

“直径稳定阶段”对 TPD 检测技术的影响与分析

卫芳洲, 贺铸, 周 锐

(武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘要: 采用热电偶对甲烷/氧气预混火焰进行 TPD (thermocouple particle densitometry) 测量, 并将实验结果与激光消光法 (laser extinction method, LE) 检测值进行对比, 结果表明, 在大部分测量区域, TPD 法检测的碳烟体积分数与 LE 结果吻合较好; 而在碳烟初生区域, 使用 TPD 法测量时出现了全新的“直径稳定阶段”, 该阶段的存在加剧 TPD 在碳烟初生区域内的碳烟体积分数检测误差; 通过调节 C/O 原子数比与预混气出口流速可以控制“直径稳定阶段”的出现时间, 从而更好地利用 TPD 技术。

关键词: 甲烷/氧气预混火焰; TPD; 直径稳定阶段

中图分类号: TF051

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2017)03-0249-06

Effect and Analysis of “Steady-Diameter Stage” on TPD Method

Wei Fangzhou, He Zhu, Zhou Kun

(Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The thermocouple particle densitometry (TPD) method was adopted to study the methane/oxygen premixed flame. It is shown that the soot volume fraction extracted from TPD matched well with that from laser extinction (LE) method in most areas detected. While new stage appeared in the beginning part of the sooting region, named “steady-diameter stage”, which aggravates the detection error sharply. Both the C/O molar ratio and the velocity of output are important parameters in controlling “steady-diameter stage” for the better use of the TPD method.

Keywords: methane/oxygen premixed flame; thermocouple particle densitometry; steady-diameter stage

热电偶是广泛应用于工业测温的检测元件之一, 其原理是通过不同金属材质在高温下产生电流的差异反馈测温节点的温度信息。同时, 热电偶也可作碳氢火焰内的碳烟浓度检测元件, 1985 年, Eisner 和 Rosner 等^[1]最先提出了使用热电偶检测碳烟体积分数的方法; 随后, McEnally 等^[2]对这一方法的理论进行了细化与分析, 根据热电偶节点在碳烟火焰中的温度信息, 基于热泳理论及碳烟沉积公式推导出碳烟体

积分数, 并将该方法命名为 TPD (thermocouple particle densitometry); 通过研究碳烟附着热电偶测温节点对温度曲线的影响, McEnally 等总结了热电偶在含碳烟火焰中经典的 3 个响应阶段: 升温响应阶段 (transient-response stage)、变发射率阶段 (variable-emissivity stage) 及变直径阶段 (variable-diameter stage)。利用 TPD 技术, McEnally 等^[3-4]后续进行了一系列碳烟实验研究。由于 TPD 自身具有简单、方

收稿日期: 2016-03-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11402179, 11572274).

作者简介: 卫芳洲 (1991—), 男, 硕士研究生, weifangzhou1991@163.com.

通讯作者: 贺铸, 男, 博士, 教授, hezhu@wust.edu.cn.

便的实验操作及直观的温度信息反馈等优点,该检测技术逐渐被更多研究者完善与发展,如 Ergut 等^[5]利用大小不同的测温节点进行 TPD 检测,将热电偶尺寸进行零点外推,做出了零尺寸节点(“zero”-bead size)下的火焰温度修正;熊倩等^[6]提出将节点与热电偶导热及碳烟对节点辐射纳入在 TPD 法的暂态能量平衡方程,以提高 TPD 技术的准确性。

在已有的 TPD 法测量中,绝大多数研究^[2-4, 6]采用非预混燃烧作为 TPD 实验对象,这主要是由于碳氢燃料在非预混燃烧下可生成轴对称碳烟火焰,然而在火焰径向位置存在不可避免的碳烟不均匀现象,同时需要借助其他检测技术(如激光诱导白炽光法、激光诱导荧光法等)准确判断碳烟生成区域^[7-9],这对于在缺乏其他检测技术、仅依靠热电偶确立碳烟生成区域,特别是判断碳烟生成临界位置有一定影响。为避免碳烟径向分布不均匀的问题,本文选择预混燃烧火焰下的平板状火焰进行 TPD 测量,选择天然气主要成分——甲烷(CH₄)进行实验。

同时,本文还使用非接触式的激光消光法(laser extinction method, LE),对碳烟体积分数进行定量检测^[10-12],其检测结果作为 TPD 测量结果的基准值。

