

马 鹏,黄 骞,闫 恒,等.煤粉燃烧初期钠元素与碳烟相互作用的光学诊断研究[J].煤炭转化,2022,45(3):11-17.DOI:10.19726/j.cnki.ebcc.202203002.

MA Peng, HUANG Qian, YAN Heng, et al. Laser-induced Incandescence (LII) Diagnostics on Sodium-soot Interaction in Early Stage of Pulverized Coal Combustion[J]. Coal Conversion, 2022, 45(3): 11-17. DOI: 10.19726/j.cnki.ebcc.202203002.

# 煤粉燃烧初期钠元素与碳烟相互作用的 光学诊断研究\*

马 鹏<sup>1</sup> 黄 骞<sup>1</sup> 闫 恒<sup>1</sup> 纪任山<sup>1,2</sup> 李水清<sup>1</sup>

(1.清华大学能源与动力工程系热科学与动力工程教育部重点实验室,100084 北京;

2.煤科院节能技术有限公司,100013 北京)

**摘 要** 煤粉燃烧过程中生成的碳烟对炉内辐射换热过程有显著影响,在随烟气进入大气后,会引发温室效应,同时危害人体健康。为研究煤粉燃烧过程中易挥发矿物质元素钠对碳烟生成的影响,本实验制备了一系列不同钠含量的煤样,使用一种新型两级平焰燃烧器,将煤粉颗粒给入燃烧器,利用激光诱导白炽光测量了酸洗煤及载钠煤的沿程碳烟空间分布,同时使用扫描电迁移粒径仪测量了热解阶段生成的细颗粒物数浓度分布。结果表明:碳烟在煤粉燃烧初期出现,约 31 ms 后达到峰值,随后减弱消失。碳烟信号峰值对应的煤粉颗粒停留时间与按照 10%最大火焰信号强度定义的煤粉着火特征时间近似相同,表明碳烟的生成氧化过程与煤粉着火过程密切相关。碳烟的光学测量结果与颗粒物采样结果均表明:随着煤样中钠含量增加(0~0.641%),生成的碳烟量明显增加,而煤粉点火几乎不受影响。这表明载入钠元素会促进燃煤初期碳烟生成。

**关键词** 煤粉燃烧,碳烟,钠,激光诱导白炽光光谱(LII),颗粒物采样

**中图分类号** TQ534.9

**DOI:** 10.19726/j.cnki.ebcc.202203002

## 0 引 言

碳烟是碳氢燃料不充分燃烧形成的颗粒物,严重危害人体健康,更是气候变暖贡献源之一<sup>[1]</sup>。研究表明,煤燃烧是大气碳烟的主要来源之一<sup>[2-3]</sup>。而在燃煤锅炉中,碳烟对炉内辐射传热及燃烧特性有显著影响<sup>[4-6]</sup>。2019年,我国能源消费和能源生产中煤炭占比仍达 57.7%和 68.8%<sup>[7]</sup>。因此,深入理解燃煤过程的碳烟生成及演化对锅炉稳定高效运行和降低碳烟排放具有重要意义。

已有研究<sup>[5-6,8-9]</sup>表明碳烟由煤粉热解生成的重质挥发分焦油在高温低氧环境中经“成核-长大-聚并”生成。而煤中的易挥发矿物质元素(钠、钾为主)也会通过“热解-核化-聚并”机制形成超细颗粒

物<sup>[10]</sup>,引发积灰结渣和受热面腐蚀等问题<sup>[10-13]</sup>。因此,矿物质超细颗粒物与碳烟的生成时间尺度相近,互相影响。研究<sup>[12,14-15]</sup>表明煤粉燃烧过程中生成的碳烟颗粒掺杂有矿物质组分,如钠、钾、钙等。为探究矿物质组分对燃煤碳烟生成演化的影响,DONG et al<sup>[16]</sup>采用滴管炉和颗粒物采样,发现碳烟生成量随煤中钠含量的升高先增后降。肖正航等<sup>[14]</sup>利用平焰燃烧器和颗粒物采样,发现钠的存在影响了碳烟的氧化活性。已有研究多采用颗粒物采样研究矿物质对碳烟生成的影响,但受限于测量手段,无法获得碳烟的空间分布。而光学测量能够获得碳烟空间分布,是研究矿物质对碳烟影响的有效方法。激光诱导白炽光光谱(LII)是常用的测量碳烟空间分布的方法<sup>[17]</sup>。针对燃煤碳烟,HAYASHI et al<sup>[18]</sup>提出了规避煤粉颗粒信号干扰的方法,获得了煤粉碳

