

文章编号: 1005-5630(2021)01-0034-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2021.01.006

## 煤粉颗粒燃烧过程可视化研究

彭 梁<sup>1,2</sup>, 周 骛<sup>1,2</sup>, 郑榕根<sup>1,2</sup>, 戴 雯<sup>1,2</sup>, 蔡小舒<sup>1,2</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;

2. 上海理工大学 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

**摘要:** 基于 McKenna 型燃烧器, 研制了双光路成像系统, 对煤粉颗粒燃烧过程中的背光投影轮廓图像和自发光光强分布信息进行同步采集, 观察了不同高度位置煤粒的运动、着火和燃烧过程。针对烟煤和无烟煤颗粒燃烧实验中出现的挥发组分着火燃烧、碳黑形成、焦炭着火燃烧等现象进行了分析, 发现两种煤种分别以均相着火和非均相着火为主。同时对煤颗粒燃烧时固体和挥发组分由于相间速度差产生的脱离现象编写了图像处理程序, 分别计算了气固相的运动速度。该研究为进一步定量分析煤粉的着火和燃烧特性提供了参考。

**关键词:** 煤粉颗粒; 背光图像; 自发光; 可视化; 着火

**中图分类号:** TK 16 **文献标志码:** A

## Ignition process visualization of pulverized coal particles

PENG Liang<sup>1,2</sup>, ZHOU Wu<sup>1,2</sup>, ZHENG Ronggen<sup>1,2</sup>, DAI Wen<sup>1,2</sup>, CAI Xiaoshu<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering,  
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Based on the McKenna burner, a dual light path imaging system was developed to synchronously collect the backlight projection profile image and the self-luminous light intensity distribution during the combustion of pulverized coal particles. Experiments were conducted on bituminous coal and anthracite particles separately, volatile ignition, soot formation, coke ignition were observed simultaneously, and corresponding analysis was conducted. It was found that the two coal types were mainly in homogeneous and heterogeneous ignition pattern, respectively. The separation phenomenon of solids and volatiles due to the interphase velocity difference between phases was observed during the burning of coal particles, and an image processing program was applied to calculate the corresponding motion speed. The study provides a reference for further quantitative analysis of the ignition and combustion characteristics of pulverized coal particles.

收稿日期: 2020-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(51576130, 51327803)

作者简介: 彭 梁(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为煤颗粒燃烧。E-mail: pengliang@163.com

通信作者: 周 骛(1986—), 女, 副教授, 研究方向为两相流在线测量、多相流动数值模拟。E-mail: zhouwu@usst.edu.cn

**Keywords:** pulverized coal particles; backlight image; self-luminous light; visualization; ignition

## 引 言

煤的燃烧特性是设计燃煤设备时的重要参考数据,同时影响着锅炉等燃烧设备的安全高效运行。对煤粉燃烧过程的理解和对煤粉燃烧特性的深入研究,在燃煤技术的改善、燃煤设备优化设计、污染物排放控制及为煤燃烧模型提供基础数据等方面都有重要作用。

煤粉燃烧的研究始于 19 世纪,当时煤已经被广泛用于发电。1979 年, Juntgen 等<sup>[1]</sup>用电加热栅网的方法,提出了著名的着火模式图谱,将煤粉着火方式同煤颗粒直径、加热速率联系起来。1981 年, McLean 等<sup>[2]</sup>第一次用显微镜和高速相机直接观察到烟煤颗粒燃烧时的显微照片和连续阴影图。近年来,随着图像传感器硬件的升级和数字图像处理技术的应用,图像法在实验室研究以及工业测量中受到重视并开始广泛应用。Kim 等<sup>[3]</sup>在层流燃烧器(LFR)系统中用双色高温计和相机记录煤粉燃烧时的温度和火焰长度。Shaddix 等<sup>[4-5]</sup>研究了携带流反应器(EER)在不同浓度 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 及 N<sub>2</sub> 下对煤颗粒着火方式的影响。2016 年, Levendis 等<sup>[6]</sup>用高速相机在电热滴管炉(DTF)中观察不同等级煤粉颗粒的燃烧现象。2017 年, Sarroza 等<sup>[7]</sup>将 VDTF 测试与图像分析技术相结合,用于生物质燃烧的实验研究。国内许多科研院所<sup>[8-11]</sup>都对煤粉或煤粉群的燃烧过程尤其是着火过程进行了广泛而深入的研究,其中对煤粉着火机理的研究综述可参见文献<sup>[12-13]</sup>。然而煤粉的燃烧过程是一个特别复杂的问题,着火机理还未能有一个清晰的结论,实验测量方法的改进和创新也是研究者们一直聚焦的研究方向。在已有的研究中,一般采用高速相机直接观察,或者采用强背光获得颗粒投影轮廓,同时采用上述两种手段实现同步测量的研究方法尚为少见,而同步测量则有望获得单颗粒燃烧过程的更多信息。

