

生物柴油液滴在直流电场中的燃烧特性

袁靖涵^{1,2}, 甘云华^{1,2}

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510641; 2. 广东省能源清洁高效利用重点实验室, 广州 510641)

摘要: 本文研究了不同电压强度的直流电场对生物柴油液滴燃烧特性的影响, 包括火焰形态、燃烧速率及碳烟生成特性。实验采用某公司生产的棕榈油基生物柴油为燃料, 通过高速摄像与前向光照射衰减法相结合的实验方法, 结合高压直流电源、电极系统及高速摄像设备, 对液滴燃烧过程中的火焰结构变化、燃烧速率及碳烟排放特征进行了定量分析。研究发现, 随着电压从 2 kV 增至 8 kV, 火焰上部高度逐渐降低而下部显著扩展, 形成不对称火焰结构; 在 8 kV 电压下, 火焰分布趋于均匀对称, 燃烧时间缩短达 30.6%, 燃烧速率提升, 碳烟质量峰值较无电场条件降低 29.8%。此外, 碳烟质量呈现 100 Hz 的周期性脉动特征, 但其频率不受电压强度影响。研究结果表明, 直流电场可通过缩短燃烧周期、改善火焰稳定性及减少颗粒物排放显著优化生物柴油液滴的燃烧性能。

关键词: 生物柴油; 液滴燃烧; 电场效应; 碳烟质量; 燃烧持续期

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2026)01-0042-07

Combustion Characteristics of Biodiesel Droplets in a Direct Current Electric Field

Yuan Jinghan^{1,2}, Gan Yunhua^{1,2}

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Clean and Efficient Utilization of Energy, Guangzhou 510641, China)

Abstract: This study investigates the effects of direct current electric fields on the combustion characteristics of biodiesel droplets, including flame morphology, combustion rate, and soot generation characteristics. The experiment utilized palm oil-based biodiesel produced by a certain company as fuel, and employed a combination of high-speed imaging and forward light attenuation methods, along with a high-voltage DC power supply, electrode system, and high-speed imaging equipment, to quantitatively analyze the changes in flame structure, combustion rate, and soot emission characteristics during the combustion of droplets. The study found that as the voltage increased from 2 kV to 8 kV, the height of the upper part of the flame gradually decreased while the lower part expanded significantly, forming an asymmetrical flame structure; at 8 kV, the flame distribution tended to be uniform and symmetrical, the combustion time decreased by 30.6%, the combustion rate increased, and the peak soot mass was reduced by 29.8% compared to the conditions without the electric field. Additionally, the quality of soot exhibited a periodic pulsation at 100 Hz, but its frequency was unaffected by the voltage intensity. The results indicate that the DC electric field can significantly optimize the combustion performance of biodiesel droplets by shortening the combustion cycle, improving flame stability, and reducing particulate matter emissions.

收稿日期: 2025-05-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52376108).

作者简介: 袁靖涵(2001—), 男, 硕士研究生, 1065526914@qq.com.

通信作者: 甘云华, 男, 博士, 教授, ganyh@scut.edu.cn.

Keywords: biodiesel; droplet burning; electric field effect; soot quality; duration of combustion

随着全球对可再生能源需求的不断增长,生物柴油作为一种可持续替代能源受到了广泛关注^[1-2]. 生物柴油主要由植物油或动物脂肪通过酯交换反应制得,具有较低的硫含量和较高的十六烷值,这使其成为传统石油基柴油的理想替代品^[3]. 然而,在实际应用中,生物柴油仍面临燃烧效率低下、碳烟排放高等问题^[4-5].