\* 中国煤炭科工集团国际合作项目基金资助项目(2019-TD-2-CXY003)。

第一作者:马 鹏,博士生,E-mail:mp19@mails.tsinghua.edu.cn;通信作者:黄 骞,助理研究员,E-mail:huangqian@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2022-02-24;修回日期:2022-04-07

烟的空间分布。已有研究者<sup>[15,18-19]</sup>采用 LII 研究了煤阶、给煤量、氧气浓度、水洗等对燃煤碳烟空间分布的影响。

针对矿物质与碳烟的相互作用,目前文献中尚缺少矿物质对燃煤碳烟空间分布影响的研究。为此,本实验基于两级平焰燃烧器,使用 LII 和颗粒物采样,获得了不同钠含量煤粉在燃烧初期的碳烟空间分布和演化特性,研究了矿物质对燃煤碳烟的影响,为完善燃煤初期颗粒物生成演化机理和模型开发提供参考。

表 1 煤样的工业分析和元素分析及灰成分分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses and ash component of coal sample

Proximate analysis(d) w/%			Ultimate analysis(adf) w/%					w(ash)/%								
A	V	FC	C	H	O	N	S <sub>t</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
5.88	30.58	63.54	71.60	3.16	23.94	0.78	0.52	28.53	3.27	4.01	32.78	2.88	0.30	21.47	0.57	6.19

为探究钠对燃煤初期碳烟生成过程的影响,制备了酸洗煤及酸洗后定量载入钠的煤样。酸洗与载钠方法可参考文献<sup>[11,16]</sup>。在载钠中,使用 NaCl 作为钠的载体,因此所载入的钠在煤中以水溶态存在。在对样品进行消解后,使用 ICP-AES 测量酸洗煤和定量载入钠煤样的钠含量,结果如图 1a 所示。酸洗煤的钠含量(质量分数,下同)小于 0.02%,表

## 1 实验部分

### 1.1 样品制备与分析

实验中使用的煤种为新疆准东煤,工业分析、元素分析和灰成分分析如表 1 所示。煤样在破碎后筛分至粒径小于 100  $\mu\text{m}$ 。每组实验前,煤样均提前在 75  $^{\circ}\text{C}$  烘箱内干燥至少 1.5 h,以实现煤粉的均匀给粉。

明酸洗能够有效去除煤中的钠。定量载入钠的煤样含钠量分别为 0.169%,0.323%,0.482%和 0.641%,煤样依次记为 Sample 1, Sample 2, Sample 3 和 Sample 4。为避免酸洗、载入钠过程对实验煤样的粒径分布产生显著影响,各实验煤样被再次筛分。筛分后,使用马尔文粒度仪测量了各煤样的粒径分布,结果如图 1b 所示。各煤样粒径分布(体积分数)相差小于 5%,符合实验要求。

### 1.2 煤粉燃烧实验系统与颗粒物采样系统

实验用的两级平焰燃烧器和颗粒物采样装置的详细设置可参考此前的研究<sup>[15]</sup>。该两级平焰燃烧器分为内、外蜂窝,中心位置有 1 根给粉管。内、外蜂窝由毫米级的不锈钢细管和蜂窝组成。燃料和氧化剂可以通过不锈钢细管和蜂窝分别给入到内、外蜂窝中。内、外两个蜂窝的进气可以分别控制,因而能够灵活调节内、外蜂窝的燃烧工况。内、外蜂窝的进气流量与此前研究<sup>[15]</sup>相同。本研究采用的工况:焰后气体流速为 1 m/s,焰后温度为 1 500 K;气氛条件:内蜂窝焰后氧气摩尔分数为 0,外蜂窝焰后氧气摩尔分数为 0.2。实验中煤粉给粉速率为 0.06 g/min。

