

气化炉内柴油火焰光谱辐射特性及 CH* 二维辐射特性研究

祝慧雯¹, 何磊¹, 杨家宝¹, 郭庆华^{1*}, 龚岩¹, 于广锁^{1, 2*}

1. 华东理工大学煤气化及能源化工教育部重点实验室, 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, 宁夏 银川 750021

摘要 火焰的自发辐射光谱与火焰的结构、温度分布等燃烧特征参数密切相关。对激发态自由基辐射的辐射强度与二维分布进行研究, 可清晰地反映火焰燃烧状态而不对火焰产生扰动。基于多喷嘴对置式气流床气化实验平台, 利用光纤光谱仪和配置 CCD 相机的高温内窥镜, 对柴油扩散火焰的辐射光谱及 CH* 辐射二维分布特性进行研究。考察了当量比和撞击作用对火焰辐射光谱和 CH* 辐射分布的影响。结果表明, 柴油火焰在 306.47 及 309.12 nm 处存在 OH* 辐射特征峰, 在 431.42 nm 处存在 CH* 辐射特征峰, 且存在明显的碱金属原子 Na* (589.45 nm), K* (766.91 和 770.06 nm) 发射光谱。此外, 由于柴油不完全燃烧生成大量碳黑, 在辐射光谱的可见光波段产生了强烈的连续黑体辐射。火焰中的黑体辐射对 CH* 辐射特征峰的检测存在干扰, 且当量比越低时背景辐射越强, 对自由基特征峰检测干扰越大。基于普朗克定律利用插值法可扣除 430 nm 附近波段背景辐射。柴油火焰中 CH* 辐射峰值随当量比的增加单调减小, CH* 辐射等值线沿火焰发展方向依次出现三峰状、双峰状及单峰状, 最终收缩为以反应核心区为中心的圆核。随着当量比的提高, 出现各个形状的 CH* 辐射强度阈值不断降低, 火焰主反应区面积减小且向下游移动, 当量比增加到 1.0 附近时, 理论上柴油完全燃烧, CH* 辐射强度显著降低, 贫燃火焰的 CH* 辐射强度及分布区域几乎稳定不变。利用 CH* 辐射强度值判定火焰举升长度, 对于单喷嘴射流火焰, 火焰举升长度随当量比的增加经历了显著增加后小幅下降的过程。相同当量比时两喷嘴撞击火焰 CH* 辐射强度峰值始终高于单喷嘴射流火焰对应值; 火焰举升长度随当量比的增加小幅增加。火焰撞击的约束作用使得火焰举升长度不易随着当量比变化发生较大波动, 燃烧更加稳定。这为定量判断火焰燃烧状态提供了一种直观、有效的方法, 同时为柴油燃烧的化学动力学研究提供了实验依据。

关键词 光谱辐射; 气流床气化炉; 扩散火焰; 撞击火焰; 燃烧诊断

中图分类号: O433.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)10-3142-06

引言

火焰的自发辐射光谱是火焰的重要特性之一, 可提供火焰的结构、燃烧状态、温度分布等燃烧特征信息^[1]。对火焰的自发辐射特性进行研究, 可在不扰动火焰的前提下, 清晰地反映火焰几何特征及燃烧状态^[2]。在碳氢火焰中, 火焰自发辐射主要来自于 OH*, CH*, C₂* 和 CO₂* 等激发态自由基所产生的离散光谱辐射^[3-4]。Kojima 等^[5]对甲烷/空气层流预混火焰进行研究, 发现 OH*, CH*, C₂* 三种激发态自由基均分布于燃料已燃区和未燃区交界处, 可用于划分火焰的已燃区和未燃区。Moon 等^[6]根据 CH* 和 C₂* 自由基的辐射

分布对煤粉火焰反应区进行划分, 得到了煤颗粒燃烧过程中挥发分的反应核心区。Escudero 等^[7]以火焰轴线上 CH* 自由基峰值辐射峰值强度位置与喷嘴出口的距离定义火焰高度, 指出利用 CH* 自由基辐射判断火焰高度可有效避免碳黑辐射造成的干扰。

目前, 火焰光谱诊断技术在工程燃烧领域取得了迅速的发展, 并被广泛应用于气化炉内火焰燃烧特性诊断^[8-10]。Parameswaran 等^[11]采用光纤光谱仪对半工业规模气化炉火焰在 500~800 nm 波段的光谱辐射特性进行研究, 指出火焰自发辐射光谱可以反映火焰实时温度变化。Zhang^[12]等对气化炉内柴油火焰进行研究, 得到基于 CH* 辐射的合成气浓度预测公式。Hu 等^[13]研究了气化炉内柴油及水煤浆火焰黑