本文将结合蓝色背光成像和自发光辐射成像原理,研制双光路信号采集系统并进行对齐标

定;通过两种煤粉的燃烧实验对测量系统的可靠性进行验证,以实现相同视场下煤粉背光图像和自发光图像的同时采集。实验拍摄并观察到了两种不同煤种在燃烧过程中的不同表现,结合数值模拟结果对该结果进行了分析。

## 1 双光路成像原理及系统

在蓝色背光成像法<sup>[14]</sup>的基础上,搭建了蓝色背光投影和自发辐射同步成像的双光路图像采集系统,原理如图 1 所示。由于煤粉燃烧辐射光谱在 400~500 nm 范围内强度较弱<sup>[15]</sup>,因此背光光路采用蓝色 LED 作为光源,光源经过测量区的煤粉颗粒后由成像系统采集,从而获得颗粒的投影轮廓图像;由于挥发组分和焦炭的燃烧会产生明亮的光线,降低背光成像质量,甚至使得颗粒难以观察到,因此在背光成像系统前需要加装相应波段的滤波片,以滤除燃烧火焰的明亮光线,保留蓝色投影光线。为同时观察煤粉的燃烧情况,也需要对燃烧火焰进行成像,因此在背光成像光路中的蓝色窄带滤波片前放置分光棱镜,将蓝色背光和自发光的混合光束一分为二,在自发光光路侧加装长波通滤光片,即滤除蓝色光源,保留一定波段以上的燃烧火焰辐射信息。

在本文实验中,经过光谱仪测定,所采用的蓝色 LED 发光波段在 440~500 nm 范围内,因此背光光路中采用波长为 460~480 nm 的带通滤波片(Thorlabs, BP470);而煤粉燃烧火焰的发

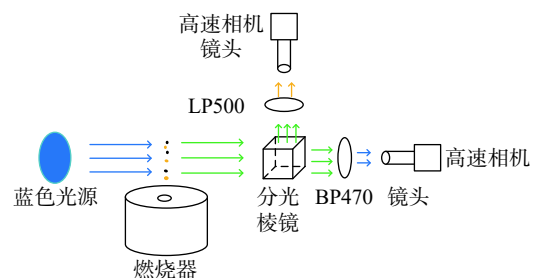


图 1 背光和自发光同步成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of synchronous imaging system of backward illumination and self-luminous radiation

光波段主要集中在 500 nm 以上, 因此自发光光路采用通过波长 500 nm 以上光线的长波通滤光片(LP500)。采用可见光范围内的半透半反立方棱镜(武汉优光, BSC0125-4)进行分光, 两个光路都采用相同型号的镜头(华谷动力, WP-1X150, 放大倍率 1 倍, 工作距离 150 mm)和相机(Photron, FASTCAM Mini AX 200, 1024×1024 像素, 像元尺寸 20  $\mu\text{m}$ ), 拍摄时曝光时间和帧率等参数设置相同(煤粉燃烧拍摄时帧率为 6400 frame/s, 曝光时间为 20  $\mu\text{s}$ )。两个成像光路系统采用笼式系统进行固定, 并保证与分光棱镜的距离相同, 从而保证相同的视场; 并对两个相机设置同步触发采集(信号发生器两个通道同时给出电信号触发相机)。目前实验中采用的相机均为黑白相机, 若在自发光光路中采用彩色相机, 则可以采用辐射成像测温的方法对颗粒的温度进行同步测量。本实验系统也可以用特定片状激光光源代替蓝色光源, 在双光路的基础上, 增加一条光路, 利用像增强器测量组分场。

