

等离子体激励下NH₃/CH₄射流火焰特性的实验研究

于百轩, 姜婕妤*, 王新宇

青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2025年4月9日; 录用日期: 2025年4月21日; 发布日期: 2025年6月23日

摘要

为应对氨燃料燃烧过程中存在的效率低和火焰不稳定等挑战, 本文提出了一种耦合等离子体的氨掺混燃烧方案。通过掺混高反应活性燃料甲烷提升氨火焰稳定性, 辅助等离子体助燃技术以进一步提高氨掺混燃烧效率。首先, 搭建氨/甲烷燃烧实验系统, 设计介质阻挡放电(DBD)等离子体发生器。其次, 采集火焰动态实验图像及等离子体电参数, 并通过图像处理技术定量分析火焰特性, 探讨等离子体激励下氨/甲烷共燃的火焰形态及燃烧特性。实验结果表明, DBD等离子体的引入显著降低火焰高度并增加火焰宽度, 其热效应与化学活性加速了燃烧反应进程; 外加电压的提升增强了等离子体电离强度, 促进活性粒子生成, 扩大火焰扩散范围; 掺氨比的增加使得火焰传播速度降低, 火焰锋面缩短, 导致火焰高度持续下降, 而火焰宽度则呈现整体减少的趋势。

关键词

射流火焰, NH₃/CH₄共燃, 火焰图像处理, 等离子体, 火焰高度

Experimental Study on the Characteristics of NH₃/CH₄ Jet Flame Excited by Plasma

Baixuan Yu, Jieyu Jiang*, Xinyu Wang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Apr. 9th, 2025; accepted: Apr. 21st, 2025; published: Jun. 23rd, 2025

Abstract

To cope with the challenges of low efficiency and flame instability in the combustion process of

*通讯作者。

文章引用: 于百轩, 姜婕妤, 王新宇. 等离子体激励下 NH₃/CH₄ 射流火焰特性的实验研究[J]. 电力与能源进展, 2025, 13(3): 135-147. DOI: 10.12677/aepe.2025.133015

ammonia fuel, this paper proposes an ammonia blending combustion scheme coupled with plasma. The stability of ammonia flame is improved by mixing high reactivity fuel methane, and the plasma-assisted combustion technology is used to further improve the combustion efficiency of ammonia blending. Firstly, an ammonia/methane combustion experimental system was built, and a dielectric barrier discharge (DBD) plasma generator was designed. Secondly, the flame dynamic experimental images and plasma electrical parameters were collected, and the flame characteristics were quantitatively analyzed by image processing technology. The flame morphology and combustion characteristics of ammonia/methane co-combustion under plasma excitation were discussed. The experimental results show that the introduction of DBD plasma significantly reduces the flame height and increases the flame width, and its thermal effect and chemical activity accelerates the combustion reaction process. The increase of the applied voltage enhances the ionization intensity of the plasma, promotes the generation of active particles, and expands the flame diffusion range. The increase of ammonia ratio reduces the flame propagation speed and shortens the flame front, resulting in a continuous decrease in flame height, while the flame width shows an overall decreasing trend.

Keywords

Jet Flame, NH_3/CH_4 Co-Combustion, Flame Image Processing, Plasma, Flame Height

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着环境保护和能源需求的日益严峻,寻找清洁、高效的燃烧方式具有重要意义。氨(NH_3)燃料的应用在近年来受到了广泛关注,尤其是在我国双碳目标的背景下。氨作为一种无碳富氢化合物,具有能量密度高、成本低、易于储存和运输等优点[1][2],被认为是替代传统化石燃料的理想选择之一。尽管氨燃料具有诸多优势,但其应用也面临一些挑战,如燃烧不稳定、氮氧化物(NO_x)排放高等问题[3][4]。

考虑到 NH_3 的低可燃性、燃烧速度较为缓慢,采用氨混合燃料可以实现减少碳排放的同时,保证燃烧效率。目前,氨/碳氢燃料成为一种较为可行的解决方案[5][6]。其中,采用 NH_3 与甲烷(CH_4)共燃的方法已经得到了广泛的应用,可以实现减少碳排放的同时保证燃烧效率[7]。Ji 等人[8]对非预混的 NH_3/CH_4 /空气预混火焰进行了研究,发现 CH_4 的加入可以提升层流火焰速度、最大热释放速率和绝热火焰温度,这有利于克服 NH_3 燃烧强度差导致火焰不稳定的问题。Nourani Najafi 等人[9]通过火焰辐射光谱测量及自发拉曼散射法研究了层流轴对称 CH_4/NH_3 /空气扩散火焰,结果表明 NH_3 的加入抑制了碳烟的生成。Xie 等人[10]通过共轭传热模型模拟了下行炉内的 MILD 燃烧与旋流燃烧,结果表明无论是旋流燃烧还是 MILD 燃烧, CH_4 比例的增加会使炉膛内壁热交换利用的热量逐渐增加。Zhang 等人[11]研究了旋流燃烧器中混合 CH_4/NH_3 /空气燃料的燃烧性能和排放特性,研究表明在 NH_3 和 CH_4 的摩尔比相等以及在富燃条件下进行燃烧会增加 NO_x 的排放。综上所述, CH_4 的添加可以克服 NH_3 物理性质导致的燃烧不完全、燃烧强度差的现象。

强化燃烧技术的应用也是增强 NH_3 优势的一个有效手段。等离子体助燃作为一种新型燃烧强化技术,能够在不改变初始燃料成分的情况下提高燃烧效率[12][13],等离子体在燃烧中表现出显著的催化和促进作用,常用于改善燃烧过程。介质阻挡放电(DBD)等离子体是非平衡等离子体的一种,容易产生均匀稳定的放电区,能产生更多长寿命的活性粒子[14],并且其结构简单,往往用于常温常压下产生等离子体。Zare 等人[15]研究了 DBD 等离子体放电对 CH_4 /空气非预混火焰的影响,发现放电可以延迟火焰的升离和吹

灭,改善气体混合和化学反应,降低火焰高度、增加火焰宽度。李森等人[16]通过一维数值模拟研究了 DBD 等离子体辅助 CH_4 的点火过程,结果表明,等离子体放电可以在较低的初始温度下有效促进燃烧反应的发生,并且随着放电电压的增加有效提高了燃烧温度。陈庆亚等人[17]利用 DBD 对 CH_4 /空气同轴扩散火焰进行了实验研究,发现贫燃条件下等离子体激励会增强燃烧稳定性并在流量较低时缩短火焰长度,而在富燃火焰下游温度会随着激励强度增大不断升高。Kim 等人[18]研究了 DBD 等离子体和 CH_4 添加对涡流稳定的 NH_3 /空气预混火焰的协同效应,发现等离子体和 CH_4 添加可以有效地稳定 NH_3 火焰,并同时降低 NO_x 和 CO 的排放量。综上所述, DBD 等离子体可以显著影响火焰的燃烧特性与形态,促进燃烧的进程。