收稿日期: 2018-07-10, 修订日期: 2018-12-05

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0602601), 国家自然科学基金项目(21676091)资助

作者简介: 祝慧雯, 1994 年生, 华东理工大学煤气化及能源化工教育部重点实验室博士研究生 e-mail: zhuhuiwen1994@foxmail.com

* 通讯联系人 e-mail: gsyu@ecust.edu.cn; gqh@ecust.edu.cn

体辐射的演变规律,指出黑体辐射受温度影响较大,且水煤浆火焰中的黑体辐射远高于柴油火焰。然而在上述研究中,仅采用单一视角采集炉内火焰辐射信息,极易受到炉壁背景辐射和火焰叠加辐射的影响,无法获得清晰的火焰边缘及根部结构特征,不利于对自由基辐射特性进一步分析。

基于多喷嘴对置式气化炉实验平台,结合炉顶和喷嘴平面两个视角对柴油火焰的光谱辐射特性进行研究,探讨了氧碳当量比和撞击作用对火焰 CH^* 辐射特性的影响,为提高光谱诊断的可靠性,促进燃料的高效利用提供了参考。

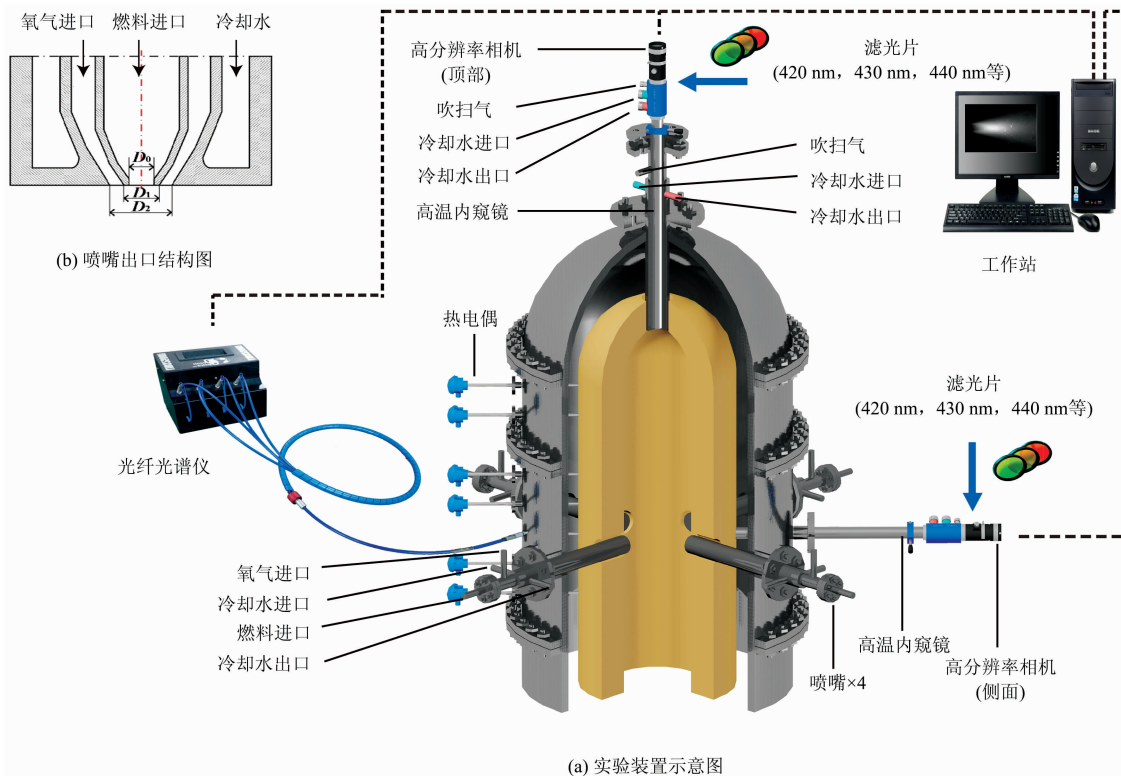


图 1 多喷嘴对置式气流床气化炉实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a bench-scale opposed multi-burner gasifier

