



移动扫码阅读

倪文婧.半焦点火特征时间的试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(7):255-259. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.07.034

NI Wenjing. Experimental study on semi-coke particle ignition characteristics [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 255-259. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.07.034

## 半焦点火特征时间的试验研究

倪 文 婧

(天地科技股份有限公司,北京 100013)

**摘 要:**为了设计符合半焦燃烧特性的燃烧系统,在保证其系统安全性的前提,进一步提高其能源利用效率,通过新型高频振荡单分散煤粉给粉器,结合多元扩散火焰燃烧器技术,并配合煤粉全辐射信号分析试验方法,研究了温度和含氧量变化对半焦颗粒着火特性的影响。试验结果表明:当选择归一化信号强度 0.1 作为点火点时,半焦的特征点火时间在 10 ms 量级;增加环境温度会加快半焦表面的化学反应速率,从而缩短半焦的点火时间,1 800 K 时的点火时间小于 1 200 K 约 4 ms;增加同样会缩短半焦的点火时间,氧气体积分数为 10% 时的点火时间较 20% 时降低了约 2 ms;由于点火特征时间改变带来的燃烧器特征尺寸变化约为 0.15 m。

**关键词:**半焦;光学测量;点火特征时间;非均相燃烧

**中图分类号:**TD94

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-2336(2019)07-0255-05

### Experimental study on semi-coke particle ignition characteristics

NI Wenjing

(Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to design a combustion system that meets the semi-coke combustion characteristics, the energy utilization efficiency is further improved on the premise of ensuring the safety of the system. In this paper, a multi non-premixed flat-flame Hencken burner system combined with a vibrated de-agglomeration particle feeder was used to investigate the effect of ambience temperature and the oxygen fraction on the semi-char ignition characteristic time. The experimental results shows when the normalized signal strength of 0.1 is selected as the ignition point, the characteristic ignition time of the semi-coke is about 10 ms; Increasing the ambient temperature accelerates the chemical reaction rate of the semi-coke surface and shortens the ignition time, and ignition time at 1 800 K is less than 1 200 K for about 4 ms; the increase will also shorten the ignition time of the semi-coke. The ignition time at an oxygen concentration of 10% is reduced by about 2 ms from 20%; the size of the burner changes due to the change in the ignition characteristic time is about 0.15 meters.

**Key words:** semi-coke; optical measurement; characteristic ignition time; heterogeneous combustion

## 0 引 言

我国煤炭资源丰富,半焦是煤梯级高效利用的主要产物<sup>[1-2]</sup>,半焦通过电站锅炉或工业锅炉燃烧是其主要利用途径。因此,设计符合半焦燃烧特性的燃烧器不但会提高其能源利用效率和系统安全性,还符合国家的规划需求<sup>[3-4]</sup>。国内外众多学者对半焦燃烧特性采用理论<sup>[5]</sup>或试验<sup>[6-8]</sup>方法进行了研究,得到了丰硕的成果。半焦颗粒由于其挥发分含量较低,点火过程通常发生在颗粒表面,氧气直接

撞击到颗粒表面同煤焦直接发生氧化反应。但对试验研究而言,多采用热重(TGA)等方法,其加热速度与实际锅炉系统相差较大,且通常只反映气相均相点火特性,而半焦由于其挥发分含量较低,点火过程通常由非均相表面引起。多元扩散火焰燃烧器(Hencken 燃烧器)<sup>[9-10]</sup>可以在提供一个稳定的温度、组分环境的同时,保持颗粒  $10^5 \sim 10^6$  K/s 的加热速率,这个量级的加热速率与一维炉<sup>[11-12]</sup>等中试规模的试验装置相似,高于热重法(10~100 K/min)和滴管炉( $10^4 \sim 10^5$  K/s)<sup>[13-14]</sup>等试验装置。在这些设

收稿日期:2019-01-22;责任编辑:赵 瑞

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51806220)

作者简介:倪文婧(1981—),女,河北石家庄人,高级工程师。E-mail:bjnwj@sina.com

备中,滴管炉或 Hencken 燃烧器被认为是试验室条件下最适合研究煤粉颗粒着火和设备。首先,其高达  $10^5$  K/s 的加热速率使得煤粉颗粒的燃烧过程同实际系统类似。其次,对比其他设备的试验研究,比如 TGA,更多地重点放在点火特征时间,而不是最小着火温度上。着火特征时间和最小着火能是设计煤粉燃烧器关键,因此为了开发半焦燃烧器,有必要针对半焦点火特征时间开展研究。此外,应用光学法测量非均相燃烧体系,还可以在不影响体系自身流动结构的前提下,得到更精确的燃烧信息。

