

基于预热燃烧技术平台的神木烟煤预热段 有机硫变化研究

张嘉航^{1,2}, 朱建国^{1,2}

(1.中国科学院工程热物理研究所,北京 100190;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:煤炭是我国主要能源,然而煤炭燃烧释放的 SO_2 等污染物影响环境。煤中有机硫结构复杂、形式多样,研究相对困难,因此研究煤中有机硫转化特性可为燃煤 SO_2 污染物排放控制提供理论支撑。在 30 kW 预热燃烧试验平台上对神木烟煤开展了预热燃烧试验,试验过程中对于测量点进行固体取样,利用 X 射线光电子能谱技术(XPS)和 X 射线衍射(XRD)对神木烟煤及预热半焦中的有机硫进行分析。结果表明:神木烟煤中有机硫的主要形态可分为 4 种:硫醇和硫醚(32.6%)、噻吩(16.0%)、亚砷(15.9%)和砷类(15.3%),无机硫有 CaSO_4 、 FeS_2 ;当循环流化床的预热温度达到 800 $^\circ\text{C}$ 以上时,预热半焦中硫形态及含量与原煤相比发生较大变化,表现为预热半焦中无机硫除原有种类外出现了 CaS ,预热半焦中的有机硫随着预热中空气当量比的增加分解程度加深,其中硫醇和硫醚因分解而减少最多,噻吩、亚砷类次之,砷类物质相对含量增大。砷类物质相对含量增大的原因一方面与其他有机硫形态分解有关,另一方面可能存在硫醇、硫醚等向砷类物质的转化。

关键词:烟煤;预热燃烧;有机硫;析出转化

中图分类号:TQ534

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)04-0042-06

Study on organic sulfur variations in Shenmu bituminous coal preheating process based on preheating combustion technology platform

ZHANG Jiahang^{1,2}, ZHU Jianguo^{1,2}

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Coal is a major pillar of our national energy, however, the SO_2 and other pollutants released by coal combustion have caused serious damage to the environment. The organic sulfur in coal has a complex structure and diverse forms so that the research is relatively difficult. Therefore, the research on the conversion characteristics of organic sulfur in coal can provide theoretical support for the control of SO_2 pollutant emissions and achieve clean coal combustion. In order to study the conversion of organic sulfur forms in coal during the preheating process, a preheating combustion test of Shenmu bituminous coal was carried out on a 30 kW preheating combustion experiment platform. During the experiment, solid samples were taken at the measurement points, and X-ray photoelectron spectroscopy technology (XPS) and diffraction of X-rays (XRD) was used to analyze Shenmu bituminous coal and preheated semi-coke. The results show that the main forms of organic sulfur in Shenmu bituminous coal can be divided into four types: mercaptans and thioethers (32.6%), thiophenes (16.0%), sulfoxides (15.9%) and sulfones (15.3%). Inorganic sulfur includes CaSO_4 , FeS_2 . When the preheating temperature reaches above 800 $^\circ\text{C}$, the sulfur form and content in the preheated semi-coke change greatly compared with that in the raw coal. The inorganic sulfur in the preheated semi-coke has CaS in addition to the original types. The degree of decomposition of organic sulfur in preheated semi-coke increases with the increase in air equivalent ratio during preheating, among which mercaptans and sulfides are reduced the most due to decomposition, followed by thiophenes and sulfoxides, and the relative content of sulfones increases. The reason of the sulfones in-

收稿日期:2020-10-22;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CE20102202

基金项目:中国科学院战略先导科技专项资助项目(XDA21040100)

作者简介:张嘉航(1996—),女,河南许昌人,硕士研究生,研究方向为硫析出转化机制。E-mail: zhangjiahang@iet.cn。通讯

作者:朱建国,研究员,硕士生导师,研究方向为预热燃烧技术。E-mail: zhujianguo@iet.cn

引用格式:张嘉航,朱建国.基于预热燃烧技术平台的神木烟煤预热段有机硫变化研究[J].洁净煤技术,2021,27(4):42-47.