(a): Experimental flow chart of the bench scale opposed multi-burner gasifier; (b): Sketch diagram of the burner

采用 LBS2500 型光纤光谱仪采集火焰辐射光谱信息,光谱仪系统由光纤探头、光纤导线和四台不同参数的微型光谱仪组成,其波长范围覆盖紫外区到可见光区(200~950 nm),用以检测炉内火焰自由基的存在方式及峰值强度。光纤探头直径为 3 mm,视场角为 25° ,由气化炉侧面热电偶插孔插入,探头前端紧贴耐火砖内壁面,正对气化炉炉膛中心。

采用 SONY XCL-C500 型 CCD 工业相机结合 CESYCO $\phi 38$ mm 高温内窥镜采集火焰 CH^* 辐射分布图像,高温内窥镜设有滤光片插槽,采集对应波段下带通滤波辐射图像。将内窥镜安装于气化炉顶部可采集完整的炉内火焰 CH^* 辐射分布;将高温内窥镜于喷嘴平面水平插入则可近距离采集火焰根部 CH^* 辐射图像。相机曝光时间为 20 ms。

1.2 实验条件

实验以柴油为燃料,纯氧为氧化剂,在常压下进行燃烧气化反应,考察不同氧碳当量比($[\text{O}/\text{C}]_e$)条件下,柴油扩散

1 实验部分

1.1 装置及方法

实验在多喷嘴对置式气化炉实验平台展开,实验装置示意图如图 1 所示,气化室内径为 300 mm,四只预混式喷嘴两两互成 90° 角水平安装于气化室,喷嘴中心通道为柴油通道(直径 $D_0=4.0$ mm),环隙通道为氧气通道(内径 $D_1=5.8$ mm,外径 $D_2=7.0$ mm),见图 1(b)。

火焰光谱辐射特性变化。 $[\text{O}/\text{C}]_e$ 的计算公式为

$$[\text{O}/\text{C}]_e = [\text{O}/\text{C}]_a / [\text{O}/\text{C}]_s \quad (1)$$

其中, $[\text{O}/\text{C}]_e$ 是由柴油与氧气实际流量计算得到的氧碳比, $[\text{O}/\text{C}]_s$ 是柴油恰好完全燃烧时的化学计量氧碳比。为保证良好的雾化效果,参考工业气化炉操作条件,保持氧气流速为 $110 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,通过调节柴油流量改变 $[\text{O}/\text{C}]_e$ 。柴油的物性参数如表 1 所示,单个喷嘴操作条件见表 2。为避免喷嘴尺寸因素的影响,使用火焰举升长度 L 与喷嘴当量直径 D_e 的比值 L/D_e 分析火焰举升随当量比 $[\text{O}/\text{C}]_e$ 的变化规律, D_e 可由式(2)表示

$$D_e = \frac{2(\vec{m}_c + \vec{m}_a)}{[\pi \bar{\rho}(G_c + G_a)]^{1/2}} \quad (2)$$

其中 $\bar{\rho}$ 为燃料与氧化剂的平均密度, \vec{m}_c 和 \vec{m}_a 分别为中心通道和环隙通道内的质量流量, G_c 和 G_a 分别为各自的动量通量。

表 1 柴油物性参数

Table 1 Properties of diesel

分子式	相对分子质量	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热值/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	燃点/ °C	C/ (Wt%)	H/ (Wt%)	N/ (Wt%)	Na/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	K/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
C_xH_y	190~220	840	44 400	220	86.2	13.7	0.1	0.8	1.2

表 2 实验操作条件

Table 2 Operating conditions of each burner

工况	$[O/C]_e$	柴油流量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	工况	$[O/C]_e$	柴油流量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
1	0.6	0.92	5	1.0	0.56
2	0.7	0.78	6	1.1	0.50
3	0.8	0.69	7	1.2	0.46
4	0.9	0.62	8	1.3	0.42

2 结果与讨论

2.1 柴油火焰辐射光谱特性

图 2 为单喷嘴燃烧条件下, $[O/C]_e = 0.6$ 及 $[O/C]_e = 1.3$ 时, 光纤光谱仪测得的炉膛中心区域柴油火焰辐射光谱。由图 2 可知, 柴油火焰在 306.47 及 309.12 nm 处存在 OH^* 辐射特征峰, 在 431.42 nm 处存在 CH^* 辐射特征峰, 且存在明显的碱金属元素 Na^* (589.45 nm), K^* (766.91, 770.06 nm) 发射光谱。实验过程中使用氩气作为吹扫气, 故于 670.74 nm 处存在 Ar^* 特征辐射。 $[O/C]_e = 0.6$ 时, 柴油不完全燃烧产生了大量碳黑, 因此在火焰辐射光谱的可见光波段存在强烈的连续黑体辐射。