近年来,随着研究的深入,发现碳氢燃料燃烧过程中会产生大量带电粒子(如 H_3O^+ 、 HCO^+ 、 OH^- 等),这些粒子在火焰中广泛分布,并会受到电场的作用. 这一现象为通过外部电场调控燃烧行为提供了理论依据^[6-7]. 已有研究表明,电场可以通过优化燃料与氧化剂混合比以及增强离子风效应等机制来提高燃烧效率^[8-9]. Imamura 等^[10]通过实验探究了乙醇、正辛烷及甲苯液滴在垂直电场与常规重力场共同作用下的燃烧特性,发现电场力与自然浮力的相互作用显著改变了火焰结构,而火焰结构的变化进一步对液滴燃烧速率产生调控作用. 张扬等^[11]探讨了交变电场对甲烷/空气扩散火焰燃烧过程及其氮氧化物生成的影响. 闫丽敏^[12]通过实验和数值模拟研究了电场对小尺度火焰形态和燃烧特性的调控机制,崔巍等^[13]则利用数值模拟方法研究了电场对火焰中离子浓度及其对燃烧反应速率的影响.

在此基础上,电场干预燃烧过程的研究逐渐成为热点,其中直流电场已被证实能显著提升液滴燃烧的性能表现^[14]. 吴筱敏等^[15]通过实验研究了交直流电场对甲烷-空气火焰燃烧特性的影响. 黄星等^[16]探讨了直流电场对 AP/HTPB 复合固体推进剂燃烧特性的影响,包括火焰传播速度和燃烧稳定性. 方朝纲等^[17]发现竖直电场可以降低正癸烷液滴燃烧中的碳烟体积分数并增加燃烧速率;左磊等^[18]分析了直流电场条件下对生物柴油火焰形态的影响,揭示了不同电压条件下火焰形态的变化规律. Luo 等^[19]的研究显示,在电场作用下乙醇液滴燃烧时火焰高度减小、宽度略有增大,且火焰温度先升高后降低. 江经纬^[20]进一步研究了基于静电喷雾的乙醇/生物柴油掺混燃料的雾化及燃烧特性,发现掺入乙醇可以产生更小且均匀的液滴,从而降低一氧化碳排放.

尽管上述研究为理解直流电场对燃烧过程的影响提供了重要依据,但对于生物柴油这种复杂成分的燃料在不同电压强度下的直流电场燃烧特性了解尚不充分. 已有研究多集中于单一燃烧特征的分析,未

能系统揭示电场对多燃烧特征的综合影响规律. 尤其在生物柴油体系中,电场对关键燃烧特征的调控效应尚未明确,基于此,本研究选取棕榈油基生物柴油作为实验燃料,旨在深入探究其在不同电压条件下的燃烧特性. 分析电场对生物柴油液滴火焰形貌、燃烧速率及碳烟生成的具体影响,为进一步理解生物柴油在直流电场下的燃烧特性提供更加全面的认识,推动该领域的技术进步和发展.

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验中采用某公司所生产的生物柴油,原料油为棕榈油,其在 25 °C 下的理化性质见表 1.

表 1 25 °C 下生物柴油的理化性质及不同碳链长度脂肪酸组成

Tab.1 Physicochemical properties of biodiesel at 25 °C and fatty acid composition with different carbon chain lengths

密度/ (g/cm ³)	介电 常数	C14(含以 下)比例/%	C16 比例/%	C18 比例/%	C20 比例/%
0.866	2.8	0.3	20	78	0.8

1.2 实验设置与方法

在本研究中,选择生物柴油作为燃料以探索其在不同电场条件下的燃烧特性. 实验设计将单个液滴通过量程为 10 μL 的微量注射器精确控制体积后悬挂在热电偶的尖端进行燃烧分析. 为确保液滴在燃烧过程中能够稳定悬挂,并便于对燃烧过程中的火焰形态和液滴尺寸变化进行图像记录,热电偶被设置为与水平面成 30°角放置. 实验装置示意图如图 1 所示,展示了整个实验系统的布局. 将液滴体积严格控制在 1 μL ,使用直径为 0.3 mm 的 S 型热电偶来悬挂液滴. 采用正高压直流电源(BOHR HV 71230P)连接两个平行且水平放置的铜板电极(60 mm × 60 mm),以生成均匀电场,两电极之间的距离固定为 80 mm. 上极板与正高压直流电源相连,而下极板接地,从而形成所需的电场环境. 研究中设定的电压 U 分别为 0 kV、2 kV、4 kV、6 kV 和 8 kV,以便于系统地分析电场强度对燃烧特性的影响. 实验在标准大气压条件下进行,环境温度保持在 25 °C. 点燃液滴的过程采用 XKT203-60 型号遥控电弧点火器通过高压模块进行点火,当观察到液滴被点燃后立即关闭电弧,确保点火迅速且对燃烧过程的干扰最小化,让液