ZHANG Jiahang, ZHU Jianguo. Study on organic sulfur variations in Shenmu bituminous coal preheating process based on preheating combustion technology platform[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 42-47.



移动阅读

creasing is from two aspects, one is due to the discompose of other substance like mercaptans or thiophenes, and the other is due to the conversion from mercaptans to sulfones.

Key words: bituminous coal; preheating combustion; organic sulfur; transformation of precipitation

0 引言

我国是能源消耗大国,煤炭提供的能源占我国全部能源的58%,煤炭工业为我国经济发展提供了可靠的能源支撑。硫是煤中有害物质,煤燃烧释放的SO₂不仅污染环境,危害人类健康^[1],还会造成锅炉设备的腐蚀、结渣,影响锅炉安全使用^[2]。面对含硫气体带来的危害,国家提出了严格的治理要求,《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020)》^[3]中对燃煤SO₂排放量提出了低于35 mg/m³的要求。掌握煤中硫元素的转化规律,形成控制SO₂排放的有效手段,一直是研究和关注的焦点。

煤中硫可分为有机硫和无机硫两大类。无机硫主要以块状黄铁矿(FeS₂)和少量颗粒状的白铁矿(FeS₂)形式存在,此外还有可能存在少量的磁铁矿(Fe₃O₄)、闪锌矿(ZnS)、方铅矿(PbS)等^[4]。有机硫结构复杂、形态多样,是一系列含硫有机官能团的统称,主要分为2部分:一部分是可用有机溶剂抽提所得的含硫低分子化合物;另一部分是以C—S键结合在煤的基本结构单元(煤大分子骨架)上的有机硫^[5],其含硫官能团主要包括硫醇硫醚类(R—SH(R))、二硫醚,以及噻吩、砜类等^[6]。有机硫属于可燃硫,燃烧过程中,除了自身形态发生分解和变迁,各种形态硫之间也存在相互转化^[7]。Wang等^[8]利用Py-MS在CO₂气氛下进行了原煤和脱黄铁矿煤热解对比试验,发现500℃时原煤热解气检测到大量H₂S,而脱黄铁矿煤热解气H₂S含量极少,验证了硫元素从固相黄铁矿向气相的转化过程。Liu等^[9]通过煤粉低温热解研究发现,250℃左右,煤中脂肪类硫开始释放,350~450℃时芳香类硫开始释放,均转化为H₂S,因此可以将有机硫热解过程转化分成2个阶段:第1阶段是来自脂肪硫和芳香硫的S/HS转化,第2阶段是S和HS自由组合产生H₂S。燃烧气氛的改变对于硫元素释放速率有较大影响。李丽君等^[10]在水平炉中对比了O₂/N₂和O₂/CO₂气氛下的煤粉燃烧,发现O₂/CO₂气氛下SO₂的生成速率较快,且排放总量较低。王利花等^[11]对比了N₂和H₂气氛下煤中硫的热解释放气体,发现H₂气氛下硫元素的释放比例是N₂气氛下的2倍,这是由于温度高于500℃时,H₂可与煤中硫发生反应从而促进硫的进一步释放,而N₂气氛下煤中硫不能随

温度的升高发生反应。前人研究多利用Py-MS和管式炉并在煤粉固定状态下进行热解,分析其热解气体等转化规律,然而鲜见对于流态化煤粉自预热过程的研究。

煤粉高温预热燃烧技术^[12]是中科院工程热物理研究所吕清刚等提出的一种新型清洁燃烧技术,具有良好的煤种适应性、燃烧稳定性,以及较低的NO_x排放等优势。该技术在循环流化床中,将煤粉部分燃烧并预热到800℃以上,再进入下行燃烧室中燃烧^[13]。中科院工程热物理研究所循环流化床实验室对此技术已开展多年研究,包括煤粉预热改性机制、预热燃料燃烧特性和氮氧化物排放特性等^[14-15],实现了NO_x原始排放浓度直接低于50 mg/m³。