NH_3 和 CH_4 燃料特性的差异导致混合燃料在湍流扰动下更易发生局部熄火,还需结合强化燃烧技术来实现 NH_3 燃料的高效应用。因此,本文基于同轴射流燃烧器,设计搭建了 DBD 等离子体激励的同轴射流燃烧系统,探究 DBD 等离子体对于 NH_3/CH_4 火焰的作用机制,对等离子体电学参数和火焰变化展开监测。本研究旨在探讨 DBD 等离子体对 NH_3/CH_4 射流火焰形态的科学依据,为设计高效环保的燃烧系统提供理论和技术支持。

2. 实验方法

为实现等离子体的高效发生并有效作用于火焰,搭建了 DBD 等离子体激励的同轴射流燃烧系统,系统原理图和实物图如图 1 所示,主要由射流火焰系统和等离子体发生系统组成。射流火焰系统主要由供气系统和燃烧器组成,供气系统包括 NH_3 、 CH_4 和空气,分别通过质量流量计(MF)来调节各气体的流量。等离子体发生装置由高压实验电源(CTP-200K,南京苏曼)、自制的 DBD 反应器和示波器(RIGOL DS1102E,北京普源)组成。高速相机与计算机通过数据连接实现实时同步,实时记录火焰的变化,提供火焰动态过程的详细图像。示波器则用于实时监测等离子体的电学参数,记录电压、电流等信息,以便与火焰形态变化进行综合分析。

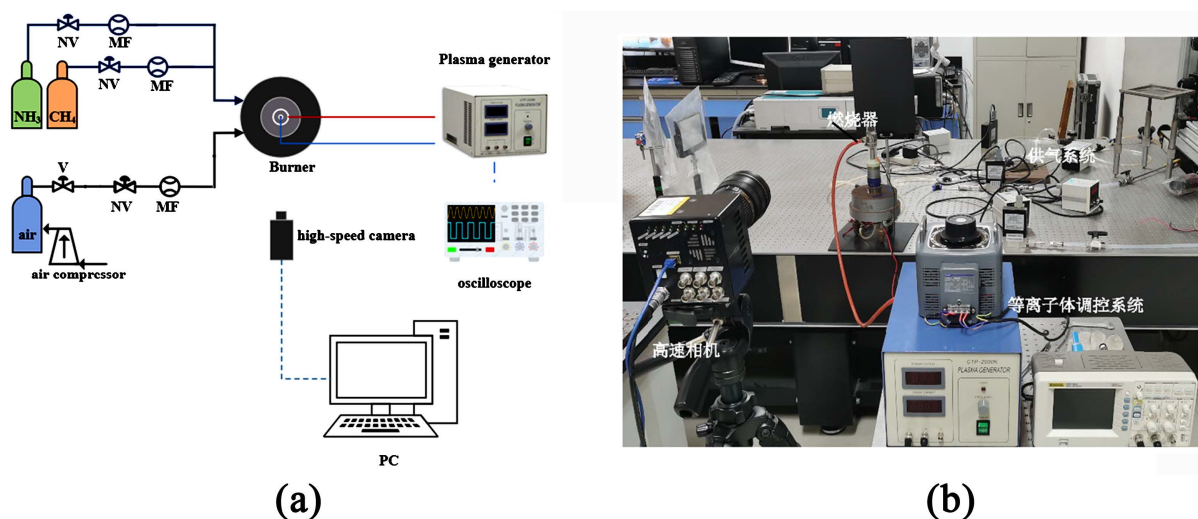


Figure 1. Plasma-excited NH_3/CH_4 jet flame experimental platform. (a) Schematic diagram; (b) System physical diagram
图 1. 等离子体激励的 NH_3/CH_4 射流火焰实验平台。(a) 示意图; (b) 系统实物图

等离子体反应器的具体结构如图 2 所示。反应器的结构是同轴圆柱结构,采用高压电极单边介质方式。选用石英玻璃作为放电介质,石英管外径为 26 mm,管长为 120 mm,介质层厚度为 1 mm;由碳素钢铁丝网作为外电极,长度为 60 mm,连接高压线;内电极材料为 304 不锈钢,直径 14 mm,同时作为燃料流道,连接低压线。放电反应发生在氧化剂流道上,电离的气体为空气。等离子体的放电间隙为 5

mm，燃料流道的喷口直径为 2 mm，燃料在出口处立即和电离的氧化剂发生燃烧反应，观察火焰并用高速相机进行记录。

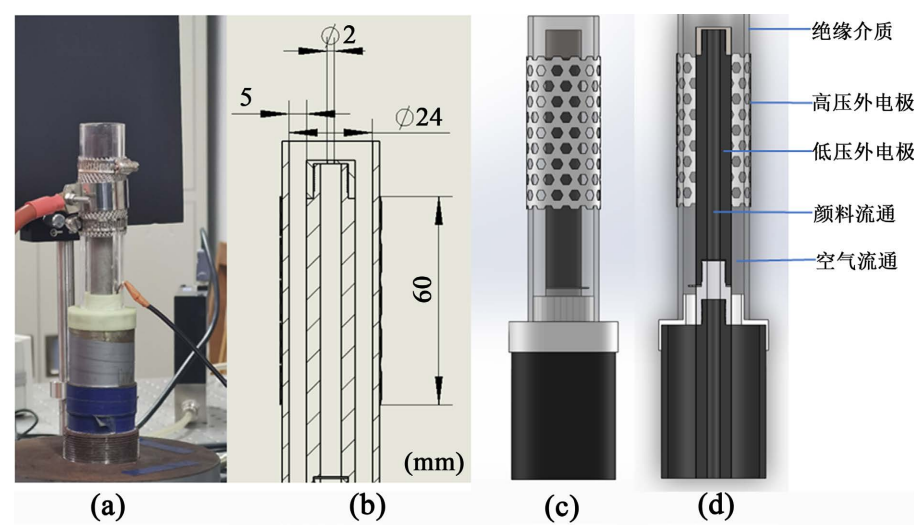


Figure 2. DBD plasma generator. (a) Physical map; (b) The specific size diagram; (c) Front view; (d) Sectional diagram
图 2. DBD 等离子体发生器。(a) 实物图；(b) 具体尺寸示意图；(c) 正视图；(d) 剖面图

表 1 为详细的实验工况， Q 为体积流量，下标 fuel 代表所使用的 NH_3 和 CH_4 燃料；co-flow 代表通入燃烧器中环流通道中的氧化剂； U 表示不同工况下的输入电压，高压电源的放电频率固定为 30 kHz，为增强火焰的稳定性，在燃料中掺入一部分氧化剂，流量为 300sccm， X_{NH_3} 表示燃料中 NH_3 占混合燃料的摩尔分数，可通过式(1)计算可得：

$$X_{\text{NH}_3} = \frac{Q_{\text{NH}_3}}{Q_{\text{CH}_4} + Q_{\text{NH}_4}} \times 100\% \tag{1}$$