## 2 双光路系统的标定

虽然采用同型号的相机及镜头, 但在系统搭建和光路调节时依然很难保证视场完全一致, 即会产生图片的相对平移和旋转等, 这将导致后续

分析时难以进行不同光路下煤粉颗粒的匹配, 因此需要对两个光路的视场进行对齐标定, 以便后期能够方便地观察和分析煤粉颗粒的燃烧过程。标定时采用黑白棋盘格, 除相机曝光时间相应调节以保证自发光光路足够明亮外, 系统配置与燃烧颗粒拍摄中完全相同。对齐前的背光光路和自发光光路的标定板图片如图 2(a)和 2(b)所示, 针对图片的相对平移和旋转以及放大倍率的差别, 采用区域对齐法<sup>[16]</sup>进行对齐标定, 获得对齐后的背光图片如图 2(c)所示(自发光图片保持不变), 两张图片的差值如图 2(d)所示, 颜色越深表示差别越大, 可见经过对齐标定后两个成像光路的视场基本对齐。

## 3 煤粉燃烧实验平台及工况

煤粉燃烧的实验平台详细介绍可参见文献<sup>[14]</sup>, 即采用带中心管的 McKenna 燃烧器提供煤粉燃烧的温度和气氛环境, 煤粉由空气携带从中心管由下往上喷出, 周围由甲烷预混火焰提供燃烧的温度环境。前期实验中煤粉送样量不太稳定, 为了更稳定地供给煤粉颗粒, 将原送煤管道内径 6 mm 改为 2 mm, 燃烧器中心管内径 6 mm 保持不变, 从而提高管道内空气流速使得输送过程更加稳定。另外添加电动升降平台以方便调节

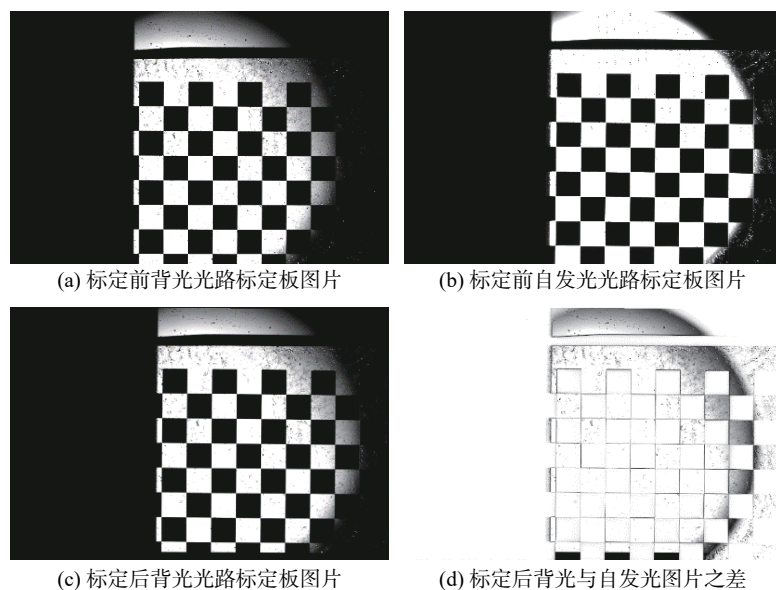


图 2 双光路对齐标定棋盘格图片

Fig. 2 Chessboard images for alignment of two light paths

燃烧器的高度位置, 用于燃烧器出口不同高度的煤粉燃烧过程拍摄。燃烧器及测量系统实物照片如图 3 所示。

实验选用了两种煤粉, 即郑州烟煤和郑州无烟煤, 其工业分析和元素分析如表 1 所示(该烟煤的挥发组分含量较高)。实验前预先用标准分样筛将煤粉颗粒进行筛分, 得到粒径大小在 63~96 μm 范围内的煤颗粒, 然后在干燥箱内恒温 50 °C 干燥 8 h 以上, 去除煤粉颗粒外部水分。