预热燃烧技术的研究虽然在氮元素转化上取得了创造性突破,但尚未开展硫元素析出转化相关研究,本文在此背景下采用预热燃烧技术,结合X射线光电子能谱技术(XPS)进行分析,针对预热过程煤中有机硫的赋存形态及转化特性进行研究,了解煤粉流态化预热燃烧过程硫元素的析出转化规律,为预热燃烧技术提供理论支撑。

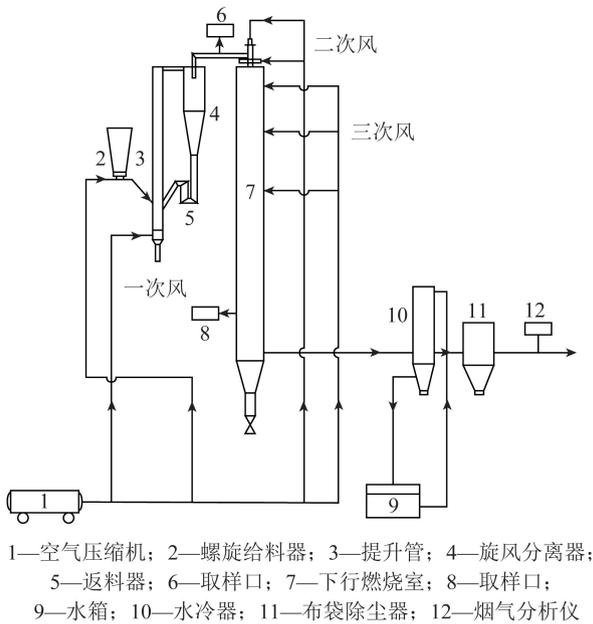
1 试验

1.1 试验系统

神木烟煤预热燃烧试验系统如图1所示。试验系统主要由3部分组成:循环流化床、下行燃烧室和辅助设备。循环流化床用于神木烟煤预热,由提升管、旋风分离器、下降管和返料器4部分组成。提升管直径80 mm,高1 500 mm。在距离布风板高度100、500、1 450 mm布置了3个(Ni—Cr/Ni—Si)热电偶,用于测量提升管底部、中部、顶部的温度。旋风分离器出口设有1个热电偶,可对预热燃料出口温度进行测量。运行过程中,一次风由提升管底部通入,保证燃料流化,燃料在提升管内与一次风发生部分燃烧和气化反应。预热到800℃以上的高温煤焦和高温煤气通过一根长500 mm、直径48 mm的水平管道通入下行燃烧室进行燃烧。水平管道上设有预热燃料取样口,可对预热半焦进行取样分析。

1.2 试验样品

试验所用燃料为神木烟煤,粒径为0~0.355 mm。其工业分析和元素分析见表1,粒径分布



1—空气压缩机; 2—螺旋给料器; 3—提升管; 4—旋风分离器;
5—返料器; 6—取样口; 7—下行燃烧室; 8—取样口;
9—水箱; 10—水冷器; 11—布袋除尘器; 12—烟气分析仪

图1 30 kW 煤粉预热燃烧试验系统

Fig.1 30 kW pulverized coal preheating combustion experiment system

表1 神木烟煤工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of Shenmu bituminous coal

工业分析/%				元素分析/%				
V_{ad}	A_{ad}	M_{ad}	FC_{ad}	C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	O_{daf}^*	S_{daf}
32.40	5.76	4.83	57.01	81.02	4.56	1.14	12.68	0.60

注: *表示 $O = 100 - C - H - N - S$

表2 试验工况

Table 2 Experimental conditions

项目	Case 1	Case 2	Case 3
粒径/mm	0~0.355	0~0.355	0~0.355
一次风量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	8.05	9.19	10.33
一次风当量比	0.48	0.55	0.63
二次风量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	8.05	6.85	5.96
二次风当量比	0.96	0.97	0.97
三次风量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	5.56	5.59	5.59
过剩空气系数	1.3	1.3	1.3