1 实验系统与方法

1.1 燃烧器

本文选用 McKenna 预混火焰燃烧器,通以燃料/氧气预混气后,该燃烧器能够在火焰径向产生均匀碳烟^[13-15],在便于确定碳烟生成区域的同时,减少由于热电偶节点位置偏差带来的检测误差。燃烧器中心为直径 60 mm 不锈钢烧结块,保证出口气流在径向的流速均匀,从而产生均匀碳烟区域。烧结块周围通以氮气形成保护气氛,在稳定火焰燃烧的同时防止碳烟与空气接触而氧化。该燃烧器安装于二维电控移动坐标架上,通过电脑程序可实现二维方向精确控制,精度达 0.025 mm。

1.2 燃料供给设备

燃料供给设备主要由高纯度甲烷、氧气、氮气及独立的数控质量流量计组成。通过质量流量计可以精确控制燃料、氧气及保护气的质量流量,便于调节当量比及预混气出口速度等。

1.3 温度采集设备

实验中选用分度号为 B 的 Pt/30% Rh-Pt/6% Rh 对焊型热电偶(Omega),节点直径为 250 μm,通过专用的陶瓷导管拉直、输送至 NI9214 温度采集模块中,该测温模块精度为 0.02 °C,同时为保证采样精

度,设定测温采集频率为 1 000 Hz,采集的温度数据通过 LabVIEW 程序直接存储至电脑中。由于 B 型号热电偶在节点环境高于 250 °C 条件下可精确测温,因此,将采样初始值定为 520 K。

1.4 实验工况与测量位置

为对比不同工况下 TPD 技术可靠性,本实验中对比了 6 组工况,通过调节质量流量计,从而改变 C/O 原子数比及出口流速,实验工况如表 1 所示。

表 1 实验详细工况

工况	C/O 原子数比	CH ₄ 流量/ (L · min ⁻¹)	流速 v/ (cm · s ⁻¹)	T ₀ /K	方法
火焰 1	0.60	3.70	4.0	298	TPD/LE
火焰 2	0.55	3.55	4.0	298	TPD/LE
火焰 3	0.45	3.21	4.0	298	TPD
火焰 4	0.60	5.08	5.5	298	TPD
火焰 5	0.60	4.60	5.0	298	TPD
火焰 6	0.60	2.77	3.0	298	TPD

注: T₀ 为循环冷却水温

由于径向碳烟均匀生成,可以清楚地分辨火焰中的碳烟区域边界,如图 1 所示。

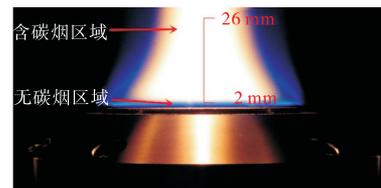


图 1 碳烟生成区域示意

碳烟浓度取样在燃烧器的中心轴线上进行,选择燃烧器面上方高度 H_{AB} (height above burner) 2 ~ 26 mm 作为测量点,每次测温时保证测温节点处洁净无碳烟,每个测量点重复测量 3 次,以确保测温节点处温度的可靠性。

1.5 温度修正与 TPD 处理

在 TPD 实验中^[2],忽略碳烟对节点处的辐射及节点沿电偶丝线的导热,得到热电偶节点处暂态能量平衡方程为

$$\epsilon_j \sigma T_j^4 = [k_{g0} Nu_j / (2d_j)] (T_g^2 - T_j^2) \quad (1)$$

$$k_{g0} = k_g / T_g$$

式中: ϵ_j 为节点发射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; T_g 为火焰实际温度; T_j 为热电偶节点净发射率下 ($\epsilon_j = 0.2$) 的温度; Nu_j 为节点努塞尔数; d_j 为热电偶节点直径; k_g 为气体导热系数。参数具体取值可以参考文献[2]。通过对 T_j-t 图在变发射率阶段的反向延长得到净发射率下的节点温度 T_j , 利用公式(1)对热电偶节点处温度进行修正,得到热电偶节点处的真实温度 T_g 。

利用变直径阶段的碳烟质量沉积率 j_T 及碳烟沉积理论^[2], 可以推导出:

$$G = mt + G_{t=0} \quad (2)$$

$$m \equiv \beta f_V \quad (3)$$

$$\beta \equiv 2D_T \varepsilon_j^2 \sigma^2 T_g^4 / (\phi k_{g0}^2 Nu_j) \quad (4)$$

$$G = (1/4)(T_g/T_j)^8 - (1/6)(T_g/T_j)^6 \quad (5)$$

式中: f_V 为碳烟体积分数; D_T 为热泳扩散率; ϕ 为碳烟团聚体密度 (ρ_d) 与碳烟颗粒密度 (ρ_p) 比值, 这里取 0.095.