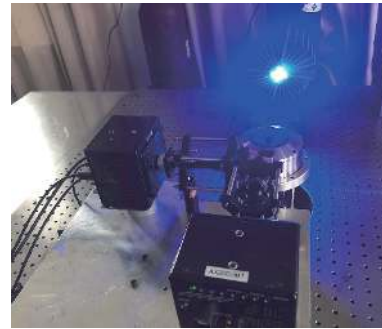


图 3 燃烧器及测量系统照片

Fig. 3 Photo of the burner and measurement system

表 1 煤样工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate and ultimate element analysis of coal samples

种类	工业分析/%				元素分析/%				
	M	A	V	F	C	H	O	N	S
烟煤	4.36	28.60	27.59	39.45	49.48	2.80	13.62	1.13	1.47
无烟煤	0.66	16.60	6.82	74.56	76.08	0.36	3.77	1.18	0.66

实验中用于提供温度环境的甲烷预混火焰的反应物化学当量比为 1.0, 燃烧器出口处预混气体冷态表观流速为 0.06 m/s, 中心管送煤空气在燃烧器出口的冷态流速为 2.67 m/s。在该工况下, 采用 B 型热电偶, 沿燃烧器中心线高度 0~200 mm 范围内和 2, 5, 15 mm 高度下对单侧径向温度分布进行测量, 每个位置取 400 个值, 然后求取平均值。结果如图 4(a)和 4(b)所示, 图中的误差条是测量时每个位置的最高温度与最低温度的差值。按照上述工况条件及所测得的实验数据, 采用数值模拟手段对燃烧器上方

200 mm 高度区域内的速度场、温度场和主要气体组分浓度场进行预测<sup>[17]</sup>, 结果如图 5 所示。本文实验中预先在不同高度处进行拍摄观察, 发现烟煤的挥发组分析出和燃烧过程基本发生在 20~60 mm 高度处, 因此分别在 20, 30, 50 mm 高度处进行拍摄和分析, 拍摄的视场区域用红色矩形在图 5 中标出, 可见该区域内气体温度在 465~1073 K 范围内, 氧气浓度在 0.01%~0.2% 范围内, 气体速度在 0.3~5 m/s 范围内。