2 结果与分析

2.1 煤粉预热温度和预热前后灰样品 XRD 分析

循环流化床测点温度分布如图3所示。以提升管底部、中部、顶部3处的温度均值作为煤粉的预热温度,3个工况的预热温度分别为840、868、894℃,每个工况下循环流化床预热温度都高于800℃,预热温度均超过了燃料燃点,燃料燃烧状况稳定良好。随着循环流化床空气当量比的增加,预热温度升高,这主要是由于空气当量比增加,即通入循环流化床的空气量增加,氧化剂的加入增大了煤粉燃烧气化

如图2所示。神木烟煤 S_{daf} 含量为0.6%,属于低硫煤。

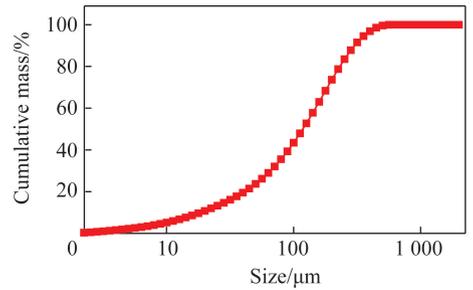


图2 神木烟煤粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of Shenmu bituminous coal

1.3 试验工况

本文试验目的是探究预热过程神木原煤和预热半焦中硫元素的存在形态及含量变化,以及当量比对硫元素转化的影响,采用控制变量的方式,试验工况见表2,并在预热取样口收集每个工况的高温预热燃料进行有机硫形态分析。

的份额,产生更多的热量来提高煤粉温度。预热前后燃料颗粒粒径变化如图4所示。可知预热过程使燃料粒径明显减小,小粒径的燃料更有利于后续燃

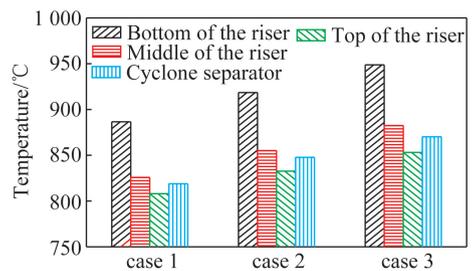


图3 循环流化床温度分布

Fig.3 Temperature distribution of circulating fluidized bed

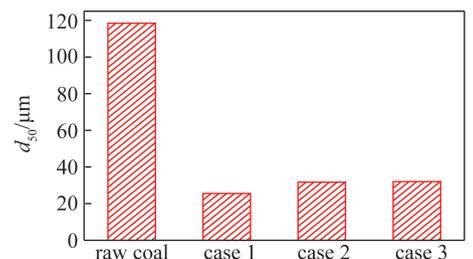
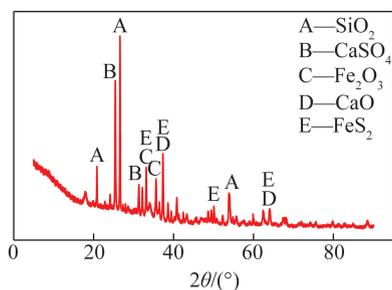


图4 神木烟煤和预热半焦粒径曲线

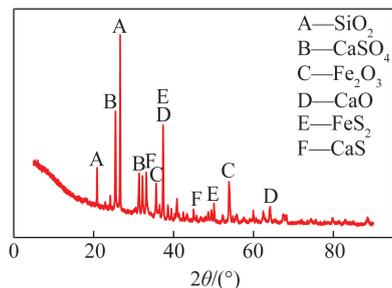
Fig.4 Particle size of Shenmu bituminous coal and preheated semi-coke

