

滑动弧辅助甲烷/氨旋流火焰的稳燃和排放特性

孙锦国¹ 黄 骞¹ 张易阳² 杨远平¹ 李水清¹

(1. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘 要 本文针对滑动弧等离子体辅助下的甲烷/氨气/空气预混旋流火焰, 研究了其燃烧稳定性以及 NO_x 排放特性。研究表明, 滑动弧不仅能够大幅拓展甲烷/氨气/空气预混旋流火焰的贫燃吹熄极限 (在开放空间和受限空间中, 贫燃吹熄极限分别从 0.60~0.80 拓宽到 0.30), 同时能够降低 NO_x 排放量。随后, 通过 NH_2^* 化学自发光的光学测量, 分析了滑动弧等离子体降低 NO_x 排放的可能机理。

关键词 滑动弧等离子体; 甲烷/氨气预混旋流火焰; 吹熄极限; NO_x 排放特性; NH_2^* 化学自发光

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2022)08-2234-08

Stabilization and NO_x Emission of Gliding Arc-assisted CH_4/NH_3 Swirl Flames

SUN Jinguo¹ HUANG Qian¹ ZHANG Yiyang² YANG Yuanping¹ LI Shuiqing¹

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In this paper, the flame stabilization and NO_x emissions of CH_4/NH_3 /air premixed swirl flame assisted by the gliding arc plasma are studied. The results show that the gliding arc can not only greatly expand the lean blowout limits of CH_4/NH_3 /air premixed swirl flame (in the unconfined and the confined cases, the lean blowout limit are extended from 0.60~0.80 to 0.30, respectively), but also reduce NO_x emissions. Subsequently, the possible mechanism of gliding arc plasma to reduce NO_x emissions was analyzed through the optical measurement of NH_2^* chemiluminescence.

Key words gliding arc; CH_4/NH_3 premixed swirl flames; lean blowout limits; NO_x emissions; NH_2^* chemiluminescence

0 引 言

在双碳目标下, 氢气 (H_2) 作为一种无碳、清洁、高热值的替代燃料受到广泛关注, 可成为与可再生能源匹配的化学能储能载体。但氢气的体积能量密度低, 压缩、液化均较为困难, 造成储运成本居高不下^[1]。因此, 发展合适的氢载体对多元互补的能源结构至关重要。

在各类载氢物质中, 氨 (NH_3) 具有诸多显著优势: 1) 含氢质量分数高达 17.7%^[2], 且易于液化 (室温下液化压力仅为 8.5×10^3 Pa), 体积能量密度高, 储运成本合理; 2) 其规模化制备 (“Haber-Bosch”工艺)、反向裂解制氢及大规模储运技术均较为成熟^[3]。为进一步提高能源转化效率, 将氨直接作为燃料也具有探索价值: 其热值较高 (低位热值为 18.8 MJ/kg), 且完全燃烧产物为氮气和水, 无污染^[3]。氨气作为燃料至少可追溯至 1940 年^[4], 但

其燃烧至今仍有不少挑战, 这是因为: 1) 氨的层流火焰传播速度较低 (6~8 cm/s), 仅为传统碳氢燃料的 1/5 左右^[5]; 2) 氨的最小点火能 (8 mJ) 较高, 可燃范围较窄^[6]; 3) 氨中的氮元素在高温下可转化为氮氧化物 (NO_x)。

面对这些亟待解决的挑战, 国际燃烧学界对纯氨/掺氨火焰开展了广泛研究^[7-20]。针对氨火焰传播速度低/可燃性差的问题, 掺氢或天然气燃烧一种简易可行的解决方式^[21,22]。Ichikawa 等^[22]的研究结果表明: 氨气/氢气火焰的层流燃烧速度随着氢含量的增加呈指数增加, 且当燃料中的氢含量为 0.4 时, 层流火焰传播速度与常规碳氢燃料相当。针对氨火焰的排放特性, Zhao 等^[23]研究者关于氨气火焰的富氧燃烧研究表明: 富燃时, NO_x 排放量随着氧含量的增加而单调增加; 而贫燃时, NO_x

收稿日期: 2022-03-22; 修订日期: 2022-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51725601, No.52006121)

作者简介: 孙锦国 (1997-), 男, 博士研究生, 主要从事等离子体助燃研究。 通信作者: 李水清, 教授, lishuiqing@tsinghua.edu.cn。

排放量随氧含量的变化是非单调的。甲烷/氨气/空气预混火焰的燃烧特性也受到广泛关注^[24-26]。甲烷/氨混燃可作为燃气轮机、燃气锅炉逐步转向低碳/零碳排放的技术途径,因此具有较大应用潜力,但目前基础研究及中试试验研究均未能彻底解决稳燃及 NO_x 排放问题^[12]。

在燃烧调控领域,等离子体助燃是一种备受关注的技术,具备燃烧效率高、稳燃效果好、可主动调控等诸多优点^[27,28]。最近,Choe 等^[29]将纳秒脉冲等离子体应用于氨火焰,发现纳秒脉冲等离子体可有效拓展氨气火焰的可燃极限,且显著降低 NO_x 排放量。但目前,利用等离子体辅助氨燃烧的实验研究还很不充分,相应的机理研究^[30,31]也显得十分匮乏,留下了极大的研究空间。比如,许多不同等离子体放电形式对氨火焰助燃的特性尚不清晰,这不利于开发实用的氨火焰稳燃技术。

本文探究了一种旋转滑动弧等离子体对甲烷掺氨火焰的稳燃和 NO_x 排放特性的影响。前期研究^[29]发现,此种等离子体对甲烷燃烧具有显著稳燃效应,主要是通过抑制湍流燃烧脉动以及拓展内回流区,从而增强燃烧。针对氨燃烧,本文定量表征了旋转滑动弧等离子体对贫燃吹熄极限和 NO_x 浓度的影响,并综合 NH_2^+ 化学发光方法对机理进行初步探讨。本文发现可为开发先进的等离子体氨稳燃技术奠定基础。