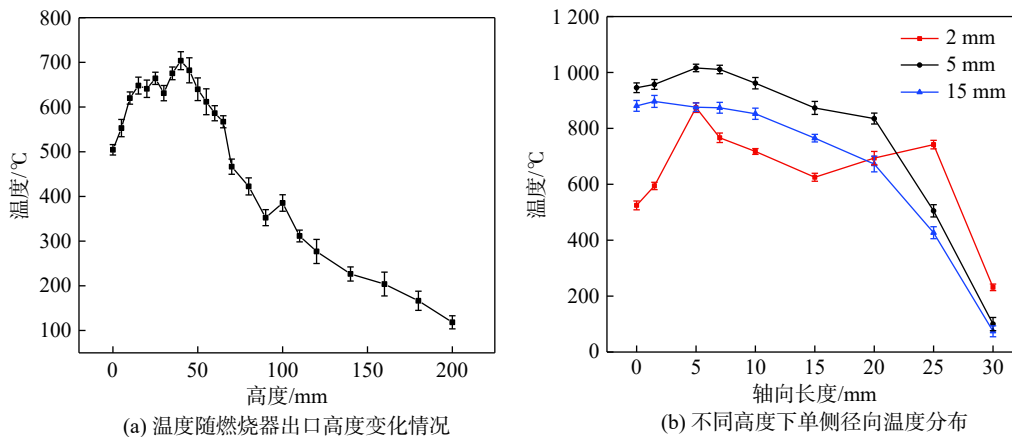


图 4 实验工况下温度变化情况

Fig. 4 Temperature change under experimental conditions

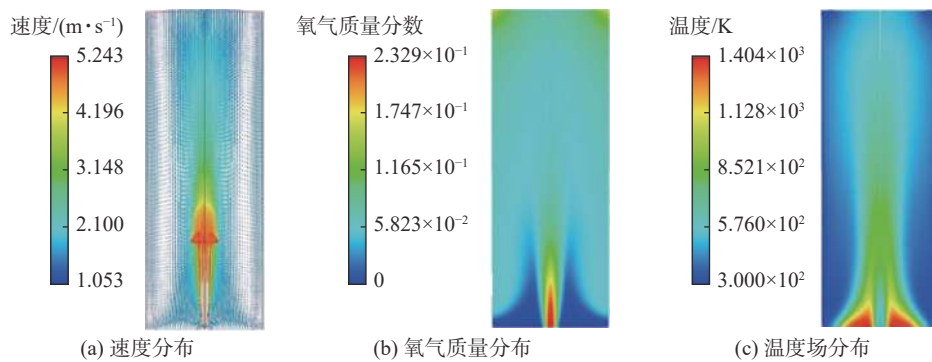


图 5 实验工况下速度、氧气质量分布和温度模拟结果

Fig. 5 Simulation results of velocity, oxygen mass distribution, and temperature under experimental conditions

## 4 实验结果及分析

### 4.1 煤颗粒的不同燃烧状态

图 6 是针对烟煤在 300 mm 高度处, 采用双光路系统拍摄获得的典型图片(由于镜头成像尺寸较小, 成像有黑边, 如图所示裁剪后的图片对应视场大小为 6 mm×6 mm)。图 6(a)为背光成

像图片, 其中黑色颗粒即为煤粉的背光投影轮廓图像, 可见颗粒浓度较低, 可认为是单颗粒燃烧状态; 由于采用背光成像, 景深范围外的颗粒图像也会被记录, 位于管道中心截面(即对焦位置)的颗粒成像清晰, 偏离中心截面的颗粒会产生离焦模糊。图 6(b)为自发光图片, 其中白色区域为相应煤粉、挥发组分或焦炭燃烧产生的火焰发光图像, 可以结合背光图像以准确判断究竟为哪种物质燃烧发光。

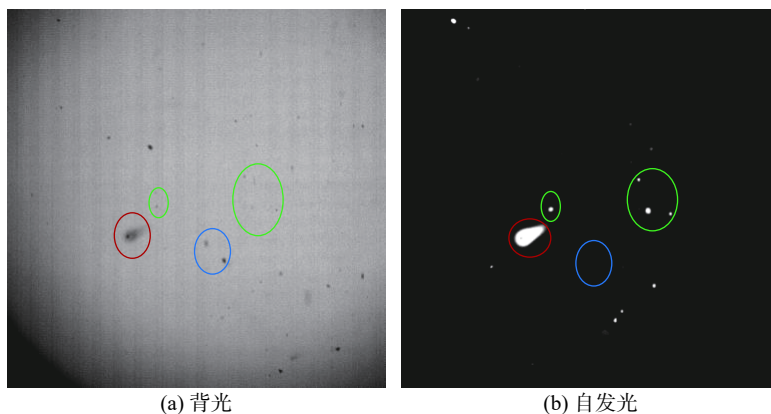


图 6 典型的煤粉颗粒背光和自发光同步成像图片

Fig. 6 Typical coal particle images for backlight illumination and self-radiation

如图 6 中红圈区域所示, 背光图像中有极暗的黑色核心, 即为煤粉颗粒, 在自发光图像中表现为明亮火焰中的暗点; 而该明亮的图像即为挥发组分燃烧所形成的火焰, 对应在背光图像相同位置上(即黑色颗粒图像周围)可以观察到明细的灰色团状物质, 是由大分子挥发组分裂解所形成的碳黑, 对背光光源产生了消光效应而形成的暗影。如图中绿圈区域所示, 背光图像中可见黑色颗粒但没有灰色团状物质, 自发光图像中

为明亮颗粒图像但没有挥发组分燃烧火焰, 可以推知该图像为焦炭燃烧图像。如图中蓝圈区域所示, 背光图像中存在黑色颗粒, 但自发光图像中没有对应的明亮颗粒, 可推知该颗粒未燃烧。为方便观察, 后文中将截取特定颗粒图像进行显示。

