

甲烷/氧气层流反扩散火焰形态及滞后特性研究

李新宇 代正华 徐月亭 李超 王辅臣

Mode and hysteresis of laminar methane/oxygen inverse diffusion flame

Li Xin-Yu Dai Zheng-Hua Xu Yue-Ting Li Chao Wang Fu-Chen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024704 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024704

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024704>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气体放电系统中多臂螺旋波的数值分析

Numerical analysis on multi-armed spiral patterns in gas discharge system

物理学报.2014, 63(22): 228201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228201>

两层耦合可激发介质中螺旋波转变为平面波

Transformation of spiral wave to plan wave in the two layers of coupled excitable media

物理学报.2014, 63(20): 208201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208201>

钾扩散耦合引起的心脏中螺旋波的变化

Potassium diffusive coupling-induced the variation of spiral wave in cardiac tissues

物理学报.2013, 62(19): 198201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.198201>

时空调制对可激发介质螺旋波波头动力学行为影响及控制研究

The influence of spatiotemporal modulation on spiral tip dynamics in excitable medium and its application for spiral control

物理学报.2012, 61(15): 158202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.158202>

双层耦合 Lengel-Epstein 模型中的超点阵斑图

Superlattice patterns in a coupled two-layer Lengel-Epstein model

物理学报.2011, 60(11): 118201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.118201>

甲烷/氧气层流反扩散火焰形态及滞后特性研究*

李新宇¹⁾²⁾ 代正华^{1)2)†} 徐月亭¹⁾²⁾ 李超¹⁾²⁾ 王辅臣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)(华东理工大学, 上海煤气化工程技术研究中心, 上海 200237)

(2014年7月4日收到; 2014年7月21日收到修改稿)

对空气气氛中甲烷/氧气反扩散火焰的形态和推举滞后特性进行了实验研究. 实验中通过改变气体流量考察了气速变化对火焰形态演变及滞后特性的影响, 并利用紫外相机系统研究了气速对不同形态火焰中 OH* 分布的影响. 研究表明: 甲烷气速、氧气气速和火焰的历史状态是决定火焰形态的三个重要参数, 并以此对实验范围内的火焰形态进行了分区; 氧气气速对不同形态反扩散火焰轴线上的 OH* 分布有相似的影响, 当氧气缺乏时, 反扩散反应区较短, 当氧气富余时, 反扩散反应区在轴向分布较广; 同轴甲烷的气速对反扩散火焰的滞后特性影响显著, 随着甲烷气速的增加, 反扩散火焰的推举速度和再附着速度呈线性减小, 部分预混火焰向反扩散火焰转变的速度呈线性增加.

关键词: 反扩散火焰, 推举, 滞后现象, 富氧燃烧

PACS: 47.70.Pq, 82.40.Ck, 47.20.Lz, 33.20.Lg

DOI: 10.7498/aps.64.024704

1 引言

扩散火焰由于其安全、稳定、操作范围广等优点, 在锅炉、汽轮机等燃烧设备中得到了广泛应用. 为保护喷嘴, 燃烧设备中的火焰通常维持在推举状态, 而推举火焰在噪声及工况变动的作用下存在着稳定性问题, 给设备的安全运行带来隐患. 深入研究扩散火焰的推举、再附着及滞后特性对于研究推举火焰的稳定范围和机理具有重要的科学意义和实用价值, 一直是燃烧学领域关注的热点^[1-3]. 推举火焰附着到喷嘴时的气速通常小于其推举速度, 这个现象称为推举火焰的滞后现象, 由 Scholefield 和 Garside^[4] 于 1949 年首先发现. 滞后行为对推举火焰的稳定性具有重要影响. Golahalli 等^[5] 对湍流推举火焰滞后行为的影响因素进行了研究, 认为火焰的再附着速度由流场的拟序结构控制, 与燃料的性质无关. Demare 和 Baillet^[6] 通过对滞后区域推举火焰流场的研究进一步确认 Kelvin-Helmholtz 不稳定及其产生的涡丝对推举火焰的稳定有重要

作用. Lee 等^[7,8] 推导出了部分预混丙烷射流火焰和空气伴流丙烷射流火焰的分析解, 认为在部分预混火焰中再附着速度与燃料质量分数有关, 而在伴流火焰中再附着速度随伴流空气速度呈线性变化. Terry 和 Lyons^[9] 研究了伴流空气对湍流推举火焰滞后特性的影响, 发现再附着速度随着伴流空气的速度呈线性变化并且与燃料的类型有关. Lyogun 和 Birouk^[10] 则对非对称结构喷嘴对甲烷扩散火焰稳定性的影响进行了研究, 发现喷嘴结构的对称性对火焰的推举和吹熄速度有影响, 但对再附着速度几乎没有影响.