实验采用大稀释比采样的方式,以避免细颗粒物团聚对测量结果的影响。通过烟气分析确定稀释比为 94,详细确定过程可参考文献<sup>[11]</sup>。在采样枪的尾部,使用 PM1 切割器去除稀释气和样品气混合气中的中模态和粗模态颗粒物,包括焦炭和矿物质飞灰等。使用美国 TSI 公司生产的扫描电迁移粒径仪(SMPS; scanning mobility particle sizer,型号: 3936)测量颗粒物数浓度粒径分布。扫描电迁移粒

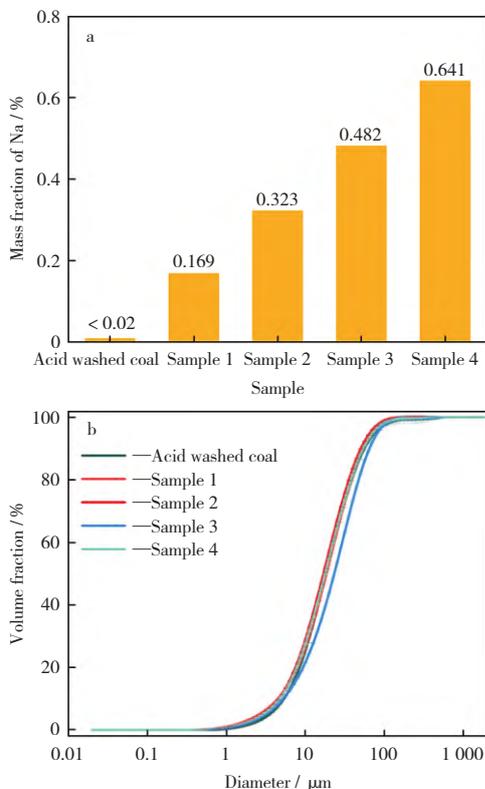


图 1 不同煤样中钠含量及粒径分布

Fig.1 Sodium content and particle diameter distribution of different coal samples

径仪由静电分级器(型号:3080)和冷凝颗粒计数仪(型号:3776)组成。静电分级器的核心部件是差分电迁移分析仪(DMA; differential mobility analyzer),利用不同粒径颗粒的电迁移特性差异筛选颗粒物。实验中使用的 DMA 测量的粒径范围为 14.6 nm~500 nm。

### 1.3 碳烟在线测量系统

LII 常用于测量碳烟空间分布,其信号强度与碳烟空间体积分数呈正相关关系<sup>[17-18]</sup>。实验所用 LII 测量系统如图 2 所示。LII 测量系统由 Nd:YAG 激光器、柱面透镜组、带通滤波片和 ICCD 相机

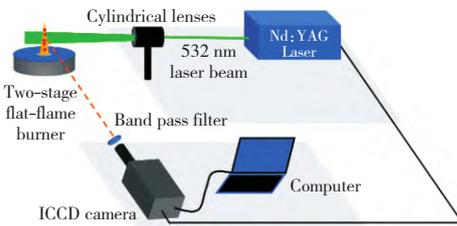


图 2 LII 诊断系统

Fig.2 LII diagnostic system



组成。为实现二维平面测量,使用柱面透镜组将点光源转换为片状光源。参考文献[18]中确定均匀片光源的方法,经过测量和选择,使用长 40 mm、宽 1.6 mm 的二维片形光进行碳烟测量实验。为排除火焰中发光基团特别是多环芳烃的干扰,在相机前使用 405 nm 的滤光片。本实验经调整比选,选取 60 mJ/pulse 激光能量,可最大限度凸显碳烟颗粒 LII 信号,避免煤粉大颗粒散射信号。ICCD 相机的延迟时间设为 190 ns,门宽设为 70 nm。

### 1.4 颗粒停留时间

煤粉颗粒给入燃烧器后,利用相机测量煤粉颗粒在流场中的速度。使用 Nikon D5600 数码相机,曝光时间设为 1 ms,拍摄得到的典型煤粉颗粒着火图像如图 3 所示。根据图 3 中煤粉颗粒的轨迹和曝光时间,可利用轨迹长度与曝光时间的比值获得煤粉颗粒的运动速度。拍摄多张图片进行统计,获得煤粉颗粒速度  $v_p$  随高度  $s$  的变化。利用式  $s = \int v_p dt$ ,可计算出煤粉颗粒停留时间,结果如图 3 所

