

直流电场对甲烷-氧气扩散火焰中 OH*辐射发光特性影响的研究

吴婧瑄¹, 龚岩^{1*}, 郭庆华¹, 吴心祎¹, 宋旭东², 王辅臣¹, 于广锁^{1,2}

(1. 华东理工大学 洁净煤技术研究所, 上海 200237; 2. 宁夏大学 省部共建煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室, 银川 750031)

摘要: 火焰为非平衡弱电离等离子体, 其中含有大量带电粒子、激发态自由基等物质。大量研究已经表明, 将等离子体技术与燃烧领域相结合, 可以显著缩短着火延迟时间、拓宽可燃极限、提高燃烧稳定性及降低污染物。本文基于火焰光谱诊断原理和模拟软件 Maxwell, 探究了直流电场对火焰形态和 OH*自发发光辐射的影响。结果表明: 施加直流电场后电场力主要作用在火焰根部, 火焰中的正离子受力向负极移动, 在火焰外观上表现为其整体形态的拉伸。贫氧燃烧工况下, 火焰高度与电压值呈正相关, 而富氧燃烧工况下, 火焰高度仅随电压值的改变在 35.08 mm 附近出现小范围波动, 即贫氧工况下电场对火焰高度的影响更为显著。而结合顺电效应, 施加电场后火焰宽度随直流电场的增大而减小, 其变化趋势在不同氧燃当量比下保持一致。向火焰施加的直流电压值小于 3 kV 时, OH*的峰值强度没有明显改变, 电压值大于 4 kV 时, OH*的峰值强度与电压值呈负相关。以富氧燃烧为例, 相比未施加电压的工况, OH*含量在 9 kV 电压作用下出现 10%左右的下降, 即直流电场加强了火焰径向及轴向的燃料及氧气的混合。

关键词: 扩散火焰; 直流电场; 自发辐射;

中图分类号: TK16

文献标志码: A

Study on the effect of direct current electric field on OH* radiation luminescence characteristics in methane-oxygen diffusion flame

Jingxuan Wu¹, Yan Gong^{1*}, Qinghua Guo¹, Xinyi Wu¹, Xudong Song², Fuchen Wang¹, Guangsuo Yu^{1,2}

(*a Institute of Clean Coal Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, PR China*)

(*b State Key Laboratory of High-efficiency Utilization of Coal and Green Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, PR China*)

Abstract: Flames are non-equilibrium, weakly ionized plasmas containing a large number of charged particles, excited state radicals and other substances. Numerous studies have shown that the combination of plasma technology and combustion field can significantly shorten the ignition delay time, extend the flammability limit, improve combustion stability and reduce pollutants. Based on the flame spectral diagnostic system and Maxwell simulation of electric field strength, the effects of DC electric field on flame morphology and OH* radiation were investigated. The results show that under DC electric field, the electric field force acted mainly on the root of the

收稿日期: 责任编辑:

基金项目: 省部共建煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室开放课题资助 (2022-K42), 国家重点研发计划 (2022YFB4101504) 和上海市明日之星计划 (21QA1402300)

作者简介: 吴婧瑄 (1998-), 性别: 女, 甘肃人, 研究生, 研究方向: 高压电场非接触式火焰调控。E-mail: y30211053@mail.ecust.edu.cn

通讯作者: 龚岩 (1986-), 性别: 男, 上虞人, 副教授, 研究方向: 气流床煤气化及燃烧火焰诊断。E-mail: yangong@ecust.edu.cn

flame, and positive ions in the flame were forced to move to the cathode, which is manifested as a stretching in the appearance of the flame. In oxygen-poor combustion of the flame height is positively correlated with the voltage value, whereas in oxygen-rich combustion the flame height fluctuated only in a small range around 35.08 mm with the change in voltage value, which meant the effect of DC electric field on the flame height was more significant in oxygen-poor combustion. Combined with the para-electric effect, the flame width decreased with the increase of the voltage value, and its trend remained consistent under different oxygen-fuel equivalent ratios. The peak intensity of OH* did not change significantly when the voltage value was below 3 kV, and the peak intensity of OH* was negatively correlated with the voltage value when it was above 4 kV. In the case of oxygen enriched combustion, the OH* content at 9 kV showed a decrease of about 10% compared to the case with no voltage applied, which meant the DC electric field promoted the mixing of fuel and oxygen in the radial and axial directions of the flame.

