

基于光学诊断技术的单颗粒煤着火及碱金属辐射特性

李金云^{1,2}, 谢非^{1,2}, 宋旭东^{1,2}, 白永辉^{1,2}, 吕鹏^{1,2}, 王焦飞^{1,2}, 苏曙光^{1,2}, 于广锁^{1,2,3}

(1. 宁夏大学 省部共建煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 化学化工学院, 宁夏 银川 750021; 3. 华东理工大学 洁净煤技术研究所, 上海 200237)

摘要: 煤着火特性研究是实现煤高效和清洁利用的理论基础, 煤中所含的 K 和 Na 等碱金属在燃烧过程中释放到气相中并进入系统容易引起反应器高温腐蚀、受热面结垢和炉内结渣等问题。单颗粒煤燃烧形式简单, 其相关研究结果可以更好地揭示煤着火特性。基于单颗粒煤着火检测平台, 探究了不同氧气体积流量下单颗粒羊场湾 (YCW) 烟煤和淖毛湖 (NMH) 褐煤燃烧过程中着火特性及碱金属 Na*、K* 辐射特性。利用高速摄像技术捕捉单颗粒煤着火过程中火焰演变过程, 结合高光谱成像技术测定火焰中碱金属 Na* 和 K* 自发辐射光谱, 获得碱金属的空间释放行为。结果表明: 不同煤种着火过程不同, YCW 煤颗粒挥发分燃烧过程中形成包络型火焰, NMH 煤则由于挥发分高, 着火反应比较剧烈, 未出现包络现象, 且整个着火过程中火焰亮度比 YCW 煤强。氧气增加对煤颗粒着火具有促进作用, 随着氧气体积流量增加, YCW 煤和 NMH 煤着火延迟时间减小, 且 NMH 煤着火延迟时间小于 YCW 煤。着火产生时火焰亮度最亮, 火焰外形相对平缓稳定。单颗粒 YCW 煤和 NMH 煤着火燃烧过程中碱金属 Na*、K* 辐射特性在煤颗粒着火后的挥发分反应过程和焦炭燃烧过程中不同, 其中, 挥发分反应过程 Na* 和 K* 辐射强度最强, Na* 在挥发分反应过程和焦炭反应过程中分别存在释放峰, 但 K* 辐射强度在挥发分反应过程和焦炭燃烧过程并未出现明显的释放峰。当氧气增加, YCW 煤和 NMH 煤碱金属释放时间逐渐提前, 且 NMH 煤碱金属辐射开始时间小于 YCW 煤。另外, 就单颗粒煤着火过程分析得出, 燃烧火焰外围位置比中心位置碱金属 Na* 和 K* 释放强度更强。

关键词: 单颗粒煤燃烧; 火焰图像; 碱金属辐射特性; 光学诊断

中图分类号: TQ545

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2023)04-1727-09

Single-particle coal ignition and alkali metal radiation characteristics based on optical diagnosis technology

LI Jinyun^{1,2}, XIE Fei^{1,2}, SONG Xudong^{1,2}, BAI Yonghui^{1,2}, LÜ Peng^{1,2},
WANG Jiaofei^{1,2}, SU Weiguang^{1,2}, YU Guangsu^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of High-efficiency Utilization of Coal and Green Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Institute of Clean Coal Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Study on the ignition characteristics of coal is the theoretical basis for realizing the high-efficient and clean utilization of coal. The alkali metals such as K and Na in coal are released into the gas phase during combustion and enter the

收稿日期: 2022-04-28 修回日期: 2022-08-22 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0607

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (22108132, 22008126); 宁夏重点研发计划资助项目 (2019BCH01001)

作者简介: 李金云 (1997—), 女, 宁夏中卫人, 硕士研究生。E-mail: ljj18152459296@163.com

通讯作者: 宋旭东 (1988—), 男, 山东泰安人, 副研究员, 博士。E-mail: xsong@nxu.edu.cn

引用格式: 李金云, 谢非, 宋旭东, 等. 基于光学诊断技术的单颗粒煤着火及碱金属辐射特性[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1727-1735.

LI Jinyun, XIE Fei, SONG Xudong, et al. Single-particle coal ignition and alkali metal radiation characteristics based on optical diagnosis technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1727-1735.



移动阅读

system, which can easily cause high temperature corrosion of the reactor, fouling of the heating surface and slagging in the furnace. Based on the single-particle coal ignition detection platform, the ignition and alkali metal Na* and K* radiation characteristics of single-particle Yangchangwan (YCW) bituminous coal and Naomaohu (NMH) lignite during combustion were investigated under different oxygen volume flow rates. High-speed camera technology was used to capture the flame evolution process during single-particle coal ignition, and hyperspectral imaging technology was used to measure the spontaneous emission spectra of alkali metals Na* and K* in the flame to obtain the spatial release behavior of alkali metals. The results show that the ignition process of different types of coal is different. The enveloping flame is formed in the combustion process of volatile matter in the YCW coal particles, while the ignition reaction of the NMH coal is more intense without enveloping phenomenon due to its high volatile matter content, and the flame brightness in the whole ignition process is stronger than that of the YCW coal. The increase of oxygen can promote the ignition of coal particles, with the increase of oxygen volume flow, the ignition delay time of the YCW coal and the NMH coal decreases, and the ignition delay time of the NMH coal is smaller than that of the YCW coal. When the fire occurs, the flame brightness is the brightest, and the flame shape is relatively smooth and stable. The radiation characteristics of alkali metals Na* and K* in single-particle YCW coal and NMH coal during ignition and combustion are different from that in coke combustion process, in which the radiation intensity of Na* and K* is the strongest. Na* has a release peak both in the volatile reaction process and coke reaction process, but K* radiation intensity does not have an obvious release peak in the volatile reaction process and coke combustion process. When oxygen content increases, the release time of alkali metals from the YCW coal and the NMH coal is gradually advanced, and the beginning time of alkali metal radiation from the NMH coal is less than that from the YCW coal. In addition, the analysis of the ignition process of single-particle coal shows that the release intensity of alkali metals Na* and K* in the peripheral position of the combustion flame is stronger than that in the central position.