TPD 方法的关键在于结合 (T_j, t) 内的“变直径阶段”与该工况下的修正温度 T_g , 进行公式(5)转换, 得到与 (T_j, t) 相对应的 (G, t) 图. 通常实验中的“变直径阶段”在 (G, t) 图中可转换为斜率恒定的上扬直线, 将该段直线进行一次拟合得斜率 m , 结合公式(3)推算出碳烟体积分数 f_V .

1.6 LE 测量处理

在 TPD 测量区域内, 使用 He-Ne 激光器进行消光法检测, 并将其结果作为参考值, 通过移动二维坐标架, 实现对燃烧器轴向碳烟体积分数检测, 实验装置与文献[2, 11]中类似. 采集的衰减光强比率通过 Beer-Lambert 定律及复折射系数公式 $\tilde{m} = 1.6 - 0.6i$ ^[16] 计算得到火焰光程累积下的碳烟体积分数.

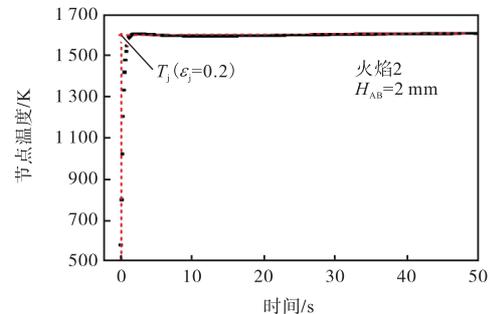
2 结果与讨论

2.1 热电偶反馈信息

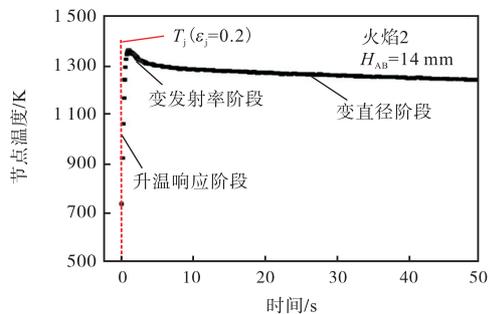
使用 TPD 进行碳烟检测的同时, 根据热电偶反馈信息, 可以将该工况下火焰划分为无碳烟火焰及含碳烟火焰, 如图 2 所示. 在无碳烟火焰内, 热电偶经过升温响应后, 节点温度在近 45 s 内保持稳定, 波动误差在 ± 1 K, 此刻即得净发射率下的节点温度 T_j ($\varepsilon_j = 0.2$), 无需进行反向延长修正, 同时也无需进行 TPD 的后续处理; 在含碳烟火焰内, 节点温度呈现先升后降的趋势, 热电偶节点完成已有 TPD 检测中的 3 个阶段——“升温响应阶段”、“变发射率阶段”及“变直径阶段”, 利用 (T_j, t) 内“变发射率阶段”反向延长至坐标零点得到 T_j ($\varepsilon_j = 0.2$), 利用公式(1), 可得到测温节点处的实际火焰烟气温度 T_g .

通过修正, 得到测量域内的火焰实际烟气温度 T_g , 如图 3 所示. 火焰高温区位于 $H_{AB} = 3 \sim 5$ mm 内, 随着预混气出口流速的提高, 火焰温度峰值逐渐上升, 这与宋崇林等^[13]、Alfè 等^[17]的实验中的火焰峰值温度及峰值存在区间较为接近. 当 $H_{AB} > 5$ mm 后, 火焰温度逐渐下降, 但不同出口流速工况下, 温

度较为接近. 在宋崇林等^[13]的实验中, 火焰后期温差较为明显, 这可能与其预混气中添加了额外稀释气体有关. 本实验中, 预混火焰中未添加任何稀释气体, 火焰实际温度经过修正后测量误差为 ± 30 K.