Table 1. Experiment conditions
表 1. 实验工况

No.	X_{NH_3}	$Q_{\text{fuel}}/(\text{sccm})$	$Q_{\text{co-flow}}/(\text{slm})$	$U/(\text{kV})$
1	0%	400	30/40/50	30/50/80/110
2	5%	400	30/40/50	30/50/80/110
3	10%	400	30/40/50	30/50/80/110
4	15%	400	30/40/50	30/50/80/110
5	20%	400	30/40/50	30/50/80/110
6	25%	400	30/40/50	30/50/80/110
7	30%	400	30/40/50	30/50/80/110
8	35%	400	30/40/50	30/50/80/110
9	40%	400	30/40/50	30/50/80/110
10	45%	400	30/40/50	30/50/80/110
11	50%	400	30/40/50	30/50/80/110

基于搭建的 DBD 等离子体激励的同轴射流燃烧系统，开展不同电学参数与 NH_3/CH_4 掺燃比例工况的实验研究，探讨其对 NH_3/CH_4 射流火焰特性的影响。使用示波器采集相关的电压和电流参数；利用高速相机捕捉等离子体和火焰图像，表征火焰行为特性。采用李萨如图对电学参数进行分析，综合评价等离子体生成的状况，分析工况的变化对于射流火焰的影响，探求最佳燃烧效能。

3. 结果与讨论

3.1. DBD 等离子体电学特性

DBD 反应器的放电属于丝状放电，在反应器的正负极施加高频交流电压时，丝状放电占据放电空间，为电流脉冲提供了路径。图 3 展示了不同电压下等离子体随时间变化的图像。可以观察到，不同时刻下等离子体发生器产生丝状放电的位置不同，丝状放电在放电间隙中随机产生而且生成和消失都很迅速。随着电压的增加，等离子体放电的显著性增强。电场强度的提升导致更多气体分子被电离，从而生成更多的丝状放电通道。在 30 kV 时，等离子体的放电表现出较为分散且不规则的形态，这源于电场分布的不均匀性。在电压为 110 kV 时，等离子体充满整个间隙，形成一个连续的环形区域。由于发生器的结构是单边介质，电荷在介质侧不会被很快地导出，因此会在介质周围产生累积，存在较长时间。随着电压从 30 kV 升高到 110 kV，放电强度的增强使得等离子体亮度逐渐增加。更高的电压能为气体放电提供更多能量，促使气体分子中的电子发生更高能级的跃迁，产生蓝紫色的光。

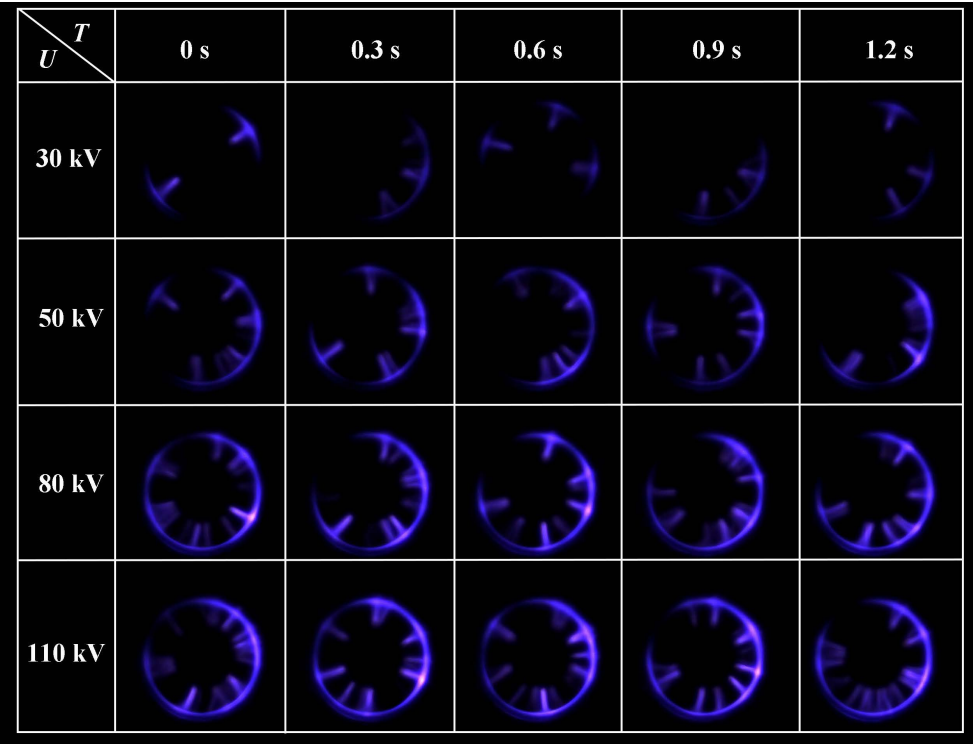


Figure 3. Plasma discharge images changing with time under different voltages
图 3. 不同电压下随时间变化的等离子体放电图像

图 4 展示了不同电压下等离子体的 U-I 波形图，DBD 放电过程中呈现出明显的周期性波动特征。在每个周期内，放电电流会在 1/2 个放电周期处产生尖锐脉冲，这是由于放电过程的丝状放电产生的电流脉冲。当电压为 30 kV 时，放电波形相对平缓，当电压增至 110 kV 时，电流脉冲表现最为显著。随着外

加电压的增大, 电流脉冲也变得更加频繁, 同时可发现 $U_{\max}$ 和 $U_{\min}$ 随电压的上升呈现增大趋势。这是由于 DBD 放电过程是非线性的, 不同的时间和位置会产生不同程度的电荷耗散和积累, 导致同一时间内不同区域电压分布出现差异, 从而导致高低不同的峰值和谷值。此外, 在高电压条件下, 内部介质可能会发生局部击穿现象, 激发强烈的放电过程, 导致某些区域的电位差迅速增大, 整体放电现象也会相应提升至更高的水平。

