

焦炉气撞击火焰碳烟生成特性与影响机制研究

徐泽杨¹, 刘畅¹, 周莹^{2,3}, 谢非², 吴润民^{4*}

- (1. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司, 宁夏银川 754011;
2. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤炭化学工业技术研究院, 宁夏银川 754011;
3. 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, 宁夏银川 750021;
4. 鄂尔多斯应用技术学院化学工程学院, 内蒙古鄂尔多斯 017000)

摘要:探究氧燃比(λ)与无量纲撞击距离(L/De)对火焰射流撞击壁面时的特性及碳烟分布的影响。通过实验与模拟相结合的方法,研究发现,随 λ 增大,火焰温度与热流密度升高,分布更趋均匀; OH^* 化学发光强度呈先增后减趋势,主导因素由化学反应转为撞击效应。当 $\lambda=0.5$ 时,碳烟生成主导,浓度最高; $\lambda>0.5$ 时,氧化作用增强,碳烟减少。此外,减小撞击距离使火焰形态转变,亮度减弱而温度与热流密度上升,碳烟因混合增强而减少。研究结果对理解此类火焰行为及碳烟调控具有参考价值。

关键词:焦炉气;撞击火焰;碳烟;光谱诊断;传热

中图分类号:TQ517

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0285-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.047

Study on the characteristics and influence mechanism of soot formation of COG impinging flame

XU Ze-yang¹, LIU Chang¹, ZHOU Ying^{2,3}, XIE Fei², WU Run-min^{4*}

- (1. CHN Energy Group Ningxia Coal Industry Co., Ltd., Yinchuan 754011, China; 2. Coal Chemical Industry Technology Research Institute, CHN Energy Group Ningxia Coal Industry Co., Ltd., Yinchuan 754011, China;
3. State Key Laboratory of High-efficient Utilization of Coal and Green Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. College of Chemical Engineering, Ordos Institute of Applied Technology, Ordos 017000, China)

Abstract: This study aims to investigate the effects of the equivalence ratio (λ) and dimensionless impingement distance (L/De) on flame characteristics and soot distribution during flame jet impingement on a wall. By combining experimental and simulation methods, the study reveals that as λ increases, flame temperature and heat flux density rise, with a more uniform distribution. The OH^* chemiluminescence intensity initially increases and then decreases, as the dominant factor shifts from chemical reactions to impingement effects. At $\lambda=0.5$, soot formation dominates, resulting in the highest soot concentration. When $\lambda>0.5$, enhanced oxidation reduces soot. Additionally, reducing the impingement distance alters the flame structure, weakening luminosity while increasing temperature and heat flux density. Improved mixing under these conditions further reduces soot content. The findings provide valuable insights into flame behavior and soot control.

Key words: coke oven gas; impinging flame; soot; spectroscopic diagnosis; heat transfer

在全球能源结构向低碳化转型以及“双碳”战略目标推进的大背景下,焦炉气(coke oven gas, COG)作为钢铁冶金行业关键的副产能源,对其开展清洁且高效的资源化利用,是助力行业达成节能减排目标的重要途径。焦炉气富含氢气和甲烷,具有热值高、燃烧速度快等特点,是一种极具价值的工业气体燃料,被广泛应用于加热炉、锅炉等工业

设备中^[1-3]。

然而,尽管焦炉气因富含氢气而被视为清洁燃料,但其成分体系中仍含有 CH_4 、 C_2 以上不饱和烃、CO及少量焦油等杂质。这些物质在特定燃烧条件下,尤其是在工业燃烧器中普遍存在的壁面撞击火焰结构里,极易诱发较为明显的碳烟生成现象。碳烟排放不仅污染环境、危害健康,还会降低燃烧效

收稿日期:2025-12-10;修回日期:2026-03-04

基金项目:鄂尔多斯高校科研创新“三清零 四提升”项目(KYQN25Z010)

作者简介:徐泽杨(1991-),男,硕士,助理工程师,研究方向为绿色低碳;吴润民(1995-),女,博士,讲师,研究方向为气化反应动力学,通讯联系人,wmr2816919548@163.com。

率、恶化传热性能并导致设备腐蚀,已成为制约焦炉气高效清洁利用的关键技术瓶颈。因此,深入探究焦炉气在典型工业场景下的碳烟生成机制,是实现其高效清洁利用必须解决的核心科学问题。