滴能够在常温常压环境下自然燃烧. 高速摄像机 (Phantom VEO 1310L, USA) 用于捕捉火焰的动态演变及液滴直径的变化过程, 其分辨率为 960 像素 × 960 像素, 帧率为 4000 帧/s. 拍摄时的照明由 LED 光源结合匀光膜提供. 碳烟质量则通过前向光照射衰减法^[21]进行测量, 以评估电场对减少颗粒物排放的效果. 本研究中, 液滴粒径、火焰粒径以及碳烟质量的测量误差分别控制在 ± 0.2%、± 0.4% 和 ± 6%.

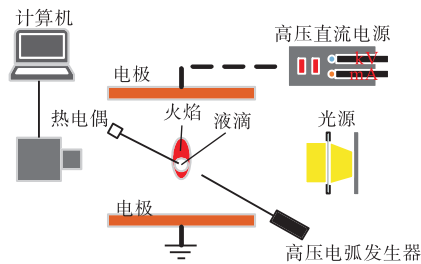


图 1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

2 实验结果

2.1 火焰形貌

本研究中探索了不同电压条件工况下液滴燃烧过程中的火焰形态变化. 为简洁起见, 并突出低电压与高电压极端情况下的显著差异性特征, 本节主要展示 2 kV 和 8 kV 电压条件下的火焰图像. 以便更清晰地对比低电压与高电压对火焰形态的影响. 图 2 和图 3 分别显示 2 kV 和 8 kV 条件下 0 至 0.6 s 的火焰形态变化的图像. 在 2 kV 电压条件下, 由于上部火焰较长, 将液滴置于光源下方以捕捉整个火焰; 而在 8 kV 电压条件下, 因为上部火焰较短, 将液滴平面放置于光源中心以突出火焰下半部分的细节特征. 其中火焰出现的时间定义为 0 s. 实验观察表明, 在恒定电压条件下, 火焰高度在 0 s 到 0.6 s 的时间范围内随燃烧时间推移逐步上升. 具体来说, 在燃烧初期, 液滴迅速气化并释放大气燃料, 导致火焰高度快速增加. 在整个观察时间段内, 火焰高度未显示出下降趋势, 而是持续增长. 此外, 在燃烧时间相同的情况下, 随着电压的不断增大, 两极板间的电场强度也随之增大. 不同电压条件下火焰的行为存在显著差异. 特别是在 8 kV 电压条件下, 与 2 kV 电压条件相比, 在同一时间段内的上火焰高度明显较低. 这表明高电压对火焰高度具有一定的抑制作用. 而下半部分的火焰高度则不断被拉长. 当电压值增加到 8 kV, 并且燃烧时间为 0.6 s 时, 液滴中心上下火焰的高度呈现对称结构. 这表明电压对火焰高度具有一定的

抑制作用. 电场不仅加速了燃烧过程, 还改变了火焰的形态分布, 使得火焰更加均匀地分布在液滴周围. 为进一步量化电压对燃烧时间的影响, 进行了系统测量. 结果显示, 在不同电压条件下 (0 kV、2 kV、4 kV、6 kV 和 8 kV), 对应的燃烧时间分别为 986 ms、969 ms、817 ms、794 ms 和 685 ms. 相较于无电压条件, 燃烧时间分别减少了 1.7%、17.1%、19.4% 和 30.6%.