1 实验装置及研究方法

1.1 滑动弧放电装置耦合预混旋流燃烧器

本文设计了一套与滑动弧等离子体放电装置相耦合的预混旋流燃烧器,实验装置示意图如图 1(a)所示。该旋流燃烧器主要由以下部分构成:金属圆管、锥形钝体、以及倾斜角为 45° 的旋片。根据式 (1) 可以计算旋流数 (Sw) 约为 0.75。

$$Sw = \frac{2 [1 - (d_c/d_i)]^3}{3 [1 - (d_c/d_i)]^2} \tan(\alpha) \quad (1)$$

式中, d_c 是出口截面处钝体直径, d_i 是喷嘴直径, α 是旋片倾斜角^[32]。甲烷/氨气燃料和空气均匀预混后通入金属圆管,流经旋流器后形成旋流,并在燃烧器喷嘴出口发展为 V 形旋流火焰。此外,将直径为 60 mm、高度为 200 mm 的圆柱形石英管固定在燃烧器喷嘴出口平面正上方,形成一个受限空间。根据石英管放置与否,本研究分别测试了“开放空间”和“受限空间”两种不同工况。

滑动弧等离子体电极由中心锥形钝体和金属圆管构成:锥形钝体与由交流电驱动的高压电源相连

接,作为放电装置的高压极;而金属圆管表面接地。这种回旋式电极布置相比于传统的刀状电极布置,对于旋流流场干扰更小。旋转滑动弧的形成包括以下三个阶段:“击穿-旋转拉伸-断裂”。1) 当高速旋转气流流过中心锥形钝体时,在高压放电作用下,气体将在电极间最窄处(电极间最窄距离约为 2 mm)发生“击穿”现象而形成电弧;2) 之后,电弧随着气流的高速旋转流动而旋转和拉伸;3) 最终,滑动弧将在燃烧器喷嘴外部断裂。该过程周而复始,形成持续的旋转滑动弧等离子体,如图 1(b)、(c) 所示。

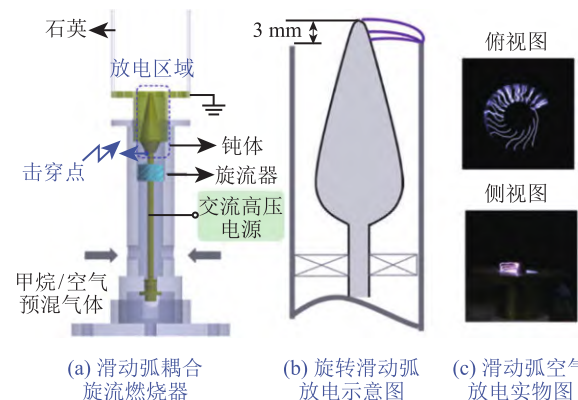


图 1 滑动弧耦合预混旋流燃烧器; 旋转滑动弧放电示意图; 滑动弧空气放电实物图 ($Q_{\text{air}} = 60 \text{ L/min}$)

Fig. 1 schematic of premixed swirl burner integrated with gliding arc discharge, schematic of rotating gliding arc, and direct photography of gliding arc discharge in air ($Q_{\text{air}} = 60 \text{ L/min}$)

本实验中采用高压探针 (Tektronix P6015A) 和电流传感器 (Pearson 4100) 测量了滑动弧等离子体放电时的电流和电压。示波器 (Tektronix DPO2024B) 的采样频率为 1 GS/s(时间分辨率为 1 ns), 采样时间为 1 ms。滑动弧等离子体 ($Q_{\text{air}} = 60 \text{ L/min}$) 的放电特性如图 2 所示。击穿频率约为 7

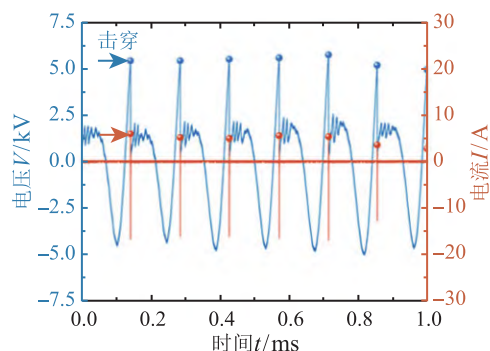


图 2 滑动弧在空气中放电的电压和电流曲线 ($Q_{\text{air}} = 60 \text{ L/min}$)
Fig. 2 Voltage and current waveforms of gliding arc discharge in air ($Q_{\text{air}} = 60 \text{ L/min}$)

kHz, 击穿电压约为 5 kV, 击穿时瞬态电流可以达到约 20 A, 击穿形成通道后, 电流和电压都迅速下降。由电流和电压的内积计算, 可以得到该滑动弧等离子体的放电功率约为 200 W。而根据完全燃烧的假设, 甲烷/空气的燃烧功率大约为 3.0 kW(当量比为 0.8, 空气流量为 60 L/min)。

1.2 研究方法

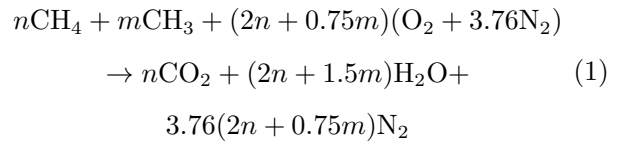
为了探究滑动弧等离子体对于甲烷/氨气/空气预混旋流火焰的稳燃和 NO_x 排放特性的影响, 本研究中测量的主要参数包括: 贫燃吹熄极限, NO_x 排放量以及 NH_2^* 的化学发光强度。