笔者通过新型高频振荡单分散颗粒给粉器结合多元扩散火焰燃烧器技术,同时配合煤粉全辐射信号分析试验方法,研究了环境温度和含氧量变化对半焦颗粒点火特征时间的影响,以期半焦燃烧器的设计和半焦锅炉的稳定运行提供理论依据。

1 试 验

1.1 试验流程

测量半焦点火特征时间的试验系统如图 1 所示。

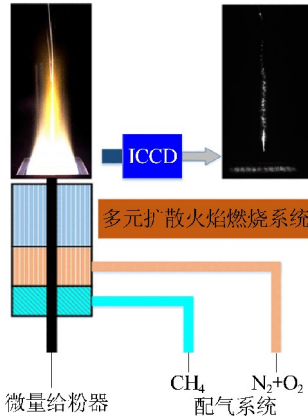


图 1 测量半焦点火特征时间的试验系统  
Fig.1 Experimentation system for measuring characteristic time of half-focus fire

试验系统由配气系统、震荡微量给粉器、多元扩散火焰(Hencken)燃烧器和光学信号采集系统 4 部分组成<sup>[15-16]</sup>。其中,Hencken 燃烧器气体燃烧所产生的高温烟气作为热源,提供和维持目标燃料燃烧所需要的能量。燃料通过数百根超细不锈钢管流出,氧化剂和稀释剂从管外部空隙孔中流出,在燃烧器上方混合燃烧,所需反应高度小于 0.3 cm,环境温度能很快达到设计目标温度。光学信号由 ICCD(Intensified Charge-Coupled Device)采集。试验流程如下:煤粉经震荡微量给粉器使煤粉达到分散状态,然后随气流进入由 Hencken 燃烧器提供的高温可控组分环境内,最后煤粉被加热点燃后的光学信

号由 ICCD 采集至存储设备。

1.2 试验材料和工况

试验所选用半焦的工业和元素分析结果见表 1。半焦挥发含量为 6.67%,固定碳含量为 82.05%。此外,试验所采取的半焦颗粒粒径小于 75  $\mu\text{m}$ 。

表 1 半焦工业和元素分析结果

Table 1 Industry and elemental analysis of semi-coke				
$M_{ad}/\%$	$V_{daf}/\%$	$FC_d/\%$	$A_d/\%$	$CRC/\%$
6.09	7.97	82.05	10.85	2

通过控制 Hencken 燃烧器所用载气、氧化剂和还原剂的配比,半焦燃烧的温度环境工况为 1 200、1 500和 1 800 K,氧体积分数工况为 10%和 20%。

2 结果与讨论

2.1 温度对点火特征时间的影响

不同环境温度  $T$  工况下,由 ICCD 获得的光学信号通过后处理得到的信号强度  $I_n$  随高度  $H$ (燃烧器平面高度为 0 mm)变化曲线如图 2a 所示。图中纵坐标为信号强度归一化后的结果,即实测信号强度除以峰值后的数值。为了得到环境温度对半焦点火特征时间的影响,半焦燃烧环境的氧含量  $Y_{O_2}$  保持为 0.1。由图 2a 可知,信号强度随着高度的增加可分为缓慢增加段、迅速增加段和下降段 3 段。缓慢增加段对应颗粒由对流换热主导的加热过程;迅速增加段对应的是颗粒自身反应速率加快导致颗粒迅速升温的过程;下降段主要由于焦炭颗粒燃烧速率下降,以及燃烧器上部流场与温度场不稳定造成的。从图 2a 可知,环境温度升高会增加缓慢增加段和迅速增加段的梯度,并降低光学信号峰值出现的位置。

ICCD 所获得的光学信号与位置信息相关联。为了获得半焦点火特征时间,需先通过应用激光多普勒技术<sup>[16]</sup>(PDA,Phase Doppler Anemometry)获得颗粒在燃烧器上方的速度。基于颗粒速度得到颗粒停留时间  $t_r$  随高度变化的曲线如图 2b 所示,曲线斜率的倒数等于半焦颗粒在 Hencken 燃烧器上的速度。由图 2b 可知,3 种温度工况下,颗粒在 Hencken 燃烧器上方速度的变化趋势相同,均可分为稳定段和加速段,末端加速段是因为颗粒自身放热造成的。

如何通过 ICCD 直接测量的光学信号来确定煤粉/半焦点火特征时间一直是研究难题。因为特征点火时间没对应的定义,只是在不同的体系下决定对应煤粉的点火容易程度。本文所指的半焦点火特征时间,为半焦颗粒在多元扩散火焰燃烧器这个体