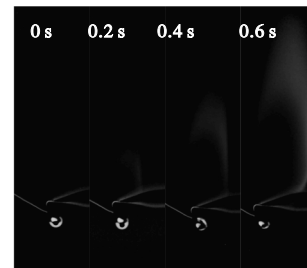


图 2 $U = 2 \text{ kV}$ 时的火焰燃烧图像

Fig.2 Flame image when U is 2 kV

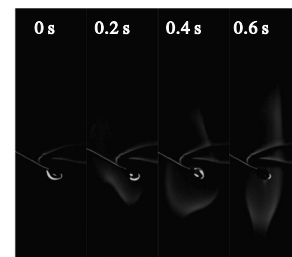


图 3 $U = 8 \text{ kV}$ 时的火焰燃烧图像

Fig.3 Flame image when U is 8 kV

为了定量分析火焰高度随燃烧时间的变化特性, 研究通过图 4 和图 5 展示了处理结果. 根据这些图表的数据, 液滴中心火焰上半部分的高度在燃烧初期逐渐增加, 但随着电压升高, 其达到的最大高度逐渐减小; 与此同时, 下半部分的火焰高度也表现出类似的增长趋势, 但随着电压升高, 其达到的最大高度显著增加. 具体而言, 电压越高, 火焰上半部分的最大

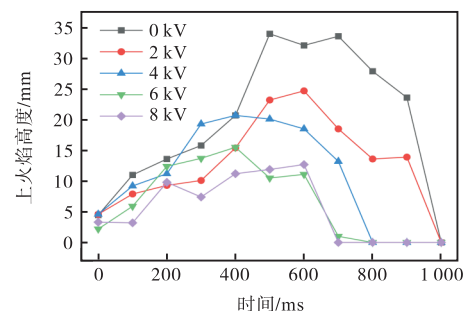


图 4 不同电压时上火焰高度随燃烧时间的变化

Fig.4 The change in upper flame height with combustion time at different voltages

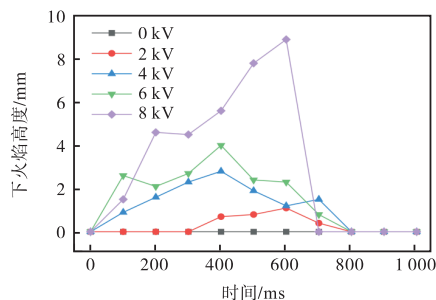


图5 不同电压时下火焰高度随燃烧时间的变化

Fig.5 The change in lower flame height with combustion time at different voltages

高度越小,而下半部分的最大高度越大,显示出底部火焰更加持久且强烈的特点。

2.2 燃烧速率

分析液滴图像,研究测量了液滴在两个正交方向上的直径:水平方向直径 D_2 和垂直方向直径 D_1 ,如图6所示。基于悬浮液滴接近球形的假设,其水平截面可视为圆形^[22]。根据这两个方向的直径值,能够计算出与实际液滴体积相等的理想球体直径,即所谓的等效直径如式(1)所示:

$$D = 2\sqrt[3]{(D_1/2)(D_2/2)^2} \quad (1)$$

式中, D 是液滴瞬时等效直径。

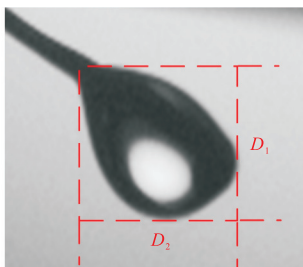


图6 液滴等效直径示意

Fig.6 Schematic diagram of the equivalent diameter of a droplet

燃烧速率是刻画液滴燃烧过程的重要参数,液滴燃烧速率可由燃烧过程液滴瞬时直径的变化进行评估。定义的液滴燃烧速率为

$$K = -d(D^2)/dt \quad (2)$$

式中, t 为时间。计算出的不同电压下的液滴燃烧速率如图7所示。

基于不同电压条件下液滴燃烧速率的变化特征,研究发现:在燃烧初期,0 kV 条件下的燃烧速率达 $3.7 \text{ mm}^2/\text{s}$,为所有电压条件中的最高值;随着电压增至 2 kV、4 kV、6 kV 和 8 kV,燃烧速率依次降低,但各条件下的变化趋势存在显著差异。其中,2 kV、6 kV 和 8 kV 条件下的燃烧速率在早期阶段差异较小,但均显著低于无电场条件。这一现象表明,燃烧