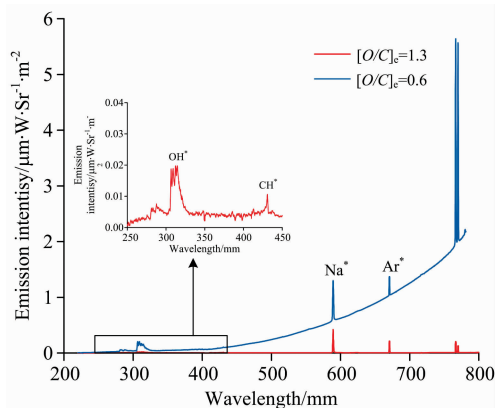


图 2 柴油火焰光谱辐射谱线

Fig. 2 The spectrum of diesel flame

火焰中的激发态自由基主要通过热激发 (Na^* , K^* , Ar^*) 和化学激发 (OH^* , CH^*) 两种途径生成^[3,14], 而 CH^* 辐射仅于 431.42 nm 存在一个特征辐射峰, 因此选取 420~450 nm 波段对柴油火焰辐射光谱进一步探讨, 如图 3 所示。火焰光谱辐射绝对值随着当量比增加而减小, 谱线斜率变小。这是由于当量比提高后火焰生成的碳黑逐渐减少, 黑体辐射减弱, 此时背景辐射主要来自于 CO_2^* 自由基。另一方面, 当量比越低, CH^* 特征峰越不明显, 且在富燃火焰中几

乎不可见。说明火焰光谱中的背景辐射对 CH^* 特征峰的检测存在干扰, 且当量比越低, 背景辐射越强, 对自由基特征峰检测干扰越大。

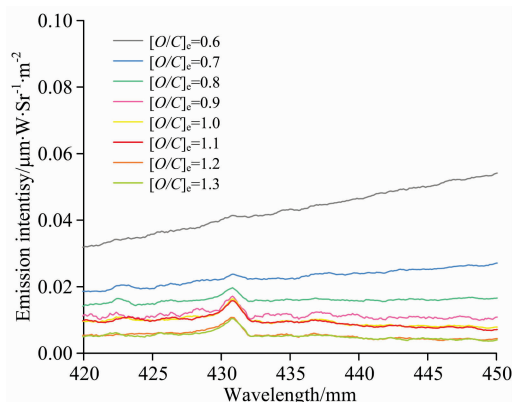


图 3 420~450 nm 波段火焰光谱辐射谱线

Fig. 3 Spectral emission lines in the band from 420 to 450 nm

2.2 柴油火焰 CH^* 二维光谱辐射特性

为排除背景辐射对 CH^* 辐射检测的干扰, 基于 Karnani 等^[15] 提出的碳黑辐射扣除方法, 通过线性插值计算得到 430 nm 处的火焰背景辐射。Zhang 等^[12] 对柴油火焰的碳黑辐射和 CO_2^* 辐射进行研究, 指出柴油火焰中的 CH^* 辐射强度 I_{CH^*} 可由如式(3)计算

$$I_{\text{CH}^*} = I_{430 \text{ nm}} - (0.636 1 I_{420 \text{ nm}} + 0.348 6 I_{440 \text{ nm}}) \quad (3)$$

式(3)中, $I_{420 \text{ nm}}$, $I_{430 \text{ nm}}$ 和 $I_{440 \text{ nm}}$ 分别为 CCD 相机拍摄得到的对应滤光片下的火焰辐射强度。在后文的分析中, 均将根据普朗克定律扣除背景辐射。图 4 为气化炉顶部采集的单喷嘴射流火焰 CH^* 辐射二维分布(视野为 300 mm×70 mm)。

由图 4 可见 CH^* 辐射强度随着当量比的提高不断减小。分析认为在柴油火焰中 CH^* 辐射主要生成路径为^[16]: $\text{C}_2\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}^*$ (R1)。低当量比条件下火焰中含碳自由基 C_2H 浓度较高, 从而促进了 CH^* 自由基的生成, 随着当量比的增加, C_2H 浓度降低, CH^* 辐射强度减弱, $[O/C]_e \geq 1.0$ 时, 气化炉内 CO_2 含量增大, 抑制反应 R1 的进行, 从而使 CH^* 辐射强度达到稳定。