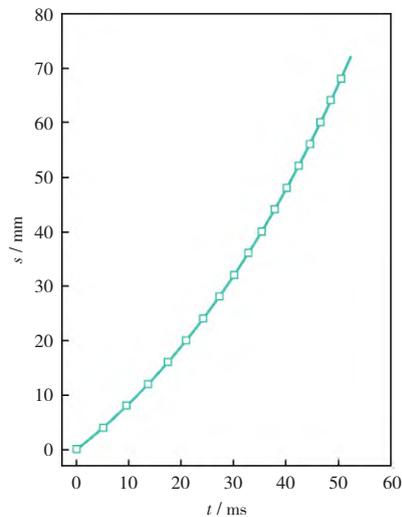


图 3 煤粉火焰与煤粉颗粒停留时间

Fig.3 Coal flame and coal particles residence time

示。煤粉颗粒在出口处的速度与设计工况相近,后续随着挥发分析出等过程,煤粉颗粒物加速,速度大于设计工况的 1 m/s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 煤粉点火与碳烟生成

采用光学在线诊断方法,可获得煤粉燃烧的火

焰信号与碳烟 LII 信号,如图 4a 和图 4b 所示。参考文献[20]中的方法,使用 PI-MAX4 ICCD 相机拍摄燃烧火焰可见光全辐射信号强度随停留时间的变化,通过获得的信号强度变化曲线分析煤粉颗粒的点火特征。实验采用 5 Hz 的频率拍摄 30 s,再将得到的图片进行时均处理,以减小给粉量波动等因素对测量结果的影响;将时均图片中每一轴向距离上的径向信号加和后归一化处理,得到归一化信号强度随停留时间的变化<sup>[21]</sup>。定义煤粉着火特征时间

为火焰信号强度从0增加到峰值的10%所对应的煤粉停留时间<sup>[20]</sup>,如图4c中虚线所示。其中,煤粉火焰中前5ms的信号来自于燃气器的内、外蜂窝气相火焰。为避免干扰,在测量碳烟时规避了该段高度。碳烟信号均采用酸洗煤碳烟信号进行归一化处理。

由图4c和图4d可知,火焰信号与碳烟信号均经历了先增大后减小的过程。对于不同钠含量的样品,特征点火时间相近,约为35ms。碳烟信号波动较大,与碳烟颗粒空间分布不均匀相关。实验工况

下,内蜂窝焰后氧气浓度为0,因此煤粉颗粒进入高温区域后,首先经历热解、脱挥发分,因氧气浓度低而未着火,实际中也未见煤粉火焰(光强很低)。此后,随着外蜂窝氧气扩散至内蜂窝,氧气浓度升高,煤粉着火,火焰信号迅速增强。而碳烟是煤粉热解产物焦油经过高温低氧区域时生成的,因此在煤粉未着火的阶段大量生成,此后碳烟大量氧化,导致LII信号快速下降。由图4可知,实验工况下煤粉着火特征时间为28ms,而碳烟峰值信号对应的停留时间约为31ms,二者大体相当。这是因为煤粉着