Key words: single particle coal combustion; flame image; radiation characteristics of alkali metal; optical diagnosis

目前,煤炭仍然是我国主要能源之一^[1-2]。以煤炭为主要燃料来源的现象将持续较长的时间。随着碳减排、碳中和政策的提出,煤炭利用迎来诸多挑战。如何提高煤炭的高效清洁转化和降低煤炭利用中产生的污染物是急需解决的问题^[3-5]。煤的燃烧特性是反映煤高效清洁利用的关键因素^[6]。煤燃烧过程中周围环境温度、气氛、煤颗粒着火延迟时间及煤颗粒燃烧过程中碱金属辐射特性都是煤燃烧过程中重要指标。煤燃烧过程会释放碱金属,导致锅炉传热表面快速积灰,进而影响传热效率,危害燃煤锅炉的安全运行^[7-8]。因此,了解碱金属的辐射特性,可为煤清洁燃烧提供依据,对减少碱金属的危害具有重要意义。

之前研究中,探究煤颗粒燃烧特性主要是利用热重分析法和采样分析法。热重分析法主要通过热重曲线对煤的热解和燃烧过程进行分析得到热解速率、燃尽速率、着火温度等燃烧特性^[9-12]。采样分析通过对煤样燃烧前后碱金属含量和形态进行测定,最终推断出碱金属的存在形态,但无法直接得到煤颗粒燃烧过程中碱金属释放行为。随着测量技术及分析方法的提高,光学诊断是一种非接触式、瞬时、高效的技术,可以用来研究煤燃烧特性及光谱辐射特性。邹高鹏^[13]、SHADD 等^[14-16]则通过采集煤粉着火燃烧过程

释放的活性基团(OH*、CH*)强度来判断着火点的位置。除此之外,LEE 等^[17]使用高速摄像对单颗粒煤的着火过程进行连续捕捉,通过煤粉颗粒图像的实际尺寸、形貌和煤粉颗粒的运动速度,判断着火点。KIM 等^[18]利用高速成像技术研究了不同粒径的无烟煤中挥发性沥青、高挥发性沥青、次烟煤和褐煤在燃烧器中的高温着火行为。RAUL 等^[19]采用高速高分辨率成像技术获取煤粉颗粒在一氧化氮、空气和二氧化碳等不同气氛中的着火特性和着火延迟。许多学者也围绕着单颗粒煤着火燃烧过程中的碱金属释放特性开展了研究。HE 等^[20]采用激光诱导击穿光谱技术(LIBS)定量研究了煤在 O₂/CO₂ 气氛中的燃烧过程,并对比研究了不同阶段(脱挥发分阶段、炭化阶段、灰分阶段)O₂/CO₂ 气氛对煤燃烧和碱金属释放的影响。张哲梓等^[21]采用高速相机结合短波红外相机,利用钠的赋存形态,研究了准东褐煤(ZDL)的时间分辨着火和燃烧特性,确定着火机理、着火时间、燃尽时间和燃烧速率。YE^[22]利用低强度技术测量了平焰燃烧器点燃准东煤粉燃烧过程中钠释放量的变化,研究了气氛和燃烧温度对钠释放量的影响。董梅荣等^[23]研究了添加不同形式钾的单个煤颗粒在燃烧过程中的着火特性和碱金属(钠和钾)的释放行为,更深入地探究煤

颗粒中碱金属存在的形态及燃烧特性。目前大多数学者对单颗粒煤着火特性和碱金属辐射特性进行了研究,但着火延迟时间的变化与碱金属辐射特性联系较少。笔者主要探究单个煤颗粒碱金属光谱辐射特性与煤颗粒的不同着火过程的关系,获取着火燃烧过程中煤颗粒火焰演变过程。

笔者利用高速相机结合高光谱相机探究不同实验条件下单颗粒煤着火燃烧过程中煤粒着火特性及碱金属 Na*和 K*自发辐射光谱,获得碱金属的空间释放行为。分析单颗粒煤在纯氧气氛中从着火到燃尽过程中颗粒的形貌、尺寸及火焰变化。同时对燃烧过程中碱金属实时释放进行讨论,为燃煤设备的设计与改进提供参考。

1 实 验

1.1 实验装置及方法

图1为实验室搭建的单颗粒煤着火特性实验系统,主要包括单颗粒煤燃烧系统和光学诊断系统。在单颗粒煤燃烧系统中,喷嘴射流火焰为加热源,将单个煤颗粒置于插入透明石英玻璃管壁的钢丝网上,火焰对单颗粒煤加热,使煤表面达到着火温度,此时煤粒开始着火燃烧,且透明石英方管罩在喷嘴上方,隔绝了外界空气的影响。当煤开始着火燃烧时,关闭甲烷控制器,之后煤在氧气气氛中燃烧至燃尽。光学诊断系统由高速相机系统和高光谱成像系统组成,高速相机系统是利用高速相机对单颗粒煤燃烧火焰形态拍摄记录,高速相机配合 AF Zoom-Nikkor 28~85 mm f/2.8-4D 倾斜镜头,以 3 600 fps 的快门速度捕捉图像,

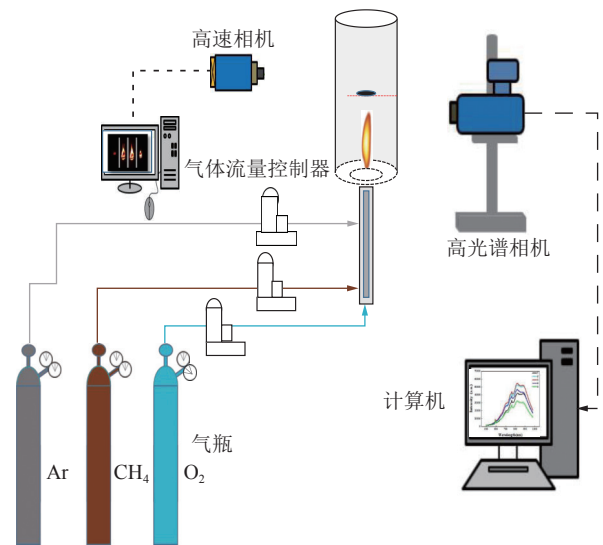


图1 单颗粒煤着火特性实验研究装置系统

Fig.1 System diagram of experimental research device for ignition characteristics of single-particle coal