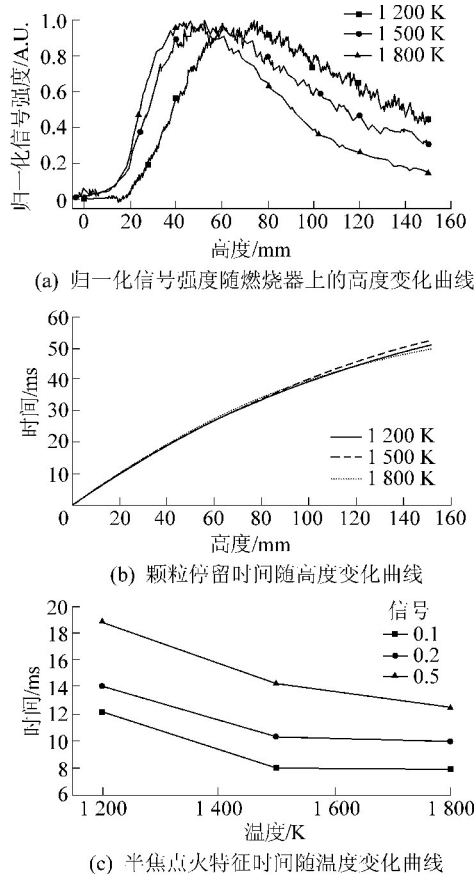


图2 环境温度对半焦着火特性时间的影响

Fig.2 Effects of ambient temperature on ignition characteristic time of semi-char

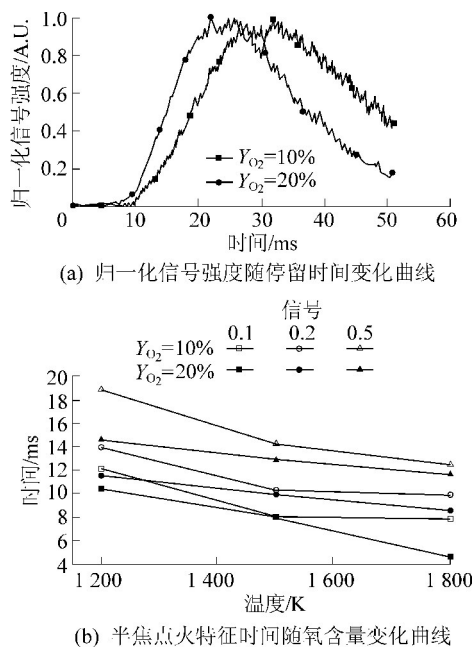
系中,用信号分析的方法确定一个数值来表征相应点火所需时间,用以研究环境、煤种和组分对点火过程的影响。笔者分别提取0.1、0.2和0.5三个信号所对应的时间点来表征半焦的点火特征时间 $t_i$ ,结果如图2c所示。由图可知,3种方法所得到的半焦点火特征时间变化规律一致。当选取归一化强度0.1作为特征点火时间信号时,环境温度由1 200 K增加到1 800 K,半焦点火特征时间缩短了4 ms,由12 ms降低到了8 ms。当选择0.2和0.5信号时,半焦点火特征时间分别缩短了4 ms和6 ms。无论采取何种信号表征半焦点火特征时间,得到的规律一致,增加环境温度会缩短半焦的点火时间。造成这种现象的原因是因为半焦挥发分含量小于7%,点火过程以非均相表面反应为主,温度升高会加快半焦表面的化学反应速率,颗粒自身反应放热能够更快地使颗粒温度升高,从而缩短了点火特征时间。

此外,当选择0.1信号表征半焦点火特征时间时,对比褐煤和烟煤的点火特征时间(1 200 K,约19 ms;1 500 K,11~15 ms;1 800 K,9~12 ms)<sup>[16]</sup>,半焦的点火特征时间相对较小。这是因为在非均相点火机制的主导下,在环境温度能够维持稳定且氧气充

足的前提下,表面反应速率决定点火特征时间。通常半焦热值和表面反应活性较高,当达到点火温度时,半焦颗粒在非均相点火模式下具有更短的点火时间。

## 2.2 氧气浓度对半焦点火特征时间的影响

氧气浓度对半焦点火特征时间的影响如图3所示。由图3a可知,氧气体积分数 $Y_{O_2}$ 由10%增加到20%,缓慢增加段的信号梯度随之增加。此外,峰值出现的时间点由30 ms降至20 ms。



(b) 半焦点火特征时间随氧含量变化曲线

图3 氧气对半焦点火特征时间的影响

Fig.3 Effects of oxygen concentration on ignition characteristic time of semi-char