Keyword: Diffusion flame; DC electric field; Spontaneous radiation;

0 引言

火焰作为弱电离非平衡冷等离子体, 热电离和化学电离均会产生大量的活泼中间产物, 如激发态的分子、电子、离子及自由基^[1,2]。等离子体助燃技术通过热效应、动力学效应和输运效应三方面直接影响燃烧反应速率和路径, 从而达到提高燃烧稳定性、改变火焰形态和增强燃烧效率等目的。龚泽儒等^[3]认为通过应用等离子体煤气化技术, 能够提高煤处理规模并降低能耗。朱丽华等^[4]通过交流高压电对低温等离子体进行研究, 发现改变输入电压、放电频率会对甲烷转化及其产物分布产生影响。在多种等离子体助燃技术中, 电场辅助燃烧因具有非接触性及操作简便的特点, 国内外学者已经开展了大量研究。

电场作用下电子和中性粒子及带电粒子的碰撞引起的复杂反应, 结合离子风效应, 二者共同导致火焰行为的变化^[5]。电场将外层电子电离, 电子不再被原子核束缚从而成为高能自由电子, 同时电子与系统中的原子和分子相互碰撞, 导致原子与分子激发到不同的振动、转动及电子激发态, 并导致分子解离^[6]。带电粒子通过洛伦兹力加速, 增加带电粒子的扩散通量, 加速的带电粒子通过随机碰撞将其动量传递给中性分子, 从而产生离子风^[7]。Calcote^[8]研究发现对火焰施加正向和反向的电场对火焰稳定性有不同程度的促进作用。吴心祎等^[9]认为火焰所需的临界稳定电压与其初始闪烁幅度呈正相关, 且电场强度梯度越大, 火焰的稳定性调控效果越好。卢矍然等^[10]认为不同电压下, 直流电场均对火焰燃烧有促进作用, 火焰会在施加电场的方向上出现拉伸并变形。Liu 等^[11]使用三维光流算法

发现 10 kV 高电压可以抑制水平火焰的变形速度。离子风对火焰速度场的影响会导致火焰温度的改变^[12]。Chien 等^[13]研究发现扩散火焰中 CO 的释放与 OH*高浓度区域的位置密切相关, 且施加电场后 CO 减少。Wisman^[14,15]使用 PLIF 研究了甲烷、丙烷和正丁烷中的 OH*分布及强度, 通过 OH*强度来表征火焰热释放率。结果表明, 随着电压的增加, 火焰高度降低并逐渐呈褶皱结构, 火焰的热释放率更集中于喷嘴上方, 即火焰流速增加且燃烧效率增加。

为了进一步研究电场和火焰的耦合关系, 本文采用了火焰光谱诊断技术, 该技术基于火焰燃烧时能够产生自发辐射, 这种非接触式诊断技术不会对火焰的结构、温度等特性造成影响, 是一种良好的研究手段。通过在 CCD 相机前端放置滤波片可以采集火焰激发态自由基的辐射信息, 如 OH*(310 nm)、CH*(430 nm)和 C₂*(517 nm)。激发态自由基(OH*和 CH*)的辐射分布及辐射强度可以表征火焰的燃烧结构^[16]、氧燃当量比^[17]、及热释放率^[18]等。Marchese^[19]等人对甲醇及正庚烷火焰内峰值强度位置的时间演变进行研究, 证实 OH*辐射强度峰值与火焰温度峰值相近, 即可以通过 OH*辐射强度峰值确定火焰分布位置。Turner^[20]研究发现, 实验中通过 CH*和 OH*自发辐射强度得到的火焰区厚度更接近动力学模型数值模拟得到的火焰尺寸。陈玉民等^[21]结合常温常压下介质阻挡放电对重整 CO₂-CH₄ 过程进行研究, 发现提高输入功率时 CH 发射光谱相对强度有所下降且对 CH₄、CO₂ 的转化率有明显的促进作用。

综上所述, 国内外学者已经大量开展了有关电场辅助燃烧的研究, 但使用火焰光谱诊断方法的研

究还较少。本文结合光谱成像系统和模拟研究，通过 CCD 相机、310 nm 滤波片和 Ansoft Maxwell 软件，探讨施加直流电场后不同氧燃当量比下甲烷-氧气扩散火焰中 OH* 化学发光分布特性及火焰形态的变化趋势，为电场辅助甲烷-氧气扩散火焰的研究进行了积极探索并为其提供了新思路。