其分辨率为 693×425;高光谱相机系统包括线阵 EM-CCD 高光谱相机(五铃光学)和 Nikon 镜头,高光谱相机光谱检测范围为 400~1 000 nm,光谱分辨率 2.73 nm,图像分辨率为 1 004×1 002,采样时间为 5 ms,图像像素尺寸为 0.150 602 mm/pixel。用同步信号发生器控制 2 个相机同时拍摄。

1.2 煤 样

为了探究单颗粒褐煤、烟煤燃烧过程中着火特性及碱金属 Na、K 光谱辐射特性,筛选挥发分含量和碱金属含量不同、粒径为 3 mm 的 YCW 烟煤和 NMH 褐煤,对 2 种原煤以空干基进行工业分析和元素分析,结果见表1。煤中碱金属质量分数见表2。

表1 煤种的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal types

煤种	工业分析/%			元素分析/%				
	V_d	FC_d	A_d	C_d	H_d	N_d	O_d^*	S_d
YCW	26.64	56.81	16.55	64.42	3.63	0.67	13.59	1.14
NMH	46.50	26.24	34.53	35.95	4.02	0.91	23.59	0.99

注: *表示差值计算。

表2 煤中碱金属质量分数

Table 2 Alkali metal content in coal

煤种	$w(K)$	$w(Na)$	$w(Ca)$	$w(Mg)$
YCW	0.49	0.23	1.08	1.20
NMH	1.10	0.66	0.05	0.02

1.3 实验工况

煤颗粒着火燃烧实验工况见表3,实验中喷嘴射

流甲烷火焰为加热源,不同实验工况下,只改变氧气体积流量 $V(O_2)$ 即氧气流速 $u(O_2)$ 不变,甲烷体积流量 $V(CH_4)$ 为 0.30 L/min 即流速 $u(CH_4)$ 为 0.06 m/s 保持不变。

2 结果与分析

2.1 煤颗粒着火图像

图2为高速相机捕获不同 $V(O_2)$ 下,YCW 煤和

表 3 煤颗粒着火燃烧实验条件
Table 3 Experimental conditions for ignition and combustion of coal particles

实验工况	$V(\text{CH}_4)/$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	$u(\text{CH}_4)/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$V(\text{O}_2)/$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	$u(\text{O}_2)/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0.30	0.06	0.30	0.04
2			0.35	0.05
3			0.40	0.06
4			0.45	0.07
5			0.50	0.08
6			0.55	0.09
7			0.60	0.10

NMH 煤着火火焰图像,其中 0 s 为颗粒开始预热时间。由图 2(a)可知,当 $V(\text{O}_2)$ 为 0.4 L/min 时,随着反应时间的进行,煤颗粒首先处于阴燃状态,表面呈现暗红

色。随着颗粒表面温度逐渐升高,颗粒内挥发分受热后释放并与氧化剂反应形成亮红色包络型挥发分火焰,但颗粒中心区域依然较暗,该过程属于挥发分燃烧阶段。在反应时间为 10 s,火焰尺寸开始变小,火焰亮度变暗,最终火焰面缩小至煤颗粒表面,火焰又逐渐变亮,该过程是煤焦反应阶段。特别地,在煤焦燃烧过程中,火焰主要呈现亮白色,且颗粒中心位置处的亮度最强,这与挥发分火焰的现象存在区别。着火延迟现象是指燃料与空气混合物在其温度高于燃料着火温度的情况下并不立即着火燃烧的一种现象,而着火延迟时间是反映着火延迟现象的参数,因此,着火延迟时间为单个煤颗粒从预热时刻起到着火发生时刻的时间间隔,本文根据高速相机记录煤颗粒的彩色图像标定计算。当 $V(\text{O}_2)$ 为 0.4 L/min 时,YCW 煤着火延迟时间为 2.5 s,着火延迟时间为从煤颗粒置于