目前, 国内外学者对推举火焰滞后特性的研究都局限于扩散火焰, 尚无人对反扩散火焰的滞后特性进行研究. 反扩散火焰是扩散火焰的一种, 其特点在于燃料和氧化剂的相对位置与常规扩散火焰不同. 在反扩散火焰中, 氧化剂处于喷嘴的中心通道, 而燃料处于喷嘴的环隙通道. 反扩散火焰在操作安全、污染物排放水平以及火焰稳定性方面综合了扩散火焰和预混火焰的优势^[11], 在生活、生产及

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB227000) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: WB1213004) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chinadai@ecust.edu.cn

航空航天中有着广泛的应用潜力^[12,13]. 相比于常规扩散火焰, 反扩散火焰特性的研究还比较少, 其特性正日益受到人们的关注. Wu和Essenhigh^[14]最早对反扩散火焰的特性进行了研究, 根据外观和稳定性对甲烷-空气反扩散火焰进行了分类. Takagi等^[15]发现不同轴向高度处反扩散火焰的最高温度要大于常规扩散火焰. 随后不同学者对不同形式的反扩散火焰的形状、温度分布进行了广泛研究^[11,16-18]. 由于碳烟在反扩散火焰的外围生成, 没有被火焰氧化, 反扩散火焰还被广泛应用于碳烟生成的研究^[19,20]. 燃料和氧化剂相对位置的变化使得反扩散火焰中的OH*分布特别适用于表征反应区特征及化学计量比的火焰高度^[21], 利用OH*分布来揭示反扩散火焰的结构也开始引起人们的关注^[13,22]. 由于反扩散火焰中燃料的特殊位置, 其所处的气氛对火焰的特性具有重要影响. Liu和Smallwood^[23]对伴流空气气氛中甲烷-空气反扩散火焰进行了研究, 发现喷嘴中心通道空气的流量对火焰的形态和碳烟生成有重要影响. Johnson和Sobiesiak^[24]采用空气伴流和燃烧产物伴流研究了伴流气氛对甲烷空气反扩散火焰的影响, 并重点分析了反扩散火焰形成和熄灭的滞后现象.

虽然对反扩散火焰和火焰推举滞后分别进行了深入的研究, 但以往的反扩散火焰研究多集中在反扩散火焰高度、温度及碳烟生成特性方面, 推举滞后研究也局限于常规扩散火焰, 尚未见到对反扩散火焰推举滞后特性的研究. 本文利用同轴交叉射流喷嘴对空气气氛下的甲烷纯氧反扩散火焰进行研究, 考察气速对火焰形态及推举滞后特性的影响, 并通过火焰中OH*分布的测量考察氧气气速对反扩散反应区分布的影响.

2 实验装置

实验装置如图1所示, 主要包括供气系统、喷嘴、紫外相机和普通单反相机. 所用反扩散火焰喷嘴为同轴双通道交叉射流喷嘴, 结构如图2所示, 喷嘴内通道直径 D_0 为0.8 mm, 外径 D_1 为1.4 mm, 外通道内径 D_2 为1.7 mm. 在反扩散火焰实验中, 喷嘴中心通道通氧气, 环形通道通甲烷. 实验中所用甲烷和氧气均由高压钢瓶供气. 气体流量由两台量程为 $2 \text{ NL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的电子质量流量计控制(七星CS200型号).

实验过程中, 火焰可见形态由一台单反相机

(尼康D800E)进行记录, 曝光时间设为 $1/250 \text{ s}$. 实验中采用高分辨率紫外相机系统获得火焰中的OH*分布, 用于表征反应区及火焰高度. 紫外相机系统包括镜头、滤光片及紫外相机, 其中镜头直径50 mm, 滤光片通过光波长为310 nm, 半峰宽度为10 nm. 整个系统的分辨率为 1024×255 . 紫外相机系统的工作原理为: 火焰燃烧发射的光经滤光片过滤, 仅有310 nm附近的光进入紫外相机, 而火焰在310 nm附近仅存在OH*的特征峰, 可认为此时得到的即为OH*辐射强度信号.

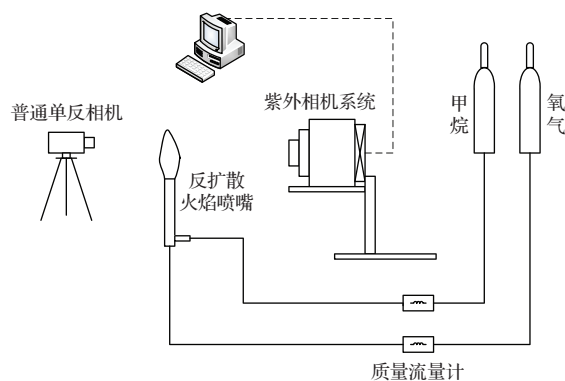


图1 实验装置示意图

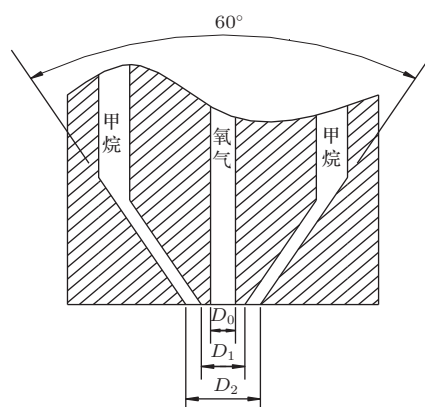


图2 同轴双通道喷嘴结构示意图

3 结果与分析

3.1 火焰形态及分区

为考察氧气气速 u_O 对火焰形态的影响, 实验中首先维持甲烷流量不变, 通过由零逐渐增加氧气流量来考察整个火焰形态的变化. 图3为甲烷气速 $u_f = 11.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时不同中心氧气气速下反扩散火焰喷嘴形成的火焰形态. 当 $u_O = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时(图3(a)), 只有甲烷流经环隙通道并与周围空气反应, 此时形成的火焰为常规扩散火焰, 火焰底部由