1 实验部分

1.1 实验装置及方法

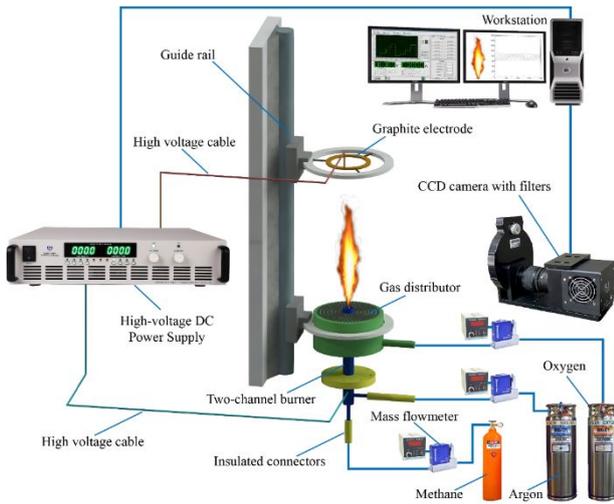


图 1 火焰光谱特性实验平台

Fig.1 Experimental platform for flame spectral properties
实验平台安置在光学平台上，主要包括火焰喷

嘴、石墨电极、高压直流电源、光谱相机如图 1 所示。同轴的双通道喷嘴可以产生大气压下的甲烷-氧气非预混扩散火焰，其中燃料通道管路内径的尺寸为 3 mm，氧化剂通道管路内径为 4 mm，外径为 5 mm。火焰外围通过气体分布器通入 Ar 为保护气，减少空气对火焰的影响。

高压直流电源的额定电压为 800V~10000V，额定电流为 0~60mA。高压直流电源被施加在火焰两端，其正极与喷嘴相连，负极与火焰上方的环形石墨电极相连，打开电源后即可在火焰轴向施加稳定的定向电场。OH* 自由基化学发光光谱由一个 CCD 照相机 (FLIE2VCCD47-10) 和一个中心波长为 310 nm 的滤波片共同完成。经过算法处理，得到的光谱图像是 20 张光谱图像的累计平均值，减小了空气扰动产生的误差。使用光纤光谱仪 (SE2030-50-DUVN) 采集火焰的发射光谱曲线，可测量波段分别为紫外和可见光波段。

1.2 实验条件

在研究不同氧燃当量比下的甲烷-氧气同轴射流扩散火焰受高压直流电场的影响时，火焰燃烧状态为层流燃烧，电极间距为 5 cm，甲烷流量控制在 0.2 L/min，实验通过调节氧气流量来控制氧燃当量比 λ 。实验工况如表 1 所示。氧燃当量比 λ 的定义如式(1)所示：

$$(1)$$

表 1 实验参数

Tabel 1 Experimental parameters

Condition	Electrode spacing /cm	Methane flow rate /L·min ⁻¹	Oxygen flow rate /L·min ⁻¹	Argon flow rate /L·min ⁻¹	λ
1			0.32		0.8
2			0.36		0.9
3	5.0	0.20	0.40	0.20	1.0
4			0.44		1.1
5			0.48		1.2

1.3 OH* 辐射发光表征

实验通过光纤光谱仪获得火焰根部的自发辐射光谱曲线，如图 2 所示。曲线通过 OH* 峰值强度进行归一化处理，其中 OH* 的化学发光特征峰位于 310 nm 波段附近。由于 OH* 受背景辐射影响较小^[22]，可以认为拍摄得到 OH* 自发辐射光谱强曲线就是 OH* 的化学发光真实强度。施加 9 kV 直流电场后，火焰根部的自发辐射光谱强度整体低于未施加电场时的对应强度，其中 OH* 化学发光特征峰有明显下降，降低了 23.52%。

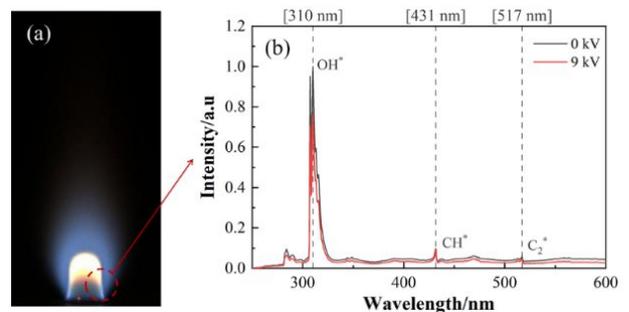


图 2 甲烷-氧气扩散火焰根部施加电场前后光谱曲线对比图 (250~600 nm)

Fig. 2 Comparison of spectral profiles before and after

2 结果与讨论

2.1 电场强度模拟

实验装置中电源正极与喷嘴相连，负极为石墨环形电极。为了直观观察施加直流电场后的场强分布情况，图 3 分别为 Ansoft Maxwell 软件模拟出的直流电场的矢量图(a)及 5 kV 及 9 kV 下以轴线为中心的单侧场强分布图(b)，其中虚线表示火焰外轮廓在外加高压直流电场作用下的分布示意线。

由图 3(a)可以观察到电场线方向由喷嘴指向石墨环形电极，向火焰施加直流电场产生的电场强度梯度主要集中在喷嘴上方 2cm 高度处。电场作用下火焰外观及内部反应区的变化均源于火焰作为弱电离冷等离子体的特性。施加电场后，火焰中的大量自由电子受到电场力作用向喷嘴方向(正极)快速运动，正离子则向石墨电极(负极)方向运动，火焰此时作为电阻与高压直流电源构成回路。