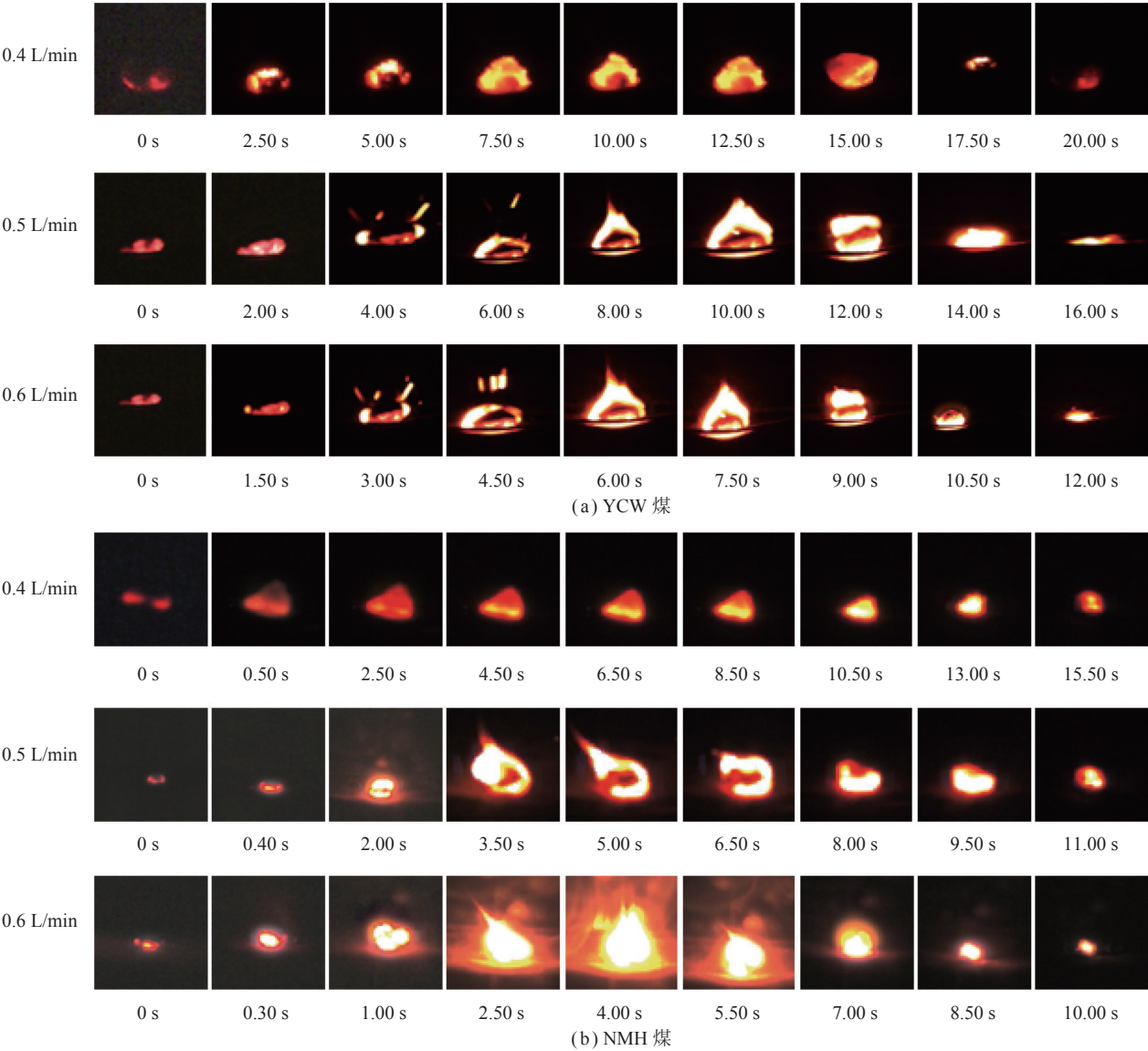


图 2 不同氧气体积流量下煤着火火焰图像

Fig.2 Images of bituminous coal ignition flames at different oxygen flow

钢丝网至快速燃烧时刻为着火延迟时间^[24-25]。当 $V(\text{O}_2)$ 从 0.4 L/min 增加至 0.6 L/min 时, 煤颗粒表面有喷射现象, 挥发分释放燃烧过程中包络火焰现象更加清晰, 且在煤焦燃烧过程中火焰呈现亮白色程度更强。这说明 $V(\text{O}_2)$ 增加对于煤颗粒着火具有促进作用。

如图2(b)所示, NMH 煤着火现象与图2(a)的 YCW 不同。挥发分燃烧阶段中煤颗粒处于阴燃的时间很短, 单颗粒煤逐渐变成暗红色, 整个煤颗粒形成一团火焰, 这表明此时煤颗粒释放的挥发分与氧化剂反应开始反应, 且火焰的尺寸逐渐的增大, 整个着火燃烧过程中并没有出现火焰包络现象, 火焰亮度相比 YCW 煤强。当 $V(\text{O}_2)$ 从 0.4 L/min 增加至 0.6 L/min 时, NMH 煤着火延迟时间依次从 0.5 s 缩短至 0.3 s。此外, 同一氧气体积流量, NMH 煤和 YCW 煤火焰亮度, 尺寸有所不同, 这主要是由于 NMH 煤相比 YCW 煤挥发分含量相差大, 影响煤颗粒的燃烧。

图3为 YCW 煤和 NMH 煤在不同氧气体积流量下着火延迟时间变化。由图3可知, 相同的 $V(\text{O}_2)$ 下, NMH 煤相比于 YCW 煤对应着火延迟时间短, 这是因为煤阶较高的煤挥发分含量较少, 使得其着火更加困难, 而挥发分含量越高, 煤颗粒着火挥发分先释放, 着火延迟时间缩短。并且当 $V(\text{O}_2)$ 从 0.3 L/min 增加至 0.6 L/min 时, 对应 YCW 煤着火延迟时间从 4.8 s 缩短至 1.5 s, NMH 煤着火延迟时间依次从 0.6 s 缩短至 0.3 s, 主要原因是 $V(\text{O}_2)$ 增加对于煤颗粒着火具有促进作用。另外, $V(\text{O}_2)$ 在 0.4 L/min 之前, 随着氧气流速增加, YCW 煤着火延迟时间快速减少, 在低氧流速下, 氧气流速是影响 YCW 煤着火延迟时间主要因素。而 $V(\text{O}_2)$ 在 0.4 L/min 之后, 随着氧气流速增加, YCW