由图3b可知,如果取0.1的信号表征半焦的点火特征时间时,氧气体积分数从10%增加到20%,分别将半焦点火特征时间从1 200 K的12 ms、1 500 K的8 ms和1 800 K的7.8 ms,降低到10、7.9和5 ms。半焦的点火特征时间平均减少了1.7 ms。当取0.2和0.5信号表征点火特征时间时,点火特征时间分别缩短了1.4 ms和2.1 ms。这说明,增加氧气浓度有利于半焦的点火。这种现象和褐煤与烟煤的试验结果相同<sup>[16]</sup>,但氧气浓度对半焦点火特征时间的影响要小于烟煤和褐煤。当取相对强度0.1为信号时,褐煤和烟煤的点火特征时间的变化约为半焦的2倍。这种现象是由于氧气浓度对非均相点火过程中煤焦反应的影响,小于其对受挥发分析出燃烧过程限制的非均相着火过程的影响造成的。

此外,对比第2.1节和第2.2节的结果可知,改变环境温度带来的点火特征时间变化约为氧气浓度变化的2倍。出现这种现象的原因可由半焦质量消



耗速率公式<sup>[17]</sup>来解释。

$$m_t = \rho_w B_c \exp(-E_c/RT_p) Y_{O_2} \pi d^2 \quad (1)$$

式中: $m_t$ 、 $\rho_w$ 、 $B_c$ 、 $E_c$ 、 $R$ 、 $T_p$ 和 $d$ 分别为半焦质量消耗速率、表面密度、指前因子、活化能、通用气体常数、颗粒温度和颗粒半径,计算结果如图4所示。由图可知,如果取 $E_c = 103 \text{ kJ/mol}$ <sup>[16-17]</sup>, $T_p$ 由1 200 K增加到1 500 K后, $m_t$ 增加6.3倍。而当氧气体积分数由10%增加到20%, $m_t$ 增加2倍,即改变温度带来的反应速率变化为改变氧气浓度的3.15倍,这与试验结果较为接近。由此可知,因为半焦消耗速率和温度呈指数函数关系,而焦炭消耗速率与氧气组分呈线性关系,环境温度对于半焦点火特征时间的影响更为明显。

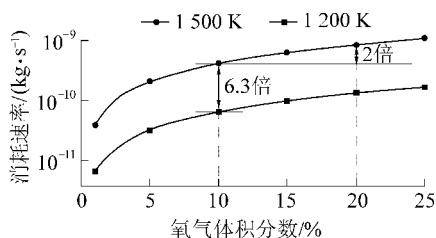


图4 焦炭质量消耗速率变化曲线

Fig.4 Variation curves of char mass loss rate

综上所述,半焦点火特征时间可以通过改变环境温度和氧气浓度来进行调控,改变这2个参数带来的点火特征时间约为5 ms。以14 MW逆喷式燃烧器为例<sup>[18-19]</sup>,燃烧器回流帽附近的流速为30 m/s,那么由调控点火特征时间带来的特征长度的变化为0.15 m,这已经与钝体等稳燃部件的尺寸在同一量级。

### 3 结 论

1)本研究通过基于光学信号获取半焦颗粒点火过程信息,当选取归一化强度0.1作为特征点火时间信号时,其特征点火时间在10 ms这一量级。

2)半焦表面的化学反应速率随着环境温度的增加而加快,因此,增加环境温度会缩短半焦的点火时间。当选取归一化强度0.1作为特征点火时间信号时,环境温度由1 200 K增加到1 800 K,点火时间由12 ms降低到8 ms,半焦的特征点火时间缩短4 ms。

3)氧气体积分数由10%增加到20%,点火特征时间由1 200 K的12 ms、1 500 K的8 ms和1 800 K的7.8 ms,降低至10、7.9和5 ms;氧气浓度对半焦点火特征时间的影响小于烟煤和褐煤,这是因为氧气浓度对非均相点火过程中煤焦反应的影响小于其对受挥发分析出燃烧过程限制的非均相着火过程的影响。