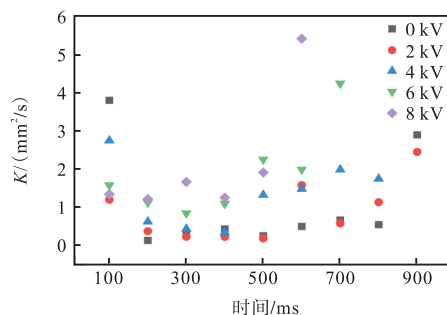


图7 不同电压下的液滴燃烧速率

Fig.7 Droplet combustion rate constant at different voltages

初期在电压作用下,电场驱动的离子风效应尚未形成有效混合增强,同时火焰锋面动力学受限,导致燃料-氧化剂混合效率下降。进入燃烧中期,4 kV 条件下燃烧速率出现局部峰值,而 8 kV 条件下的速率显著跃升至较高水平。一方面,电场通过优化燃料-氧化剂混合比改善反应路径的均匀性;另一方面,高电场通过改变火焰传播路径和增强湍流混合强度提升燃烧效率。当电压升高至 8 kV 时,燃烧速率在后期阶段持续维持最高水平,相比之下,其他电压条件下的燃烧速率在后期均呈下降趋势,表明高电场强度通过协同调控蒸发-混合-反应过程,实现了燃烧速率的动态维持与能量释放效率的优化。这一发现与 Imamura 等^[10]关于乙醇液滴燃烧的研究以及方朝纲等^[17]关于正癸烷液滴燃烧的结论具有一致性。这些研究共同表明,电场能有效促进液滴燃烧。

2.3 碳烟质量

在本研究中,采用前向光照射衰减法测量了生物柴油液滴燃烧过程中产生的碳烟质量,并对不同电压工况下的火焰图像进行了逐帧分析,计算每帧图像中的碳烟质量,详细捕捉燃烧过程中碳烟生成的动态变化情况。图8展示了在 0 kV 电压条件下,燃烧过程中碳烟质量随燃烧时间的变化趋势呈现出先增大后减小的特征。具体而言,在燃烧初期,随着燃烧时间的增加,碳烟质量逐渐上升,达到一个峰值后开始下降。这一现象表明,在燃烧初期,由于燃料不完全燃烧导致碳烟量增加,随着燃烧进程的发展和更充分的氧化反应,碳烟量减少。值得注意的是,这种先增后减的趋势在其他电压条件下也得到了验证,即碳烟质量随燃烧时间的变化均表现出类似的模式。进一步分析显示,尽管不同电压条件下碳烟质量的变化趋势相似,但最大碳烟质量值随着电压的升高而显著降低。如图9所示,在 8 kV 电压条件下,燃烧过程中碳烟质量随燃烧时间的变化同样表现出先增后减的趋势,但其最大碳烟质量显著低于 0 kV 电压条件。这表明电场强度对碳烟生成具有明显的抑制作用。为

深入理解电压对燃烧过程中碳烟生成的影响,对不同电压条件下燃烧过程中的碳烟质量峰值进行了分析,结果如图 10 所示. 研究表明,随着电压的升高,最大碳烟质量呈现出明显的下降趋势:在 0 kV 时的最大碳烟质量为 5.89×10^{-9} kg;在 2 kV 时略微下降至 5.86×10^{-9} kg,减少了约 0.51%;在 4 kV 时显著降至 5.32×10^{-9} kg,降幅约为 9.68%;在 6 kV 时进一步降至 4.48×10^{-9} kg,降幅约为 15.79%;而在 8 kV 时达到最低值 4.13×10^{-9} kg,相较于 6 kV 降低了约 7.81%,相较于 0 kV 则降低了 29.88%. 这些结果揭示了电场强度对碳烟生成的有效抑制作用. 电场不仅能够加速燃料蒸发、改善火焰结构,还能减少碳烟前驱体的生成路径. 因此,通过施加适当的电场,可