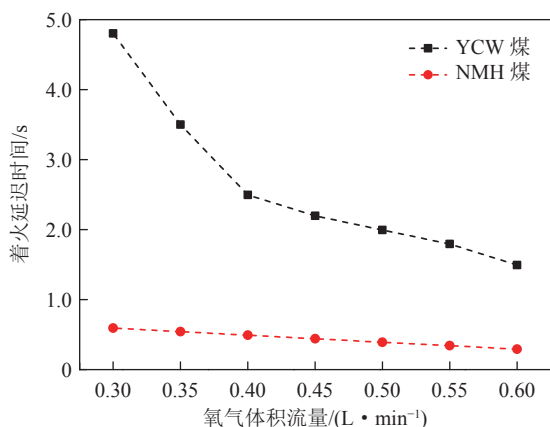


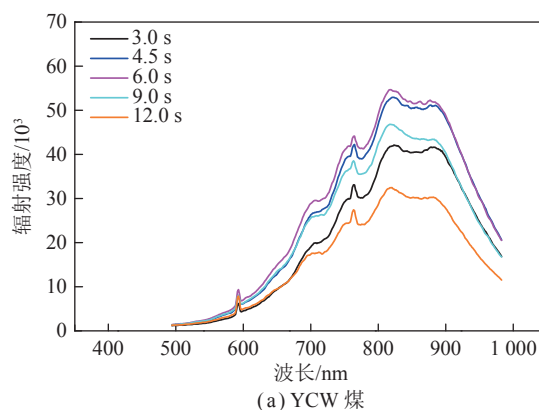
图3 不同氧气体积流量下着火延迟时间变化

Fig.3 Variation of ignition delay time under different oxygen volume flow

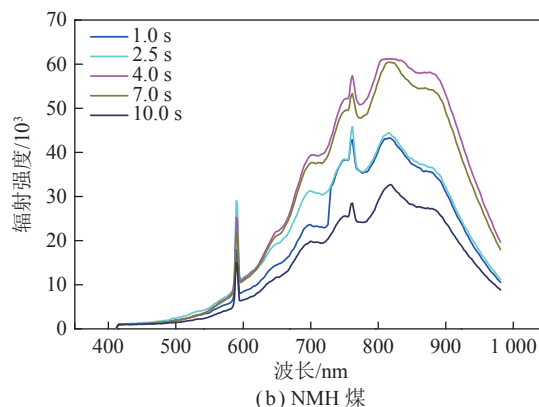
煤着火延迟时间缓慢减少, 在高氧流速下, 氧气流速增加对着火延迟时间减少不是主要因素。相比 YCW 煤, NMH 煤着火延迟时间减少的趋势逐渐平缓, 主要由于 NMH 煤挥发分含量高, 着火点比 YCW 煤低, 其容易着火。

2.2 煤颗粒碱金属辐射特性

图4为 $V(\text{O}_2)$ 为 0.6 L/min 时高光谱相机拍摄 YCW 煤和 NMH 煤着火燃烧过程碱金属 Na*、K* 辐射强度信息。Na*、K* 辐射强度在着火燃烧过程分别在 589 nm 和 766 nm 波段出现特征峰。由图4(a)可知, 燃烧时间在 3 和 6 s 时, YCW 煤 Na*、K* 释放峰增强, 其中 6 s 时 Na*、K* 释放峰最强。表明 YCW 煤颗粒着火燃烧过程碱金属 Na* 和 K* 光谱辐射强度变化主要是在煤颗粒挥发分反应过程和焦炭反应过程。图4(b)为 NMH 煤颗粒着火燃烧过程 Na*、K* 辐射强度信息。NMH 煤颗粒着火燃烧过程碱金属 Na* 和 K* 光谱辐射强度变化主要也是在煤颗粒挥发分反应过程和焦炭反应过程, 但相比于 YCW 煤, NMH 煤颗粒着火燃烧整个过程中在 589 nm 处 Na* 峰值强度和在 766 nm 处 K* 强度明显强于 YCW 煤, 主要是 NMH 煤 Na 和 K 含量高于 YCW 煤, 这与图2中 NMH 煤



(a) YCW 煤



(b) NMH 煤

图4 煤颗粒着火燃烧过程碱金属辐射特性

Fig.4 Alkali metal radiation characteristics during ignition and combustion of coal particles

火焰亮度很强且燃烧剧烈是一致的。

图 5 为单颗粒 YCW 煤在不同氧气体积流量下碱金属辐射强度随时间变化, 由于煤中碱金属分布不均, 随着反应进行, 碱金属释放出现起伏, 但其整体趋势变化是一致的。由图 5(a) 可知, 在 $V(\text{O}_2)$ 为 0.4 L/min 时, Na^* 辐射强度在 4~9 s 内逐渐增强, 出现一个 Na^* 释放峰, 此过程煤颗粒着火燃烧挥发分最大限度释放, 与图 2 燃烧过程一致。而在 12~17 s 内又再次出现 Na^* 释放峰。 Na^* 的二次释放峰说明存于煤颗粒内的碱金属随着煤颗粒的燃烧逐渐释放。由图 5(a) 还可知, 对于 YCW 煤颗粒, 随着 $V(\text{O}_2)$ 从 0.4 L/min 增加至 0.6 L/min, Na^* 首次释放峰出现时间从 9 s 提前至 5 s, Na^* 二次释放峰出现时间从 15 s 提前至 7 s。说明随着氧气体积流量增加, YCW 煤碱金属释放时间逐渐提前。图 5(b) 为 YCW 煤颗粒在不同氧气体积流量下 K^* 辐射强度随时间变化, 由图 5(b)

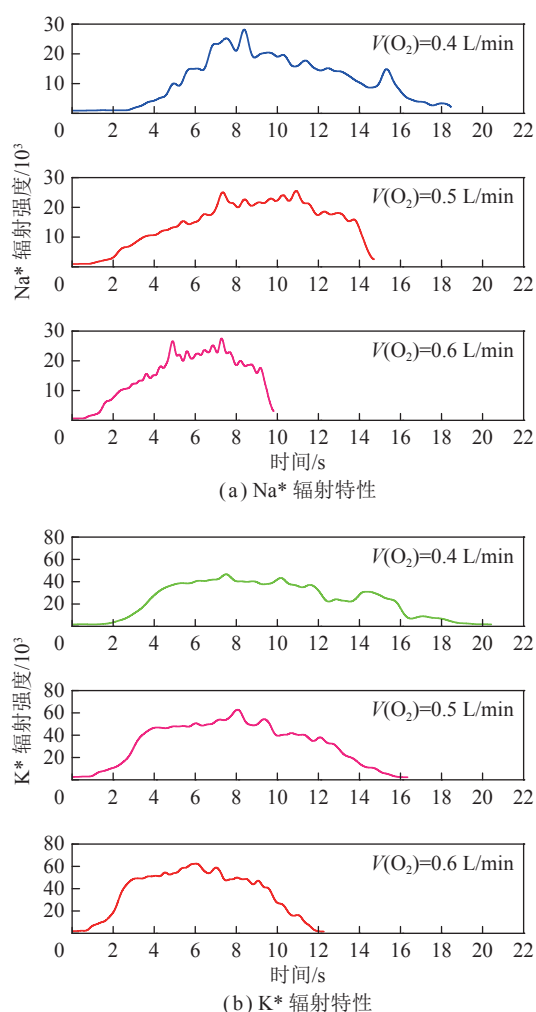


图 5 YCW 煤在不同氧气体积流量碱金属辐射强度随时间变化

Fig.5 Variation of alkali metal radiation intensity of YCW coal with time at different oxygen volume flow