于甲烷射流卷吸了大量周围的空气, 燃烧较充分, 呈现出蓝色. 而在火焰中部及上部, 由于氧气的不足, 燃烧生成大量的碳烟, 碳烟辐射导致火焰中上部呈现出明亮的黄色. 保持甲烷流速不变, 当通入少量氧气 ($u_O = 6.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 时, 火焰中上部的黄色区域明显减小, 碳烟生成受到抑制, 而火焰底部的蓝色反应区则有所增加, 呈现出部分预混火焰的特征(图 3(b)). 文献[23, 24]中把这种火焰称为部分预混火焰. 此时通入的氧气并未与甲烷反应形成反扩散火焰, 而只是简单地与甲烷混合. 继续增大氧气流量到 $u_O = 9.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 部分预混火焰的中部开始出现一个蓝色的亮点(如图 3(c)所示). 继续

增大氧气流量, 该亮点突然向火焰上游喷嘴出口快速移动, 形成一个明亮的蓝色附着火焰(如图 3(d)所示). 该火焰是由中心氧气和环隙甲烷反应形成的, 是真正意义上的反扩散火焰. 在附着的反扩散火焰的外围和上方, 是未反应完的甲烷与周围空气形成的常规扩散火焰, 具有明显的碳烟特征.

随着氧气流量的进一步增加, 反扩散火焰高度逐渐增加, 火焰上方明亮的碳烟区域逐渐消失, 整体火焰呈现蓝色, 如图 3(d)和(e)所示. 氧气流速增加到某一临界值时, 附着的反扩散火焰突然发生推举, 如图 3(f)所示. 这一临界速度称为反扩散火焰的推举速度 (u_{lift}).

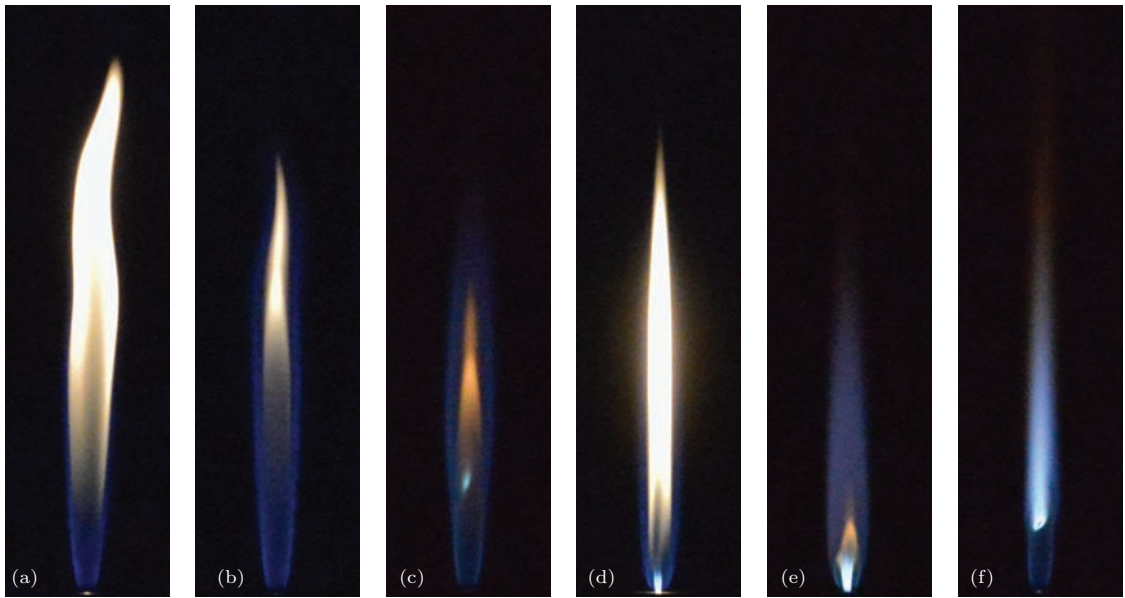


图3 $u_f = 11.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时增加氧气流速对火焰形态的影响 (a) $u_O = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $u_O = 6.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $u_O = 9.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $u_O = 10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) $u_O = 16.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) $u_O = 33.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

