, Dincer I. Development and assessment of a new hybrid vehicle with ammonia and hydrogen[J]. *Applied Energy*, 2018, 219: 226-239.
- [17] Chen D, Li J, Li X, et al. Study on combustion characteristics of hydrogen addition on ammonia flame at a porous burner[J]. *Energy*, 2023, 263: 125613.
- [18] 程 康, 王 平, 毛晨林, 等. 氨气-氢气富燃湍流旋转火焰的大涡模拟[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(5): 561-568.
- Cheng Kang, Wang Ping, Mao Chenlin, et al. Large eddy simulation of rich ammonia-hydrogen turbulent swirling flame[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(5): 561-568 (in Chinese).
- [19] Wei X, Zhang M, An Z, et al. Large eddy simulation on flame topologies and the blow-off characteristics of ammonia/air flame in a model gas turbine combustor[J]. *Fuel*, 2021, 298: 120846.
- [20] Somarathne KDKA, Colson S, Hayakawa A, et al. Modelling of ammonia/air non-premixed turbulent swirling flames in a gas turbine-like combustor at various pressures[J]. *Combust Theor Model*, 2018, 22(5): 973-997.
- [21] Gaydon A G. *The Spectroscopy of Flames*[M]. London: Chapman and Hall, 1957.
- [22] Ballester J, García-Armingol T. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames[J]. *Prog Energ Combust*, 2010; 36: 375-411.
- [23] 王林森, 涂晓波, 车庆丰, 等. 基于 OH-PLIF 技术贫燃预混旋流火焰的结构特征研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(2): 193-199.
- Wang Linsen, Tu Xiaobo, Che Qingfeng, et al. Structure characteristics of lean-burn premixed swirl flame based on OH-PLIF technology[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(2): 193-199 (in Chinese).
- [24] Zhao M, Buttsworth D, Choudhury R. Experimental and numerical study of OH\* chemiluminescence in hydrogen diffusion flames [J]. *Combust & Flame*, 2018, 197: 369-377.
- [25] Kojima J, Ikeda Y, Nakajima T. Basic aspects of OH(A), CH(A), and C2(d) chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames[J]. *Combustion & Flame*, 2005, 140(1/2): 34-45.
- [26] 李新宇, 代正华, 徐月亭, 等. 甲烷/氧气层流反扩散火焰形态及滞后特性研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(2): 337-344.
- Li Xinyu, Dai Zhenghua, Xu Yueting, et al. Study on the morphology and hysteresis characteristics of methane/oxygen laminar anti-diffusion flame[J]. *Journal of Physics*, 2015, 64(02): 337-344 (in Chinese).
- [27] Yan G, Hu C, Guo Q, et al. Chemiluminescence and Structure Characteristics in CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> Coflow Jet Diffusion Flames[J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 1059-1064.
- [28] Zhang T, Guo Q, Lang Q, et al. Distribution characteristics of OH\*, CH\*, and C2\* luminescence in CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> co-flow diffusion flames [J]. *Energy Fuel*, 2012, 26: 5503-5508.
- [29] Zhu X, Khateeb A A, Roberts W L, et al. Chemiluminescence signature of premixed ammonia-methane-air flames[J]. *Combustion & Flame*, 2021, 231: 111508.