壁面撞击火焰是受限空间内燃烧的典型形式,其火焰-壁面相互作用使近壁区域的燃烧过程极为复杂。一方面,壁面作为巨大热沉,通过导热和辐射吸收火焰热量,在近壁区形成陡峭温度梯度,导致局部淬熄或反应速率降低^[4],这种热效应深刻影响碳烟的生成与氧化过程^[5-6]。Feng 等^[7]研究了不同板高度和温度对碳烟体积分数的影响,发现随着板高度降低,碳烟体积分数先增后减,而在特定高度处,板温度升高则引起相反趋势。另一方面,壁面材料在高温下可能具有催化作用,通过表面反应影响碳烟前驱体的生成路径与氧化速率^[8]。碳烟生成本身是一个涉及前体生成、成核、表面生长与氧化的多步过程^[9],在火焰主体区域,HACA 等机制已较为明确;然而在近壁区域,热损失与壁面催化的耦合效应使碳烟生成特性与主体区域显著不同。例如,已有研究^[10]表明,近壁区的强氧化环境可能导致颗粒减少、形态演变,但这些认识多基于简单碳氢燃料,是否适用于高氢、组分复杂的焦炉气仍有待探究。

目前,针对焦炉气壁面撞击火焰中碳烟生成特性的研究尚处于起步阶段。为此,本研究拟结合先进激光诊断与精细数值模拟,系统研究常压条件下焦炉气壁面撞击火焰近壁区域的碳烟生成特性与影响机制。重点通过多参数同步激光诊断技术,实现对温度、速度、关键组分及碳烟体积分数的高分辨率测量,揭示近壁区域碳烟的分布与演变规律,为焦炉气燃烧器优化、能效提升与排放控制提供理论依据与数据支撑。

1 实验装置与数值模拟

实验装置示意图如图 1 所示。碰撞火焰结构由燃烧器和实心板组成。喷嘴呈圆形,内径(d_n)为 2 mm。实心撞击面由钢制成,直径 100 mm,厚度 15 mm。在本研究中,焦炉气分别由燃烧器的环隙通道供应。并通过数字质量流量控制器(Sevenstar, CS200A)控制其流量。燃料流量固定为 0.5 L/min。实验工况及 COG 组成如表 1 和表 2 所示,其中喷嘴出口到撞击板的垂直距离与当量直径的比值 L/De 分别取 2.5~10,氧燃比例 λ 分别为 0.3~1.2。

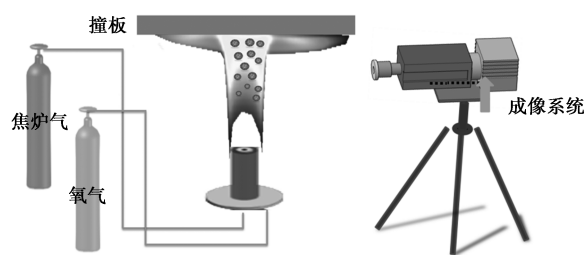


图 1 实验装置示意图

表 1 单喷嘴撞板火焰实验条件

	1	2	3	4	5	6	7
L/De				5, 10, 15, 20			
$V_{COG}/(L \cdot \min^{-1})$				0.50			
$u_{COG}/(m \cdot s^{-1})$				1.71			
$v_{O_2}/(L \cdot \min^{-1})$	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2
$u_{O_2}/(m \cdot s^{-1})$	1.59	2.12	2.65	3.18	4.25	5.31	6.37
λ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2
Re	337	400	461	535	681	815	978

注:板距喷嘴出口保持 150 mm 的距离,对应于燃料喷嘴直径 18.75De 的归一化距离。

表 2 焦炉气(COG)组分 %

COG	CH ₄	H ₂	N ₂	CO	C ₂ H ₄
100	29	55	6	8	2

1.1 光谱诊断技术

本研究利用高分辨率的高速摄像机对撞击火焰的发展阶段进行拍摄。高速摄像机的拍摄速度 1 000 fps,镜头光圈 f/1.4,曝光时间 35 ms,图像分辨率 1 004×1 004 像素。测试中将不同工况的撞击火焰重复测试 10 次。加强型电荷耦合器件(ICCD)相机(尼康 Hisence MK),通过 310 nm 带通滤光片(10 nm FWHM)和紫外镜头(尼克尔 105-mm f/2.8)记录 OH* 化学发光。增强的门控时间设置为 1.5 ms 持续时间。激光诱导白炽光技术(LII)对撞击火焰的碳烟浓度进行检测,详细的测量参数在之前的研究中已经使用^[11]。采用长 10 cm 宽 5 cm 长方形的热流量微传感器(HFM)(Vatell Corporation, HFM-7e/H)测量撞击表面的局部热流密度。将传感器固定在铜夹具上,热流密度传感器与撞击表面齐平测量径向热流密度分布。

1.2 模拟方法

本研究在轴对称条件下,建立了焦炉气-氧气

反扩散火焰撞击平面的二维计算模型,利用 CFD 软件 Ansys Fluent 进行模拟。采用 Wu 等^[12]应用碳烟生成机理结合自由基化学发光反应机理进行 CFD 模拟,得到二维轴对称情况下的数值解。二维层流反应流的主要控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程和物质方程^[13]。