图 3(a)、(b) 所示分别是甲烷/氨气/空气火焰尾气(石英管出口中心) NO_x 含量测量 NH_2^* 化学发光强度测量示意图。在燃烧器喷嘴出口上方 200 mm 处放置直径为 3 mm 的探针, 抽吸后经过总长为 3 m 的管道进入烟气分析仪 (MRU 600), 所有工况中采样频率均为 1 Hz, 采样时间为 1 min。为了探究滑动弧影响 NO_x 排放机理, 本研究中采用化学自发光技术测量 NH_2^* 自由基分布以表征 NH_3 反应生成 NO_x 的情况。在 630 nm 处选择了 NH_3 α 波段的单峰进行 NH_2^* 化学自发光测量^[33,34]。测量采用中心波长为 632.8nm, 带宽为 3 nm 的带通滤光片, 用增强型电荷耦合检测器 (ICCD 相机, Princeton PI-MAX IV, 1024×1024 像素) 捕捉二维信号。

1.3 实验工况

本研究中针对不同流速 (20~100 L/min)、不同当量比 (0.7, 0.8, 0.9) 以及不同掺氨比例的工况进行了测试, 所有实验工况均在室温和常压下 (298 K, 1.013×10^5 Pa) 进行, 见表 1。其中当量比的计算考

虑以下氧化反应:



实验中掺氨能量比例按式 (2) 计算, 其中甲烷和氨气的低位热值分别为 $LHV_{\text{CH}_4} = 802.3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $LHV_{\text{NH}_3} = 316.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$:

$$E_{\text{NH}_3} = \frac{x_{\text{NH}_3} LHV_{\text{NH}_3}}{x_{\text{NH}_3} LHV_{\text{NH}_3} + x_{\text{CH}_4} LHV_{\text{CH}_4}} \quad (2)$$

当 x_{NH_3} 从 0 增加至 0.6, E_{NH_3} 的值从 0 增加至 0.37。

2 结果与分析

2.1 滑动弧辅助 CH_4/NH_3 预混旋流火焰

首先, 本研究探究了滑动弧等离子体与掺氨比例甲烷/氨气/空气预混旋流火焰形貌的影响。针对当量比 $\phi = 0.80$ 和 $Q_{\text{air}} = 60 \text{ L/min}$ 的工况, 采用光学相机 (Nikon D5600) 分别得到了开放空间和封闭空间下的火焰形貌, 如图 4 和图 5 所示, 曝光时间均为 1/125 s。

开放空间内预混旋流火焰整体呈现典型的 V 型结构, 火焰根部稳定在中心锥形钝体上。掺混不同比例的氨对火焰的影响如下: 1) 甲烷火焰原本呈现蓝色, 掺混少量氨气后, 火焰颜色变黄, 继续增加氨气比例, 火焰颜色无明显变化; 2) 随着氨气比例的增加, V 形火焰的整体形状基本不变。但由于氨气的增加, 火焰变得更加难以稳定, 实验中氨体

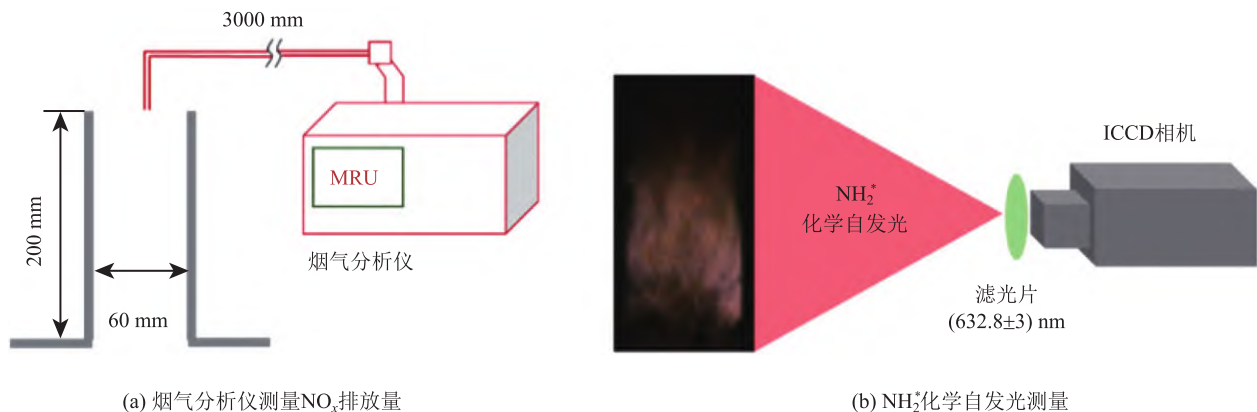


图 3 实验示意图

Fig. 3 Schematics of (a) NO_x emissions measurement using gas analyzer and (b) NH_2^* chemiluminescence

积分数达到 60% 时火焰彻底熄灭。应用滑动弧等离子体后, V 形火焰的张角明显变大, 这一特性在滑动弧辅助甲烷/空气火焰中也存在 [35]。火焰张角的增加表明了旋流火焰回流区的扩大, 因此提供给燃料更加充分的停留时间, 化学反应也因此更加充分 [36]。同时火焰亮度相比未应用滑动弧时略有增强, 也能说明滑动弧使得火焰燃烧更加稳定。此外, 由于等离子体的辅助, 氨气体积分数增加至 60% 之后火焰仍能稳定存在, 也表明滑动弧对于掺氨火焰的稳燃作用。

而在受限空间工况中, 由于石英管的存在加强了高温气体的回流, 且此时作为壁面给旋流火焰提供了滞止点, 因此受限火焰的形状并不完全是 V 形

火焰。如图 5 所示, $x_{\text{NH}_3} = 0$ 即纯甲烷/空气火焰在该流速和当量比下是 V 形火焰, 但是增加氨气比例后, 火焰除了颜色发生明显变黄外, 火焰长度也随氨气含量的增加而迅速增加。尽管火焰根部仍然稳定在中心钝体上, 但甲烷掺氨火焰在受限空间内由 V 形火焰转变成管状火焰。同时, 由于四周石英管的存在提供了声学反馈, 在贫燃时火焰会出现明显的燃烧不稳定现象, 甚至出现火焰震荡行为而无法完全稳定在钝体上。同样地, 在应用滑动弧等离子体后: $x_{\text{NH}_3} = 0$ (纯甲烷/空气火焰) 的工况下同样观察能看到 V 形火焰张角的拓展, 而 $x_{\text{NH}_3} = 0.1, 0.2, 0.3$ 时, 火焰明显更加稳定的驻定在钝体上, 此时管式火焰的燃烧不稳定性被抑制。