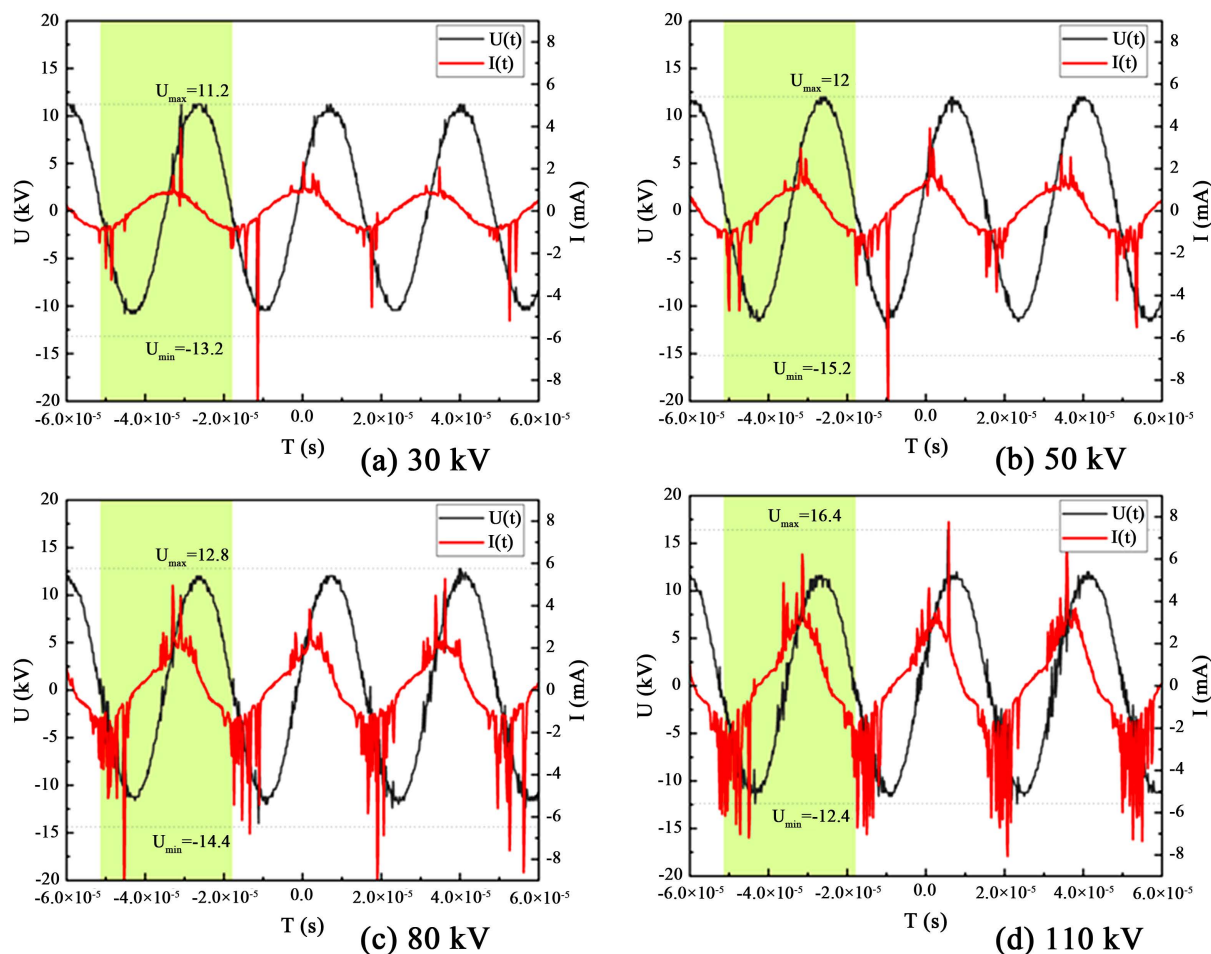


Figure 4. U-I waveforms of plasma under different voltages

图 4. 不同电压下等离子体的 U-I 波形图

输出功率是放电性能的关键指标之一, 体现了反应器的工作性能, 是评价等离子体产生效能的关键因素。在实验中常使用李萨如图来计算功率[19], 即通过测量李萨如图的面积, 进而根据电路的电容大小进行估算, 其公式为

$$P = z k_x k_y f C S_{\text{liss}} \quad (2)$$

其中 z 是电压取样比, 值为 1000; k_x 和 k_y 是示波器两个通道信号采集的总衰倍数, 都为 1, 即实验中并无衰减; f 是频率, 固定为 30 kHz; C 是电源内部的取样电容, 大小是 0.47 μF ; S_{liss} 是李萨如图的面积。因此, 只要测得李萨如图的面积, 就可以计算得到输出功率。输出效率定义为输出功率 P 和电源输入功率 P_{in} 之比

$$\eta = \frac{P}{P_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

图 5 是实验测得的李萨如图像，电容不断反向充放电导致数据点围成形状基本对称，而游离于边线之外的点是由于微放电电丝的生成消失的不规律导致。图形并非完全对称是由于反应器的结构是单边介质，存在一定的放电不对称性。在图 4 中上半部分的脉冲多于下半部分，也是由于这个原因。电压的变化对李萨如图像的形状和面积产生了显著影响。随着电压的增高，图像的边界愈发清晰，放电过程趋于均匀，电流积分在电压增加时呈现线性增长的趋势。