采用详细的化学反应动力学机理描述湍流与化学反应之间的耦合作用。在数值模拟中,燃烧室的结构形式、物理模型、计算区域以及边界条件设置如图 2 所示。依据实验工况,初始压力设为 101.325 kPa,初始温度为 300 K,重力加速度沿 y 轴负方向,大小为 9.81 m/s^2 。燃料与共流氧气入口采用速度进口条件,出口设置为压力出口边界。碰撞壁面采用结合对流换热与辐射换热的混合热边界条件,并同时满足防滑条件。详细的辐射模型及碳烟模型见参考文献[14]。建立的几何模型采用结构化网格划分计算域。为了减少网格数对求解结果的影响,需要进行网格独立性校验。选取燃烧器到板距 $L/De = 10$ 的模型,经过网格独立性分析,认为由 45 870 个单元组成的结构网格已经足够。

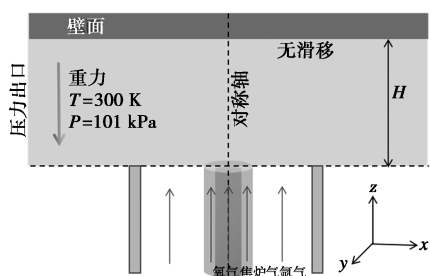


图 2 计算域及初始条件示意图

2 结果与讨论

2.1 火焰结构和碳烟形成

图 3 为 COG 在不同撞击距离和不同氧燃比条件下的高速相机火焰图像,通过对比分析可揭示其燃烧特性与流动结构的耦合关系。在图 3(a)中,随着撞击距离的增加,火焰形态由紧凑的蓝色锥形逐渐演变为宽广、明亮的“T”字型或“U”字型火焰,且火焰长度显著增长,表明气流速度降低、混合时间延长,促进了燃料与氧化剂的充分混合,导致燃烧区域扩大、热释放增强。尤其在最大撞击距离下,火焰呈现明显的分层结构,底部为蓝色内焰(高温完全燃烧区)是由于 CO 氧化和自由基电子(如 CH、C₂ 和 CH₂O)的能级跃迁引起的化学发光^[15]。上部为黄色外焰(不完全燃烧或辐射区),推断为碳烟辐射所

致,是碳烟颗粒生长、凝固和氧化的发光区域^[16],表明燃烧过程趋于稳定但存在局部富燃现象。图 3(b)中,随 λ 从 0.3 增至 1.0,火焰形态发生显著变化。当 $\lambda = 0.3$ 时,火焰呈宽大的“T”型,颜色偏黄,表明严重贫燃,燃烧速率低、火焰稳定性差;随着 λ 增大至 0.4~0.5,火焰收缩变窄,亮度增强,黄色区域减少,说明混合比例接近化学计量比,燃烧效率提高;当 $\lambda \geq 0.6$ 时,火焰转为蓝色细长型,尤其在 $\lambda = 0.8 \sim 1.0$ 时火焰高度集中、颜色纯净,代表完全燃烧状态,热效率高、污染物排放低。值得注意的是, $\lambda = 0.6$ 时火焰出现轻微蓝白过渡,可能因局部过氧导致温度骤升。整体而言,氧燃比是调控火焰结构与燃烧性能的关键参数,而撞击距离则影响混合均匀性与湍流强度,二者共同决定了火焰的稳定性、燃烧效率及排放特性。