图 5 为喷嘴平面采集的单喷嘴射流火焰 CH^* 辐射二维分布(视野为 80 mm×60 mm), 喷嘴出口位于 A 点, 可见 CH^* 分布趋势与气化炉顶部视角所得趋势吻合, 随着当量比的增加, 火焰主反应区面积减小且逐渐向火焰下游移动。 $[O/C]_e \geq 1.0$ 时, 相机视野中无法采集到完整的 CH^* 辐射分布图像, 火焰脱火, 因为此时气液质量流量比更大, 柴油液滴更易被氧气携带至火焰下游。选取虚线区域对火焰化学反应核心区 CH^* 辐射分布进行分析, 实线为辐射强度等值线, 当 $[O/C]_e = 0.6$ 时, CH^* 辐射等值线沿火焰传播方向依

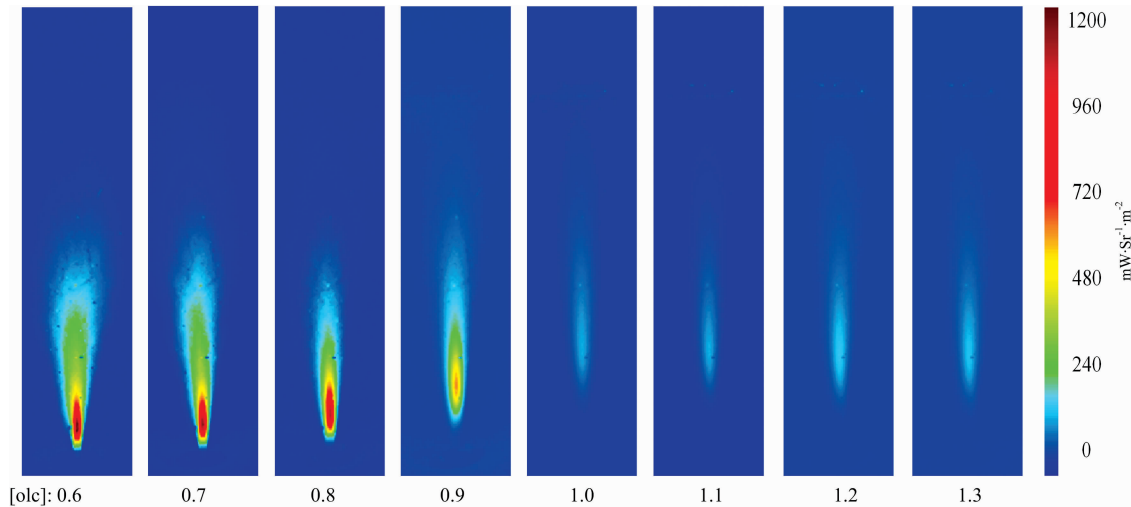


图 4 气化炉顶部采集单喷嘴射流火焰 CH* 辐射二维分布

Fig. 4 CH* distributions of one-burner diffusion flame obtained from the top of the gasifier

次呈现 3 种形状：三峰状 ($I_{CH^*} = 40 \text{ mW} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)—双峰状 ($I_{CH^*} = 240 \text{ mW} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)—单峰状 ($I_{CH^*} = 800 \text{ mW} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), 并最终缩小为以峰值为中心的核状封闭形状。随着当量比的提高, 达到双峰和单峰形态的等值线阈值不断减小, 当 $[O/C]_e = 0.9$ 时, 三峰形态几乎不可见, 当 $[O/C]_e > 0.9$ 时, 则仅存在单峰形态。由此说明, CH* 辐射强度可直观地表征不同当量比下的柴油火焰结构, 并有效判断火焰中化学反应分布区域。

两喷嘴撞击火焰在各当量比条件下均未产生明显举升现象, 喷嘴平面采集的 CH* 辐射分布即可完整地反映火焰整体结构, 如图 6 所示。 $[O/C]_e < 1.0$ 时两喷嘴火焰形态随当量比变化与单喷嘴火焰相似, $[O/C]_e \geq 1.0$ 时, 两喷嘴撞击火焰尚未脱火, 核心反应区趋于稳定, 表明贫燃状态下两喷嘴火焰中化学反应受当量比影响较小。