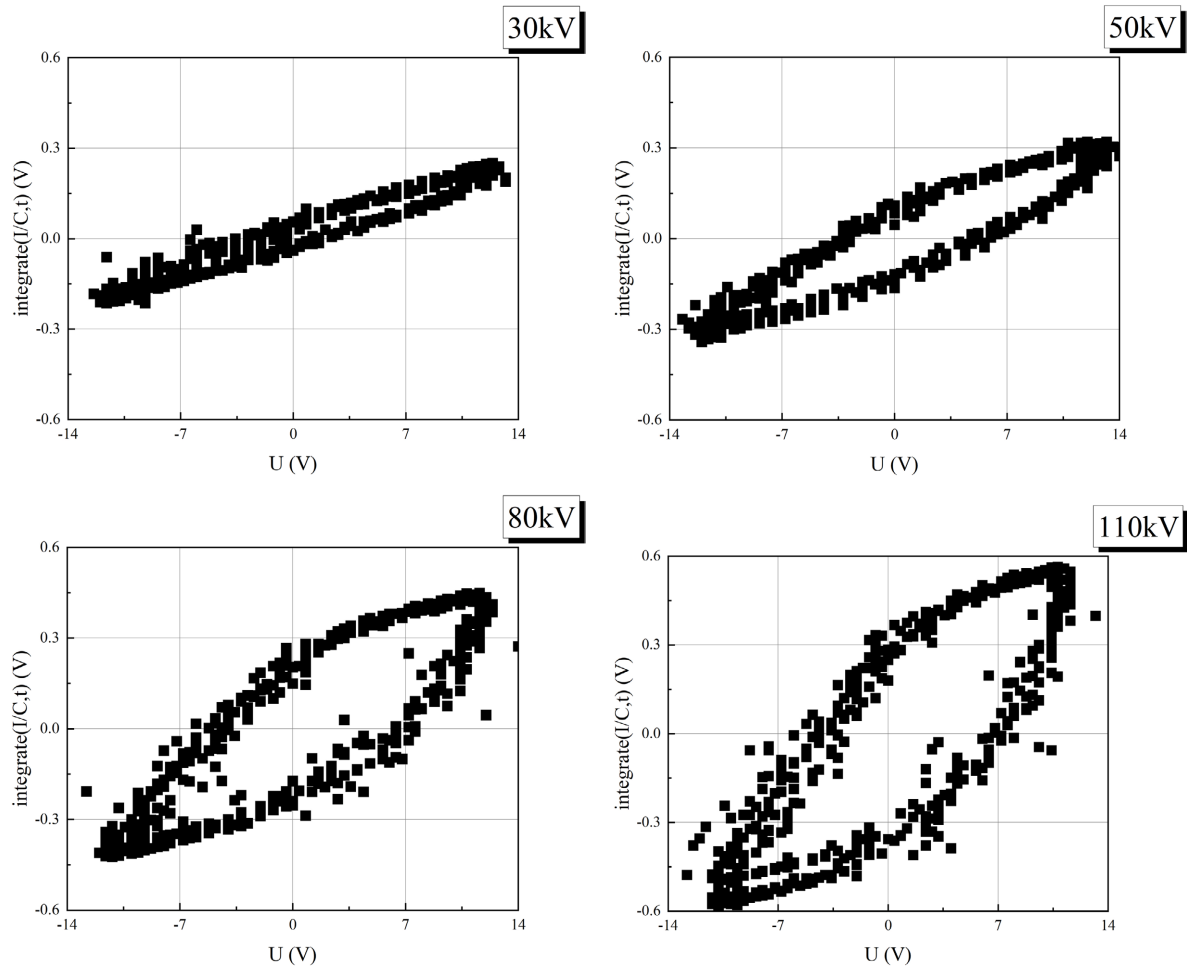


Figure 5. Lissajous image under different voltages
图 5. 不同电压下的李萨如图像

图 6 为不同工况下电源输出功率与输出效率的变化，讨论了不同电压下和不同气体流量下电源输出功率 P 和输出效率 η 的变化关系。在图中可发现，随着 U 的升高， P 呈现出显著的线性增长趋势，这表明较高的电压有助于产生更大的功率输出。同时，不同气体流量工况下的功率曲线呈现出相似的线性增长模式，而斜率有所不同意味着在相同电压下，气体流量越高则功率输出越高。从输出效率方面来看，其随电压的变化表现出非线性的特点，先增大后减小，存在一个效率峰值，这表明存在一个能使系统能量转换效率达到最高的最优工作电压区间，在 80 kV 附近。而在不同气体流量工况下的效率曲线形状十分相似，但最大效率点的位置随着气体流量的增加而稍有偏移，并且高流量工况下的最大效率值略低于低流量工况。

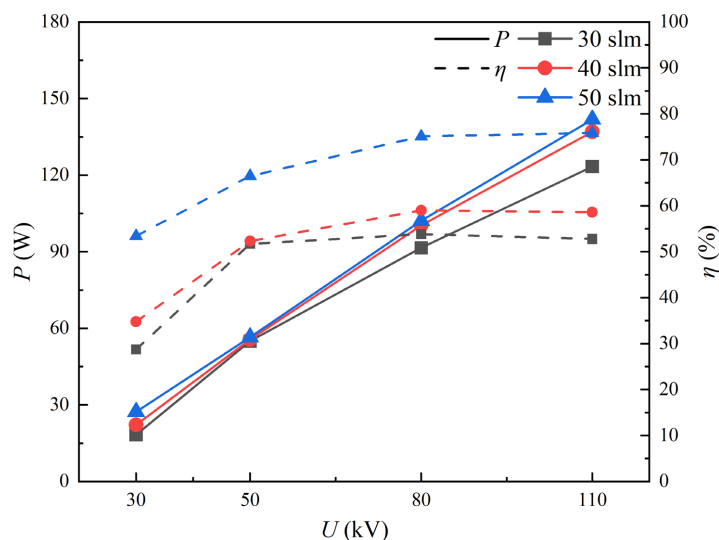


Figure 6. The changes of output power and output efficiency of plasma under various working conditions
图 6. 各工况下电源输出功率与输出效率的变化

3.2. DBD 等离子体作用下的火焰形态表征

3.2.1. 火焰图像表征

通过高速摄影技术捕捉火焰形态的变化,对火焰的动态响应进行了定量和定性分析。火焰的形态不仅受到等离子体电学性能的影响,还与 X_{NH_3} 和气体流量等参数密切相关。通过提取高速相机在各工况 1 s 内拍摄的 100 张照片,使用 MATLAB 程序对每个工况下的火焰图片进行时均处理,获取火焰在等离子体作用下的动态响应特性。

图 7 展示了 25% X_{NH_3} 时不同外加电压下,等离子体作用于 NH_3/CH_4 掺混燃烧的火焰形态。随着等离子体的施加,火焰的颜色变化并不明显,但对于火焰高度有显著影响,主要表现在火焰特征长度的缩短。随着外加电压的增大,等离子体的存在并未使火焰的整体颜色发生显著改变,这意味着等离子体的产生未显著改变火焰的化学组成,在宏观层面火焰的颜色特征维持不变。等离子体的施加促使火焰横向扩散,火焰燃烧加速,进而使火焰高度有所降低。在较高电压时,随着等离子体生成的增强,火焰高度的降低更为显著。

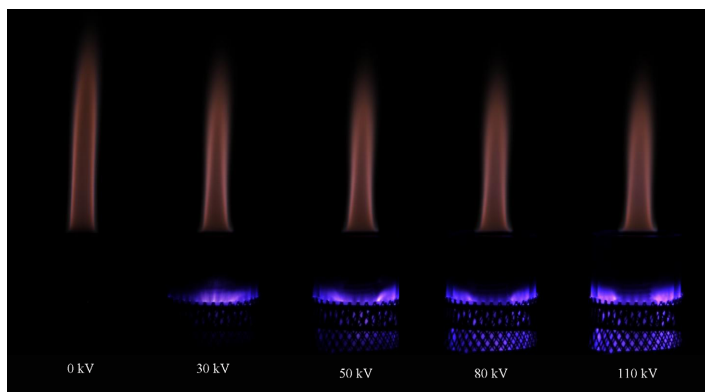


Figure 7. Flame images at 25% X_{NH_3} and flow rate of 40 slm under different voltages

图 7. 在 25% X_{NH_3} 和伴流流量 40 slm 时不同电压下的火焰时均图像

图 8 展示的是在 50 kV 电压和伴流流量 40 slm 时, 不同 X_{NH_3} 对火焰形态影响的图像。在 X_{NH_3} 为 0% 时, 燃烧火焰呈现淡蓝色光, 这是因为 CH_4 燃烧时产生的碳原子和氢原子的激发态到基态的跃迁产生的辐射。随着 X_{NH_3} 的进一步提高, 火焰高度有所下降, 火焰颜色呈现橘黄色特征, 是由 $\text{NH}_2\text{-}\alpha$ 和水蒸气光谱造成的[20]。