### 4.2 煤颗粒燃烧过程可视化分析

图 7 所示为不同高度处拍摄到的烟煤颗粒着火和燃烧过程。每个颗粒图片都包含上下两组图

片, 上方为颗粒背光图片, 下方为同一颗粒同一时刻的自发光图片。图片下方的数字代表颗粒燃烧时的不同时刻。其中烟煤颗粒 A 的图片是在 30 mm 高度附近 3.28 ms 内所拍摄(此处 0 时刻仅代表拍摄观察到的第一个时刻), 从自发光图片中可以观察到明亮的火焰图像, 即表示此时挥发组分已经着火燃烧, 而火焰中心存在黑色内核(由于挥发组分火焰非常明亮, 仔细观察可见火焰中心有一黑色小点), 说明该固体焦炭未着

火; 相应背光图片中可观察到由于挥发组分迅速燃烧形成高温气氛导致大分子裂解而在颗粒图像周围产生的碳黑; 随后挥发组分燃烧强度逐渐减弱, 而明亮火焰中的黑色核心也逐渐消失。由于视场所限, 未能跟踪观察到后期燃烧情况, 但从上述分析可以判定该颗粒处于均相着火阶段。同时也可以观察到该颗粒周围有另外几个燃烧着的颗粒, 还有几个未燃烧的颗粒从周围经过。

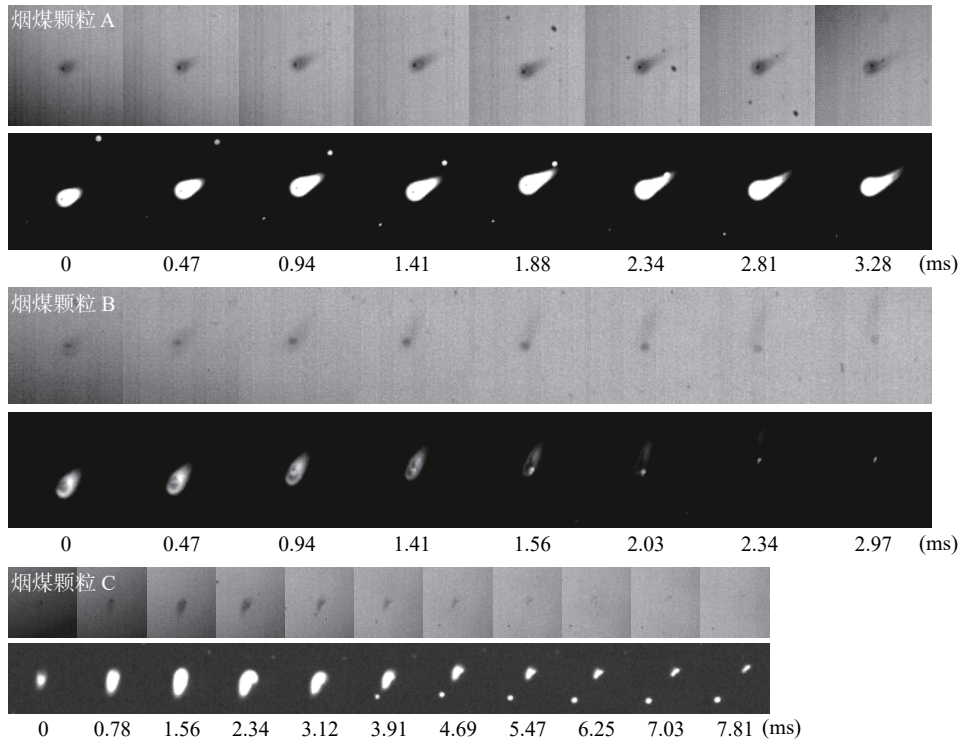


图 7 烟煤颗粒几种典型背光和自发光图片

Fig. 7 Typical backlight illumination and self-radiation images of bituminous particles