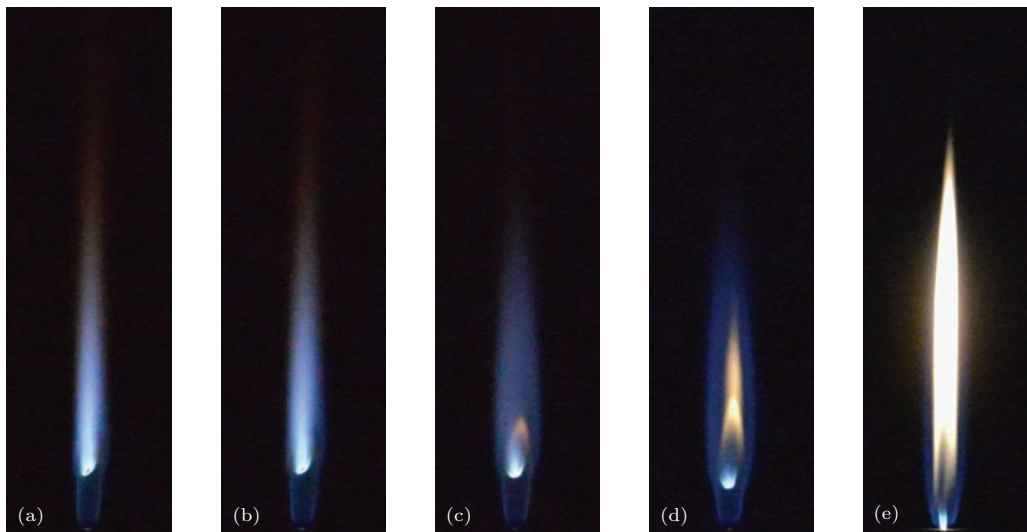


图4 反扩散火焰由推举变为附着的过程 ($u_f = 11.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) $u_O = 33.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $u_O = 26.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $u_O = 16.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $u_O = 13.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) $u_O = 10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

实验过程中发现, 推举状态的反扩散火焰与附着状态的反扩散火焰的相互转变之间存在着滞后现象. 当反扩散火焰发生推举后, 逐渐减小氧气的速度, 反扩散火焰仍然维持推举状态而不附着. 当氧气速度减小到一临界值时, 推举的反扩散火焰突然附着, 这一现象称为推举火焰的再附着, 相应的速度称为再附着速度 u_{RA} . 反扩散火焰再附着的过程如图 4 所示. 再附着速度 u_{RA} 小于火焰的推举速度 u_{lift} , 两者之差形成的区域称为推举火焰的滞后区域. 在滞后区域范围内, 根据火焰所经历的历史状态的不同, 相同工况下的火焰既有可能处于附着状态也有可能处于推举状态, 如图 3(e) 和图 4(d) 所示.

反扩散火焰推举滞后现象的存在表明火焰的历史状态对火焰的形态也有影响. 甲烷气速一定 ($u_f = 11.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 时, 氧气气速和火焰历史状态对火焰形态的影响如图 5 所示. 为区分火焰形态的变化, 实验中测量了部分实验点火焰的推举高度, 推举高度为零表示反扩散火焰处于附着状态, 非零表示反扩散火焰处于推举状态. 从图中可以看出, 在 u_O 逐渐增加的过程中, 滞后区域的火焰处于附着状态; 在 u_O 逐渐减小的过程中, 滞后区域的火焰处于推举状态. 滞后区域与附着火焰区域和推举火焰区域的分界线分别对应反扩散火焰的再附着速度和推举速度, 这两个速度由经过标定的高精度质量流量计准确测量得到.

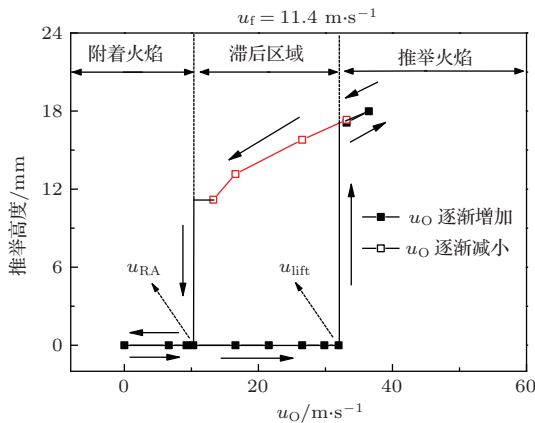


图 5 氧气气速和火焰历史状态对火焰形态的影响 (滞后现象)

实验过程中发现, 甲烷的气速对火焰形态的变化也有一定影响. 当 $u_f > 12.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 部分预混火焰中的蓝色亮点随着氧气气速的增加直接转变为推举状态的反扩散火焰而不经历图 3(d) 和 (e) 所示的附着状态. 这可能是由于甲烷气速的增加导

致上游气流速度超过了甲烷-氧气反扩散火焰的最大传播速度从而导致反扩散火焰无法向前传播并附着, 只能稳定在下游火焰传播速度与局部气流速度相当的地方, 直接形成推举火焰.

从以上的讨论可知, 根据实验条件的不同, 火焰存在三种不同的形态: 部分预混火焰、附着反扩散火焰和推举反扩散火焰. 甲烷气速、氧气气速以及火焰的历史状态是影响反扩散火焰形态的三个重要参数. 根据这三个参数对实验数据进行整理, 可以对实验范围内的火焰进行形态分区, 结果如图 6 所示. 把不同甲烷气速下火焰由部分预混向反扩散火焰转变的点连接而成的线称为转变线, 相应地, 附着线和推举线分别由火焰发生再附着和推举的点连接而成. 由于甲烷气速的影响, 当 $u_f > 12.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 部分预混火焰直接转变为推举反扩散火焰, 所以推举线和转变线在 $u_f > 12.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时发生重叠.