(a) 无碳烟火焰



(b) 含碳烟火焰

图 2 无碳烟火焰与含碳烟火焰的节点温度曲线对比

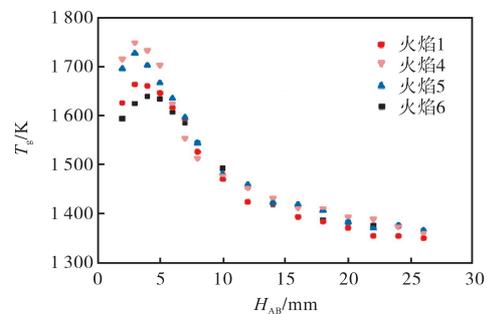


图 3 测量域内的火焰温度分布

2.2 TPD 与 LE 结果对比

利用 2.1 中的温度信息及公式, 得到 TPD 方法下的碳烟体积分数信息, 如表 2 所示.

表 2 中列出的 LE 检测结果与 Xu 等^[15]在相似工况下获得的碳烟体积分数接近, 从而可以保证该实验条件下的 LE 测量结果具有可靠性. 由于在无碳烟区域 ($H_{AB} = 1 \sim 3$ mm) 无法进行有效的 TPD 检测, 因此没有得到有效的 f_V , LE 法在无碳烟区域会存在极其微弱的衰减, 可用作修正透射率, 修正后在无碳烟区域内碳烟体积分数为 0. 与 LE 的检测结果相比, 含碳烟区域内的大部分测量位置 ($H_{AB} = 8 \sim 26$ mm), TPD 测量的碳烟体积分数与 LE 的检测结果相差较

小, 小于 0.3×10^{-6} . 然而, 在利用 TPD 检测的 $H_{AB} = 3 \sim 5 \text{ mm}$ 内, TPD 法下的碳烟体积分数出现了范围值; 在 $H_{AB} = 5 \sim 7 \text{ mm}$ 内, TPD 检测结果较 LE 检测结果偏小, 差值大于 0.3×10^{-6} . 图 4 列出火焰 1 在 $H_{AB} = 4 \text{ mm}$ 处的热电偶节点温度曲线, 该工况下热电偶节点温度在 $10 \sim 50 \text{ s}$ 内几乎维持不变(波动在 $\pm 1 \text{ K}$ 内), 这一阶段是在 McEnally 等^[2-4]的实验中未有出现过的, 测量温度在完成了“升温响应阶段”、“变发射率阶段”及“变直径阶段”后进入了全新的稳定阶段.

表 2 甲烷/氧气预混火焰下的 TPD/LE 结果对比

H_{AB}/mm	火焰 1 轴向碳烟体积分数/ 10^{-6}		火焰 2 轴向碳烟体积分数/ 10^{-6}	
	TPD	LE	TPD	LE
2	—	0	—	0
3	0 ~ 4.01	0.283	—	0
4	0 ~ 2.96	0.558	0 ~ 3.94	0.386
5	0.001 ~ 2.42	0.706	0.011 ~ 2.61	0.481
6	0.115	0.952	0.176	0.601
7	0.368	1.073	0.344	0.647
8	0.836	1.113	0.674	0.663
10	0.986	1.217	0.905	0.771
12	1.003	1.258	0.999	0.755
14	1.104	1.325	1.019	0.865
16	1.062	1.323	1.068	0.862
18	1.082	1.271	1.096	0.939
20	1.088	1.338	1.007	0.922
22	1.097	1.317	1.028	0.904
24	1.031	1.369	1.013	0.901
26	1.135	1.306	1.003	0.939

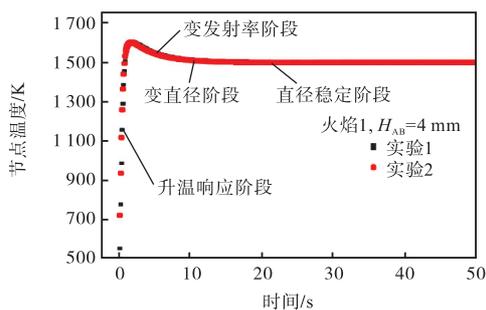


图 4 稳定阶段出现后的节点温度曲线

由于

$$\frac{d(d_j)}{dt} = 2j_T/\rho_d \quad (6)$$

该新阶段下热电偶节点尺寸不随时间变化, 即 $d(d_j)/dt = 0$, 可将其形象定义为“直径稳定阶段”, 此刻碳烟质量沉积率 j_T 为 0, 此时碳烟沉积及氧化达到动态平衡. “直径稳定阶段”的出现致使“变直径阶段”缩短甚至消失, 这不利于 TPD 法的后续处理.