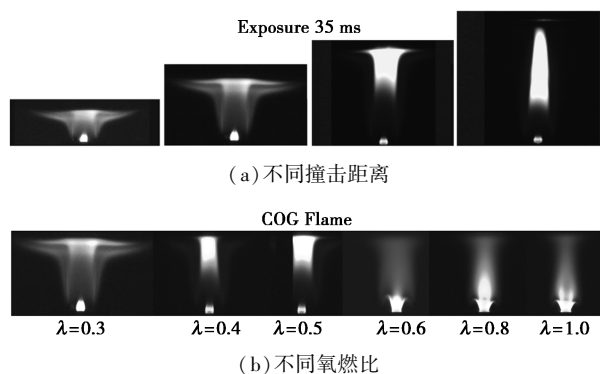


图 3 不同撞击参数下的火焰照片

2.2 火焰传热特性

在撞击距离 $L/De = 5, 10, 15, 20$ 条件下,研究了氧燃比($\lambda = 0.3 \sim 1.2$)对撞击火焰传热特性的影响。图 4(a)、(b)显示,随着氧燃比增加,轴线温度最大值向滞止面移动且数值减小,而径向温度最大值则向远处偏移,撞击面温度升高。在 $L = 5De$ 时,火焰高度显著大于板间距,越靠近撞击面,传热量越大,表面温度越高。图 4(c)、(d)展示了 $\lambda = 0.5$ 时板距 L/De (5~20) 的影响。当板距较大 ($L/De = 10$) 时,火焰预混锥远离撞击面,表面温度峰值位于滞止点;当板距减小至 $L/De = 5$ 时,火焰被撞击面拦截,未燃混合气直接冲击滞止区,导致温度峰值出现在壁面射流区。不同氧燃比下 4 种撞击高度火焰的碳烟峰值变化表明在 $5De \sim 15De$ 范围内,火焰温度峰值随氧燃比增加而上升,但增速减缓;继续增大撞击高度,温度峰值反而下降[图 4(e)]。这可能是由于火焰扩散导致燃料-氧气混合稀释,燃烧反应减弱,产热量降低,从而使温度下降。

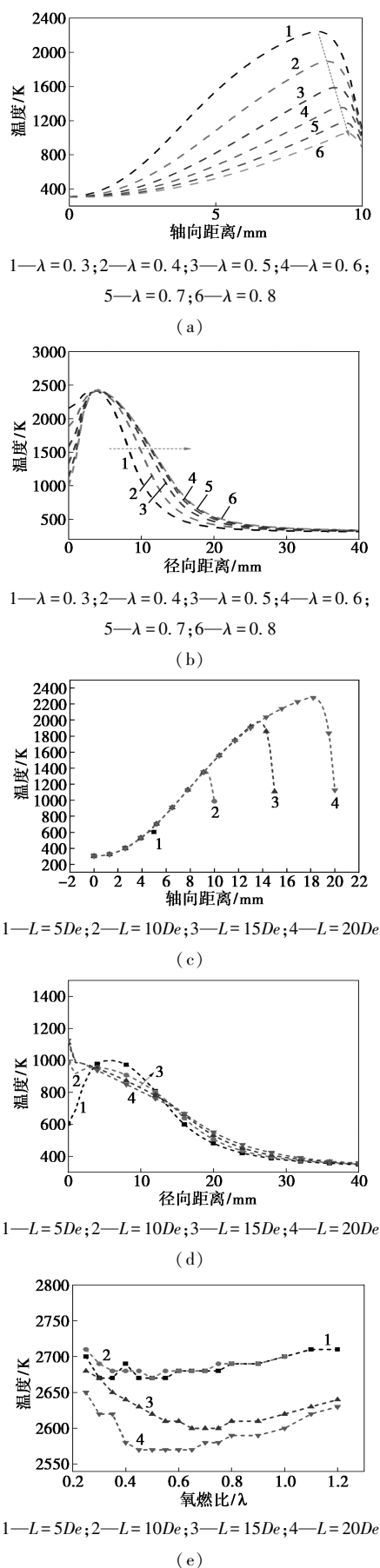


图 4 不同冲击参数下火焰温度分布

图 5 为不同氧燃比、撞击高度下,撞击表面径向热流密度的分布规律。由图 5(a)可知,在撞击径向距离 ≤ 4 mm 的范围内,随氧燃比升高,火焰热流密度整体呈下降趋势。但超过 4 mm 后,COG 火焰的热流密度会随氧燃比增大而回升。这是因为高氧燃比会提升气流轴向速度,既强化了对流换热,也使火焰反应区位置上移。而相同撞击高度下,焦炉气火焰的预混锥离撞击面较远,热流密度呈“滞止点最高、向四周递减”的正态分布特征。同时,高氧燃比会让火焰更宽,燃烧射流的覆盖范围更广,最终使热流密度的分布更均匀。由图 5(b)氧燃比为 0.3,撞击高度(L/De)的影响可知,当 $L/De=10$ 时,火焰预混锥被撞击面拦截,未燃的冷混气直接冲击滞止区,导致热流密度峰值偏离滞止点;若 L/De 降至 5,预混锥被拦截的范围更大,未燃混气与撞击面的接触面积增加,热流密度峰值的位置会进一步远离滞止点,且峰值数值会降低。随着 L/De 增大(如 $L/De=15$),火焰撞击面积缩小,热流密度为负的区域也相应减少;此时火焰锥接近但不接触撞击面,热流密度峰值回到滞止点且数值上升。当 $L/De=20$ 时,火焰预混锥远离撞击面,热流密度峰值稳定在滞止点^[17]。