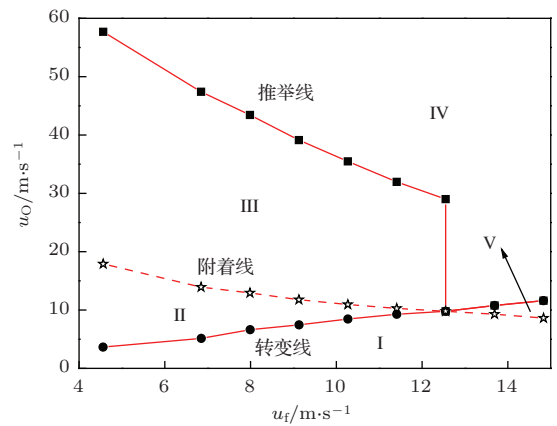


图 6 反扩散火焰形态分区

表 1 各分区对应的火焰形态

分区	火焰形态 (增加氧气)	火焰形态 (减小氧气)
I	部分预混火焰	附着反扩散火焰
II	附着反扩散火焰	附着反扩散火焰
III	附着反扩散火焰	推举反扩散火焰
IV	推举反扩散火焰	推举反扩散火焰
V	部分预混火焰	推举反扩散火焰

图 6 中五个分区在不同的火焰状态路径 (增大或减小氧气) 下代表着不同的火焰形态. 表 1 为不同火焰状态路径下各分区对应的火焰形态. 把由零逐渐增加氧气流量直到火焰推举的过程称为路径 1, 其反向路径称为路径 2. 在路径 1 下, 分区 I 和 V 合并, 对应的火焰形态为部分预混火焰; 分区 II 和 III 合并, 对应的火焰为附着反扩散火焰; 分区 IV

为推举反扩散火焰. 在路径 2 下, 分区 IV 仍为推举反扩散火焰; 分区 III 和分区 V 转变为推举火焰区; 分区 II 和 I 合并, 对应火焰形态为附着反扩散火焰. 可以看出, 在实验范围内只有分区 II 和 IV 内的火焰形态是绝对稳定的, 不随火焰的历史状态而发生变化. 分区 I, III 和 V 内的火焰形态均与火焰的历史状态有关.

3.2 同轴甲烷气速对反扩散火焰推举滞后的影响

图 7 为不同环隙甲烷气速下反扩散火焰由附着状态变为推举状态时的氧气速度. 可以看出, 同轴甲烷的气速对反扩散火焰的推举速度有很大的影响. 当甲烷气速由 $4.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 变为 $6.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 反扩散火焰发生推举所需要的氧气气速由 $58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 减小到 $47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 随着甲烷气速的增大, 反扩散火焰发生推举所需的氧气速度逐渐降低.

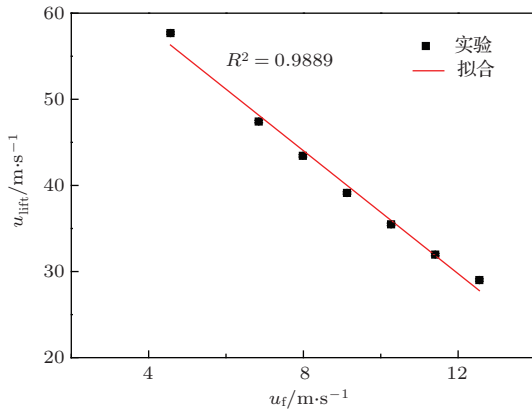


图 7 不同甲烷气速下反扩散火焰的推举速度

图 8 为不同甲烷气速下反扩散火焰的再附着速度. 可以看出, 甲烷气速与反扩散火焰的再附着速度之间存在着线性关系, 在实验范围内, 随着甲烷气速的增加, 再附着速度逐渐减小. Lee 等 [8] 基于自由射流流场的相似性推导出了伴流射流流场的近似分析解, 指出层流推举火焰的再附着速度 u_{RA} 与伴流空气速度 V_{CO} 之间存在着如 (1) 式所示的线性关系. Terry 和 Lyons [9] 发现该线性关系同样存在于湍流推举火焰. 而本文的结果表明, 再附着速度的线性关系对于反扩散火焰同样成立.

$$u_{RA} = C_1 - C_2 V_{CO}, \quad (1)$$

其中 C_1, C_2 为常数.

由于同轴射流流场与伴流射流流场之间存在

较大的差别, Lee 等 [8] 提出的流场近似分析解并不能直接用于本实验中的同轴射流流场. 在 Lee 等 [8] 提出的模型中, 一个关键假设为伴流流场中射流与伴流的相对速度 $(u - V_{CO})$ 在远场区域的相似性. 正是基于该假设, 自由射流流场的相似分析解才可用于伴流射流流场.

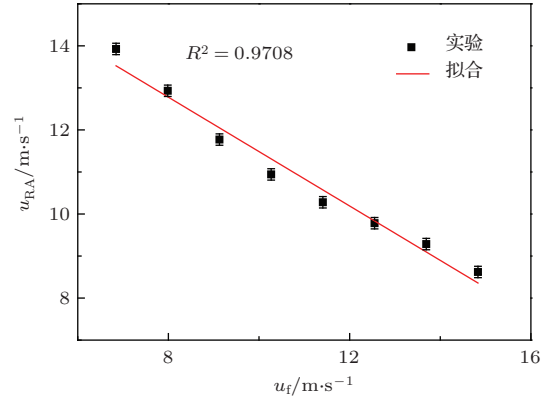


图 8 不同甲烷气速下反扩散火焰的再附着速度

而根据射流理论可知, 在喷嘴出口 $8-10d_0$ (d_0 为喷嘴直径) 以外的充分发展区, 同轴射流的流动情况与轴对称的圆射流相似, 也存在着速度分布的相似性. 因此, 同轴射流与伴流射流在射流的充分发展区有着相似的流动情况. 根据 Gollahli 等 [5] 的研究, 火焰的再附着现象只与射流远场区域的速度分布有关. 因此可以认为, 速度分布之间的相似性导致了同轴射流火焰与伴流射流火焰有着相似的再附着现象. 这可能是 (1) 式所示的线性关系在本实验中的同轴射流反扩散火焰中仍然成立的原因.