2.3 “直径稳定阶段”的影响

在 $G-t$ 图中, “直径稳定阶段”转化为斜率 $m \sim 0$ 的长直线段, 压缩甚至取代了“变直径阶段”对应的直线段数据. TPD 法需要对“变直径阶段”的 $G-t$ 数据进行一次线性拟合, 然而斜率 $m \sim 0$ 且长时间的“直径稳定阶段” $G-t$ 数据使研究者无法准确判断“变直径阶段” $G-t$ 数据. 如图 5 所示, 在“直径稳定阶段”对应的 $G-t$ 曲线 ($m \sim 0$) 前, 斜率 m 在 $0 \sim 0.02$ 范围内连续变化, 在对应的 β 值下 (该工况下, $\beta = 6755 \text{ s}^{-1}$), f_V 在 $0.0052 \times 10^{-6} \sim 2.96 \times 10^{-6}$ 内浮动, 因此以范围值标定, 同时也导致该工况下 TPD 检测的碳烟体积分数出现偏离.

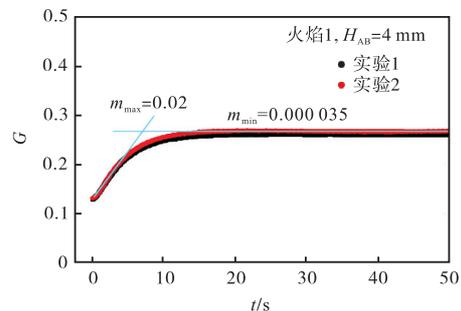


图 5 稳定阶段出现后的 (G, t) 示意

此外, 随着 H_{AB} 的升高 ($5 \sim 7 \text{ mm}$), 当碳烟体积分数逐渐上升时, 在实验时间内 ($50 \sim 60 \text{ s}$), “变直径阶段”逐渐延伸, 但是“直径稳定阶段”的影响依旧存在, 最直接的体现是 H_{AB} 为 $5 \sim 7 \text{ mm}$ 下的 $G-t$ 图中存在冗长的、斜率值 m 极低的“变直径阶段” $G-t$ 数据, 在相同实验时刻下“直径稳定阶段”向“变直径阶段”过渡, 但是偏低的斜率 m 使得在 H_{AB} 为 $5 \sim 7 \text{ mm}$ 时的检测结果仅为正常测量值的 $1/9 \sim 1/3$, 低于 LE 测量值水平. 当 H_{AB} 大于 7 mm 后, T_j 曲线出现斜率稳定的“变直径阶段”, 使得 TPD 法可以正常运用.

在 McEnally 的实验中, 由于选用的燃料及检测点的差异(后续分析), 导致在相同的时间内未出现上述的“直径稳定阶段”, 但是碳烟附着直径后必然会达到与氧化消耗的动态平衡与稳定, 因此可以推测, 在足够长的时间后, 其实验中也将会出现类似的“直径稳定阶段”.

2.4 影响“直径稳定阶段”出现的因素

及时判定“直径稳定阶段”对于能否运用 TPD 技术具有重要意义. 热电偶节点温度是一个连续变化过程, 提早预判“直径稳定阶段”, 在该阶段出现前停止采样, 可以保证继续运用 TPD 检测技术的可能性, 同时也可以提醒研究者是否需要更换检测手段.

在本实验研究中, C/O 原子数比和预混气出口流

速是影响“直径稳定阶段”出现的主要因素,如图6和图7所示.