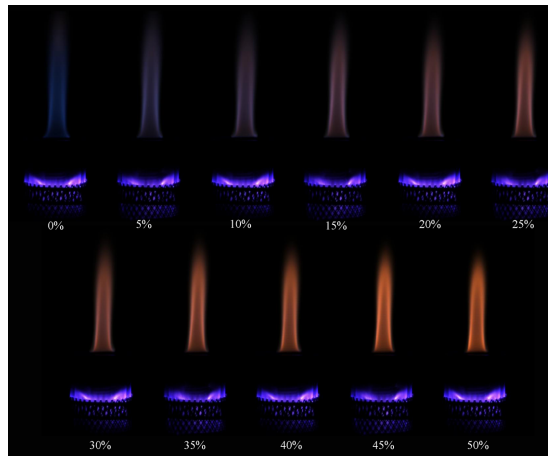


Figure 8. Flame images at 80 kV and flow rate of 40 slm under different X_{NH_3}

图 8. 在 50 kV 和伴流流量 40 slm 时不同 X_{NH_3} 下的火焰时均图像

图 9 展示 25% X_{NH_3} 时 0 kV 和 50 kV 时不同伴流空气流量下的火焰时均图像。在未施加等离子体时, 火焰高度较高, 颜色均匀。随着伴流空气流量的增加, 火焰高度略有降低, 因为气流的提升增加了氧化剂的含量, 促进了火焰的燃烧进程, 这也间接导致了火焰高度的降低。当电压增加到 50 kV 时, 等离子体的引入对火焰形态产生了显著影响。等离子体的热效应和化学活性促进了燃烧反应的进程, 从而提高了燃烧效率。而对比伴流量度的增加, 等离子体的增加对火焰的影响更为显著。

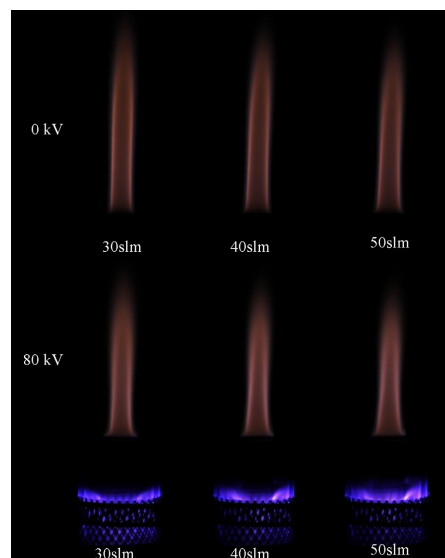


Figure 9. Flame images at 25% X_{NH_3} under different co-flow air rates

图 9. 在 25% X_{NH_3} 时不同伴流空气流量和电压下的火焰时均图像

3.2.2. 火焰特征

为了更清晰地对比火焰图像的变化,使用 MATLAB 程序对火焰图像进行定量处理。图 10 表现了采用火焰边缘识别算法,通过一系列图像处理技术来增强火焰特征并准确定位其边缘。首先,通过高速相机捕获火焰的原始图像,再将彩色的原始图像转换为灰度图像,减少数据维度的同时保留了火焰的亮度 and 对比度信息。应用自适应阈值技术,将灰度图像转换为二值图像,使得火焰区域与背景形成鲜明对比,便于边缘检测。在二值化的基础上,采用形态学操作去除图像中由环境光干扰或传感器噪声引起噪声。最后利用边缘检测算法,从处理后的图像中提取火焰的边缘,进而得到火焰面积、宽度和高度的具体数据。最后在每组工况下的图片中取出均值,观察火焰形态。

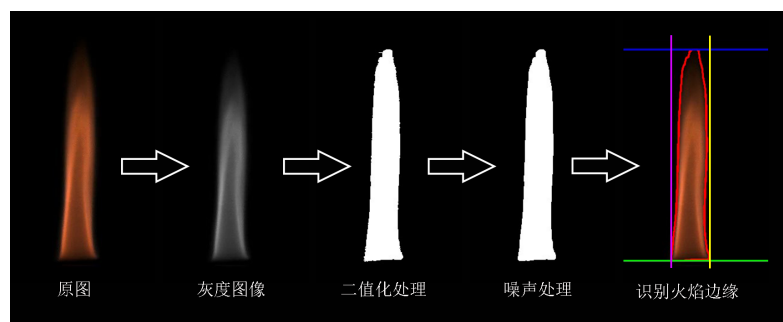


Figure 10. Flame-specific morphology feature extraction process

图 10. 火焰特征提取过程

图 11 展示了在不同电压和 X_{NH_3} 条件下火焰面积的变化趋势。在图 11(a)中,随着电压从 0 kV 增加至 110 kV,三种伴流空气流量下的火焰面积均呈现下降趋势,这说明空气等离子体中的物质具有较高的化学活性,加速了火焰燃烧的进程,随着电压的增大现象更明显。而在图 11(b)中, X_{NH_3} 从 0% 增加至 50% 时,火焰面积值不断降低,并且在施加等离子体之后,火焰面积降低更为明显。

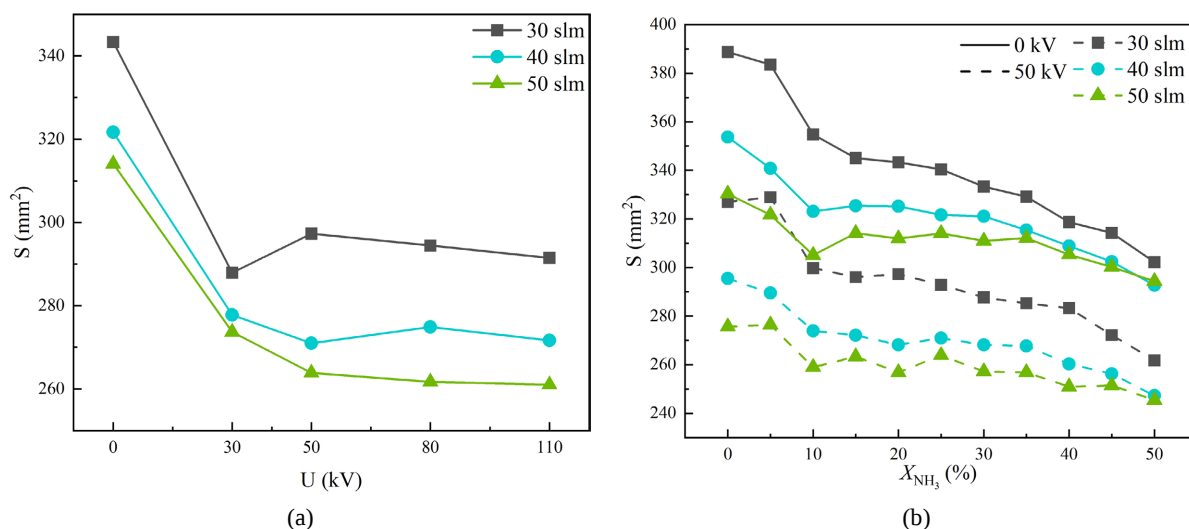


Figure 11. Flame area under different co-flow air rates. (a) Voltage; (b) X_{NH_3}