另一烟煤颗粒 B 在 50 mm 高度附近 2.97 ms 内的变化图片有所不同, 开始观察到该颗粒时, 焦炭已逐渐开始燃烧, 表现为自发光图像中的黑色内核存在亮点。在自发光图片中, 随着挥发组分逐渐燃烧完毕, 团状明亮图像逐渐变小变淡, 同时团状物质内包裹的球形固体颗粒逐渐变亮, 即表示焦炭开始着火燃烧; 相应背光图片中的灰色团状物质图像也逐渐上升和变淡。值得注意的是, 在挥发组分火焰逐渐消失时(2.34 ms), 颗粒周围的碳黑在较长时间内依然形成; 这一方面可能是因为此时挥发组分燃烧形成的火焰较弱, 在短曝光时间内未能被相机响应, 另一方面也说明

此时依然有挥发组分析出和裂解, 但可能由于未满足浓度条件等原因未能发生挥发组分的剧烈燃烧。

烟煤颗粒 C 的燃烧图像拍摄于 20 mm 高度处, 历时 5 ms, 从图中可以看到由于该颗粒与周围气体间存在速度差, 挥发组分燃烧火焰的位置(碳黑基本跟随气相运动)从初始的颗粒下方逐渐移动到颗粒上方并脱离。为了分析颗粒和气相之间的相对运动, 采用 MATLAB 软件, 分别识别颗粒和挥发组分图像的质心位置随时间的变化, 通过式(1)计算其速度:

$$V_x = \frac{(x_2 - x_1) \cdot u}{k \cdot t}, \quad V_y = \frac{(y_2 - y_1) \cdot u}{k \cdot t} \quad (1)$$

式中： $V_x$ 、 $V_y$  分别代表  $x$ 、 $y$  方向上的速度； $u$  为像元大小 ( $20\ \mu\text{m}$ )； $k$  为镜头放大倍率 ( $\times 1$ )； $t$  为相机曝光时间 ( $20\ \mu\text{s}$ )。具体结果见图 8，下标 p 和 g 分别代表颗粒和挥发组分 (MATLAB 识别颗粒和挥发组分质心位置不超过一个像素值，速度误差在 5% 以内)。可见在 1.56 ms 时刻前，气相速度低于颗粒速度，这是由于射流卷吸作用导致气相速度迅速衰减，而颗粒由于惯性作用在 20 mm 高度附近依然保持了相对较高的速度 (从燃烧器出口喷出时的速度约为 2.67 m/s)，在图 7(c) 中表现为碳黑图像位于颗粒图像下方；之后由于重力作用颗粒速度迅速降低，而气体由于温度升高因而速度略有增加 (也可从图 5(a) 中观察到) 并高于颗粒速度，在图 7(c) 中表现为挥发组分从颗粒的右上方脱离。颗粒和挥发组分的平均速度分别约为 1.18 m/s 和 1.40 m/s。

结合大量不同高度的图片来看，对该实验工况而言，从燃烧器出口开始，随着高度的增加，自发光图片中团状火焰出现的次数慢慢增多，随后逐渐减少，高度在 50 mm 处观察到的挥发

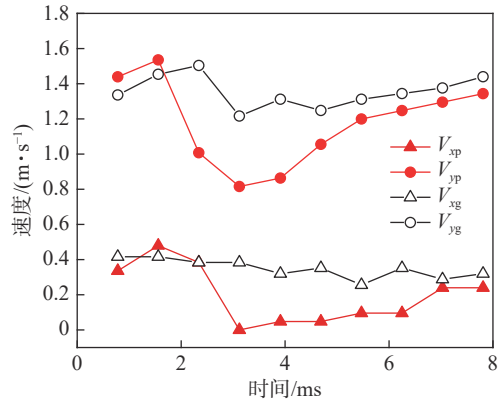


图 8 颗粒和挥发组分运动速度

Fig. 8 Particle and volatile velocity

组分析出图像最多，且该工况下以均相着火方式为主。

无烟煤颗粒的着火则大部分属于典型的异相着火，如图 9 所示。没有观察到团状挥发组分物质燃烧，直接从颗粒表面开始着火，逐渐扩展到颗粒内部，背光图片中颗粒在逐渐缩小，自发光图片中颗粒亮度先增加后降低。