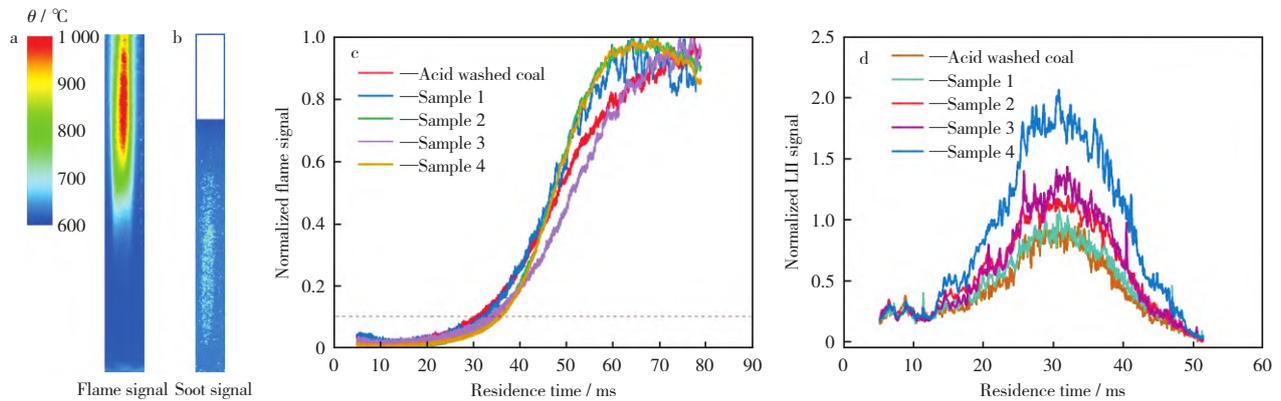


图4 煤粉燃烧初期火焰信号与碳烟信号

Fig.4 Flame and soot signals in early stage of pulverized coal combustion

a—Time-averaged flame signal;b—Time-averaged soot signal;c—Normalized flame signal;d—Normalized soot signal

火和碳烟氧化均受氧气向内扩散控制,当煤粉着火时,氧气向内输运量也足以显著消耗碳烟(致使碳烟氧化速率逐渐高于生成速率)。因此,可以采用煤粉着火特征时间近似表征碳烟峰值特征时间。而在火焰信号峰值处,碳烟已大量消耗。

由图4d可知,所有样品的碳烟信号均呈先增后减趋势。从碳烟信号强度上看,煤样中钠含量愈高,碳烟信号(特别是峰值信号)愈强,表明生成的碳烟量愈多。定义25ms~40ms内的碳烟信号均值为平均碳烟峰值,这样可消除LII信号空间波动的影响;当煤样含钠量从0.169%增加到0.641%,平均碳烟峰值强度分别是酸洗煤(含钠量极低)碳烟峰值强度的1.07,1.35,1.48和2.21倍,由此可反映煤中钠含量(主要是水溶态钠)对燃烧中碳烟生成的促进作用。碳烟信号峰值所对应的停留时间均在25ms~35ms范围内。从机理上分析,水溶态钠在燃烧初期易于析出,因此在燃烧过程中,煤样载钠量越高,气相钠浓度应越大。钠在高温烟气中的氧化、成核过程非常迅速,由此形成大量含钠的初始颗粒(成分可能以 $\text{Na}_2\text{O}$ 为主)<sup>[10]</sup>。这些超细颗粒提供了大量的活性位点,可能会极大降低脱挥发分产生的焦油

成核所需势垒,促使焦油发生显著异相成核,生成碳烟颗粒。且在本实验所包括的含钠量范围内,这一促进作用似并未饱和。另一方面,LII信号强度在达到峰值后快速降低,且各样品信号均在50ms前降至极低,这反映了钠对碳烟氧化的促进作用<sup>[14]</sup>,这主要是钠对碳氧化的催化作用。在高温烟气中,碳烟颗粒会与含钠细颗粒物聚并,从而进一步提升颗粒中钠含量,因而氧化速率加快。

## 2.2 超细颗粒物粒径分布

为验证LII原位诊断结果,进一步采用细颗粒两级稀释采样方法,测量了各煤样燃烧初期(停留时间为30ms)的超细颗粒物粒径分布,结果如图5所示。所选测量位置为LII信号峰值所在位点。由图5可知,酸洗煤燃烧的超细颗粒物粒径呈双峰分布,粒径小的峰对应颗粒成核模态,第二个峰对应颗粒聚并模态,可见两个模态的峰值分别超出测量仪器(SMPS)粒径上下限。而各载钠煤样燃烧过程中,超细颗粒物粒径分布以成核模态为主,在粒径大于200nm后浓度升高,似存在较大的聚并模态。从颗粒数浓度来看,煤样中载钠后燃烧初期的超细颗粒

物浓度均高于酸洗煤的超细颗粒物浓度,且煤样中钠含量愈高,颗粒物浓度愈高,超细颗粒物生成能力愈强。早期较高的超细颗粒物浓度会增强颗粒间聚并,使聚并模态的粒径增大。这一分析与图 4d 的实验结果相符。