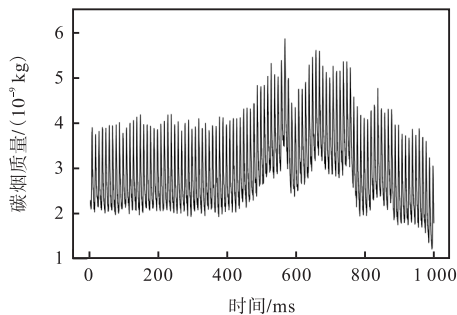


图 8 $U = 0$ kV 时碳烟质量随燃烧时间的变化

Fig.8 The variation of soot quality with combustion time when U is 0 kV

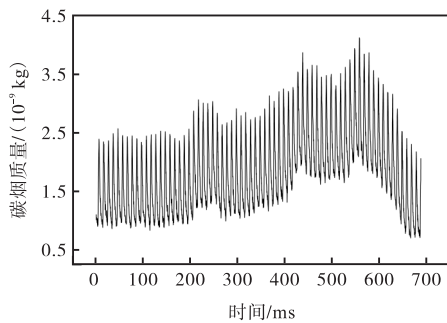


图 9 $U = 8$ kV 时碳烟质量随燃烧时间的变化

Fig.9 The variation of soot quality with combustion time when U is 8 kV

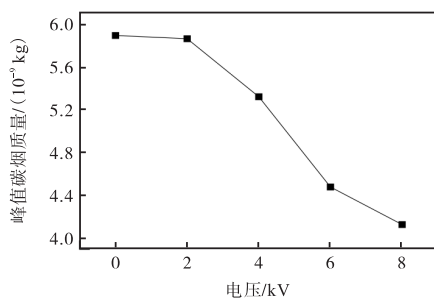


图 10 不同电压条件下峰值碳烟质量

Fig.10 Peak soot quality at each voltage

以显著减少燃烧过程中碳烟的生成,从而有助于提高燃烧的清洁性.

2.4 碳烟质量周期性

图 11 展示了生物柴油液滴燃烧过程中碳烟质量的脉动现象,其波动频率为 100Hz. 为清晰呈现这一周期性特征,选取了 100 ~ 150 ms 的时间段进行分析,避免数据密集带来的图表混乱. 每组不同电压实验中,周围环境参数均保持恒定,排除外部扰动对蒸发与混合过程的影响. 实验结果表明,所有电压条件下碳烟质量均呈现先增后减的周期性波动特征:燃烧初期,液滴表面快速蒸发形成局部高温富燃料区,多环芳烃成核^[23]与表面生长主导碳烟的迅速积累;随着燃烧进程推进,氧化剂扩散增强与电场协同效应显著提升了整体氧化效率. 电场力驱动带正电的碳烟颗粒向下迁移至火焰下部区域,离子风扰动则增强了该区域的氧气渗透,局部氧化能力提升;离子风扰动破坏了局部富燃料微区结构,优化燃料与氧化剂的混合比例,最终促使碳烟质量在达到峰值后逐渐衰减. 这种周期性波动可归因于液滴蒸发速率与氧化动力学的动态耦合:蒸发速率的波动导致局部当量比周期性偏离理想燃烧条件,从而交替激活碳烟生成主导的富燃料阶段与氧化主导的贫燃料阶段. 随着电压从 0kV 升高至 8kV,碳烟峰值质量降低 29.8%. 这一调控作用在燃烧中期尤为显著,以 8kV 条件为例,燃烧速率提升与碳烟峰值抑制同步发生,表明电场通过压缩碳烟生成的“高温富燃料时间窗口”,实现了燃烧过程的动态优化. 尽管电压升高显著缩短燃烧时间,但碳烟质量波动的周期性频率在不同电压下保持稳定. 这一稳定性的维持与液滴燃烧系统的固有时间尺度锁定效应密切相关:蒸发速率波动与扩散混合过程的时间常数主要由初始液滴尺寸和燃料物性决定^[24],而电场的作用更多体现在增强氧化强度或抑制碳烟生成路径上,并未显著改变系统的蒸发扩散时间尺度的稳定性.