可知, 在不同 $V(\text{O}_2)$ 下, K^* 辐射强度随着时间增加均是先增强后减弱再增加后减弱的过程, 相比 Na^* 辐射强度, K^* 辐射强度在挥发分过程和焦炭燃烧过程并未出现明显的释放峰。主要是 Na^* 、 K^* 在煤焦颗粒存在形式不同。 Na 挥发释放主要在 2 个过程, 即挥发分析出过程、焦炭燃烧过程。挥发分析出过程中 Na 主要以水溶性存在, 在煤颗粒着火燃烧脱水过程中会被带至颗粒表面并以 NaCl 形式释放出来^[26]。而在焦炭燃烧过程中可挥发 Na 在释放出来后可与 (铝) 硅酸盐 (包括 SiO_2) 反应从而转化成不可挥发的形式, 其中温度是影响 Na 与 (铝) 硅酸盐反应过程的重要因素^[27-28]。 K 一般有 2 种存在形式, 一是硅铝酸盐形式, 二是连接在黏土表面的非晶体形式。大多数研究表明煤中的 K 主要是以硅铝酸盐形式存在的, 在高温环境下仍然有一部分 K 先从硅铝酸盐内部向颗粒表面扩散, 进而从表面气化, 释放到气相中。因此在整个过程中能检测到较强的 K^* 辐射信号。当 $V(\text{O}_2)$ 增加时, Na^* 和 K^* 释放时间减少, 主要是氧气流量增加促进了燃烧反应, 煤颗粒温度升高影响了碱金属释放。

图 6 为单颗粒 YCW 煤和 NMH 煤着火燃烧过程 Na^* 辐射强度随时间变化, 由图 6 可知, NMH 煤 0.8 s

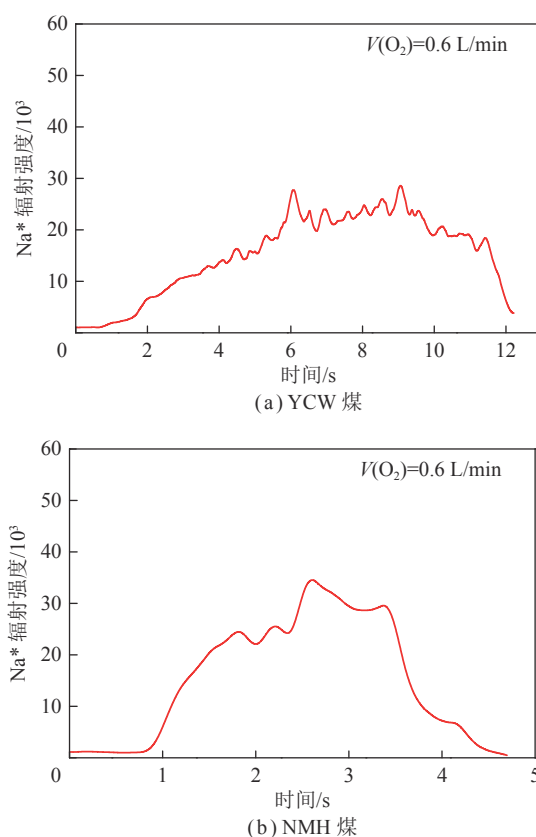


图 6 Na^* 辐射强度随时间变化

Fig.6 Variation of Na^* radiation intensity with time

开始释放而 YCW 煤在 1.8 s 开始释放, NMH 煤 Na* 光谱辐射开始时间少于 YCW 煤。因为 NMH 煤挥发分高, 挥发分先开始燃烧释放, 导致煤颗粒表面温度快速升温, 有利于 Na* 光谱辐射。所以从侧面 YCW 煤 NMH 煤 Na* 辐射强度释放时间表征不同煤种着火延迟时间变化。

图 7 为单颗粒 YCW 煤和 NMH 煤着火燃烧过程

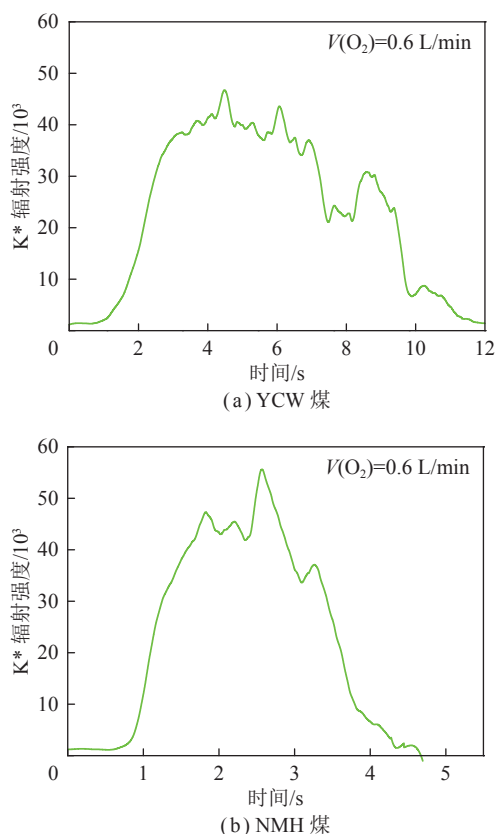


图 7 K*辐射强度随时间变化

Fig.7 Variation of K* radiation intensity with time

K*辐射强度随时间变化。由图 7(b)可知, NMH 煤 K*光谱辐射开始时间少于图 7(a)的 YCW 煤, 由表 1 可知, 因为 NMH 煤挥发分含量高, 挥发分先开始燃烧释放, 导致煤颗粒表面温度快速升温, 有利于 K*光谱辐射。但 YCW 煤与 NMH 煤焦炭燃烧过程中 K*辐射强度不同, 图 7(b)中 NMH 煤在焦炭燃烧过程中 K*释放强度强于图 7(a)中 YCW 煤, 原因是碱金属在 2 种煤的燃烧过程中释放特性不仅与量有关, 而且与它们的化学形态有关。在释放过程中, 不同形态的物质经历不同的物理和化学转化过程, 导致释放出不同形态的碱金属。因此, NMH 褐煤和 YCW 烟煤 2 种煤着火燃烧过程碱金属释放特性区别较大, 此基础数据在燃煤设备应用中提供参考。