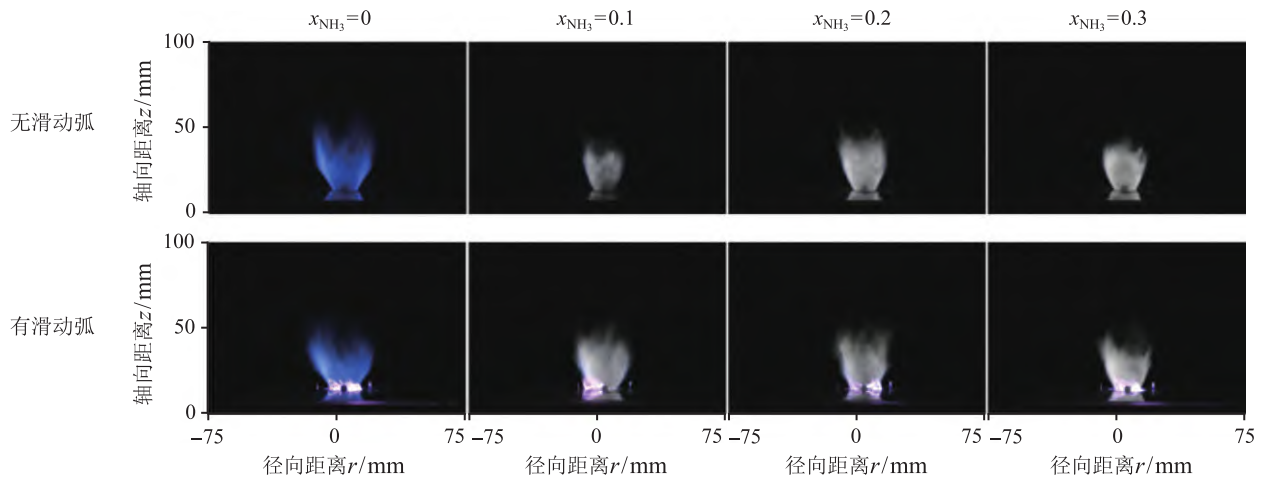


图 4 开放空间甲烷/氨气/空气预混旋流火焰形貌 (无滑动弧和有滑动弧)

Fig. 4 Direct photography of unconfined $\text{CH}_4/\text{NH}_3/\text{air}$ premixed swirl flames without and with gliding arcs

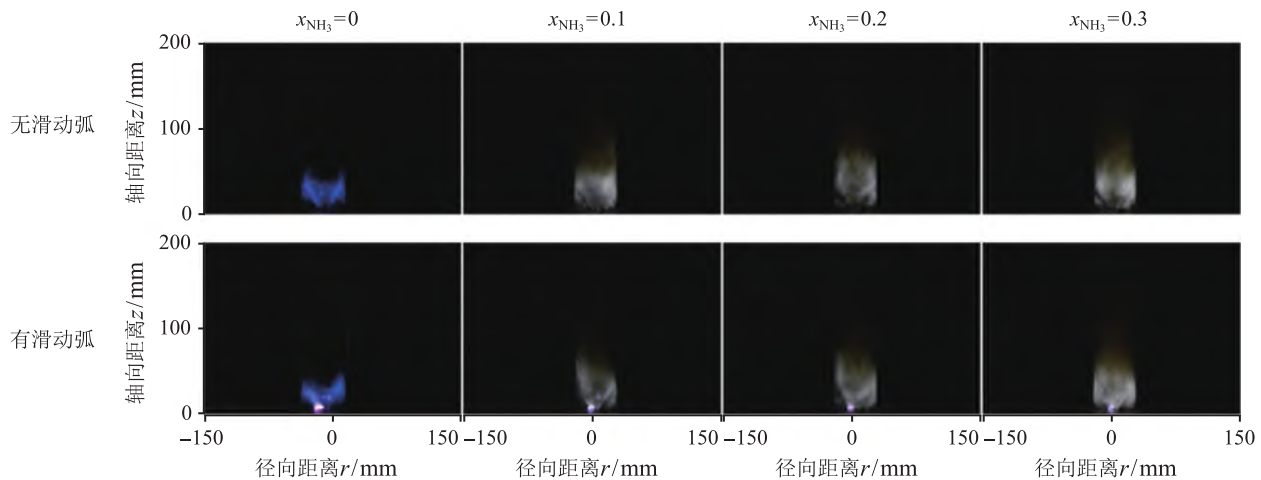


图 5 受限空间甲烷/氨气/空气预混旋流火焰形貌 (无滑动弧和有滑动弧)

Fig. 5 Direct photography of confined $\text{CH}_4/\text{NH}_3/\text{air}$ premixed swirl flames without and with gliding arcs

2.2 贫燃吹熄极限

以较高的初始当量比点燃甲烷/氨气/空气预混气体后, 缓慢减少当量比 (同时保持掺氨比例不变) 直至火焰熄灭, 从而得到该流速下的熄灭当量比作为贫燃吹熄极限 (ϕ_{ext})。图 6(a)、(b) 分别展示了开放空间和受限空间内甲烷/氨气/空气预混旋流火焰的贫燃吹熄极限 (Lean blowout limits, LBO)。在本研究中, 根据燃烧器喷嘴出口等效直径和气体流速核算出的雷诺数 ($Re = ud_e/v$) 范围为 1160~5780。在该测试范围内, 在没有滑动弧辅助的工况下, 开放空间和受限空间内甲烷掺氨火焰的熄灭当量比均在 0.6~0.8 之间, 而应用了滑动弧等离子体后, 贫燃吹熄极限被拓展至 0.25~0.40 (拓展比例在 50%~58% 左右)。而不同掺氨比例对于熄灭极限也略有影响: 随着氨气体积分数从 0 增加至 0.2, 贫燃吹熄极限从 0.6 增加至 0.7, 但在滑动弧等离子体后, 该趋势仍然存在, 但熄灭当量比由于整体被拓展至 0.30, 因此不同掺氨比例工况下贫燃吹熄极限的差距相应缩小。其次, 针对贫燃吹熄极限的结果, 在开放空间和受限空间中的结论较为一致, 表明滑动弧对于甲烷掺氨火焰的拓展在开放空间和受限空间中都同样有效。