2.3 当量比及撞击作用对火焰 CH* 辐射特性的影响

气化炉内火焰 CH* 辐射强度峰值随当量比的变化趋势如图 7 所示, 随着当量比增加, 单喷嘴及两喷嘴火焰 CH* 辐射峰值均先下降, 且在当量比达到 1.1 后保持稳定。两喷嘴火焰的 CH* 辐射峰值始终高于单喷嘴火焰, 这是由于两喷嘴火焰轴向上受到对置火焰撞击作用, 反应区面积减小, 单位空间 CH* 浓度增大, 辐射峰值随之提高。由图 5 可知柴油火焰与炉膛背景间具有明显的界线, 选取 $I_{CH^*} = 20 \text{ mW} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 作为判断火焰存在的强度阈值^[12], 以火焰轴线上 CH* 辐射刚达到阈值处与喷嘴出口距离作为火焰举升长度 L , L/D_e 随 $[O/C]_e$ 的变化如图 8 所示。单喷嘴火焰 L/D_e 随 $[O/C]_e$ 的增加先增大后减小, 当 $[O/C]_e = 1.1$ 时, $L_{\max} = 14D_e$, 这是由于此时炉内 CO_2 含量较高, 且氧气气流对燃料的雾化效果较强, 二者综合影响导致该工况下火焰举升长度具有最大值; 对于两喷嘴撞击火焰, 在 $[O/C]_e = 1.1$ 时, $L_{\max} = 2D_e$, 之后维持恒定, 表明撞击作用使得火焰举升长度

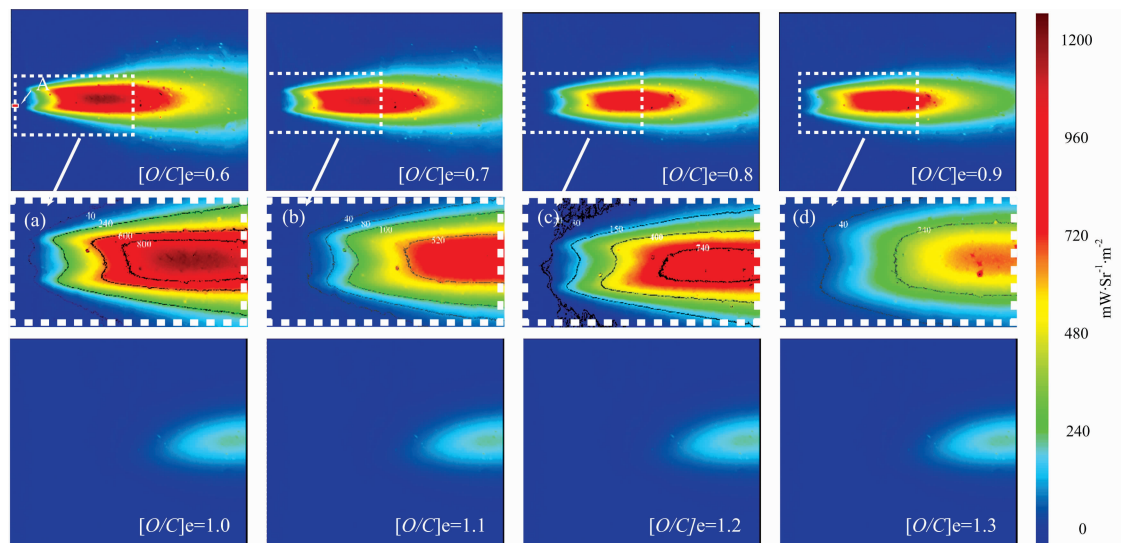
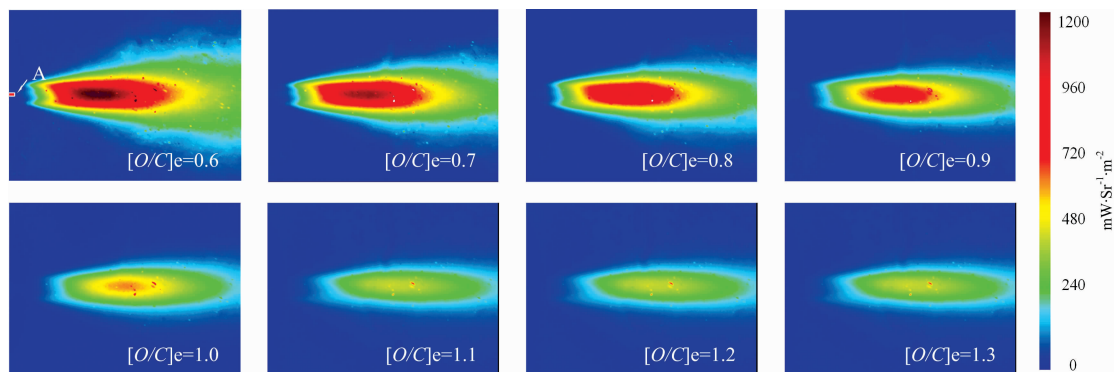
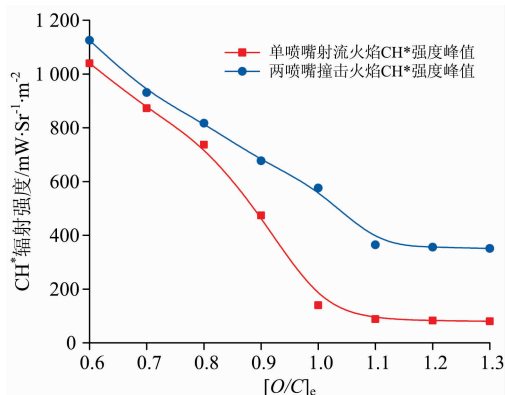
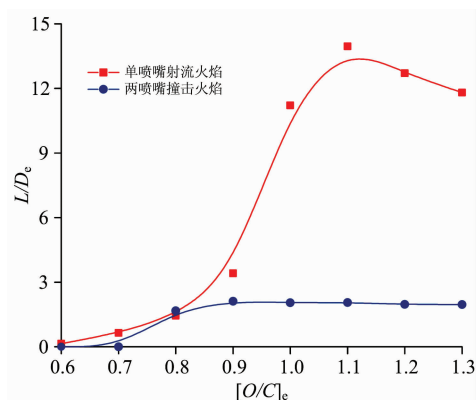