烧过程进行,提高了燃料的燃烧效率。随着当量比增大,预热半焦的粒径基本不变。

神木烟煤和预热半焦中矿物质 XRD 分析图谱如图 5 所示,为避免碳元素对检测结果的影响,对样



(a) 经过灰化处理后的神木烟煤



(b) 经过灰化处理后的预热半焦

图 5 样品 XRD 分析图谱

Fig.5 XRD analysis of Sample

品进行缓慢灰化的前处理,经过缓慢灰化的样品中不含碳元素,减少了对矿物质峰的影响。由图 5 可知,神木烟煤中存在 CaSO_4 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 FeS_2 等无机化合物,对比 2 个样品发现,半焦中可以检测到 CaS ,这是由于煤粉在预热阶段处于还原性气氛下,该过程中燃料释放的 H_2S 或 SO_2 会与自身的 CaO 反应,产生固硫作用,以 CaS 形式保存在固体燃料中。

2.2 预热过程硫元素形态转化规律

利用 X 射线光电子能谱技术 (XPS) 对神木烟煤和预热半焦进行硫元素的形态分析。XPS 是一种高效、快速的检测手段,因其对煤结构无损伤的特点被广泛使用^[16]。根据 XPS 原理,硫的 2p 层电子受到 X 射线激发会呈现不同的峰值图谱,基于峰对应的结合能位置,利用 $2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$ 双峰进行拟合,确定硫的存在形态。结合相关文献[17-19],在 248.8 eV 处对 $\text{C}1s$ 进行校准,采用结合能来表示样品中硫的形态,设定结合能数据为:162.8~163.5 eV 对应硫醇、硫醚类 (S1) 物质,164.0~164.4 eV 对应噻吩类 (S2) 物质,165~167 eV 对应亚砷 (S3),167.4~168.3 eV 对应砷类 (S4) 物质,169~171 eV 对应硫酸盐 (S5)。神木原煤和预热半焦 XPS 分析结果如图 6 所示。

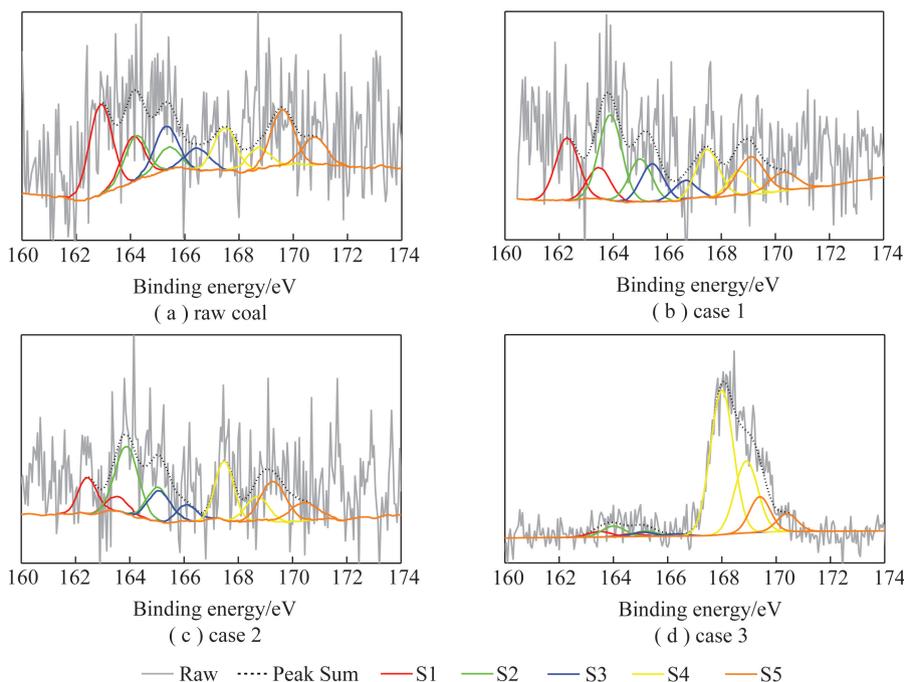


图 6 神木烟煤和预热半焦硫元素 XPS 图谱

Fig.6 XPS analysis of sulfur element in Shenmu bituminous coal and preheated semi-coke