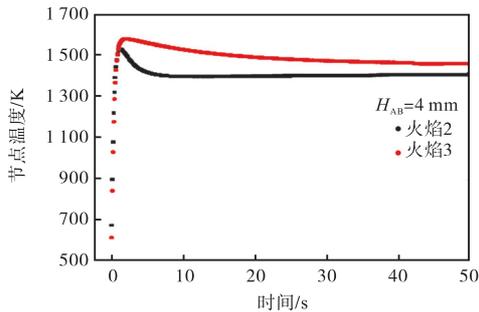


图6 不同 C/O 原子数比下节点温度曲线

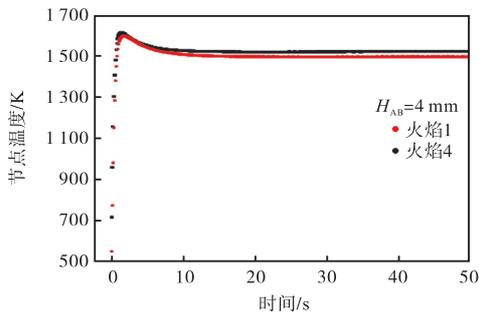


图7 不同出口流速下节点温度曲线

通过对不同 C/O 原子数比下的热电偶节点信息对比可以发现:低 C/O 原子数比工况下当 $t > 40$ s 后,“直径稳定阶段”出现,而高 C/O 原子数比下当 $t > 12$ s 后,“直径稳定阶段”即出现,C/O 原子数比从 0.45 升至 0.55 后,使得“直径稳定阶段”延迟了将近 30 s 出现,效果明显.低 C/O 原子数比工况下拥有冗长且变化平缓的“变直径阶段”使得“直径稳定阶段”延后,甚至是使得“变直径阶段”无限逼近“直径稳定阶段”;而在高 C/O 原子数比下,得益于较高的含碳烟氛围,“变直径阶段”几乎与“变发射率阶段”同时完成,立刻进入“直径稳定阶段”.

通过对不同出口流速下的热电偶节点信息对比也可以发现:较低出口流速工况中推迟了“直径稳定阶段”的来临.但是降低流速,速度由 5.5 cm/s 降至 4 cm/s,对于延迟进入“直径稳定阶段”的影响并不明显,仅延迟了 1~3 s.结合 C/O 原子数比与出口流速,说明在该实验工况下,热电偶节点的“直径稳定阶段”受 C/O 原子数比和预混气出口流速共同影响,但是主要由 C/O 原子数比把控是否延迟进入该阶段.

McEnally 等的实验中并没有出现该阶段,分析原因主要有如下几点:①McEnally 等在实验中进行的是非预混燃烧,选择的 TPD 测量点在 10~70 mm 内,测量间隔为 10 mm,较大的测量间隔很可能导致

错过碳烟初生区域;②McEnally 等在实验中使用的甲烷和乙烯流量较小,仅为 0.474 L/min 和 0.231 L/min,之前已经分析流速是影响热电偶是否能够及时进入“直径稳定阶段”的因素之一,McEnally 等的小流量火焰产生的碳烟,造成即使在使用高碳乙烯下“变直径阶段”无限稳定延长的假象;③对于 C/O 原子数比在 McEnally 实验中的影响,没有给出明确的实验信息,也无法做详尽比对,不过可以确信 C/O 原子数比与出口流速之间的竞争关系永远存在.

在本实验工况下,TPD 的使用局限仅在 $H_{AB} = 3 \sim 7$ mm 内出现,当 $H_{AB} > 7$ mm 后,“直径稳定阶段”在实验时间内(50~60 s)没有出现,这样可以再次运用 TPD 技术进行正确测量,与 LE 测量值较为吻合.

3 结论

(1) 根据热电偶的温度反馈可将火焰分为无碳烟区域与含碳烟区域.TPD 技术能够在含碳烟的大部分区域进行碳烟体积分数检测,并在全域内反馈温度信息;

(2) 在碳烟初生区域内,热电偶在结束传统的 3 个阶段(“温度响应阶段”、“变发射率阶段”及“变直径阶段”)之后,由于碳烟附着与氧化达到动态平衡,致使出现“直径稳定阶段”.

(3) 对比 LE 测量结果,在碳烟初生区域内 TPD 测量值会由于“直径稳定阶段”导致测量误差加剧,无法保证测量精度;在高于碳烟初生区域后,TPD 测量值与 LE 值吻合较好.

(4) C/O 原子数比与出口流速共同影响“直径稳定阶段”的出现时间,在碳烟初生区域内,“直径稳定阶段”的出现时间主要由 C/O 原子数比控制,合理调整 C/O 原子数比与出口流速,可避免“直径稳定阶段”对 TPD 技术的影响;同时,“直径稳定阶段”作为热电偶信息反馈的最后一个稳定阶段,一旦出现即无法避免,要求研究者在检测区域内更换检测方法.