图 5 喷嘴平面采集单喷嘴射流火焰 CH* 辐射二维分布

Fig. 5 CH* distributions of one-burner diffusion flame obtained from the burner plane

图 6 喷嘴平面采集两喷嘴撞击火焰 CH^* 辐射二维分布Fig. 6 CH^* distributions of two-burner impinging flames obtained from the burner plane

不易受当量比影响发生较大波动, 燃烧状态较为稳定。

图 7 CH^* 辐射峰值随 $[\text{O}/\text{C}]_e$ 的变化Fig. 7 CH^* peak intensities under different $[\text{O}/\text{C}]_e$.图 8 L/D_e 随 $[\text{O}/\text{C}]_e$ 的变化Fig. 8 L/D_e values under different $[\text{O}/\text{C}]_e$.

3 结论

(1) 在柴油火焰辐射光谱中, 不仅存在 OH^* , CH^* , Na^* 和 K^* 等自由基辐射特征峰, 且出现了连续的黑体辐射。火焰的氧碳当量比越低, 黑体辐射越强, 对自由基特征峰检测干扰越大, 可根据普朗克定律采用插值法扣除背景辐射对 CH^* 辐射检测的影响。

(2) 相同当量比时两喷嘴撞击火焰的 CH^* 辐射强度高于一喷嘴射流火焰。随着当量比增加, 火焰主反应区收缩且逐渐向下游移动, CH^* 辐射强度不断减小, 其等值线沿火焰发展方向先后出现三峰-双峰-单峰形状, 且随着当量比的增加, 三峰、双峰逐渐消失。

(3) 在高当量比条件下单喷嘴射流火焰发生脱火, 两喷嘴撞击火焰举升长度不受当量比影响而发生较大波动, 火焰始终被约束在喷嘴出口附近, 说明撞击作用能够使火焰燃烧状态更加稳定, 可根据 CH^* 辐射分布对操作工况及火焰结构进行表征。

References

- [1] GUI Xin-yang, AymericAlliot, YANG Bin, et al(桂欣扬, AymericAlliot, 杨斌, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(11): 3492.
- [2] Xu H, Liu F, Sun S, et al. Combustion and Flame, 2017, 177: 67.
- [3] Garcia-Armingol T, Ballester J. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(4): 375.
- [4] Zhang T, Guo Q, Liang Q, et al. Energy & Fuels, 2012, 26(9): 5503.
- [5] Kojima J, Ikeda Y, Nakajima T. Combustion and Flame, 2005, 140(1-2): 34.
- [6] Moon C, Sung Y, Eom S, et al. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 62(1): 99.
- [7] Escudero F, Fuentes A, Demarco R, et al. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 73: 101.
- [8] LOU Chun(娄春). Engineering Combustion Diagnostics(工程燃烧诊断学). Beijing: China Electric Power Press(北京: 中国电力出版社), 2016.