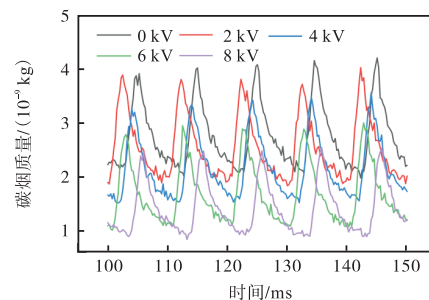


图 11 不同电压条件下碳烟质量周期性

Fig.11 Periodicity of soot quality under different voltage conditions

3 结 论

本研究系统地探讨了生物柴油液滴在不同电压直流电场中的燃烧特性,通过一系列实验深入分析了电场对火焰形态、燃烧速率及碳烟生成的影响规律.实验结果表明,电场的引入显著调控了液滴燃烧的动态过程.

(1) 直流电场显著改变了生物柴油液滴燃烧的火焰形态,在 8kV 电压下,火焰分布变得均匀对称,优化了火焰结构,从而提升了燃烧效率.

(2) 随着电压强度的增加,燃烧时间显著缩短,最高减少 30.6%,表明电场能够有效加速燃烧过程,提高燃烧速率.

(3) 电场环境明显降低了碳烟生成量及其峰值,特别是在 8kV 电压条件下,碳烟质量峰值减少了 29.8%,显示出电场在减少颗粒物排放方面的潜力.

(4) 燃烧过程中碳烟质量表现出 100Hz 的周期性脉动现象,但该频率不受电压变化的影响.尽管如此,随着电压的增加,碳烟质量的峰值显著降低,这表明电场不仅能调节碳烟生成的数量,还影响其生成模式.

参考文献

- [1] 韦兰星,王继刚,沈钰焜,等.生物燃料液滴蒸发和燃烧试验研究进展[J].热能动力工程,2023,38(9):1-11.
Wei Lanxing, Wang Jigang, Shen Yukun, et al. Research progress in biomass fuel droplet evaporation and combustion[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2023, 38(9): 1-11 (in Chinese).
- [2] 李法社,王承志,王文超,等.生物质燃油燃烧特性分析[J].燃烧科学与技术,2020,26(2):169-175.
Li Fashe, Wang Chengzhi, Wang Wenchao, et al. Analysis of biomass fuel combustion characteristics[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2020, 26(2): 169-175 (in Chinese).
- [3] Hoxie A, Anderson M. Evaluating high volume blends of vegetable oil in micro-gas turbine engines[J]. *Renewable Energy*, 2017, 101: 886-893.
- [4] 孙文强.生物柴油单液滴蒸发规律及发动机缸内燃烧特性研究[D].镇江:江苏科技大学,2023.
Sun Wenqiang. Study on the Evaporation Law of Biodiesel Single Droplets and In-cylinder Combustion Characteristics of Engines[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023 (in Chinese).
- [5] 许广举,陈庆樟,孟杰,等.生物柴油芳香烃燃烧产物的生成规律与演化历程[J].燃烧科学与技术,2013,19(6):539-543.
Xu Guangju, Chen Qingzhang, Meng Jie, et al. Evolution process and formation characteristics of aromatic hydrocarbon combustion products by biodiesel fuel[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2013, 19(6): 539-543 (in Chinese).
- [6] Bai Z, Jiang X Z, Luo K H. Reactive force field molecular dynamics simulation of pyridine combustion assisted by an electric field[J]. *Fuel*, 2023, 333: 126455.
- [7] Gao X, Gao Z, Du Z, et al. Effect of low-frequency alternating-current electric field parameters on laminar and turbulent flames of CH₄/air mixture[J]. *Fuel*, 2022, 317: 121755.
- [8] Gan Y, Luo Z, Cheng Y, et al. The electro-spraying characteristics of ethanol for application in a small-scale combustor under combined electric field[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 87: 595-604.
- [9] 洪樱珊,王静,黄福全,等.电场辅助 NH₃/CH₄ 燃烧的反应分子动力学研究[J].燃烧科学与技术,2024,30(6):619-625.
Hong Yingshan, Wang Jing, Huang Fuquan, et al. Reactive force field molecular dynamics study of NH₃/CH₄ combustion assisted by an electric field[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2024, 30(6): 619-625 (in Chinese).
- [10] Imamura O, Chen B, Nishida S, et al. Combustion of ethanol fuel droplet in vertical direct current electric field[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2010, 33(2): 2005-2011.
- [11] 张 扬,张 海,杨海瑞,等.交变电场对扩散火焰燃烧过程及 NO 生成的影响[J].工程热物理论,2010,31(12):2156-2158.
Zhang Yang, Zhang Hai, Yang Hairui, et al. Effect of alternating electric field on the combustion and no formation of diffusion flames[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(12): 2156-2158 (in Chinese).
- [12] 闫丽敏.电场与小尺度火焰相互作用的实验研究及模拟分析[D].北京:北京交通大学,2012.
Yan Limin. Experimental Study and Simulation Analysis of Electric Field and Small-scale Flame Interaction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012 (in Chinese).
- [13] 崔 巍,杨君宇,任翊华,等.电场作用下火焰中离