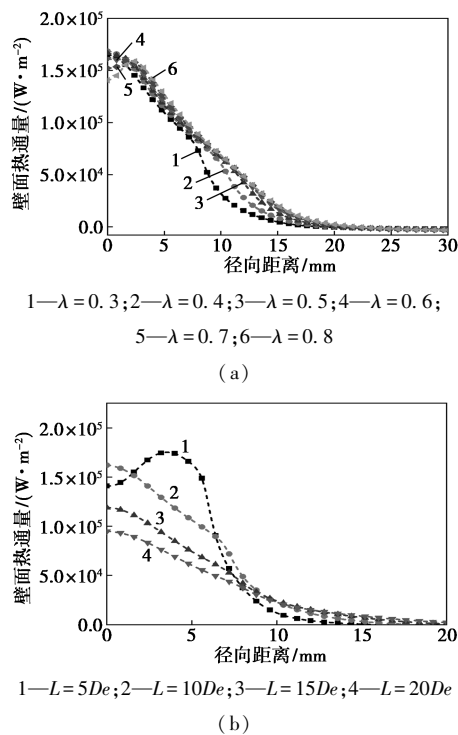


图 5 不同氧燃比及撞击高度的热流密度分布(径向)

2.3 碳烟生成特性

图 6 讨论了不同撞击高度对碳烟生成的影响。

当喷嘴-板距离小于火焰高度时 ($L/De = 5, 10$), 火焰尖端会被“截断”, 反应区向径向发散扩散^[18], 此时碳烟集中区主要出现在壁面射流区域, 且碳烟浓度随离壁面距离增大而降低, 这与火焰温度的分布趋势一致。随着喷嘴-板距离增加 ($L/De = 15, 20$), 碳烟分布逐渐从壁面射流区转移到自由射流区。一方面, 自由射流的充分发展会降低流动动量, 既优化了混合过程以强化碳烟氧化, 也会改变燃烧温度来抑制碳烟生成。另一方面, 火焰与壁面的相互作用会增强氧气混合, 这也是减少碳烟排放的关键因素。此外, 冷壁附近的温度梯度还会影响点火延迟、点火位置与火焰结构, 而火焰-壁面的换热过程, 也会对燃烧的热效率与辐射水平产生间接影响。

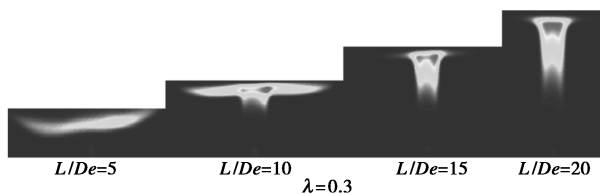
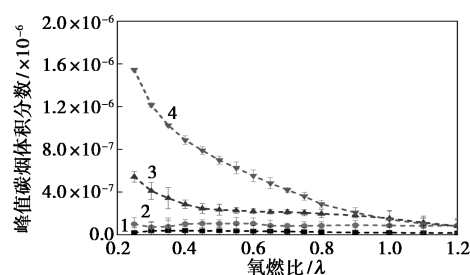


图6 不同撞击高度条件下碳烟分布

对 COG 不同氧燃比和撞击高度下的峰值碳烟浓度进行探讨, 如图 7 所示。Wu 等^[19] 研究发现自由火焰中随氧燃比的增加, 碳烟浓度逐渐下降。自由射流燃烧形成的碳烟明显大于撞击火焰燃烧形成的碳烟。COG 火焰碳烟浓度峰值分布发现, 在 4 种撞击高度下碳烟峰值均随氧燃比的增加先增加后下降直至趋于 0。当氧燃比为 0.5 时, 火焰中的碳烟浓度最大。发现随撞击高度的增加, 碳烟峰值逐渐降低且撞击高度 $L = 2.5De$ 时, 基本无碳烟生成。可能的解释为在氧燃比较小时 ($\lambda < 0.5$), 火焰受到撞击效应的影响, 撞击板直接影响预混燃烧区, 导致撞击板表面附近燃烧强度减弱, 从而导致该区域碳烟产量较低。大量的碳烟颗粒通过碳烟沉积过程从壁面射流中除去。而随着氧燃比的增加, 撞击壁面远离预混锥, 但壁面阻碍火焰中的氧气扩散, 导致火焰局部缺氧, 从而增加了碳烟生成的可能性。因此在氧燃比为 0.5 时达到最大碳烟浓度。相反, 当 $\lambda > 0.5$ 时, 燃烧过程中的温度会升高, 此时火焰趋向完全反应, 撞击效应的影响基本忽略, 使得碳烟生成减少至消失。而焦炉气撞击火焰的碳烟浓度在撞击高度高于 $7.5De$ 时的变化为随氧燃比的增加逐渐降低, 在撞击高度小于 $5De$ 时, 基本无碳烟产生, 表明此时由于撞击壁面作用导致燃料-氧气混合增强而减少碳烟。