针对滑动弧辅助纯甲烷火焰, 贫燃吹熄极限的测量以及相应的 OH-PLIF 实验结果, 在之前已经有过深入的研究^[35], 且实验现象和结论与本文中的甲烷掺氨火焰较为类似。

2.3 NO_x 排放特性

针对在受限空间内的甲烷掺氨火焰, 本研究中测量了燃烧器喷嘴出口正上方 200 mm 处的 NO_x

排放量, 测量位置位于石英管出口平面中心 (示意简图如图 3(a) 所示)。该平面内 NO_x 排放的径向分布也相对均匀, 因此可用中心位置处 NO_x 排放量来表征火焰的 NO_x 排放特性。

对于当量比为 0.80, 空气流量为 60 L/min 的受限空间内预混旋流火焰, 其尾气中 NO_x 排放量如图 7 所示。 $x_{\text{NH}_3} = 0$ 即纯甲烷火焰的 NO_x 排放量在无/有滑动弧辅助的情况下分别为 $0.018 \times 10^{-3}/0.2 \times 10^{-3}$, 表明滑动弧的应用略微增加了纯甲烷火焰的 NO_x 排放。在类似的等离子体辅助甲烷火焰研究中, Choe^[37] 和 Kim^[38] 等发现纳秒脉冲等离子体会显著增加 NO_x 排放量, 这与本研究的实验结果相符。在掺入少量氨气后, 尾气中 NO_x

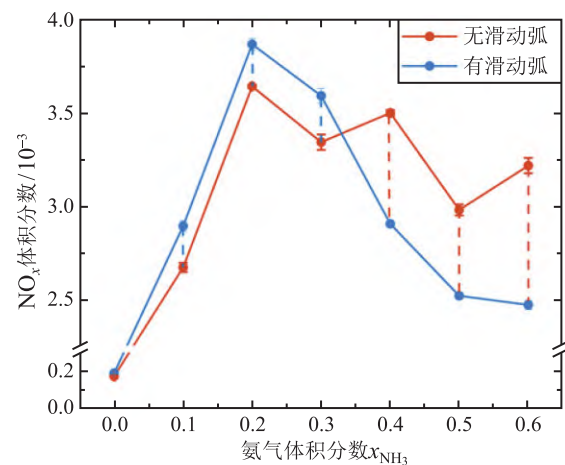


图 6 受限空间甲烷/氨气/空气预混旋流火焰的 NO_x 排放特性
Fig. 6 NO_x emissions of confined $\text{CH}_4/\text{NH}_3/\text{air}$ premixed swirl flames without and with gliding arcs

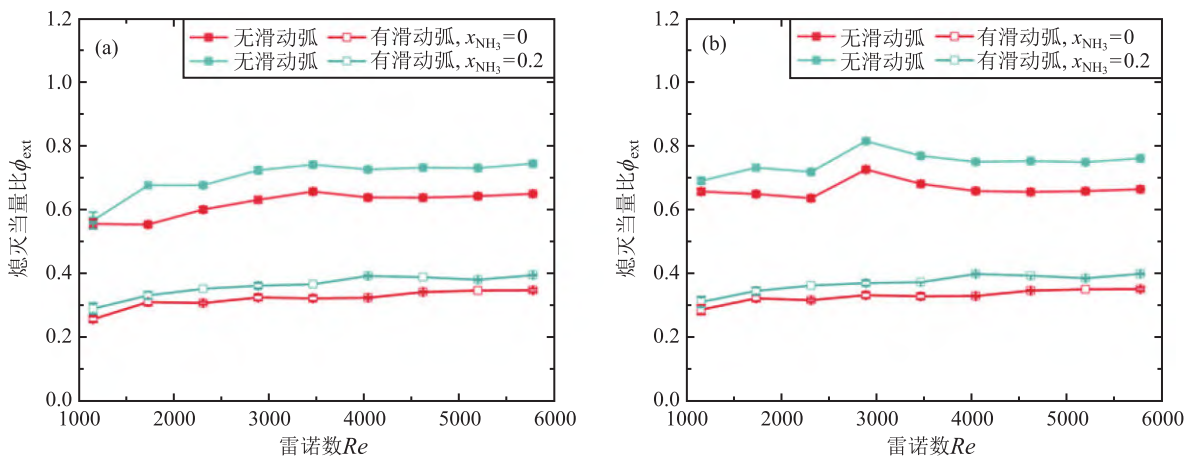


图 7 开放空间 (a) 和受限空间 (b) 甲烷/氨气/空气预混旋流火焰的贫燃吹熄极限

Fig. 7 Lean blowout limits of (a) unconfined and (b) confined $\text{CH}_4/\text{NH}_3/\text{air}$ premixed swirl flames without and with gliding arcs

体积含量迅速升高至 2.5×10^{-3} 以上。当 $x_{\text{NH}_3} = 0.1, 0.2$ 时, 应用滑动弧等离子体后, NO_x 排放量仍然会略有上升 (上升幅度在 5%~10% 之间)。

对于此类掺氨比例较低 (或不掺氨) 的旋流火焰, 应用滑动弧后 NO_x 排放量略有升高的可能原因是火焰温度的升高 [37]。尽管实验中由于滑动弧的存在, 剧烈放电的环境使得研究中无法采用热电偶以测量火焰温度分布, 但根据滑动弧本身的特性, 滑动弧在热平衡态时会使局部气体温度上升至 3000 K 以上 (这也是滑动弧作为热平衡等离子体能够有效提高燃烧稳定性的主要原因之一) [32]; 温度升高会促进热力型 NO_x 的生成 [39], 因此滑动弧作用下可能会导致尾气中 NO_x 排放量的增加。