- 子对燃烧反应速率的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(6): 1395-1400.
- Cui Wei, Yang Junyu, Ren Yihua, et al. Numerical study about the ions effect to the combustion reaction rate under the eclectic field[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(6): 1395-1400(in Chinese).
- [14] 左磊, 王军锋, 梅德清, 等. 直流电场作用下生物柴油液滴的雾化特性和燃烧特性研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(7): 2012-2019.
- Zuo Lei, Wang Junfeng, Mei Deqing, et al. Atomization and combustion characteristics of biodiesel droplet in a direct current electric field[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(7): 2012-2019(in Chinese).
- [15] 吴筱敏, 侯俊才, 张聪, 等. 交直流电场对甲烷/空气火焰燃烧特性影响的试验与分析[J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(1): 72-77.
- Wu Xiaomin, Hou Juncai, Zhang Cong, et al. Experimental study of effects of DC/AC electric fields on the combustion characteristic of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ flames[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2016, 7(1): 72-77(in Chinese).
- [16] 黄星, 甘云华, 敖文, 等. 直流电场对 AP/HTPB/Al 复合固体推进剂燃烧特性的影响[J]. 推进技术, 2023, 44(1): 270-278.
- Huang Xing, Gan Yunhua, Ao Wen, et al. Effects of DC electric field on combustion characteristics of AP/HTPB/Al composite solid propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(1): 270-278(in Chinese).
- [17] 方朝纲, 宋蕾, 仲蕾, 等. 电场作用下正癸烷液滴在常温常压下的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(6): 486-490.
- Fang Chaogang, Song Qiang, Zhong Lei, et al. Combustion behavior of n-decane droplet in direct current electric field in normal gravity field[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012, 18(6): 486-490(in Chinese).
- [18] 左磊, 王军锋, 高健, 等. 电场调控生物柴油液滴燃烧行为[J]. 化工学报, 2024, 75(8): 2983-2990.
- Zuo Lei, Wang Junfeng, Gao Jian, et al. Electric field-regulating combustion behavior of biodiesel droplet [J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(8): 2983-2990(in Chinese).
- [19] Luo Y L, Jiang Z W, Gan Y H, et al. Evaporation and combustion characteristics of an ethanol fuel droplet in a dc electric field[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2021, 98: 216-222.
- [20] 江政纬. 基于静电喷雾的乙醇/生物柴油掺混燃料雾化及燃烧特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- Jiang Zhengwei. Study on the Electro Spray and Combustion Characteristics of Biodiesel-Ethanol Blends[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018(in Chinese).
- [21] Xu Y, Chia-fon F L. Investigation of Soot Formation in Diesel Combustion Using Forward Illumination Light Extinction (FILE) Technique[R]. Detroit: SAE Technical Paper, 2004.
- [22] Fang B, Chen L, Li G, et al. Multi-component droplet evaporation model incorporating the effects of non-ideality and thermal radiation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 136: 962-971.
- [23] Wenjun Z, Xin P, Hui M W, et al. Inhibition of electric field on inception soot formation: A ReaxFF MD and DFT study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(41): 15695-15708.
- [24] Sirignano W A. *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.