2.3 单颗粒煤火焰不同位置碱金属辐射特性

图 8 为单颗粒 YCW 煤着火燃烧火焰亮度最亮的火焰图像。标取火焰同一轴线不同的位置 1、2、3。1 处为火焰外层, 3 处为火焰中心处。高光谱相机同步检测火焰碱金属 Na*辐射强度, 选取单颗粒 YCW 煤在着火过程中 0.27 s 时的图像进行了 Na*释放分析, 图 9 为火焰不同位置 Na*辐射强度, 由图 9 可知, 火焰外层 1 处碱金属 Na*辐射强度最强, 外层 1 至火焰中心 3 依次减弱。因为在单颗粒煤的氧化阶段, 单颗粒煤首先从表面开始着火, 煤粒最外层温度高, 有利于挥发分热解, 挥发分释放快, 强度最强, 然后扩散到煤颗粒整体。主要因为火焰亮度最亮时, 煤颗粒表面温度最高, 碱金属释放强度受温度影响。煤颗粒火焰的同一高度时的不同位置碱金属释放强度不同, 进一步说明煤颗粒着火燃烧过程中碱金属释放强度时间快慢受挥发分含量的影响。

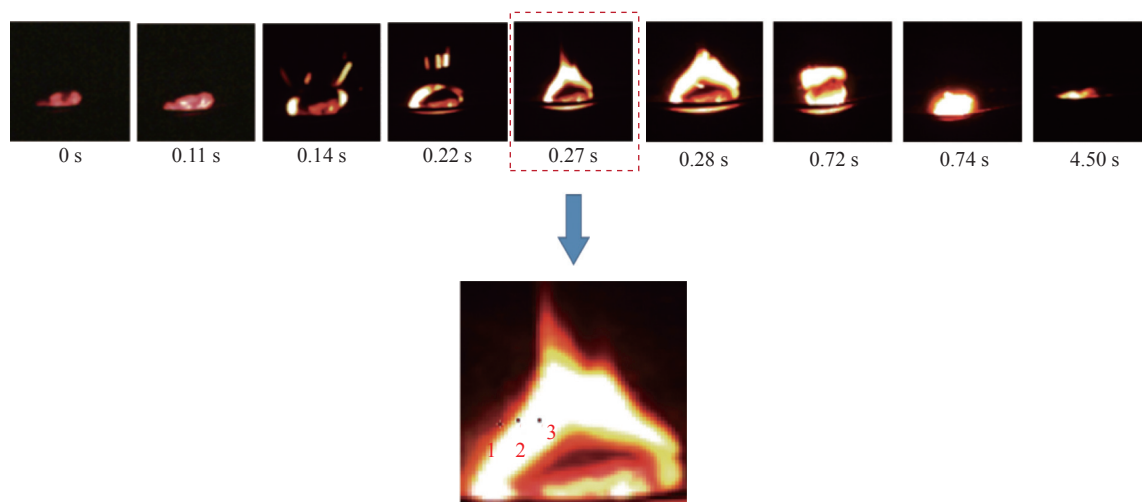


图 8 单颗粒 YCW 煤火焰

Fig.8 Single particle YCW coal flame

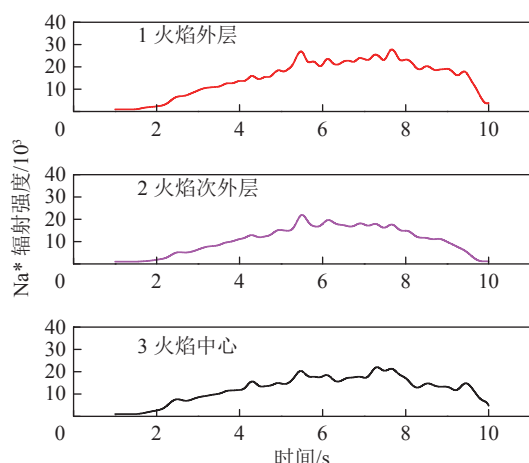


图9 火焰不同位置 Na*辐射强度

Fig.9 Na* radiation intensity at different positions of flame

3 结 论

(1) 不同煤种着火过程不同, YCW 煤颗粒挥发分燃烧过程中挥发分受热释放并与氧化剂反应形成包络型火焰, 但颗粒中心区域依然较暗。在煤焦反应阶段, 火焰尺寸开始变小, 火焰亮度变暗, 至火焰面缩小到煤颗粒表面, 火焰又逐渐变亮, 呈现亮白色, 且颗粒中心位置处的亮度最强。而 NMH 煤挥发分燃烧阶段中煤颗粒逐渐变成暗红色, 整个煤颗粒形成一团火焰, 且火焰尺寸逐渐增大, 整个着火燃烧过程中并未出现包络现象, 火焰亮度相比 YCW 煤强。

(2) $V(O_2)$ 增加对于煤颗粒着火具有促进作用, 当 $V(O_2)$ 从 0.3 L/min 增加至 0.6 L/min 时, YCW 煤着火延迟时间从 4.8 s 缩短至 1.5 s, 而 NMH 煤着火延迟时间从 0.6 s 缩短至 0.3 s。相同的 $V(O_2)$ 下, NMH 煤相比于 YCW 煤火焰着火延迟时间短, 这是因为煤阶较高的煤挥发分较少。

(3) 由于 Na*、K* 在煤焦颗粒存在形式不同, 相同的 $V(O_2)$ 下, YCW 煤和 NMH 煤颗粒着火燃烧过程中, 在挥发分反应过程中存在第 1 个 Na* 释放峰, 在焦炭过程中出现第 2 个 Na* 释放峰, 但 K* 辐射强度在挥发分反应过程和焦炭燃烧过程并未出现明显的释放峰。当 $V(O_2)$ 增加, YCW 煤和 NMH 煤碱金属释放时间逐渐提前, 且 NMH 煤碱金属辐射开始时间少于 YCW 煤。

(4) 高温影响煤颗粒燃烧过程中碱金属释放, 单颗粒煤着火过程火焰外层 Na* 释放强度最强。

参考文献(References):

[1] MUNAWER M. Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes[J]. Journal of Sustainable Mining, 2017, 17(2): 87–96.