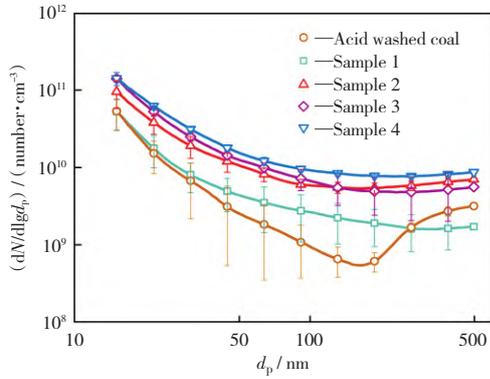


图 5 距燃烧器 30 mm 处超细颗粒的粒径分布  
Fig.5 Particle diameter distribution of fine particles at 30 mm above burner surface

图 6 所示为测得各煤样碳烟均值 LII 信号峰值(使用酸洗煤归一化)和颗粒物总体积浓度的关联。由图 6 可以看出,随着钠含量的增加,颗粒物总体积浓度与均值 LII 峰值信号强度呈正相关,但并非严格线性关系。这验证了本研究采用两种实验方法所得结论的一致性,即载入钠含量增大,燃烧初期的颗粒物浓度与碳烟颗粒浓度均增大。

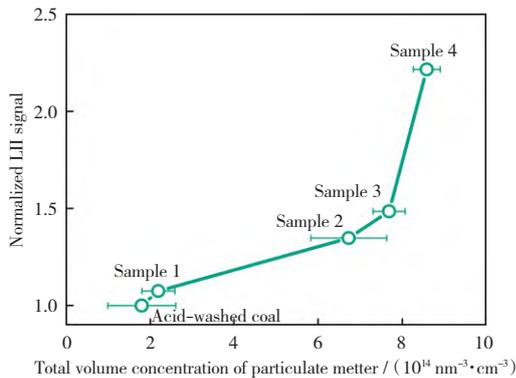


图 6 各样品 LII 信号峰值与颗粒物总体积浓度的关联  
Fig.6 Correlation between the peak LII signal and total volume concentration of particulate matter of each sample

粒径分布测量结果包括了碳烟和矿质颗粒的总量。与酸洗煤相比,载钠煤样中仅多了载入的钠,这部分所贡献的矿质颗粒可以  $\text{Na}_2\text{O}$  颗粒表征, $\text{Na}_2\text{O}$  是高温下主要的稳定组分<sup>[9,11]</sup>。图 7 中蓝线所示为该部分增加的质量,计算中考虑了各煤样的钠含量、颗粒物采样时间和给煤量。而图 7 中红线所示为 SMPS 测得的超细颗粒物质量与酸洗煤生成的超细

颗粒物质量相比的增量,计算中细颗粒密度取  $1.8 \text{ g/cm}^3$ (碳烟密度值,实际颗粒含矿物质,平均密度值可能略高)。由二者比较可见,载钠煤样燃烧过程中,当钠含量大于  $0.323\%$  时,SMPS 测量所得的超细颗粒物质量增量(较之酸洗煤)远大于载入的钠完全转化为  $\text{Na}_2\text{O}$  的质量,表明新增的细颗粒物主要是碳烟颗粒。这一分析表明,随着煤样中钠含量的增加,碳烟生成量增加,体现了钠对煤粉热解阶段碳烟生成的促进作用。

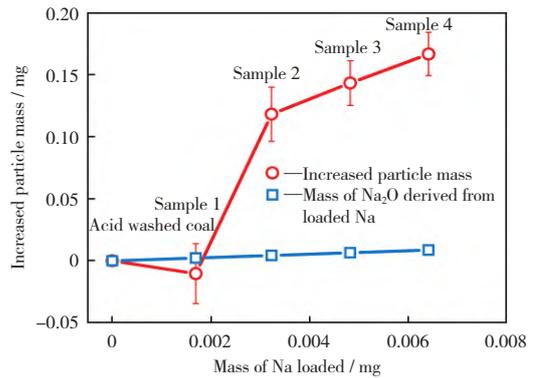


图 7 载钠煤样与酸洗煤相比生成超细颗粒物质量的增量与载入钠完全转化为  $\text{Na}_2\text{O}$  的质量的比较  
Fig.7 Increment in the mass of ultrafine particles generated by the combustion of each Na-loaded coal sample compared to the acid-washed coal vs. the amount of Na loaded (calculated as the total amount of  $\text{Na}_2\text{O}$  in the sampling period)