由图 6 可知,神木烟煤中有机硫主要以 4 类形态存在,其中硫醇、硫醚类物质含量最多,占 32.6%,噻吩、亚砷和砷类物质含量基本相同,分别占

16.0%、15.9%和 15.3%,无机硫以硫酸盐形式存在,占 20.1%。预热过程中有机硫发生分解,随着预热当量比的增加,有机硫分解程度加深,不同种类有

机硫之间稳定性有所差别,因此在不同工况下分解程度也有所差异。在一定当量比下,对比预热前后的硫元素种类,发现预热半焦与原煤硫元素种类相似,图谱谱峰数量差别小;但当量比为0.63时,图谱中明显观察到硫醇、硫醚、噻吩、亚砷物质图谱面积明显减小,表明该工况下这3种物质几乎完全分解。

对XPS各峰面积进行计算可得各形态硫的含量比例,图7为神木烟煤和预热半焦各形态硫元素的相对含量。前人研究表明,4种有机硫结构中硫醇、硫醚最不稳定,易分解,分解温度约为200℃,噻吩稳定性次之,约500℃分解^[20]。Liu等^[21]对比了噻吩类(苯并噻吩)模型和苯硫醚模型热解SO₂释放规律,发现噻吩类物质较苯硫醚需要更高的热解温度才能分解,SO₂释放曲线在500~600℃出现峰值。煤粉经过高于800℃的预热,噻吩类物质发生分解,因此预热半焦硫的形态及含量与神木原煤相比均发生改变:预热后3个工况中的硫醇和硫醚类硫含量均降低,分别下降为22.5%、13.3%、2.8%,说明空气当量比的提高,促进了硫醇和硫醚的分解。噻吩含量在当量比为0.48和0.55时基本相同,分别为30.8%、31.1%,空气当量比为0.63时降到5.5%,即空气当量比的增加同样促进了噻吩类物质的分解,这主要与预热温度较高有关;空气当量比从0.48增到0.55时亚砷含量基本不变,分别为13.6%和13.8%;当量比从0.55增到0.63时发生大量分解,当量比为0.63时含量降为2.2%。预热半焦中砷类物质的相对含量与神木烟煤相比增加,分别为17.1%、21.6%、73.3%,即在当量比0.63时,砷类物质是预热半焦中有机硫存在的主要形式,这一方面与其他含硫有机物分解导致相对含量增大有关,另一方面在于可能存在其他含硫物质向砷类转化。因此预热过程中煤中有机硫的分解程度会随着当量比的变化而改变,进而影响预热半焦中有机硫存在的主要形态。结合图5、6可以看出,随着空气当量比增大,各形态硫元素在预热半焦中的相对含量发生变化:硫醇、硫醚由于稳定性较差,经过预热阶段相对含量明显降低,且随当量比增加相对含量下降,最终几乎完全分解;噻吩稳定性较好,因此在较高当量比时才出现大量分解(0.48~0.55小幅变化,0.55~0.63快速降低);亚砷因较高的稳定性与噻吩变化趋势相似,在较低当量比预热时变化不明显,随着当量比的增加分解程度加剧;这些有机硫形态中,砷类物质结构最稳定,因此预热过程中仅少部分发生分解,相对含量不断增大,同时根据前人研究可知预热过程中硫醇、硫醚类物质会向砷类转化,这也是造成

砷类相对含量增大的原因之一。

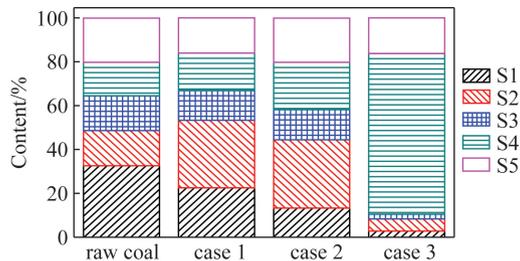


图7 神木烟煤和预热半焦各形态硫含量

Fig.7 Sulfur content of Shenmu bituminous coal and preheated semi-coke

预热过程中煤中有机硫除砷类外,硫醇、硫醚、噻吩、亚砷相对含量随着空气当量比的增大,均不同程度减少,其中以硫醇和硫醚变化量最大,噻吩、亚砷类物质其次。根据各形态有机硫的分解温度及稳定性,结合图7神木烟煤和预热半焦各形态硫的含量比例可知,预热过程中硫醇和硫醚率先发生分解转化为其他物质或产生含硫气体,使硫元素从固体中释放,噻吩和亚砷较稳定,只有在空气当量比增大到一定程度时才分解,且噻吩含量降低更迅速,砷类物质含量在其他形态有机硫分解过程中逐渐增大。因此预热过程中,煤中有机硫的分解顺序为:硫醇、硫醚→噻吩→亚砷→砷类物质。