[2] 刘峰, 曹文军, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 10–15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 10–15.

[3] 赵剑峰. 低碳经济视角下煤炭工业清洁利用分析及政策建议[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 514–518.
ZHAO Jianfeng. Analysis and policy recommendation on coal industry clean-using from the perspective of low-carbon economy[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 514–518.

[4] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187–1197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187–1197.

[5] ZHANG X S, SONG X D, WANG J F, et al. Physico-chemical structure evolution characteristics of coal char during gasification in the presence of iron-based waste catalyst[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2020, 7: 1–8.

[6] REN T, MARTIN K, PATEL. Basic petrochemicals from natural gas, coal and biomass: Energy use and CO₂ emissions[J]. Resources Conservation & Recycling, 2009, 53(9): 513–528.

[7] 赵明, 吕嗣晨. 浅析煤粉燃烧过程中污染物控制研究现状[J]. 能源与节能, 2020, 182(11): 86–88.
ZHAO Ming, LÜ Sichen. Analysis of research status of pollutant control in pulverized coal combustion[J]. Energy and Energy Conservation, 2020, 182(11): 86–88.

[8] LUO J Z, SHENG B X, SHI Q Q, et al. A review on the migration and transformation of heavy metals influence by alkali/alkaline earth metals during combustion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2020, 48(11): 1318–1326.

[9] TOMASZ H, NORBERT M. Development of prognostic tool for high-temperature corrosion risk assessment in pulverised coal boilers based on the waterwalls boundary layer monitoring system and CFD simulation[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 1833–1838.

[10] MUNIR S, DAOOD S S, NIMMO W, et al. Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(3): 1413–1418.

[11] NIU S L, HAN K B, LU C M, et al. Characteristic of coal combustion in oxygen/carbon dioxide atmosphere and nitric oxide release during this process[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(1): 532–537.

[12] SHAFIE S A, AL-ATTAB K A, ZAINAL Z A, et al. Effect of hydrothermal and vapothermal carbonization of wet biomass waste on bound moisture removal and combustion characteristics[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 139(5): 187–195.

[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: 49–77.
ZOU Gaopeng. Study on ignition and combustion characteristics of pulverized coal based on optical diagnostic portable flow reactor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 49–77.

- [14] MURPHY J J, SHADDIX C R. Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments[J]. *Combustion & Flame*, 2006, 144(4): 710–729.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] LEE H, CHOI S. An observation of combustion behavior of a single coal particle entrained into hot gas flow[J]. *Combustion & Flame*, 2015, 162(6): 2610–2620.
- [18] KIM R G, LI D, JEON C H, et al. Experimental investigation of ignition behavior for coal rank using a flat flame burner at a high heating rate[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2014, 54: 212–218.
- [19] RAUL H V, ALBERTO A, FRANCIACO G L, et al. Coal combustion in a 50 kW_{th} chemical looping combustion unit: seeking operating conditions to maximize CO₂ capture and combustion efficiency[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 50: 80–92.
- [20] HE Y, ZHU J, LI B, et al. In-situ measurement of sodium and potassium release during oxy-fuel combustion of lignite using laser-induced breakdown spectroscopy: Effects of O₂ and CO₂ concentration[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27: 1123–1130.
- [21] ZHANG Z Z, MING M, ZHU M, et al. Ignition and combustion characteristics of single particles of Zhundong lignite: Effect of water and acid washing[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 2139–2146.
- [22] YE Y. Optic diagnostics on pulverized coal particles combustion dynamics and alkali metal release behavior[M]. Germany: Springer Singapore, 2019: 89–105.
- [23] DONG M R, LUO F S, HUANG M, et al. Study on the ignition characteristics and alkali release of single coal particles with additional different forms of potassium[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 203: 106–385.
- [24] YANG W, ZHANG Y, HU L, et al. An experimental study on ignition of single coal particles at low oxygen concentrations [J]. *Frontiers in Energy*, 2020, 15(2–4): 1–8.
- [25] 刘冰, 詹扬, 张海, 等. 毫米级单颗粒煤粒富氧条件下着火特性实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(11): 3267–3274.
- LIU Bing, ZHAN Yang, ZHANG Hai, et al. Experimental study on ignition characteristics of millimeter single coal particle under oxygen enrichment[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2018, 38(11): 3267–3274.
- [26] 汉春利, 张军, 刘坤磊, 等. 煤中钠存在形式的研究[J]. *燃料化学学报*, 1999, 27(6): 95–98.
- HAN Chunli, ZHANG Jun, LIU Kunlei, et al. Study on the existing forms of sodium in coal[J]. *Journal of Fuel Chemistry*, 1999, 27(6): 95–98.
- [27] VAN E, ASHMAN P J, NATHAN G J, et al. Mechanism and kinetics of sodium release from brown coal char particles during combustion[J]. *Combustion & Flame*, 2011, 158(12): 2512–2523.
- [28] 张军, 汉春利. 煤中碱金属及其在燃烧中的行为[J]. *热能动力工程*, 1999, 14(2): 7–9.
- ZHANG Jun, HAN Chunli. Alkali metals in coal and their behavior in combustion[J]. *Thermal Power Engineering*, 1999, 14(2): 7–9.