1— $L = 5De$; 2— $L = 10De$; 3— $L = 15De$; 4— $L = 20De$

图7 COG 火焰碳烟的峰值分布

2.4 火焰自由基分布

图 8 对焦炉气撞击火焰 OH^* 自由基分布进行探讨。 OH^* 自由基是一种具有高度反应性的氢氧化物, 常常参与燃烧反应中的氧化过程, 是活跃出现在燃烧区域的关键因素, 火焰的稳定性可以通过激发态的 OH^* 自由基分布的可视化来表征。随氧燃比增加, OH^* 核心区域逐渐增大且向火焰下游移动, 氧气流量增大有利于撞击区内氧化还原反应产生, OH^* 强度逐渐增大, 反应区面积逐渐增大。当氧燃比大于 0.6 时, OH^* 自由基分布区域变窄, OH^* 强度降低。 OH^* 核心区由中轴线向火焰两侧移动。此外, 随撞击高度的增加, 火焰强反应区均在氧燃比大于 0.6 时由中心向两侧移动, 贫燃火焰的径向长度最大, 火焰被明显拉伸, OH^* 更集中。这种现象体现在喷嘴尖端附近产生了很强的 OH^* 强度, 从而增强了燃烧强度。高的火焰温度导致高的碳烟负荷, 在高温火焰中, 在碳烟小翼的两侧也可以清楚地看到 2 个薄的 OH^* 翼。在 2 个温度最高的纯乙烯火焰的尖端区域内发现了一个新的 OH^* 区, 表明有第二个氧化区。在 2 个主 OH^* 翼之间, 一个明显的结构在 3 个富氧火焰中出现, 并且在信号强度上与 OC-36.8% 火焰的外 OH^* 翼相当。

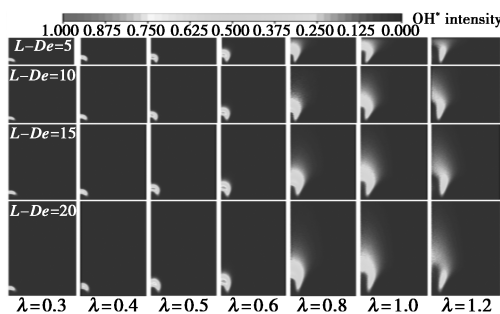


图8 焦炉气反扩散撞击火焰 OH^* 分布

对 4 种撞击高度下火焰不同氧燃比条件的 OH^* 自由基峰值强度进行分析, 如图 9 所示。明显发现, 当 $\lambda < 0.5$ 时, 氧气速度增大, 导致燃料与氧化

剂之间的相对速度增大。氧气量的增加促使未反应的甲烷和不完全燃烧产物扩散到中轴线附近与氧进一步反应,有利于 OH^* 自由基通过化学激发反应 $\text{CH} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO} + \text{OH}^*$ 和 $\text{H} + \text{O} + \text{M} \longrightarrow \text{OH}^* + \text{M}$, 因此,加强了 2 种流的混合,促进了燃烧反应的加剧。最终, OH^* 的峰值强度上升。COG 火焰的 OH^* 峰值在 $\lambda = 0.6$ 时最大,这与碳烟浓度峰值的分布一致。当 λ 继续升高后, OH^* 特征峰的强度呈现出持续回落的趋势。这一现象主要在于随着氧气流速 (u_{O_2}) 的增大,火焰区域的流动状态逐步从层流演变为湍流,且在火焰根部会自发形成涡流结构,该结构可持续裹挟周边燃料向中心射流区域输运,进而推动局部化学反应速率的提升^[20];另一方面,湍流环境下火焰基底的特殊空间结构,叠加氧流量持续增加的作用,会显著促进 OH^* 的猝灭反应进程。尤为关键的是,气流撞击效应引发的火焰流动扰动强度,此时已超过化学反应本身的主导作用,二者综合作用最终造成 OH^* 特征峰峰值强度的显著降低,使 OH^* 峰值强度降低。但是,在 $\lambda < 0.5$ 时, $L/De = 20$ 处的 OH^* 峰值强度比 $L/De = 15, 10, 5$ 时要大。而 $\lambda > 0.5$ 时,正好相反,表明撞击效应引起火焰流动模式变化,从而导致 OH^* 峰值强度变化。从焦炉气燃料的 OH^* 分布也能得到这一现象。