### 3 结 论

1) 碳烟 LII 信号在燃烧初期出现、达峰(约 31 ms)并减弱消失。碳烟信号峰值对应的煤粉颗粒停留时间与按照 10% 最大火焰信号强度定义的煤粉着火特征时间近似相同,表明碳烟的生成氧化过程与煤粉着火过程密切相关。

2) LII 结果表明,随煤样中载钠含量增大,碳烟峰值浓度增加,表明钠可促进煤粉燃烧初期的碳烟生成,这可能是通过促进焦油异相成核实现;此外,煤中钠含量愈高,碳烟浓度后期降低愈快,反映了钠对碳烟氧化的促进作用。

3) 针对 30 ms 停留时间(碳烟信号峰值)处的超细颗粒物采样测量表明,粒径分布呈明显的成核模态,且超细颗粒物数浓度随煤中载钠量提高而增大;与酸洗煤相较,载钠煤样的细颗粒物增量主要来自碳烟,证实了钠对燃煤初期碳烟生成的促进作用。

## 参 考 文 献

- [1] TOLLEFSON J. Soot a Major Contributor to Climate Change[J]. *Nature*, 2013; Article 12225. <https://doi.org/10.1038/nature.2013.12225>.
- [2] 赵承美, 邵龙义, 蒋靖坤, 等. 民用煤燃烧排放 PM<sub>2.5</sub> 的微观形貌和化学组分[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(16): 4422-4428. ZHAO Chengmei, SHAO Longyi, JIANG Jingkun, *et al.* Microscopy Morphology and Chemical Composition of PM<sub>2.5</sub> from Household Coal Combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(16): 4422-4428.
- [3] BOND T C, DOHERTY S J, FAHEY D W, *et al.* Bounding the Role of Black Carbon in the Climate System; a Scientific Assessment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118, 5380-5552.
- [4] MA Jinliang. Soot Formation and Secondary Reactions During Coal Pyrolysis[D]. Provo: Brigham Young University, 1996.
- [5] CHEN C J, NIKSA S. Suppressed Nitrogen Evolution from Coal-derived Soot and Low-volatility Coal Chars[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1992, 24(1): 1269-1276.
- [6] FLETCHER T H, MA Jinliang, RIGBY J R, *et al.* Soot in Coal Combustion Systems[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1997, 23(3): 283-301.
- [7] 《新时代的中国能源发展》白皮书[M/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content\\_5571916.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content_5571916.htm) White Paper on China's Energy Development in the New Era[M/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content\\_5571916.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content_5571916.htm)
- [8] KHATRI D, GOPAN A, YANG Zhiwei, *et al.* Characterizing Early Stage Sub-micron Particle Formation During Pulverized Coal Combustion in a Flat Flame Burner[J]. *Fuel*, 2019, 258: Article 115995.
- [9] 王安振, 司梦婷, 袁 林, 等. 单颗粒煤挥发分火焰碳烟演化实验研究[J]. *煤炭转化*, 2021, 44(3): 1-10. WANG Anzhen, SI Mengting, YUAN Lin, *et al.* Experimental Study on Soot Evolution of Single Coal Particle Volatile Flame[J]. *Coal Conversion*, 2021, 44(3): 1-10.
- [10] 高 琦. 煤粉燃烧全粒径飞灰生成机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2019. GAO Qi. Mechanistic Studies on the Formation of Fly Ash Particles in Full Sizes During Pulverized Coal Combustion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [11] 李庚达. 煤粉燃烧细颗粒物生成、演化与沉积特性实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2014. LI Gengda. Investigations on Fine Particulates Formation, Transformation and Deposition Properties During Pulverized Coal Combustion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [12] 卓建坤. 煤粉燃烧过程中亚微米颗粒形成机理的实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2008. ZHUO Jiankun. Experimental Investigation on the Formation Mechanisms of Submicron Particulate Matters During Pulverized Coal Combustion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [13] 江锋浩, 张守玉, 黄小河, 等. 高碱煤燃烧过程中结渣机理研究进展[J]. *煤炭转化*, 2018, 41(2): 1-8. JIANG Fenghao, ZHANG Shouyu, HUANG Xiaohu, *et al.* Research Progress on Slagging Mechanism During High Alkali Coal Combustion Process[J]. *Coal Conversion*, 2018, 41(2): 1-8.
- [14] 肖正航, 唐 勇, 卓建坤, 等. 煤粉燃烧初期碱金属与碳烟相互作用的研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(2): 399-406. XIAO Zhenghang, TANG Yong, ZHUO Jiankun, *et al.* Study on Soot-sodium Interaction in the Initial Stage During Pulverized Coal Combustion[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(2): 399-406.
- [15] MA Peng, HUANG Qian, GAO Qi, *et al.* Effects of Na and Fe on the Formation of Coal-derived Soot in a Two-stage Flat-flame Burner[J]. *Fuel*, 2020, 265: Article 116914.
- [16] DONG Heming, DU Qian, LI Dun, *et al.* Impact of Sodium on the Formation Mechanism and Physicochemical Properties of Coal-derived Soot[J]. *Energy and Fuels*, 2020, 34(2): 1453-1466.
- [17] MICHELSEN H A, SCHULZ C, SMALLWOOD G J, *et al.* Laser-induced Incandescence: Particulate Diagnostics for Combustion, Atmospheric, and Industrial Applications[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 51: 2-48.
- [18] HAYASHI Jun, NOZOMU Hashimoto, NORIAKI Nakatsuka, *et al.* Soot Formation Characteristics in a Lab-scale Turbulent Pulverized Coal Flame with Simultaneous Planar Measurements of Laser Induced Incandescence of Soot and Mie Scattering of Pulverized Coal[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34: 2435-2443.
- [19] XU Kailong, ZHANG Hai, SHEN Wenfeng, *et al.* Soot Formation and Distribution in Coal Jet Flames over a Broad Range of Coal Concentration[J]. *Energy and Fuels*, 2020, 34: 7545-7553.
- [20] YE Yuan, LI Shuiqing, LI Gengda, *et al.* The Transition of Heterogeneous-homogeneous Ignitions of Dispersed Coal Particle Streams[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(9): 2458-2468.
- [21] 高 琦, 李水清, ZABRODIEC Diego, *et al.* 燃煤初期碳烟生成的激光诱导白炽光 LII 诊断研究[J]. *工程热物理学报*, 2019,