对推举火焰的研究表明, 火焰根部的燃料和氧化剂处于部分预混状态 [25, 26]. 对于本文中的同轴交叉射流火焰来说, 交叉射流的存在使得甲烷和氧气在喷嘴附近的混合进一步增强, 因此可以在远场区域把甲烷氧气反扩散火焰看作是部分预混甲烷火焰. Lee 和 Chung [7] 基于自由射流流场相似分析解推导出了部分预混丙烷层流推举火焰的再附着速度 u_{RA} 与初始预混混合物中燃料质量分数 $Y_{F,0}$ 之间的函数关系.

$$\frac{u_{RA}}{Y_{F,0}^{1/Sc} + C_1 Y_{F,0}^{1/(2Sc)} + C_2} = C_3, \quad (2)$$

其中, Sc 为燃料的施密特数; C_1, C_2, C_3 为常数.

在上述反扩散火焰根部部分预混的假设下, 定义 $Y_{F,0}$ 为喷嘴出口处甲烷质量在甲烷氧气总质量

中所占的分数, 利用该函数对实验中的甲烷质量分数及反扩散火焰再附着速度进行拟合, 结果如(3)式和图9所示.

$$\frac{u_{RA}}{Y_{F,0}^{1/Sc} + C_1 Y_{F,0}^{1/(2Sc)} + C_2} = C_3,$$

$$C_1 = -1.76376, \quad C_2 = 1.04726,$$

$$C_3 = 27.57105. \quad (3)$$

从图9可以看到, 实验数据与Lee和Chung^[7]提出的函数曲线之间符合得相当好. 该结果表明, 把实验中的推举反扩散火焰的根部作为部分预混处理是合适的, 甲烷的质量分数与再附着氧气速度之间符合Lee和Chung^[7]提出的函数关系.

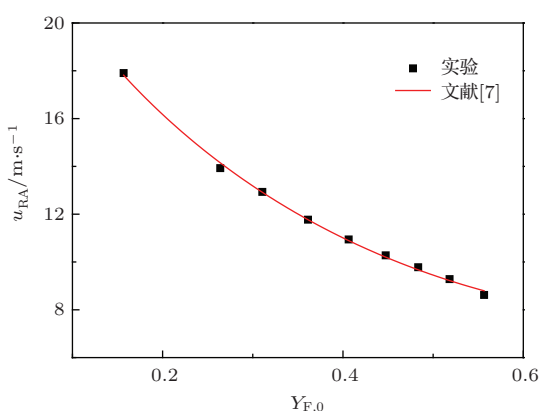


图9 初始燃料质量分数与再附着速度之间的关系

3.3 部分预混火焰向反扩散火焰的转变

图10为不同环隙甲烷气速下火焰由部分预混火焰向反扩散火焰转变时的临界氧气的速度. 可以发现, 在实验范围内, 随着甲烷气速的增大, 发生转变所需要的中心氧气射流速度也逐渐增大. 甲烷气速与临界氧气的速度之间存在着高度的线性关系. 这与Johnson和Sobiesiak^[24]在甲烷/空气反扩散火焰中得到的结论一致.

关于该转变过程的机理, 可以用推举火焰稳定性理论中的速度匹配理论来解释. 随着部分预混火焰根部氧气速度的逐渐增加, 氧气与甲烷的混合当量比逐渐较小, 当氧气气速增加到一定值时, 在火焰中部局部地区的甲烷氧气混合物达到可燃极限并被周围的扩散火焰点燃, 形成蓝色的亮点. 随着氧气气速的进一步增加, 蓝色亮点前锋处的混合当量比逐渐接近化学当量比, 火焰燃烧速度也逐渐增加到最大值. 到一临界点时, 蓝色亮点前锋的甲烷-氧气火焰燃烧速度超过上游流体速度, 蓝色

亮点快速向上游移动并在喷嘴出口稳定为附着的甲烷-氧气反扩散火焰.

前已述及, 当甲烷气速大于 $12.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 部分预混火焰直接转变为推举状态的反扩散火焰. 从图10中可以看出, 预混火焰向反扩散火焰转变的临界速度并不受该因素影响, 在甲烷气速大于 $12.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 甲烷气速与发生转变时的氧气气速之间仍保持着较好的线性关系.