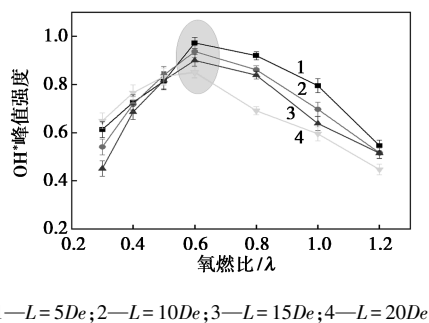
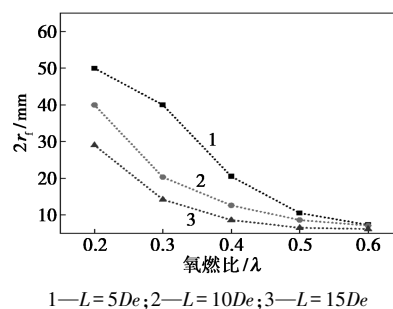


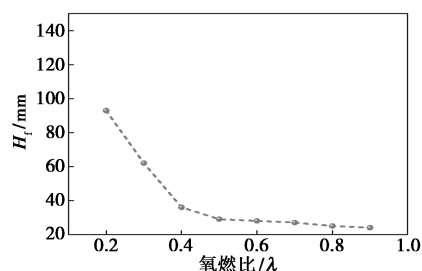
图 9 COG 撞击火焰 OH^* 峰值分布

火焰扩展特性是评估射流火焰撞击行为的关键参数,对工业燃烧器设计和火灾安全分析具有重要意义。基于图 10 所示的实验结果,火焰扩展特性是评估射流火焰撞击行为的关键参数,对工业燃烧器设计和火灾安全分析具有重要意义。本研究基于图 10 所示的实验结果,探讨了 COG 在不同氧燃比和撞击高度下的火焰延伸长度 (r_f) 及自由火焰高度 (H_f) 变化规律。图 10(a) 显示,随着 λ 从 0.2 增至 0.6,火焰沿撞击板的延伸长度逐渐减小,并在氧燃比达到 0.5 后趋于稳定。同时,随着撞击高度的增加,火焰延伸长度进一步减小,且变化趋势随高度增

大而趋于平缓。图 10(b) 表明,自由火焰高度随氧燃比增大同样呈现下降趋势。



(a) 火焰延伸长度

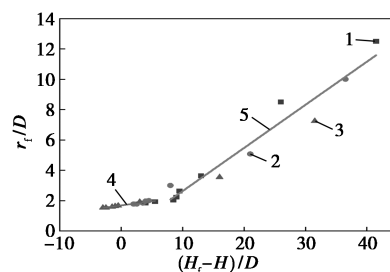


(b) 自由火焰高度

图 10 不同撞击高度下火焰延伸长度和自由火焰高度随氧燃比的变化

图 11 基于无量纲参数 $(H_f - H)/D$ (H_f 为自由火焰高度, H 为撞击高度, D 为喷嘴直径) 的分析表明,焦炉气火焰的延伸行为存在明显的临界转变点。当 $(H_f - H)/D > 10$ 时,火焰延伸长度及其增长斜率显著上升,呈现出与较低 $(H_f - H)/D$ 范围不同的扩展特性。基于这一现象,研究建立了适用于更广 $(H_f - H)/D$ 范围的火焰延伸长度预测关联式。

$$\text{COG}: r_f/D = \begin{cases} 1.68 + 0.05[(H_f - H)/D], & 0 < [(H_f - H)/D] < 10 \\ -0.21 + 0.28[(H_f - H)/D], & 100 < [(H_f - H)/D] < 45 \end{cases}$$



1— $L = 5De$; 2— $L = 10De$; 3— $L = 15De$; 4— $y = 1.68 + 0.05x$; 5— $y = -0.21 + 0.28x$

图 11 火焰延伸长度和自由火焰高度的相关性

3 结论

为了研究撞击火焰燃烧对碳烟形成的机理,采

用多种光学技术和 Fluent 模拟对不同撞击距离和氧燃比下撞击火焰形态、燃烧过程和碳烟形成进行了研究。得出的主要结论如下。

(1) 随着氧燃比(λ)的增加,焦炉气火焰形态与结构发生显著变化。当 $\lambda \leq 0.5$ 时,火焰黄光区域扩大,壁面射流区变薄; $\lambda > 0.5$ 后,黄光区域逐渐消失,火焰转为蓝色,燃烧更充分,燃料与氧气混合更均匀。撞击距离增大使射流火焰在撞击前发展更充分,碳烟亮度增强。自由火焰高度与延伸长度呈现2种相关性趋势,可用于预测焦炉气射流火焰的扩展范围。

(2) 撞击距离与氧燃比对焦炉气火焰的传热与稳定性影响显著。火焰靠近壁面时热通量更高;随着氧燃比增加,壁面温度与热流密度升高,分布更均匀;撞击距离增大则使两者降低。 OH^* 自由基强度随氧燃比先增后减,主导因素由化学反应转为撞击效应。 $\lambda < 0.5$ 时, $L/De = 20$ 处 OH^* 强度最高; $\lambda > 0.5$ 时则相反,表明撞击效应改变了火焰流动模式。氢气组分增强了火焰反应强度与稳定性。