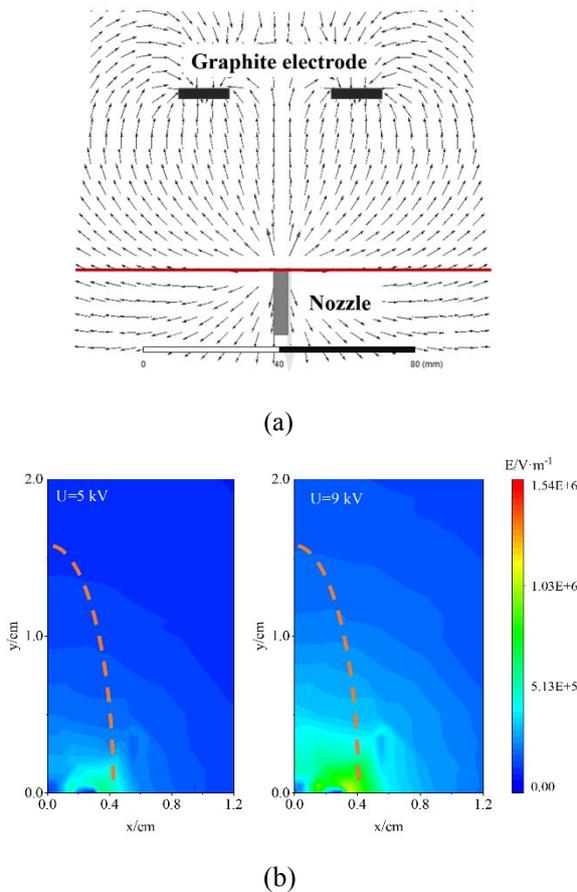


图 3 电场线(a)及场强分布图(b)

Fig. 3 DC electric field direction vector (a) and electric field diagram (b)

2.2 电场对 OH*辐射分布的影响

本节使用光谱相机拍摄 OH*自由基辐射发光

分布情况，以火焰峰值强度的 8 %定义火焰反应区^[23]，峰值强度的 50%定义火焰核心反应区，如图 4 中所示。甲烷与氧气在核心反应区迅速混合并燃烧。图 4 为 $\lambda=0.8$ 、1.0 和 1.2 时施加在火焰两端的电压分别为 3 kV、5 kV、7 kV 和 9 kV 时火焰锋面及核心反应区的变化趋势，可以观察到施加直流电压后，火焰整体受到从向上的电场力，火焰锋面及核心反应区随着电压的增加被拉伸、变得细长。氧气流量的增加导致氧气向燃料侧的扩散作用增强，进而导致靠近喷嘴处火焰反应增强，火焰锋面被拉伸及延长。

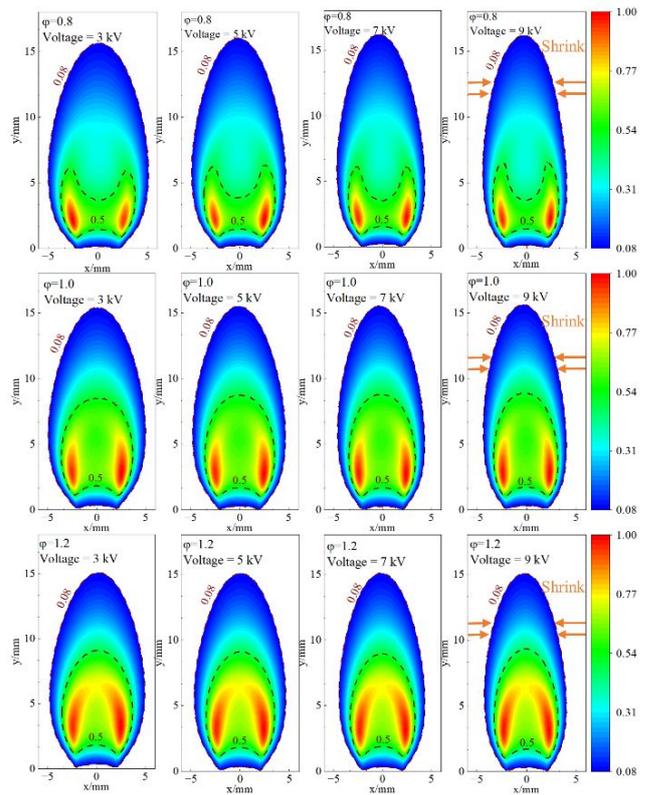


图 4 OH*自发辐射强度归一化分布图

Fig.4 OH* spontaneous radiation intensity normalized distribution

由于火焰喷嘴处为电源正极，施加电压后火焰中带正电的粒子受到电场力向喷嘴处迁移，带负电的离子则向石墨电极处迁移，带电粒子与中性分子间的碰撞频率增加。随着直流电压大小的施加，火焰下游区域出现的偏移会更加明显，结合图 3 中电场强度的分布，火焰根部受到的电场力远大于火焰顶端受到的力，外侧气体受力后燃料与氧化剂间的扩散作用增强，故火焰 OH*辐射分布出现向中央轴线偏移的趋势。