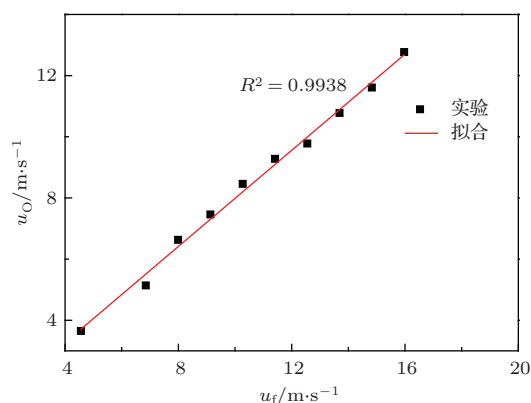


图10 不同甲烷气速下反扩散火焰出现的氧气气速

3.4 氧气流量对反扩散反应区分布的影响

Mikofski等^[21]认为, 由于反扩散火焰特殊的结构形式, OH^* 分布特别适合用来对反扩散火焰的长度和结构进行表征. 图11为甲烷流量 $Q_f = 500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ($11.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)时不同氧气流量 Q_O 下喷嘴轴线上 OH^* 辐射强度的分布, 横坐标 x 为喷嘴轴线方向上距喷嘴出口的距离. 以 OH^* 辐射强度最大值距离喷嘴出口的距离作为反扩散火焰的高度, 可以看出, 在实验范围内随着氧气流量的增加, 反扩散火焰的高度逐渐增加. 以氧气流量为 $Q_O = 600 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的 OH^* 分布线为分界, 当氧气流量 $Q_O < 600 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 喷嘴轴线上的 OH^* 分布的曲线较窄, 即甲烷氧气的反应区长度较短. 而且随着 Q_O 的增加, OH^* 的峰值强度也逐渐增加. 表明当氧气流量 $Q_O < 600 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 甲烷与氧气的反应处于富燃料状态, 氧气的增加可以促进反应的强度. 当氧气流量 $Q_O > 600 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, OH^* 的分布范围逐渐变大且峰值强度基本保持不变. 这说明虽然全局化学计量比(以喷嘴出口的甲烷和氧气计算)仍大于化学计量比 $\phi = 1$, 但此时氧气已处于富余状态, 氧气的增加无法再增大甲烷氧气的反应强度, 而多余的氧气穿透反扩散火焰区域在下游与火焰外围的甲

烷、碳烟等反应生成OH*, 使得OH* 在轴线上的分布范围较广.

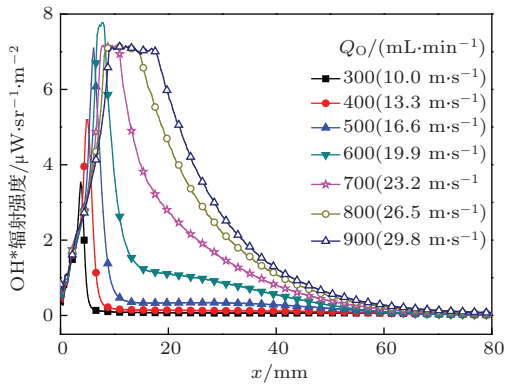


图 11 附着状态下喷嘴轴线上 OH* 辐射强度分布

图 12 为反扩散火焰处于推举状态时, 氧气流量从 $Q_O = 1200 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 减小到 $Q_O = 300 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时喷嘴轴线上 OH* 分布的变化, 甲烷流量保持 $Q_f = 500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 不变. 可以看出 OH* 的分布与图 11 附着状态时相比整体向下游移动. 随着氧气流量的减小, 反扩散火焰的反应区向上游喷嘴出口方向移动. 与附着状态时类似, 当氧气流量 $Q_O > 600 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, OH* 在轴线上分布较广, 表明氧气处于富余状态, 有多余的氧气穿过反扩散火焰在下游反应. 不同氧气流量下, 火焰下游的 OH* 分布重叠. 当氧气流量 $Q_O < 600 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, OH* 分布范围较窄, 反扩散火焰下游无明显 OH* 生成反应. 当氧气流量为 $Q_O = 300 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 推举的反扩散火焰附着到喷嘴出口.

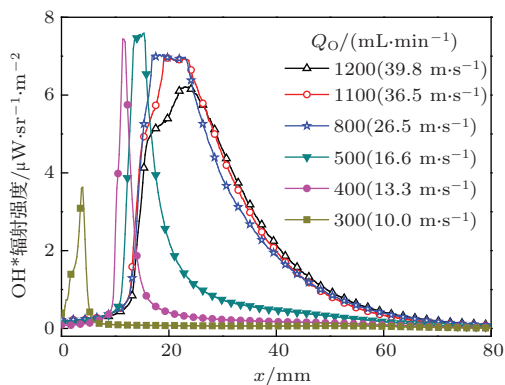


图 12 反扩散火焰再附着过程中喷嘴轴线上 OH* 分布

4 结 论

采用同轴交叉射流喷嘴对空气气氛下的甲烷/氧气反扩散火焰的形态和滞后特性进行了研究,

得到以下结论.

1) 甲烷气速、氧气气速和火焰历史形态对反扩散火焰的形态有重要影响. 在实验范围内, 根据这三个参数的不同, 火焰存在部分预混火焰、附着反扩散火焰和推举反扩散火焰三种模态.

2) 反扩散火焰存在着推举滞后现象. 同轴甲烷气速对反扩散火焰的推举速度、再附着速度有着显著的影响. 随着同轴甲烷气速的增加, 再附着速度线性减小, 这与伴流射流火焰的再附着规律相似. 射流流场在远场区域的相似性可能是造成该相似性的原因. 如果把同轴交叉射流反扩散火焰看作为部分预混火焰, 其初始甲烷质量分数与再附着速度之间的关系符合文献中给出的部分预混火焰的再附着规律.

3) 随着同轴甲烷气速的增加, 火焰由部分预混状态转变为反扩散火焰所需的氧气速度线性增加, 这一规律与甲烷/空气反扩散火焰的规律一致. 当甲烷气速大于 $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 部分预混火焰直接转变为推举的反扩散火焰.