- [9] Parameswaran T, Hughes R, Gogolek P, et al. *Fuel*, 2014, 134: 579.
- [10] Song X, Guo Q, Hu C, et al. *Fuel*, 2017, 188: 132.
- [11] Parameswaran T, Duchesne M A, Champagne S, et al. *Energy & Fuels*, 2016, 30(11): 9867.
- [12] Zhang Q, Gong Y, Guo Q, et al. *AIChE Journal*, 2016, 63(6): 2007.
- [13] Hu C, Gong Y, Guo Q, et al. *Fuel*, 2018, 211: 688.
- [14] Leo M D, Saveliev A, Kennedy L A, et al. *Combustion and Flame*, 2007, 149(4): 435.
- [15] Karnani S, Dunn-Rankin D. *Combustion and Flame*, 2013, 160(10): 2275.
- [16] Nori V N, Seitzman J M. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 895.

Study on Spectral Characteristics and CH* Distribution Characteristics of Diesel Flames in an Entrained-Flow Gasifier

ZHU Hui-wen¹, HE Lei¹, YANG Jia-bao¹, GUO Qing-hua^{1*}, GONG Yan¹, YU Guang-suo^{1, 2*}

1. Key Laboratory of Coal Gasification and Energy Chemical Engineering of Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China
2. State Key Laboratory of High-Efficiency Coal Utilization and Green Chemical Engineering, School of Chemistry and Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract The spontaneous emission spectra of flame are closely related to flame characteristics such as flame structure and temperature distribution. And the combustion state of flame can be reflected clearly by radiation intensity and distributions of excited radicals without being destabilized. Based on a bench-scale opposed multi-burner (OMB) gasification platform, a fiber spectrometer and a high-temperature endoscope coupled with a CCD camera were applied to investigate the two-dimensional distributions of CH* of diesel diffusion flames. The effects of equivalence ratio and impingement on emission spectra and CH* distributions of flame were further compared. The results show that there exists OH* (306.47, 309.12 nm), CH* (431.42 nm), Na* (589.45 nm) as well as K* (766.91, 770.06 nm) radicals in diesel flames. In addition, due to incomplete combustion of diesel fuel, a lot of black carbon is emitted, which leads to strong continuous black-body radiation in visible wavelengths. The black-body radiation interferes with the detection of the CH* characteristic peak, and the lower the equivalence ratio, the stronger the background radiation, and the greater the interference to the detection. According to Planck's law and interpolation method, background radiation can be subtracted from total radiation in the band around 430 nm. The peak intensity of CH* decreases monotonically with the increase of equivalence ratio. Meanwhile, the contours of CH* radiation appear in the form of three-peak, double-peak, and single-peak along the direction of flame development, and eventually shrink into a circular nucleus centered on the reaction zone. As the equivalence ratio increases, the thresholds of each form continuously decrease, and the reaction zone gradually shrinks and moves downstream. When the equivalence ratio increases to 1.0, the diesel fuel burns completely, CH* radiation intensity decreases significantly, and the intensity and distribution of CH* chemiluminescence of fuel-lean flame remain stable. The flame lift-off length can be evaluated by CH* radiation. For one-burner jet flame, the flame lift-off length increases significantly and then decreases slightly with the increase of the equivalence ratio. The peak intensity of CH* of impinging flame is always higher than that of jet flame. The lift-off length of impinging flame increases slightly with the increase of the equivalence ratio. More obviously, the confining effect of impingement makes the lift-off length of impinging flame not easy to fluctuate with the change of the equivalence ratio, which enables the combustion process to be stabler. This provides an intuitive and effective method for quantitatively judging the flame combustion state, as well as an experimental basis for the study of the chemical kinetics of diesel combustion.

Keywords Spectral radiation; Entrained-flow gasifier; Diffusion flame; Impinging flame; Combustion diagnosis

(Received Jul. 10, 2018; accepted Dec. 5, 2018)

* Corresponding authors