影响。

4)相比氧气浓度,环境温度对于半焦点火特征时间的影响更为明显,这是因为半焦消耗速率和温度呈指数函数关系,而半焦消耗速率与氧气组分呈线性关系造成的。

### 参考文献(References):

- [1] 屈进州,陶秀祥,刘金艳,等.褐煤提质技术研究进展[J].煤炭科学技术,2011,39(11):121-125.  
QU Jinzhou,TAO Xiuxiang,LIU Jinyan,et al.Research progress on upgrading technology of lignite[J].Coal Science and Technology, 2011,39(11):121-125.
- [2] 余 斌,李社锋,方梦祥.多联产半焦燃烧特性的热重研究[J].动力工程学报,2010,30(3):214-218.  
YU Bin,LI Shefeng,FANG Mengxiang.Thermogravimetric study on combustion characteristics of semi-cokes from polygeneration[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010,30(3): 214-218.
- [3] 中国国家能源局.煤炭清洁高效利用行动计划[EB/OL]. [2019-01-01]. [http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto85/201505/t20150505\\_1917.htm](http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto85/201505/t20150505_1917.htm).
- [4] 中国国家能源局.煤炭工业发展“十三五规划”[R].北京:中国国家能源局,2016.
- [5] GAVALAS G R.Analysis of char combustion including the pore enlargement[J].Combustion Science and Technology, 1981(4): 197-210.
- [6] JIA L F,ANTHONY E J,LAU I,et al.Study of coal and coke ignition in fluidized beds[J].Fuel,2006,85(5/6):635-642.
- [7] 张守玉,江锋浩,黄小河,等.五彩湾煤半焦水热脱钠提质及其燃烧特性的演变[J].煤炭学报,2018,43(1):250-256.  
ZHANG Shouyu,JIANG Fenghao,HUANG Xiaohe,et al.Investigation on the Na removal and combustion characteristics of the hydrothermal treated Wucuiwan coal char[J].Journal of China Coal Society,2018,43(1):250-256.
- [8] 马淞江,刘晓芳,戴谨洋,等.温和热解条件下内蒙褐煤热解半焦的燃烧性能[J].煤炭学报,2015,40(5):1153-1159.  
MA Songjiang,LIU Xiaofang,DAI Jinze,et al.Combustion performance of semi-coke from inner Mongolia lignite under mild pyrolysis conditions[J].Journal of China Coal Society, 2015,40(5): 1153-1159.
- [9] 熊 刚.煤和生物燃烧碳烟生成的实验研究[D].北京:清华大学,2011:26-31.
- [10] JACKSON M.A quantitative analysis of the flame produced by a gas-fueled propellant simulating burner including:soot field characterization,temperature diagnostic techniques,spectral analysis, heat flux,and aluminum particle combustion[D].Texas: Texas Tech University,2007:4-5.
- [11] LI Gengda,LI Shuiqing,XU Xiaoguang.Dynamic behavior of biomass ash deposition in a 25 kW one-dimensional down-fired combustor[J].Energy & Fuels,2014,28:219-227.
- [12] WEIDMANN M,WERBAERE V,BOUTIN G,et al.Detailed investigation of flameless oxidation of pulverized coal at pilot-scale

- [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 74(5):96-101.
- [13] 王道平, 尚庆雨, 牛 芳, 等. 两段式高温滴管炉内烟煤 NO<sub>x</sub> 生成规律[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(12):3300-3304.  
WANG Daoping, SHANG Qingyu, NIU Fang, *et al.* NO<sub>x</sub> formation of bituminous coal in two-stage high-temperature dropper tube furnace[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(12):3300-3304.
- [14] LEVENDIS Y A, JOSHI K, KHATAMI R, *et al.* Combustion behavior in air of single particles from three different coal ranks and from sugarcane bagasse [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158:452-265.
- [15] 陶雨洁, 卓建坤, 袁 野, 等. 煤粉燃烧过程碳烟生成的激光测量研究[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(1):185-188.  
TAO Yujie, ZHUO Jiankun, YUAN Ye, *et al.* Study of measurement system for soot formed in pulverized coal combustion[J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2013, 34(1):185-188.
- [16] YUAN Ye, LI Shuiqing, LI Gengda, *et al.* The transition of heterogeneous-homogeneous ignitions of dispersed coal particle streams [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161:2458-2468.
- [17] DU X Y, ANNAMALAI K. The transient ignition of isolated coal particle [J]. *Combustion and Flame*, 1994, 97:339-354.
- [18] 姜思源, 王永英, 周建明, 等. 中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6):1147-1153.  
JIANG Siyuan, WANG Yongying, ZHOU Jianming, *et al.* Numerical simulation on middle volatile coal combustion in reversed injection burner[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6):1147-115.
- [19] 王鹏涛, 王乃继, 程晓磊, 等. 煤粉工业锅炉空气深度分级数值模拟研究[J]. *洁净煤技术*, 2018, 24(5):68-76.  
WANG Pentao, WANG Naiji, CHENG Xiaolei, *et al.* Numerical simulation of deep air-staged technology in pulverized coal industrial boiler[J]. *Clean Coal Technology*, 2018, 24(5):68-76.