当然,燃料种类是影响碳烟生成的最主要因素之一,高碳燃料燃烧时往往有更高的碳烟生成趋势^[11],从而持续有效附着热电偶节点,但是也有可能加剧“变直径阶段”的结束,提早进入“直径稳定阶段”,燃料种类对于“直径稳定阶段”出现时间的影响将是后续研究的重点之一.高碳燃料下热电偶节点的附着与氧化的竞争关系需要研究者在合理范围

内调节 C/O 原子数比和流量大小,从而保证 TPD 技术在一定时间内(50 ~ 60 s)的使用。

参考文献:

- [1] Eisner A D, Rosner D E. Experimental studies of soot particle thermophoresis in nonisothermal combustion gases using thermocouple response techniques [J]. *Combustion and Flame*, 1985, 61: 153-166.
- [2] McEnally C S, Koyle U O, Pfefferle L D, et al. Soot volume fraction and temperature measurements in laminar nonpremixed flames using thermocouples [J]. *Combustion and Flame*, 1997, 109: 701-720.
- [3] McEnally C S, Pfefferle L D. Soot formation in methane/air non-premixed flames doped with small quantities of C₃ hydrocarbons [J]. *Combustion and Flame*, 1998, 112: 545-558.
- [4] McEnally C S, Pfefferle L D. Comparison of non-fuel hydrocarbon concentrations measured in coflowing non-premixed flames fueled with small hydrocarbons [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 117: 362-372.
- [5] Ergut A, Levendis Y. An investigation on thermocouple-based temperature measurements in sooting flames [C]//*Proceeding of IMECE 2005-82332*. 2005: 397-403.
- [6] 熊倩, 周怀春, 艾育华, 等. 火焰辐射及偶丝导热对热电偶测温影响的数值分析 [J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(S2): 213-216.
Xiong Qian, Zhou Huaichun, Ai Yuhua, et al. Numerical analysis of flame radiation and wire conduction influence in temperature measurement using thermocouple [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(S2): 213-216 (in Chinese).
- [7] 何旭, 马骁, 王建昕. 用激光诱导炽光法定量测量火焰中的碳烟浓度 [J]. *燃烧科学与技术*, 2009, 15(4): 344-349.
He Xu, Ma Xiao, Wang Jianxin. Quantitative soot concentration measurement of flame by laser induced incandescence [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2009, 15(4): 344-349 (in Chinese).
- [8] 王宇, 姚强, 何旭, 等. 用激光诱导可见光法测量电场影响下火焰碳烟颗粒浓度的分布变化 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(8): 34-39.
Wang Yu, Yao Qiang, He Xu, et al. Electric field control of soot distribution in flames using laser-induced incandescence [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(8): 34-39 (in Chinese).
- [9] Kumfer B M, Skeen S A, Chen R, et al. Measurement and analysis of soot inception limits of oxygen-enriched coflow flames [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 147: 233-242.
- [10] Menon A V, Lee S Y, Linevsky M J, et al. Addition of NO₂ to a laminar premixed ethylene-air flame: Effect on soot formation [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2006, 31: 593-601.
- [11] Wang Y, Chung S H. Effect of strain rate on sooting limits in counterflow diffusion flames of gaseous hydrocarbon fuels: Sooting temperature index and sooting sensitivity index [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(5): 1224-1234.
- [12] Sante R D. Laser extinction technique for measurements of carbon particles concentration during combustion [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2013, 51: 783-789.
- [13] 宋崇林, 洪亮, 汪晓伟, 等. CH₄-O₂ 预混火焰中温度对碳烟纳观结构及形貌的影响 [J]. *燃烧科学与技术*, 2013, 19(2): 115-120.
Song Chonglin, Hong Liang, Wang Xiaowei, et al. Effect of temperature on soot nanostructure and morphology in CH₄-O₂ premixed flames [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2013, 19(2): 115-120 (in Chinese).
- [14] Xu F, Sunderland P B, Faeth G M. Soot formation in laminar premixed ethylene/air flames at atmospheric pressure [J]. *Combustion and Flame*, 1997, 108: 471-493.
- [15] Xu F, Lin K C, Faeth G M. Soot formation in laminar premixed methane/air flames at atmospheric pressure [J]. *Combustion and Flame*, 1998, 115: 195-209.
- [16] D'Alessio A, Menna P. Light scattering and extinction coefficients for soot forming flames in the wavelength range from 200 nm to 600 nm [J]. *The Combustion Institute*, 1982, 19(1): 1421-1428.
- [17] Alfè M, Apicella B, Rouzaud J N. The effect of temperature on soot properties in premixed methane flames [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157: 1959-1965.