另一方面, 当 $x_{\text{NH}_3} = 0.4, 0.5, 0.6$ 时, 没有滑动弧等离子体时, 甲烷/氨气/空气燃烧产生 NO_x 大约为 $3 \times 10^{-3} \sim 3.5 \times 10^{-3}$, 而应用滑动弧等离子体后, NO_x 排放量显著减少至 $2.5 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$, 降低幅度约为 14.2%~16.6%。这表明, 当掺氨比例一定时, 滑动弧对于降低 NO_x 排放量有显著作用。下文中 NH_2 的测量针对滑动弧降低 NO_x 含量的机制进行了更深入的研究。

另外值得注意的是, 尽管在固定当量比和掺氨比例下, 滑动弧对于纯甲烷火焰/掺氨量较低的火焰的 NO_x 排放量没有降低作用, 但从滑动弧极大拓展该类火焰的熄灭极限的角度而言, 在更贫燃的情况下使用甲烷掺氨燃料同样是实际中降低 NO_x 排

放量的重要举措。

2.4 滑动弧影响 NO_x 排放机理分析

关于 NO_x 还原的机理研究中, Lyon [40] 最早发现了在一定的温度范围和氧气浓度内, 使用 NH_3 可以增强燃烧中的 NO_x 还原过程, 并称之为“热脱硝”(Thermal De NO_x) 过程。后续 Miller 等 [41-44] 进行了一系列研究发现, NH_2 和 NO 参与的反应: $\text{NO} + \text{NH}_2 \rightarrow \text{NNH} + \text{OH}$ 和 $\text{NH}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 是“热脱硝”工艺的关键反应。因此, 本研究中对降低 NO_x 生成过程中最为关键的自由基 NH_2 开展了实验测量。

对当量比为 0.80, 空气流量为 60 L/min 的甲烷掺氨火焰进行 NH_2^* 化学自发光信号强度测量, 每个工况进行 100 次测量后进行平均后得到如图 8 和图 9 所示的时均二维分布。没有氨气 ($x_{\text{NH}_3} = 0$) 时, 在甲烷/空气等离子体中几乎没有观察到 NH_2^* 化学发光, 随着掺氨比例的增加, NH_2^* 化学发光信号强度显著增强。无论在开放空间还是受限空间内, 结果都表明: 相比没有放电辅助下的工况, 滑动弧辅助甲烷/氨气/空气火焰的 NH_2^* 化学发光强度明显增强。根据 Pugh 等 [13] 的研究结果, NH_2^* 的化学发光信号强度可以作为 NH_2 产生和 NO 还原的重要表征。因此, 实验结果表明, 滑动弧在 NO 还原过程中, 发挥了其助燃的动力学效应, 促进了 NH_2 的产生, 增强了 NH_2 还原 NO 的化学反应, 从而降低了 NO_x 排放。

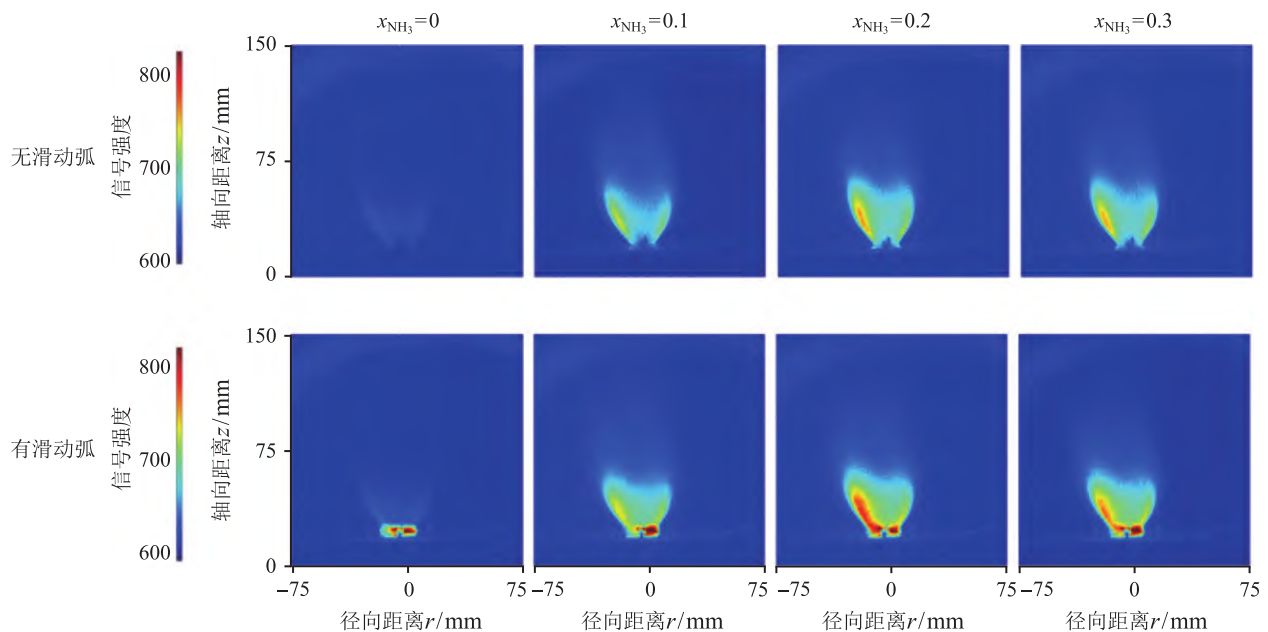


图 8 开放空间甲烷/氨气/空气预混旋流火焰的 NH_2^* 自发光图像 (时间平均)

Fig. 8 Time-averaged NH_2^* chemiluminescence of unconfined $\text{CH}_4/\text{NH}_3/\text{air}$ premixed swirl flames without and with gliding arcs