2.3 电场对火焰形态的影响

如 2.1 节所述，火焰可被视为电阻与直流电源相连，正负电极间距离为 5 cm，火焰反应区(火焰

峰值强度的 8 %)及其尾迹区(火焰峰值顶端与负极间的区域)连接构成回路。图 5-图 7 为 $\lambda=0.8$ 、1.0 和 1.2 时, 火焰外轮廓线随电压值的变化(a)以及火焰反应区及尾气区随施加电压值的变化图(b)。由图可得, 火焰反应区高度最大值和最小值之差从贫氧状态到富氧状态分别为 0.65 mm、0.19 mm 和 0.13 mm。贫氧状态下火焰锋面高度会受到直流电压影响, 但随着氧燃当量比的增加, 电场对火焰高度的影响逐渐减弱。不同电压下火焰宽度的最大值和最小值之差相近, 如在 9 kV 时, 从贫氧到富氧状态下的火焰宽度分别为 8.43 mm、8.3 mm 和 8.23 mm。根据顺电效应, 电场强度梯度的存在会导致低场强(高气压)内的气体涌入高场强(低气压)区域, 形成抽吸作用。离子风效应所产生的径向的气压差, 加强了燃料与氧化剂这类中性气体的扩散通量, 缩短了扩散时间, 因而火焰直径的减小不受氧燃当量比的影响。

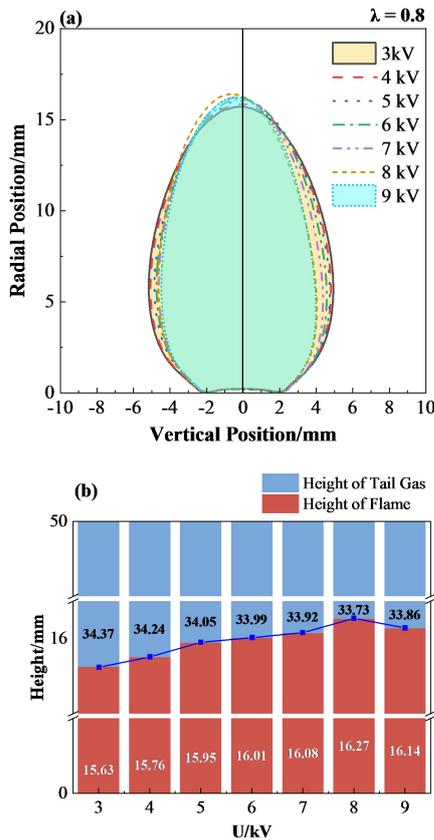


图 5 (a)富燃火焰轮廓线随电压值的变化(b)尾迹区及反应区高度随所施加电压的变化($\lambda=0.8$)

Fig. 5 (a)Variation of flame rich contour line with voltage value
(b) Height of the tail gas zone and reaction zone with the applied voltage ($\lambda=0.8$)

在贫氧和完全燃烧的状态下, 随着施加在火焰两端直流电压的增加, 火焰锋面高度整体呈现增加趋势, 而富氧状态下火焰高度基本不发生改变, 如

图 5(b)、6(b)、7(b)。其中贫氧状态下火焰高度的增加最为显著, 是由于在 $\lambda=0.8$ 的情况下, 火焰内部燃料无法完全燃烧, 直流电场的施加增加了火焰内部带电粒子间的碰撞和运动, 电场力驱动带电粒子向火焰内卷吸形成离子风, 离子风卷吸燃烧区外部的氧气进入火焰内部, 燃料外侧有很薄的区域会转变为部分预混的火焰, 氧气与燃料混合程度加剧, 未完全燃烧的甲烷继续燃烧, 造成了随着直流电压的增加火焰整体呈现被拉伸的状态。

结合火焰自身的电学性质, OH^* 分布的迁移除了扩散作用的影响外, 还与火焰中带电粒子受到电场力后的定向移动有关。 H_3O^+ 是甲烷火焰中浓度最高的正离子^[24]。 H_3O^+ 受到电场力的作用后顺着电场线移动, 电子和负离子则朝着与其相反的方向移动。二者在受力移动过程中, 不仅使其碰撞的频率增加, 形成更多带电粒子、激发态分子和中性分子, 也卷吸外部气体进入火焰, 进而加强火焰反应区燃烧, 对火焰外观及内部反应造成影响。