40(6):1433-1438.

GAO Qi, LI Shuiqing, ZABRODIEC Diego, *et al.* Laser-induced Incandescence (LII) Diagnostics on the Soot Formation in the Early Stage of Pulverized Coal Combustion[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(6):1433-1438.

## Laser-induced Incandescence (LII) Diagnostics on Sodium-soot Interaction in Early Stage of Pulverized Coal Combustion

MA Peng<sup>1</sup> HUANG Qian<sup>1</sup> YAN Heng<sup>1</sup> JI Renshan<sup>1,2</sup> LI Shuiqing<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China*; 2. *China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, 100013 Beijing, China*)

**ABSTRACT** The soot generated during the combustion of pulverized coal has a significant impact on the radiative heat transfer inside furnace. Besides, after entering the environment with the flue gas, soot can enhance the greenhouse effect and endanger human health. To investigate the effect of the volatile sodium contained in coal on soot formation, in this work, a novel two-stage flat-flame burner was used and a series of coal samples with different Na content were studied. Laser-induced incandescence was applied to detect the soot spatial distribution for different coal samples, including the demineralized coal and the coal containing specific content of Na. In addition, the scanning electromobility particle sizer was utilized to measure the number concentration distribution of fine particles generated in the pyrolysis stage. The results show that soot is mainly generated in the pyrolysis stage during the combustion of pulverized coal. The soot signal intensity reaches a peak after about 31 ms, and then decreases. The residence time of pulverized coal particles corresponding to the peak value of soot signal is approximately the same as the characteristic time of pulverized coal ignition, which is defined by 10% of the maximum flame signal intensity. It indicates that the generation and oxidation of soot is closely related to the ignition process of pulverized coal. Both the optical measurement results of soot and the sampling results of particulate matter show that with the increase of Na content in the coal samples (0-0.641%), the amount of soot increases significantly, while the ignition of pulverized coal is almost unaffected. This phenomenon indicates that the loading of Na element can promote the generation of coal-derived soot in early stage.

**KEYWORDS** pulverized coal combustion, soot, sodium, laser-induced incandescence (LII), particle sampling

(责任编辑 刘改换)