(3) 壁面撞击导致焦炉气火焰温度与碳烟含量下降,同时引起动量损失。随着氧燃比增加,滞止点附近轴向速度峰值接近壁面,热通量峰值处温度梯度最大,碳烟浓度在 $\lambda = 0.5$ 时达到最高,此时生成机制占主导; λ 继续增大则氧化速率超过生成速率,碳烟减少。撞击距离减小时,涡旋作用增强混合,湍流动能耗散增大,壁面射流中碳烟温度与含量进一步降低。

参考文献

- [1] 李振东,张贵雄,白雪,等.膜分离耦合 PSA 提氢工艺在焦炉煤气制合成氨中的应用研究[J].现代化工,2025,45(S1):392-395,400.
- [2] Sahin M. Entrainment effects on combustion characteristics of various syngases using a perforated burner[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(34): 15282-15295.
- [3] Wang G, Chen T, Wang Q, et al. Experimental investigation of conventional and MILD combustion of coke oven gas under different dilution types and preheating temperatures in a long-narrow confined furnace[J]. International Journal of Energy Research, 2025, (1): 7414757.
- [4] Moussou J, Pilla G, Sotton J, et al. High-frequency wall heat flux measurement during wall impingement of a diffusion flame[J]. International Journal of Engine Research, 2021, 22(3): 699-710.
- [5] Ruiz-Rodriguez I, Cracknell R, Parkes M, et al. Experimental study of the effect of C_8 oxygenates on sooting processes in high pressure spray flames[J]. Combustion and Flame, 2020, 220: 235-246.
- [6] Pucilowski M, Jangi M, Fatehi H, et al. LES study of diesel flame/wall interaction and mixing mechanisms at different wall distances[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5597-5604.
- [7] Feng L, Wang Q L, Liu H F, et al. Effect of the stagnation plate on PAHs, soot and OH distributions in partially premixed laminar flames fueled with a blend of n-heptane and toluene[J]. Combustion and Flame, 2021, 227: 52-64.
- [8] 孙丹,吴钢,李宗霖,等.铈基和钨基复合氧化物催化剂催化碳烟燃烧性能研究[J].西华大学学报,2022,41(5):19-26.
- [9] Luo M, Liu D. Pollutants emissions of CO and soot from flame-wall interactions in fundamental and practical energy conversion systems: A review[J]. ES Energy & Environment, 2019, 3: 4-24.
- [10] 于润田,刘冬,杨凯旋,等.铝基纳米流体燃料火焰与壁面相互作用中碳烟生成特性研究[J].固体火箭技术,2024,47(6):794-802.
- [11] Wu R, Song X, Guo Q, et al. Study on the application of laser diagnosis technology in the rapid real time measurement of soot[J]. Applied Energy, 2023, 350: 121595.
- [12] Wu R, Song X, Wei J, et al. Hydrogen addition in methane-oxygen laminar inverse diffusion flames: A study focused on free radical chemiluminescence and soot formation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 54: 1029-1039.
- [13] 赵万辉,孙婷,卫海桥,等.正十二烷喷雾火焰大涡模拟研究[J].内燃机学报,2023,41(3):193-202.
- [14] Hwang W, Dec J, Sjoberg M, et al. Spectroscopic and chemical-kinetic analysis of the phases of HCCI autoignition and combustion for single- and two-stage ignition fuels[J]. Combustion and Flame, 2008, 154: 387-409.
- [15] Zhang X L, Hu L H, Wang Q, et al. Soot free length fraction of buoyant turbulent non-premixed jet flames[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 111-114.
- [16] Zhen H S, Chen K D, Chen Z B, et al. Heat transfer analysis of impinging flames using field synergy principle[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 43: 102807.
- [17] Zhen H S, Leung C W, Cheung C S. A comparison of the heat transfer behaviors of biogas- H_2 diffusion and premixed flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39: 1137-1144.
- [18] You H Z, Faeth G M. Ceiling heat transfer during fire plume and fire impingement[J]. Fire Mater 1979, 3: 140-147.
- [19] Wu R M, Song X D, Zhang W J, et al. Effect of flame-wall impingement on heat transfer characteristics and soot migration in methane inverse diffusion flames[J]. Journal of the Energy Institute, 2025, 118: 101937.
- [20] 余永哲,孙蒙,何灿星,等.基于壁面淬熄诱导形成机理的非预混撞击火焰的动力学研究[J].青岛科技大学学报:自然科学版,2025,46(1):102-110. ■