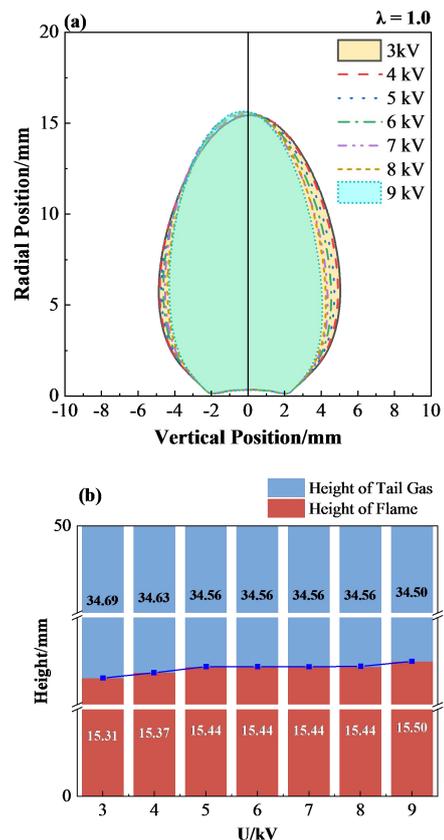


图 6 (a)化学当量燃烧火焰轮廓线随电压值的变化(b)尾迹区及反应区高度随所施加电压的变化 ($\lambda=1.0$)

Fig. 6 (a)Variation of chemical equivalent combustion flame profile with voltage value

(b)Height of the tail gas zone and reaction zone with the applied voltage ($\lambda=1.0$)

根据电荷守恒原理, 正离子和负离子能分别产

生向负极和正极方向的相反方向的双向离子风。由于单个电子质量仅为单个质子质量的 1/2000，且负离子数量较少，其对动量传递的贡献和对离子风的影响可以忽略不计，即正离子被认为是主要负责动量的转移，导致单向离子风由高电势向低电势的方向流动，在火焰外观上表现为其整体形态的拉伸。边界区燃料与氧气混合的程度依赖于物质的扩散和流体的流动，当氧气流量增加，浮力对火焰的影响会大于离子风的影响，说明只有当火焰的流速足够小于离子风引起的流速变化，离子风才能对流场产生可见的影响。

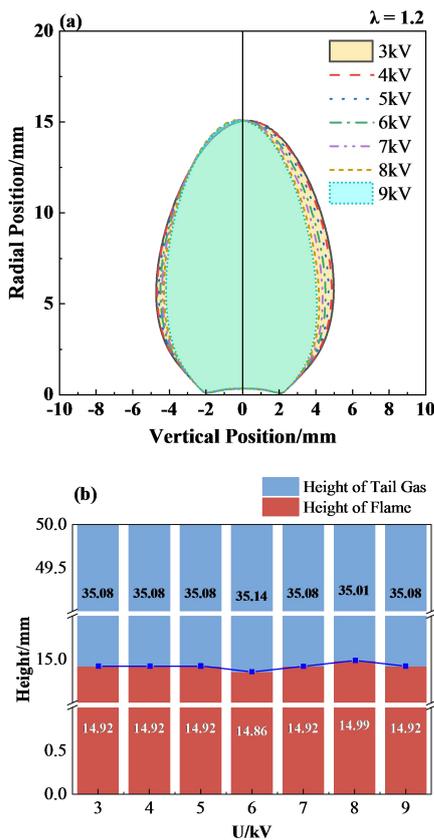


图 7(a) 富氧燃烧火焰轮廓线随电压值的变化(b)尾迹区及反应区高度随所施加电压的变化($\lambda=1.2$)

Fig. 7(a) Variation of the flame profile of oxygen-rich combustion with voltage values

(b) Height of the tail gas zone and reaction zone with the applied voltage ($\lambda=1.2$)

2.4 电场对 OH* 辐射峰值强度的影响

不同氧燃当量比下 OH* 辐射积分强度峰值随直流电压的变化趋势如图 8 所示，OH* 峰值强度与电场强度呈负相关。值得注意的是，向火焰施加的直流电压 $U \leq 3$ kV 时，OH* 的峰值强度没有明显改变，分析这个现象的产生是因为此时电场强度较低，火焰内部仍存在脉动^[9]，电场力对火焰的影响主要是通过离子风作用消除浮力产生的涡旋结构。

OH* 反应区内辐射强度与面积的乘积可以反应 OH* 含量。以未施加电场时氧燃当量比为 1.2 的 OH* 辐射强度与面积的乘积对各工况施加 9 kV 电场前后的 OH* 含量进行归一化处理，结果如图 9 所示，OH* 含量与氧燃当量比呈正相关，氧燃当量比由 0.8 增加至 1.2，OH* 含量 9 kV 电场作用下均呈现下降趋势，幅度分别为 9.8%、11.5%、12.8%、11.1% 和 12.0%。