图 11. 在不同伴流空气流量下的火焰面积。(a) 电压; (b) X_{NH_3}

图 12(a)显示了在不同伴流空气流量下火焰高度随电压变化的情况。结果表明,随着电压的增加,火

焰高度整体呈现下降趋势,但在特定情况下会出现不同的变化。在 30 slm 时,随着电压的升高火焰高度从 58 mm 降至最低 46 mm;在 40 slm 和 50 slm 时,火焰高度分别从 52 mm 和 50 mm 下降到 44 mm 和 42 mm。图 12(b)显示了在 0 kV 和 50 kV 两种电压下火焰高度随 X_{NH_3} 变化的情况。随着 X_{NH_3} 的增加,火焰高度总体呈下降趋势。在 30 slm 情况下,0 kV 时的火焰高度从 65 mm 降至 50 mm;50 kV 的火焰高度从 60 mm 降至 45 mm。同样的趋势也在 40 slm 和 50 slm 时得到了验证,且电压和伴流空气流量的增加进一步加剧了火焰高度的下降。这些结果表明电压和 X_{NH_3} 的增加都会导致火焰高度的显著下降,而流量的改变也对火焰高度有显著影响。

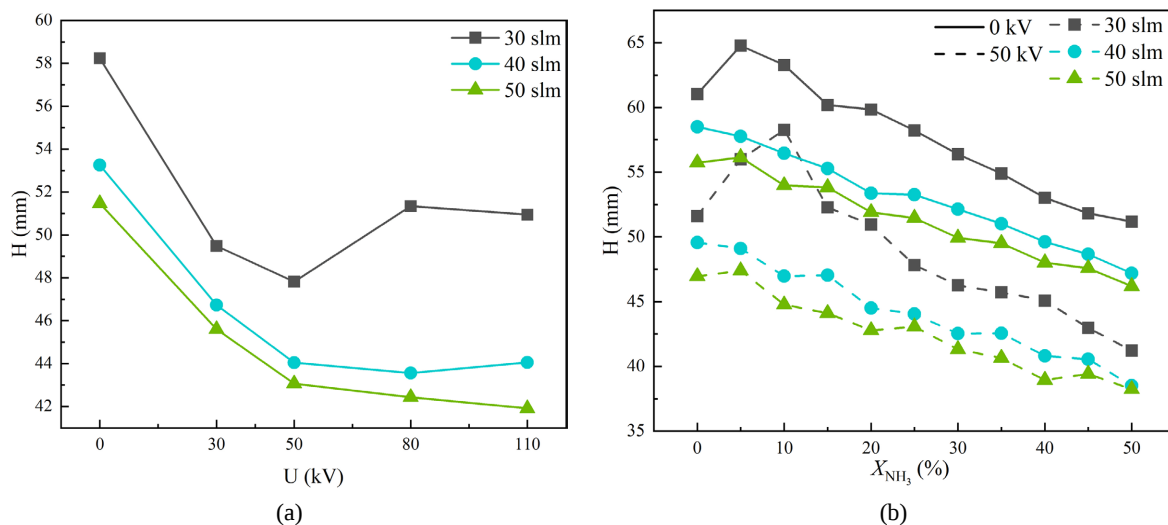


Figure 12. Flame height under different co-flow air rates. (a) Voltage; (b) X_{NH_3}

图 12. 在不同伴流空气流量下的火焰高度。(a) 电压; (b) X_{NH_3}

图 13(a)显示了火焰宽度随电压变化的情况。在三种流量下,火焰宽度都随着电压的增加而增加。30 slm 时,火焰宽度从 0 kV 的 6 mm 增加到 110 kV 的 20 mm;40 slm 时,火焰宽度从 6 mm 增加到 24 mm;50 slm 时,火焰宽度从 6 mm 增加到 22 mm。图 13(b)显示了火焰宽度随 X_{NH_3} 的变化情况。在 0 kV 和 30 kV 和不同流量,火焰宽度均表现出先略微增加后大幅减少的趋势。在 0 kV 电压下,30 slm 时火焰宽度从 7.5 mm 上升到 8.5 mm,然后降至 7 mm;40 slm 时火焰宽度从 8 mm 上升到 10 mm,然后降至 7.5 mm;50 slm 时火焰宽度从 8 mm 上升到 9 mm,然后降至 7.5 mm。在 30 kV 电压下,火焰宽度总体比 0 kV 电压下略大,但变化趋势相似。这些结果表明电压的增加会导致火焰宽度显著增加,而 X_{NH_3} 增加火焰宽度的整体趋势减少。这表明电压的增加会导致火焰宽度的显著增加,这是因为高电压下产生的强电场会使等离子体的电离强度增加,导致更多的活性粒子生成,这些活性粒子会促进燃料扩散到火焰的外围,导致火焰宽度的增加。

4. 结论

本文通过实验方法深入探讨了介质阻挡放电等离子体激励下 NH_3/CH_4 掺混燃烧的火焰特性。基于自行研制的等离子体发生器和 NH_3/CH_4 掺混燃烧实验系统,开展多工况测量实验,详细分析了等离子体耦合掺混燃烧方案中等离子体电学参数和掺氨比例对 NH_3/CH_4 火焰的影响。以下是研究的主要结论:

1) DBD 等离子体的引入能够显著改善 NH_3/CH_4 掺混燃烧的火焰形态,主要表现为降低火焰高度和增加火焰宽度。这一现象表明等离子体的热效应和化学活性促进了燃烧反应的进程,从而影响了火焰的形貌特征。

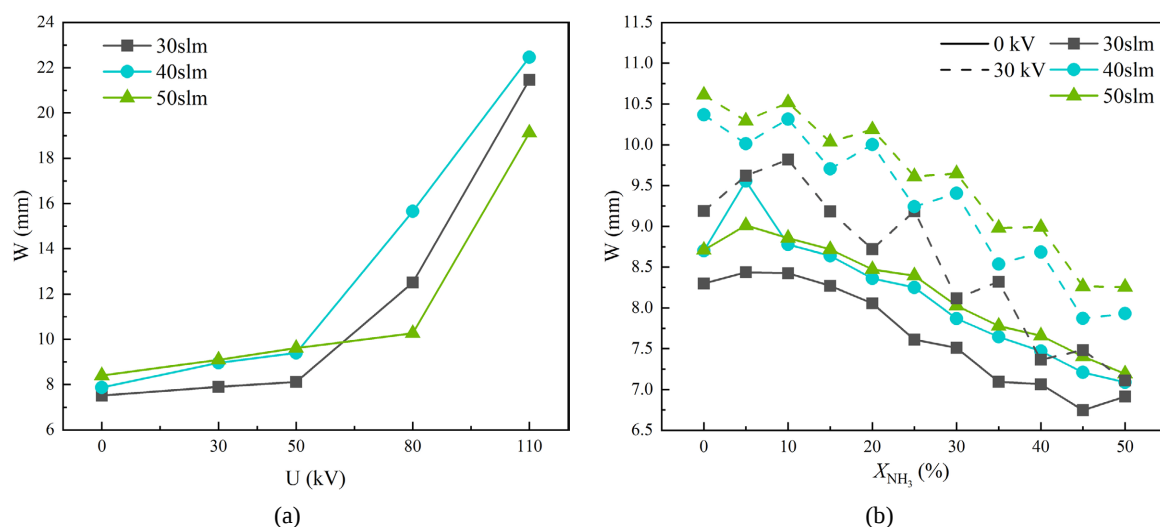


Figure 13. Flame width under different co-flow air rates. (a) Voltage; (b) X_{NH_3}