4) 氧气流量对反扩散火焰中反应区的分布具有重要影响. 当氧气流量较小时, 反扩散反应区比较短; 当氧气处于富余状态时, 反扩散反应区在轴向上分布较广.

参考文献

- [1] Lin C K, Jeng M S, Chao Y C 1993 *Exp. Fluids* **14** 353
- [2] Chung S H 2007 *Proc. Combust. Inst.* **31** 877
- [3] Lyons K M 2007 *Prog. Energy Combust. Sci.* **33** 211
- [4] Scholefield D A, Garsie J E 1949 *Third Symposium on Combustion, Flame, and Explosion Phenomena* (Massachusetts: The Massachusetts Institute of Technology Cambridge) p102
- [5] Gollahalli S R, Savas O, Huang R F, Rodriguez Azara J L 1988 *Symposium (International) on Combustion* **21** 1463
- [6] Demare D, Baillot F 2001 *Phys. Fluids* **13** 2662
- [7] Lee J, Chung S H 2001 *Combust. Flame* **127** 2194
- [8] Lee J, Won S H, Jin S H, Chung S H 2003 *Combust. Flame* **135** 449
- [9] Terry S D, Lyons K M 2006 *J. Energy Resour. Technol.* **128** 319
- [10] Iyogun C O, Birouk M 2008 *Combust. Sci. Technol.* **180** 2186
- [11] Sze L K, Cheung C S, Leung C W 2006 *Combust. Flame* **144** 237
- [12] Jin P, Li M, Cai G B 2013 *Chin. Phys. B* **22** 044701
- [13] Stelzner B, Hunger F, Voss S, Keller J, Hasse C, Trimis D 2013 *Proc. Combust. Inst.* **34** 1045
- [14] Wu K T, Essenhigh R H 1985 *Symposium (International) on Combustion* **20** 1925

- [15] Takagi T, Xu Z, Komiyama M 1996 *Combust. Flame* **106** 252
- [16] Qiu X L, Long Q, Wu Y X, Zhang H, Lü J F 2011 *Proceeding of Chinese Society of Engineering Thermophysics on Engine Aero Combustion* Hangzhou, November 27–30, 2011 p1 (in Chinese) [仇晓龙, 龙泉, 吴玉新, 张海, 吕俊复 2011 年中国工程热物理学会热机气动燃烧学学术会议论文集 杭州, 2011 年 11 月 27—30 日, 2011 第 1 页]
- [17] Sobiesiak A, Wenzell J C 2005 *Proc. Combust. Inst.* **30** 743
- [18] Sze L K, Cheung C S, Leung C W 2004 *Int. J. Heat Mass Transfer* **47** 3119
- [19] Mikofski M A, Williams T C, Shaddix C R, Fernandezpello A C, Blevins L G 2007 *Combust. Flame* **149** 463
- [20] Shaddix C R, Williams T C, Blevins L G, Schefer R W 2005 *Proc. Combust. Inst.* **30** 1501
- [21] Mikofski M A, Williams T C, Shaddix C R, Blevins L G 2006 *Combust. Flame* **146** 63
- [22] Elbaz A M, Roberts W L 2014 *Exp. Therm Fluid Sci.* **56** 23
- [23] Liu F, Smallwood G J 2011 *Proc. Combust. Inst.* **33** 1063
- [24] Johnson M B, Sobiesiak A 2011 *Proc. Combust. Inst.* **33** 1079
- [25] Joedicke A, Peters N, Mansour M 2005 *Proc. Combust. Inst.* **30** 901
- [26] Lawn C J 2009 *Prog. Energy Combust. Sci.* **35** 1

Mode and hysteresis of laminar methane/oxygen inverse diffusion flame*

Li Xin-Yu¹⁾²⁾ Dai Zheng-Hua^{1)2)†} Xu Yue-Ting¹⁾²⁾ Li Chao¹⁾²⁾ Wang Fu-Chen¹⁾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) (Shanghai Engineering Research Center of Coal Gasification, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

(Received 4 July 2014; revised manuscript received 21 July 2014)

Abstract

Flame modes and liftoff hysteresis of the methane/oxygen inverse diffusion flame (IDF) are experimentally studied in still air. The effects of gas velocity on flame mode and liftoff hysteresis are investigated by changing the gas flow rate, and the influences of gas velocity on OH* distribution in different modes of flame are investigated using an ultraviolet camera. The results show that methane velocity, oxygen velocity and history of the flame mode are the key factors in determining the flame mode. Flame mode regimes are identified according to the three factors. The OH* profile along the axis of the nozzle in the IDF indicates that the reaction zone is narrow in fuel rich condition and broad in fuel lean condition. The hysteresis characteristics of the IDF are significantly influenced by the coaxial methane velocity. With the increase of coaxial methane velocity, the liftoff velocity and attachment velocity of the IDF decrease linearly, while the transition velocity increases linearly from partly premixed flame to IDF.

Keywords: inverse diffusion flame, liftoff, hysteresis, oxy-combustion

PACS: 47.70.Pq, 82.40.Ck, 47.20.Lz, 33.20.Lg

DOI: 10.7498/aps.64.024704

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB227000) and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. WB1213004).

† Corresponding author. E-mail: chinadai@ecust.edu.cn