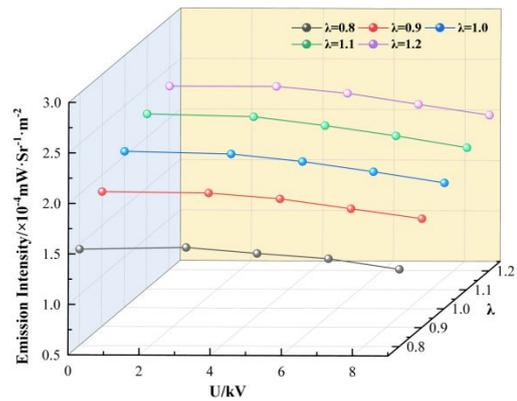


图 8 OH* 火焰辐射强度积分峰值随电压值的变化

Fig. 8 OH* peak integrated flame radiation intensity as a function of voltage value

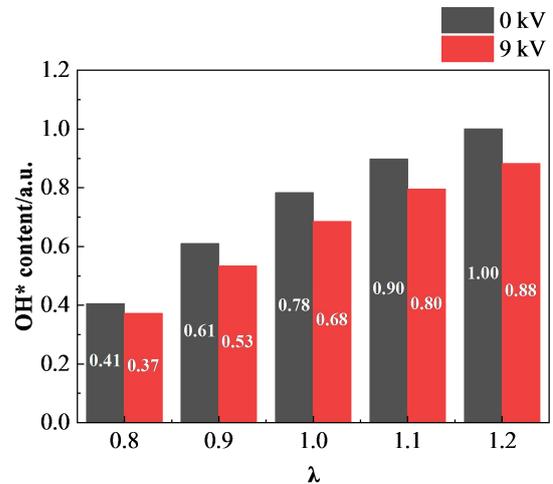


图 9 施加 9kV 电场前后 OH* 含量对比图

Fig. 9 Comparison of OH* content before and after application of 9kV electric field

3 结论

本文结合火焰光谱诊断系统和模拟软件 Maxwell，研究了直流电场影响下的甲烷-氧气扩散火焰中 OH* 的化学辐射发光分布、强度和火焰形态的变化，得到以下结论：

1) 模拟结果表明高压直流电场产生的电场强度梯度主要集中在喷嘴上方 2 cm 高度处，即电场对火

焰的影响主要集中在火焰根部。施加电场后, 火焰中的带电粒子受到电场力后定向移动, 增加带电粒子与中性粒子间的碰撞频率, 进而改变 OH* 的辐射分布及辐射强度。

2) 施加电压后, 火焰下游区域出现的偏移显著, 结合电场强度的分布云图, 火焰根部受到的电场力远大于火焰顶端受到的力, 外侧气体受力后燃料与氧化剂间的扩散作用增强, 故火焰 OH* 自发辐射分布出现向中央轴线偏移的趋势。

3) 对比完全燃烧和富氧燃烧, 贫氧状态下火焰高度的变化最为显著。贫氧状态下, 施加电场后, 火焰宽度缩小了 16.53%, 火焰高度延长了 3.3%。

4) 向火焰施加的直流电压 $U \leq 3$ kV 时, OH* 的峰值强度没有明显改变, $U \geq 4$ kV 时, OH* 的峰值强度与电压值呈负相关。在此过程中向内流动的 OH* 与氧气混合, 发生氧化还原反应, 故对比不同当量比下 OH* 含量均在 9 kV 电场作用下出现 10% 左右的下降, 说明施加直流电场能增强火焰燃烧效率。

参考文献(References) :

[1] STARIKOVSKAIA S M. Plasma assisted ignition and combustion[J/OL]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(16): R265-R299.

[2] JU Y, LEFKOWITZ J K, REUTER C B, et al. Plasma Assisted Low Temperature Combustion[J/OL]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2016, 36(1): 85-105.

[3] 龚泽儒, 吕俊复, 张戟. 等离子体煤气化技术研究进展[J/OL]. 洁净煤技术, 2019, 25(35-40).
Gong Zeru, Lv Junfu, Zhang Ji. Research Progress on Plasma Coal Gasification Technology[J/OL]. Clean Coal Technology, 2019, 25(35-40).

[4] 朱丽华, 张悦, 田瑶瑶, 等. 电源参数和气体组分对低温等离子体转化煤层甲烷的影响[J/OL]. 洁净煤技术, 2022,28(05): 81-86.
ZHU Lihua, ZHANG Yue, Tian Yaoyao, et al. Effects of Power Parameters and Gas Components on Conversion of Coalbed Methane by Low-temperature Plasma[J/OL]. Clean Coal Technology, 2022,28(05): 81-86.

[5] JAGGERS H, VON ENGEL A. The effect of electric fields on the burning velocity of various flames[J]. Combustion and Flame, 1971, 16(3): 275-285.