3 结 论

1) 神木烟煤中含有4种形态的有机硫,其中硫醇和硫醚为32.6%,噻吩、亚砷、砷类含量分别为16.0%、15.9%和15.3%。

2) 煤粉预热过程中发生部分气化和燃烧,预热过程为强还原性气氛,神木烟煤中部分硫元素与灰中Ca反应生成CaS。预热前后灰样品的XRDS测试数据表明,预热后半焦灰中存在CaS,证实了该反应的发生。

3) 预热过程改变了预热半焦中各形态硫元素的相对含量。神木原煤中硫元素的主要形态为硫醇和硫醚,但预热过程中硫醇和硫醚发生分解。随着循环流化床空气当量比的增大,硫醇、硫醚分解最大,其次为噻吩和亚砷。预热燃料中砷类物质含量增加,这一方面与其他有机硫的分解有关,另一方面可能存在硫醇、硫醚等向砷类物质的转化。试验结果表明,空气当量比为0.63时,预热半焦中砷类物质占硫含量的73%,是预热半焦中硫的主要形态。

参考文献 (References):

- [1] 崔建会. 高硫煤中有机硫的赋存结构研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.

- CUI Jianhui. Study on the occurrence structure of organic sulfur in high sulfur coal [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2019.
- [2] 李伟, 耿瑞光, 金大桥. 锅炉硫化物生成机理及控制技术研究 [J]. 黑龙江工程学院学报, 2019, 33(6): 6-9, 19.
- LI wei, GENG ruiguang, JIN Daqiao. Formation mechanism and control technologies of boiler NO_x [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2019, 33(6): 6-9, 19.
- [3] 国家发展改革委, 环境保护部, 国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年) [EB/OL]. (2014-09-12) [2020-10-22]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2818468.htm.
- National Development and Reform Commission, Ministry of Environmental Protection of People's Republic of China, Energy Board. Coal-fired energy-saving emission reduction upgrade and transformation plan of action (2014-2020) [EB/OL]. (2014-09-12) [2020-10-22]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2818468.htm.
- [4] MICHAEL Müller, UWE Schnell, GÜNTER Scheffknecht. Modelling the fate of sulphur during pulverized coal combustion under conventional and oxy-fuel conditions [J]. Energy Procedia, 2013, 37: 1377-1388.
- [5] 魏强, 唐跃刚, 李薇薇, 等. 煤中有机硫结构研究进展 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1911-1923.
- WEI Qiang, TANG Yuegang, LI Weiwei, et al. Research advances on organic sulfur structures in coal [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1911-1923.
- [6] 邹碧海, 石晨飞, 谯自强, 等. 煤的燃前脱硫技术发展趋势研究 [J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(18): 48-50.
- ZOU Bihai, SHI Chenfei, JIAO Ziqiang, et al. Research on development trend of coal desulfurization technology before combustion [J]. Industrial & Science Tribune, 2018, 17(18): 48-50.
- [7] ZHANG Dongke, YANI Setyawati. Sulphur transformation during pyrolysis of an Australian lignite [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33: 1747-1753.
- [8] WANG Xinlong, GUO Huiqing, LIU Fenrong, et al. Effects of CO₂ on sulfur removal and its release behavior during coal pyrolysis [J]. Fuel, 2016, 165: 484-489.
- [9] LIU Shuai, WEI Mengmeng, QIAO Yu, et al. Release of organic sulfur as sulfur-containing gases during low temperature pyrolysis of sewage sludge [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 2767-2775.
- [10] 李丽君, 姜曙, 李丽萍. 不同气氛下煤粉燃烧硫氮污染物析出的特性研究 [J]. 电站系统工程, 2015, 31(5): 23-25, 28.