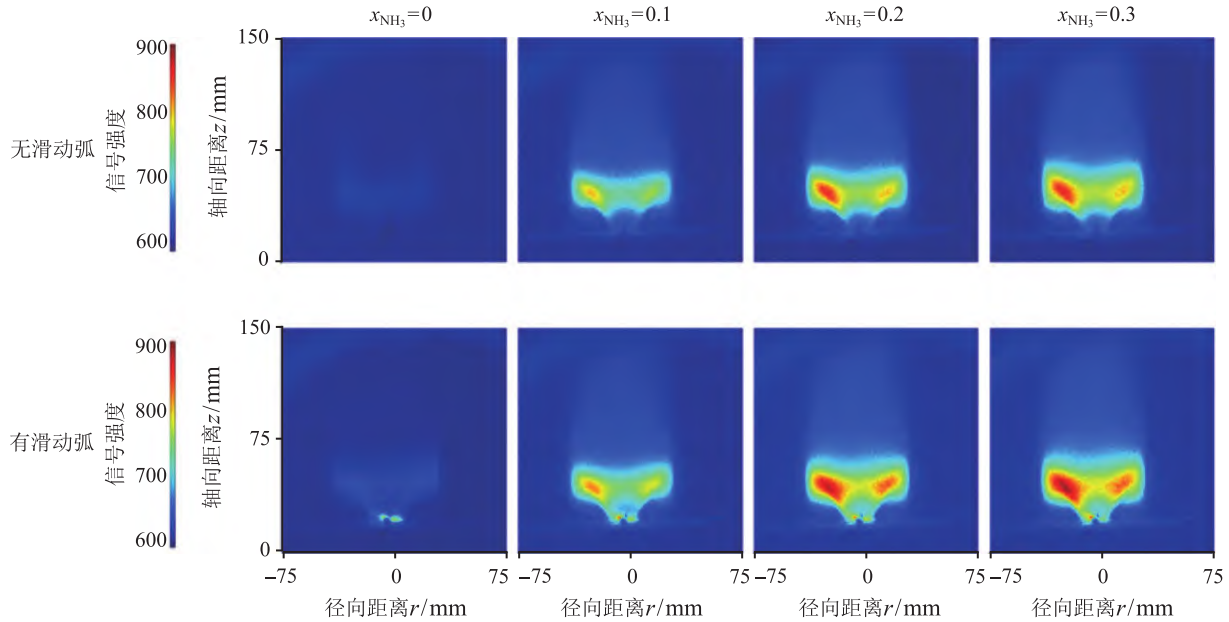


图9 受限空间甲烷/氨气/空气预混旋流火焰的 NH_2 自发光图像 (时间平均)

Fig. 9 Time-averaged NH_2^* chemiluminescence of confined $\text{CH}_4/\text{NH}_3/\text{air}$ premixed swirl flames without and with gliding arc

3 结 论

本文设计与高频交流电驱动的旋转滑动弧等离子体放电装置相耦合的预混旋流燃烧器,测试了滑动弧对开放空间和受限空间下甲烷掺氨预混旋流火焰稳燃和 NO_x 排放特性,并基于 NH_2^* 化学自发光测量等光学诊断研究了滑动弧降低 NO_x 排放的物理机制,得到如下主要结论:

1) 滑动弧对氨/甲烷/空气旋流预混火焰具有显著稳燃效果,在开放空间和受限空间下的贫燃吹熄极限可由 $0.60\sim 0.80$ (无等离子体) 拓展至 $0.20\sim 0.30$ 。

2) 掺氨比例在 $0\sim 40\%$ 内,滑动弧引起的热效应会使燃烧尾气中 NO_x 浓度增加 $5\%\sim 10\%$ 。而当掺氨比例达到 40% 后,滑动弧使得尾气中的 NO_x 含量由 $3.0\times 10^{-3}\sim 3.5\times 10^{-3}$ 降低至 $2.5\times 10^{-3}\sim 3.0\times 10^{-3}$ (降幅约 $14\%\sim 16\%$)。

3) NH_2^* 化学自发光信号强度结果表明,滑动弧可能通过化学路径增强了火焰中 NH_2 自由基的生产,强化了高温区 NO_x 还原过程,从而降低了 NO_x 的生成。

参 考 文 献

[1] Abdalla A M, Hossain S, Nisfindy O B, et al. Hydrogen Production, Storage, Transportation and Key Challenges with Applications: a Review [J]. Energy Convers Manage, 2018, 165: 602–627
 [2] Chiuta S, Everson R C, Neomagus H W J P, et al. Reac-

tor Technology Options for Distributed Hydrogen Generation via Ammonia Decomposition: a Review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(35): 14968–14991

- [3] Yapicioglu A, Dincer I. A Review on Clean Ammonia as A Potential Fuel for power Generators [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 103: 96–108
 [4] NH3 Fuel Association. Introduction to NH_3 Fuel [EB/OL]. [2021-06-16]. <https://nh3fuelassociation.org/introduction/>
 [5] Kurata O, Iki N, Matsunuma T, et al. Performances and Emission characteristics of NH_3 -Air and NH_3CH_4 -Air Combustion Gas-Turbine Power Generations [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3): 3351–3359
 [6] Verkamp F J, Hardin M C, Williams J R. Ammonia Combustion Properties and performance in Gas-Turbine Burners [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1967, 11(1): 985–992
 [7] Kobayashi H, Hayakawa A, Somarathne K D Kunkuma a, et al. Science and Technology of Ammonia Combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1): 109–133
 [8] Okafor E C, Somarathne K D K A, Hayakawa A, et al. Towards the Development of an Efficient Low- NO_x Ammonia Combustor for a Micro Gas Turbine [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 4597–4606
 [9] Okafor E C, Naito Y, Colson S, et al. Experimental and Numerical Study of The Laminar Burning Velocity of CH_4 - NH_3 -air Premixed Flames [J]. Combustion and Flame, 2018, 187: 185–198
 [10] Okafor E C, Somarathne K D K A, Ratthan R, et al. Control of NO_x and Other Emissions in Micro Gas Turbine Combustors Fuelled with Mixtures of Methane and Ammonia [J]. Combust Flame, 2020, 211: 406–416
 [11] Hussein N A, Valera-Medina A, Alsaegh A S. Ammonia-Hydrogen Combustion in a Swirl Burner with Reduction