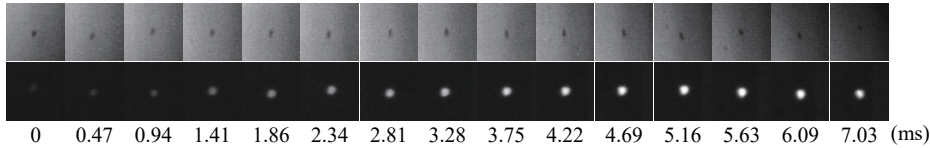


图 9 无烟煤颗粒典型背光和自发光图片

Fig. 9 Typical backlight illumination and self-radiation images of anthracite particles

## 5 结 论

本文在蓝色背光成像法的基础上，搭建了背光和自发光信号同步采集的双光路成像系统，观察了煤粉颗粒燃烧时的背光和自发光图片，其中烟煤颗粒在实验工况下以均相着火为主，挥发组分分析集中在燃烧器出口 20~60 mm 高度处，在 50 mm 高度处挥发组分分析出最多，且为典型的均相着火。无烟煤颗粒着火则是典型的异相着火模式。同时在烟煤燃烧中观察到速度差造成了煤颗粒燃烧时固体和挥发组分脱离现象，并观察到挥发组分燃烧后期无明显火焰情况下，碳黑依然析出现象。这也为进一步结合彩色相机实现颗粒轮廓和温度的精确测量提供了参考。

## 参考文献:

- [1] JÜNTGEN H, VAN HECK K H. An update of German non-isothermal coal pyrolysis work[J]. *Fuel Processing Technology*, 1979, 2(4): 261 – 293.
- [2] MCLEAN W J, HARDESTY D R, POHL J H. Direct observations of devolatilizing pulverized coal particles in a combustion environment[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1981, 18(1): 1239 – 1248.
- [3] KIM J D, KIM G B, CHANG Y J, et al. Examination of flame length for burning pulverized coal in laminar flow reactor[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(12): 2567 – 2575.
- [4] MOLINA A, SHADDIX C R. Ignition and devolatilization of pulverized bituminous coal particles during oxygen/carbon dioxide coal combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2):

- 1905 – 1912.
- [ 5 ] SHADDIX C R, MOLINA A. Particle imaging of ignition and devolatilization of pulverized coal during oxy-fuel combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2091 – 2098.
- [ 6 ] KHATAMI R, LEVENDIS Y A. An overview of coal rank influence on ignition and combustion phenomena at the particle level[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 164: 22 – 34.
- [ 7 ] SARROZA A C, BENNET T D, EASTWICK C, et al. Characterising pulverised fuel ignition in a visual drop tube furnace by use of a high-speed imaging technique[J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 157: 1 – 11.
- [ 8 ] BU C S, LECKNER B, CHEN X P, et al. Devolatilization of a single fuel particle in a fluidized bed under oxy-combustion conditions. Part A: experimental results[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(3): 797 – 808.
- [ 9 ] BU C S, PALLARÈS D, CHEN X P, et al. Oxy-fuel combustion of a single fuel particle in a fluidized bed: char combustion characteristics, an experimental study [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 287: 649 – 656.
- [10] 章明川, 徐旭常. 煤粉颗粒着火模式的研究 [J]. 热力发电, 1992(1): 5 – 11.
- [11] 俞伟伟. 煤粉颗粒群射流着火特性实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [12] 黄晓宏. 基于平面火焰携带流反应器的煤粉富氧燃烧特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [13] 邹高鹏. 基于光学诊断型携带流反应器的煤粉着火及燃烧特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [14] 郑榕根, 周骛, 孔庆恩, 等. 燃烧煤粉颗粒的粒度速度测量方法 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1579 – 1584.
- [15] 桂欣扬, ALLIOT A, 杨斌, 等. 煤粉燃烧火焰辐射光谱实验研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(11): 3492 – 3496.
- [16] EVANGELIDIS G D, PSARAKIS E Z. Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(10): 1858 – 1865.
- [17] 戴雯, 周骛, 彭梁, 等. 单颗粒煤粉燃烧过程数值模拟及实验研究 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(S1): 264 – 270.

(编辑: 张 磊)