[6] KRITIKOS E, LELE A, VAN DUIN A C T, et al. A reactive molecular dynamics study of the effects of an electric field on n-dodecane combustion[J/OL]. Combustion and Flame, 2022, 244: 112238.

[7] KIM M K, CHUNG S H, KIM H H. Effect of AC electric fields on the stabilization of premixed bunsen flames[J/OL]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 1137-1144.

[8] CALCOTE H F, KING I R. Studies of ionization in flames by means of langmuir probes[J/OL]. Symposium (International) on Combustion, 1955, 5(1): 423-434.

[9] 吴心祎, 吴婧瑄, 龚岩, 等. 高压直流电场作用下的甲烷-氧气流层流扩散火焰稳定性[J/OL]. 华东理工大学学报(自然科学版): 1-9. <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20220620001>.

WU Xinyi, WU Jingxuan, GONG Yan, et al. Methane-oxygen laminar diffusion flame stability under high-voltage direct current electric field[J/OL]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition): 1-9. <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20220620001>.

[10] 卢夔然, 高忠权, 等. 直流电场对不同初始压力球形膨胀火焰的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020,51(10): 2959-2968.
Lu Yunran, Gao Zhongquan, et al. Effect of DC electric field on spherical expansion flame with different initial pressure[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2020,51(10): 2959-2968.

[11] LIU H, YANG Z, CAI W. Application of three-dimensional diagnostics on the direct-current electric-field assisted combustion[J/OL]. Aerospace Science and Technology, 2021, 112: 106657.

[12] KUHL J, SEEGER T, ZIGAN L, et al. On the effect of ionic wind on structure and temperature of laminar premixed flames influenced by electric fields[J/OL]. Combustion and Flame, 2017, 176: 391-399.

[13] CHIEN Y C, ESCOFET-MARTIN D, DUNN-RANKIN D. Ion current and carbon monoxide release from an impinging methane/air coflow flame in an electric field[J/OL]. Combustion and Flame, 2019, 204: 250-259.

[14] WISMAN D, MARCUM S, GANGULY B. Electric Field Induced Dissociative Recombination at the Base of Pre-Mixed Hydrocarbon/Air Flames[C/OL]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Cincinnati, OH: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[15] WISMAN D, RYAN M, CARTER C, et al. OH PLIF

Measurements in a Low Electric Field Perturbed CH₄/Air Flame[C/OL]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008.

[16] HANSEN N, MILLER J A, TAATJES C A, et al. Photoionization mass spectrometric studies and modeling of fuel-rich allene and propyne flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 1157-1164.

[17] KRABICKA J, LU G, YAN Y. Profiling and characterization of flame radicals by combining spectroscopic imaging and neural network techniques[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(5): 1854-1860.

[18] ZHANG T, GUO Q, LIANG Q, et al. Distribution characteristics of OH*, CH*, and C₂* luminescence in CH₄/O₂ co-flow diffusion flames[J]. Energy & fuels, 2012, 26(9): 5503-5508.

[19] MARCHESE A, DRYER F, NAYAGAM V, et al. Hydroxyl radical chemiluminescence imaging and the structure of microgravity droplet flames[C]//Symposium (International) on Combustion: Vol 26. Elsevier, 1996: 1219-1226.

[20] TURNER M A, PASCHAL T T, PARAJULI, et al. Resolving flame thickness using high-speed chemiluminescence imaging of OH* and CH* in spherically expanding methane-air flames[J]. Proceedings of the

Combustion Institute, 2021, 38(2): 2101-2108.

[21] 陈玉民, 卢钱程, 雷文涛, 等. 合发射光谱与动力学计算的非热等离子体重整 CO₂-CH₄ 机理[J/OL]. 洁净煤技术, 2022, 28(10): 54-67.

CHEN Yumin, Lu Qiancheng, Lei Wentao, et al. Mechanism of non-thermal plasma weight-integrated CO₂-CH₄ with combined emission spectrum and kinetics[J/OL]. Clean Coal Technology, 2022, 28(10): 54-67.

[22] JAKOB M, HUELSE T, JANSSEN A, et al. Simultaneous high-speed visualization of soot luminosity and

OH* chemiluminescence of alternative-fuel combustion in a HSDI diesel engine under realistic operating conditions[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(7): 2516-2529.

[23] SIEBERS D, HIGGINS B. Effects of injector conditions on the flame lift-off length of DI diesel sprays[C]//Thermo-and Fluid-Dynamic Processes in Diesel Engines: Selected Papers from the Thiesel 2000 Conference Held in Valencia, Spain, September 13–15, 2000. 2000: 253-277.

[24] CALCOTE H F. Ion and electron profiles in flames[J/OL]. Symposium (International) on Combustion, 1963, 9(1): 622-637.