- of NO_x Emissions [J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 2305–2310
- [12] Valera-Medina A, Morris S, Runyon J, et al. Ammonia, Methane and Hydrogen for Gas Turbines [J]. *Energy Procedia*, 2015, 75: 118–123
- [13] Pugh D, Runyon J, Bowen P, et al. An Investigation of Ammonia Primary Flame Combustor Concepts for Emissions Reduction with OH^* , NH_2^* and NH^* Chemiluminescence at Elevated Conditions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(4): 6451–6459
- [14] Li B, He Y, Li Z, et al. Measurements of NO Concentration in NH_3 -Doped CH_4 +Air Flames Using Saturated Laser-Induced Fluorescence and Probe Sampling [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(1): 40–46
- [15] Rocha R C, Zhong S, Xu L, et al. Structure and Laminar Flame Speed of an Ammonia/Methane/Air Premixed Flame under Varying Pressure and Equivalence Ratio [J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(9): 7179–7192
- [16] Zhang D, Gao Q, Li B, et al. Instantaneous One-Dimensional Ammonia Measurements with Femtosecond Two-Photon Laser-Induced Fluorescence (Fs-TPLIF) [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(47): 25740–25745
- [17] Zhang D, Gao Q, Li B, et al. Femtosecond Laser-Induced Plasma Spectroscopy for Combustion Diagnostics in Premixed Ammonia/Air Flames [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(28): 7810–7816
- [18] Zhang M, Wei X, Wang J, et al. The Blow-Off and Transient Characteristics of Co-Firing Ammonia/Methane Fuels in A Swirl Combustor [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(4): 5181–5190
- [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] Zhang M, An Z, 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
- [21] Li J, Huang H, Kobayashi N, et al. Study on Using Hydrogen and Ammonia as Fuels: Combustion Characteristics and NO_x Formation [J]. *International Journal of Energy Research*, 2014, 38(9): 1214–1223
- [22] 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
- [23] Wang D, Ji C, Wang S, et al. Numerical Study on The Premixed Oxygen-Enriched Ammonia Combustion [J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(12): 16903–16917
- [24] Henshaw P F, D'andrea T, Mann K R C, et al. Premixed Ammonia-Methane-Air Combustion [J]. *Combustion Science and Technology*, 2005, 177(11): 2151–2170
- [25] Ichikawa A, Naito Y, Hayakawa A, et al. Burning Velocity and Flame Structure of CH_4/NH_3 /Air Turbulent Premixed Flames at High Pressure [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(13): 6991–6999
- [26] Somarathne K D K A, Okafor E C, Sugawara D, et al. Effects of OH Concentration and Temperature on NO Emission Characteristics of Turbulent Non-Premixed CH_4/NH_3 /Air Flames in a Two-Stage Gas Turbine Like Combustor at High Pressure [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(4): 5163–5170
- [27] Ju Y, Sun W. Plasma Assisted Combustion: Dynamics and Chemistry [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 48: 21–83
- [28] Starikovskiy A. Physics and Chemistry of Plasma-Assisted Combustion [J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2048): 20150074
- [29] Choe J, Sun W, Ombrello T, et al. Plasma Assisted Ammonia Combustion: Simultaneous NO_x Reduction and Flame Enhancement [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 228: 430–432
- [30] Shioyoke A, Hayashi J, Murai R, et al. Numerical Investigation on Effects of Nonequilibrium Plasma on Laminar Burning Velocity of Ammonia Flame [J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(3): 3824–3832
- [31] Faingold G, Lefkowitz J K. A Numerical Investigation of $\text{NH}_3/\text{O}_2/\text{He}$ Ignition Limits in a Non-Thermal Plasma [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(4): 6661–6669
- [32] BeéJ M, Chigier N A. *Combustion Aerodynamics* [M]. Applied Science Publishers Limited, 1972
- [33] Gaydon A. *The spectroscopy of flames* [M]. Springer Science & Business Media, 2012
- [34] Yi Y, Zhang R, Wang L, et al. Plasma-Triggered CH_4/NH_3 Coupling Reaction for Direct Synthesis of Liquid Nitrogen-Containing Organic Chemicals [J]. *ACS Omega*, 2017, 2(12): 9199–9210
- [35] Sun J, Tang Y, Li S. Plasma-Assisted Stabilization of Premixed Swirl Flames by Gliding Arc Discharges [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(4): 6733–6741
- [36] Terhaar S. *Identification and Modeling of Coherent Structures in Swirl Stabilized Combustors at Dry and Steam Diluted Conditions* [D]. Technische Universität Berlin, 2015
- [37] Choe J, Sun W. Blowoff hysteresis, Flame Morphology and the Effect of Plasma in a Swirling Flow [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(36): 365201
- [38] Kim W, Snyder J, Cohen J. Plasma Assisted Combustor Dynamics Control [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3479–3486
- [39] Miller J A, Bowman C T. Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1989, 15(4): 287–338
- [40] Lyon R K. The $\text{NH}_3\text{-NO-O}_2$ reaction [J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 1976, 8(2): 315–318
- [41] Miller J A, Branch M C, Kee R J. A Chemical Kinetic Model for the Selective Reduction of Nitric Oxide by Ammonia [J]. *Combustion and Flame*, 1981, 43: 81–98
- [42] Green R M, Miller J A. The Measurement of Relative Concentration Profiles of NH_2 Using Laser Absorption Spectroscopy [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1981, 26(4): 313–327
- [43] Klippenstein S J, Harding L B, Glarborg P, et al. The Role of NNH in NO Formation and Control [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(4): 774–789
- [44] Miller J A, Smooke M D, Green R M, et al. Kinetic Modeling of The Oxidation of Ammonia in Flames [J]. *Combust Sci Technol*, 1983, 34(1-6): 149–176