图 13. 在不同伴流空气流量下的火焰宽度。(a) 电压；(b) X_{NH_3}

2) 随着外加电压的增加, 火焰面积和火焰高度均呈现下降趋势, 而火焰宽度则随之增加。这表明高电压下产生的强电场使等离子体的电离强度增加, 导致更多的活性粒子生成, 这些活性粒子扩散到火焰的外围, 增加了火焰的宽度。

3) X_{NH_3} 的增加会导致火焰高度降低, 而火焰宽度则呈现整体减少的趋势。 NH_3 的添加导致火焰的锋面缩短, 使火焰高度下降。 X_{NH_3} 应控制在 25%~35% 区间, 以平衡火焰稳定性与燃烧效率, 避免因 NH_3 比例过高导致火焰锋面过度缩短。

本研究揭示了等离子体与 NH_3/CH_4 掺混燃料的协同作用机制, 为氨燃料的清洁高效利用提供了实验依据与理论支撑。

致 谢

感谢山东省自然科学基金(编号: ZR2023ME006)的资助。

参考文献

- [1] MacFarlane, D.R., Cherepanov, P.V., Choi, J., Suryanto, B.H.R., Hodgetts, R.Y., Bakker, J.M., *et al.* (2020) A Roadmap to the Ammonia Economy. *Joule*, **4**, 1186-1205. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>
- [2] Dolan, R.H., Anderson, J.E. and Wallington, T.J. (2021) Outlook for Ammonia as a Sustainable Transportation Fuel. *Sustainable Energy & Fuels*, **5**, 4830-4841. <https://doi.org/10.1039/d1se00979f>
- [3] Lee, H. and Lee, M.J. (2021) Recent Advances in Ammonia Combustion Technology in Thermal Power Generation System for Carbon Emission Reduction. *Energies*, **14**, Article 5604. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5604>
<https://doi.org/10.3390/en14185604>
- [4] 张屿, 赵义军, 曾光, 等. 氨燃料强化燃烧技术研究进展[J]. 能源环境保护, 2023, 37(5): 129-144.
- [5] 赵争辉, 李航锦, 吴超杭, 等. H_2 与氨混燃增强火焰燃烧特性模拟研究[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(1): 18-27.
- [6] Kang, L., Pan, W., Zhang, J., Wang, W. and Tang, C. (2023) A Review on Ammonia Blends Combustion for Industrial Applications. *Fuel*, **332**, Article ID: 126150. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126150>
- [7] He, C., Jiang, J., Sun, M., Yu, Y., Liu, K. and Zhang, B. (2022) Analysis of the NH_3 Blended Ratio on the Impinging Flame Structure in Non-Premixed $\text{CH}_4/\text{NH}_3/\text{Air}$ Combustion. *Fuel*, **330**, Article ID: 125559. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125559>
- [8] Ji, L., Wang, J., Hu, G., Mao, R., Zhang, W. and Huang, Z. (2022) Experimental Study on Structure and Blow-Off

- Characteristics of NH_3/CH_4 Co-Firing Flames in a Swirl Combustor. *Fuel*, **314**, Article ID: 123027. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123027>
- [9] Nourani Najafi, S.B., Mokhov, A.V. and Levinsky, H.B. (2022) Investigation of the Stability, Radiation, and Structure of Laminar Coflow Diffusion Flames of CH_4/NH_3 Mixtures. *Combustion and Flame*, **244**, Article ID: 112282. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112282>
- [10] Xie, M., Tu, Y. and Peng, Q. (2023) Numerical Study of NH_3/CH_4 MILD Combustion with Conjugate Heat Transfer Model in a Down-Fired Lab-Scale Furnace. *Applications in Energy and Combustion Science*, **14**, Article ID: 100144. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2023.100144>
- [11] Zhang, M., An, Z., Wei, X., Wang, J., Huang, Z. and Tan, H. (2021) Emission Analysis of the CH_4/NH_3 /Air Co-Firing Fuels in a Model Combustor. *Fuel*, **291**, Article ID: 120135. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120135>
- [12] Lacoste, D.A. (2023) Flames with Plasmas. *Proceedings of the Combustion Institute*, **39**, 5405-5428. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.06.025>
- [13] Ju, Y. and Sun, W. (2015) Plasma Assisted Combustion: Dynamics and Chemistry. *Progress in Energy and Combustion Science*, **48**, 21-83. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.12.002>
- [14] Deng, J., Wang, P., Sun, Y., Zhou, J., Luo, Y. and He, D. (2022) Design and Experimental Investigation of a Dual Swirl Combined DBD Plasma Combustor Head Actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, **344**, Article ID: 113707. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113707>
- [15] Zare, S., Lo, H.W., Roy, S. and Askari, O. (2020) On the Low-Temperature Plasma Discharge in Methane/Air Diffusion Flames. *Energy*, **197**, Article ID: 117185. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117185>
- [16] 李森, 陶正德, 韩微笑, 等. 介质阻挡放电辅助稀薄甲烷-空气燃烧点火过程的一维数值模拟[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(7): 609-617.
- [17] 陈庆亚, 聂万胜, 陈川, 等. 介质阻挡体放电对甲烷扩散火焰特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(3): 768-775.
- [18] Kim, G.T., Park, J., Chung, S.H. and Yoo, C.S. (2024) Synergistic Effect of Non-Thermal Plasma and CH_4 Addition on Turbulent NH_3 /Air Premixed Flames in a Swirl Combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, **49**, 521-532. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.213>
- [19] Liwei, Z., Liqiu, W., Na, S., Desheng, Z., Hong, L., Yongjie, D., et al. (2022) Energy Conversion Analysis of Ion Wind in Surface Dielectric Barrier Discharge at Low Pressure. *Physica B: Condensed Matter*, **640**, Article ID: 414069. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.414069>
- [20] Hayakawa, A., Goto, T., Mimoto, R., Kudo, T. and Kobayashi, H. (2015) NO Formation/Reduction Mechanisms of Ammonia/Air Premixed Flames at Various Equivalence Ratios and Pressures. *Mechanical Engineering Journal*, **2**, 14-00402. <https://doi.org/10.1299/mej.14-00402>