- LI Lijun, JIANG Shu, LI Liping. Study on characteristics of sulfur and nitrogen pollutants from coal combustion under different atmosphere [J]. Power System Engineering, 2015, 31(5): 23-25, 28.
- [11] 王利花, 王素珍, 赵炜. 还原性气氛下煤中硫热解迁移规律 (I) H₂ 和 N₂ 气氛下煤中硫热解释出规律的比较 [J]. 煤炭转化, 2009, 32(1): 10-13.
- WANG Lihua, WANG Suzhen, ZHAO Wei. Migration of sulfur in coal under the reductive pyrolysis part (I) comparison of experimental results under H₂ and N₂ atmosphere [J]. Coal Conversion, 2009, 32(1): 10-13.
- [12] 吕清刚, 朱建国, 牛天钰, 等. 煤粉高温预热方法: CN101158468 [P]. 2008-04-09.
- LYU Qinggang, ZHU Jianguo, NIU Tianyu, et al. High-temperature preheating method for pulverized coal: CN101158468 [P]. 2008-04-09.
- [13] 欧阳子区, 朱建国, 吕清刚, 等. 无烟煤粉经循环流化床预热后燃烧特性及 NO_x 排放特性实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(11): 1748-1754.
- OUYANG Ziqu, ZHU Jianguo, LYU Qinggang, et al. Experimental study on combustion and NO_x emission of pulverized anthracite coal preheated by a circulating fluidized bed [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(11): 1748-1754.
- [14] 张毅, 朱建国, 吕清刚, 等. 烟煤循环流化床预热特性实验 [J]. 中国粉体技术, 2019, 25(6): 7-11.
- ZHANG Yi, ZHU Jianguo, LYU Qinggang, et al. Experiment on preheating characteristics of bituminous coal by circulating fluidized bed [J]. China Powder Science and Technology, 2019, 25(6): 7-11.
- [15] 朱书骏. 煤/半焦富氧预热燃烧特性及 NO_x 排放特性试验研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2019.
- ZHU Shujun. Experimental study on preheating oxy-fuel combustion and NO_x emission characteristics of coal/char [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [16] 马玲玲, 秦志宏, 张露, 等. 煤有机硫分析中 XPS 分峰拟合方法及参数设置 [J]. 燃料化学学报, 2014, 42(3): 277-283.
- MA Lingling, QIN Zhihong, ZHANG Lu, et al. Peak fitting methods and parameter settings in XPS analysis for organic sulfur in coal [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, 42(3): 277-283.
- [17] 陈鹏. 鉴定煤中有机硫类型的方法研究 [J]. 煤炭学报, 2000, 25(S1): 174-181.
- CHEN Peng. Study on determination of the forms of organic sulfur in coals [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(S1): 174-181.
- [18] KOZOWSKI M. XPS study of reductively and non-reductively-modified coals [J]. Fuel, 2004, 83(3): 259-265.
- [19] 朱应军, 郑明东. 炼焦用精煤中硫形态的 XPS 分析方法研究 [J]. 选煤技术, 2010(3): 55-57.
- ZHU Yingjun, ZHENG Mingdong. Study on the analysis method of using sulfur forms in XPS coking coal [J]. Coal Preparation Technology, 2010(3): 55-57.
- [20] LI Dong, ZHANG Cheng, TAN Peng, et al. Evolution of organic sulfur in the thermal upgrading process of Shengli lignite [J]. Energy Fuels, 2013, 27: 3446-3453.
- [21] LIU Fengrong, XIE Lili, GUO Huiqing, et al. Sulfur release and transformation behaviours of sulfur-containing model compounds during pyrolysis under oxidative atmosphere [J]. Fuel, 2014, 115: 596-599.