中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

基于粒度分级的煤气化细渣特性分析及利用研究

王学斌[1],于 伟[1,2],张 韬[3],白永辉[4],刘莉君[2],史兆臣[1],殷 瑞[5],谭厚章[1]
(1.西安交通大学 能源与动力工程学院,陕西 西安 710049;2.西安科技大学 化学与化工学院,陕西 西安 710054;
3. 烟台龙源电力技术股份有限公司,山东 烟台 264006;4.宁夏大学 化学化工学院 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;5.北京恩萨工程技术有限公司,北京 100101)

摘 要:煤气化过程中产生大量含碳量较高的气化细渣,目前主要以填埋方式处理,不仅占用大量土地,污染土壤和水体,同时造成能源浪费,对气化细渣进行高效环保的资源化利用是目前的研究热点。气化细渣中的残碳与灰组分分离是实现其高值化、减量化、无害化利用的关键,煤气化细渣粒度特性分析表明,各粒级产品灰分基本随粒级减小呈增大趋势,通过分级工艺可实现碳灰的分离与富集。榆林煤气化细渣固定碳含量随粒级减小均呈下降趋势,各粒级产品中均含有较多的 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO,微观形貌主要由多孔基体、不规则颗粒、黏附小颗粒及圆球颗粒组成。煤气化细渣孔隙结构发达,比表面积丰富,>75 μm 粒级产品可直接作为优质的吸附材料;与气化燃料煤相比,气化细渣各粒级产品燃烧的特征温度均显著提高,从着火温度看,除<45 um 颗粒外,着火特征温度都高于作为参照的无烟煤;由于气化细渣中丰富孔隙率的存在,增大了颗粒与氧气的接触面积,使燃烧中后阶段燃烧峰值温度低于无烟煤,且燃尽温度明显低于无烟煤。

关键词:煤气化细渣;粒度特性;微观形貌;孔隙结构;燃烧
中图分类号:TQ53 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-6772(2021)03-0061-09

Characteristic analysis and utilization of coal gasification fine slag based on particle size classification

WANG Xuebin[1], YU Wei[1,2], ZHANG Tao[3], BAI Yonghui[4], LIU Lijun[2], SHI Zhaochen[1], YIN Rui[5], TAN Houzhang[1]
(1.*School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710049, *China*; 2.*School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an* 710054, *China*; 3.*Yantai Longyuan Power Technology Co., Ltd., Yantai* 264006, *China*; 4.*State Key Laboratory of High-efficiency Utilization of Coal and Green Chemical Engineering, College of Chemistry and Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*; 5.*Beijing ENSA Engineering Co., Ltd., Beijing* 100101, *China*)

Abstract: A large amount of gasification fine slag with high carbon content is produced in the process of coal gasification. At present, it is mainly treated by landfill, which not only occupies a lot of land, pollutes soil and water, but also causes energy waste. How to efficiently and environmentally utilize gasification fine slag as a resource is the hot spot of current research. The separation of residual carbon and ash in gasification fine slag is the key to realize its high value, reduction and harmless utilization. The analysis of particle size characteristics of gasification fine slag shows that the ash content of each particle size increases with the decrease of particle size, and the separation and enrichment of carbon and ash can be realized by screening and classification process. The results show that the fixed carbon content of Yulin coal gasification fine slag decreases with the decrease of particle size. There are more SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 and CaO in each particle size. The micro morphology is mainly composed of porous matrix, irregular small particles, flocculent particles and spherical particles. The results show that the pore structure of coal gasification fine slag is developed, the specific surface area is rich, and the products with particle size >75 μm can be directly used as high-quality adsorption materials. Compared with the gasification fuel coal, the combustion characteristic temperature of each particle size of coal gasification fine slag is significantly increased, and the ignition characteristic temperature is higher than that of anthracite except for <45 μm particles. Due to the existence of rich porosity in gasification slag, the contact area be-

收稿日期:2021-04-19;**责任编辑**:张晓宁 **DOI**:10.13226/j.issn.1006-6772.SW21041901
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1910000);省部共建煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室开放课题资助项目(2019-KF-12)
作者简介:王学斌(1984—),男,山东昌邑人,教授,博士生导师,从事燃烧和污染物控制方面研究。E-mail:wxb005@mail.xjtu.edu.cn
引用格式:王学斌,于伟,张韬,等.基于粒度分级的煤气化细渣特性分析及利用研究[J].洁净煤技术,2021,27(3):61-69.
WANG Xuebin, YU Wei, ZHANG Tao, et al. Characteristic analysis and utilization of coal gasification fine slag based on particle size classification[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 61-69.

移动阅读

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

tween particles and oxygen is increased, so that the peak combustion temperature of combustion is lower than that of anthracite and the burnout temperature is significantly lower than that of anthracite in middle and later stage of combustion.

Key words: coal gasification fine slag; particle size characteristics; micro morphology; pore structure; combustion

0 引　　言

我国的能源结构具有“富煤、贫油、少气”特点[1],预计到 2050 年,煤炭占全国化石能源消费的比重仍将维持在 50%以上[2],煤气化工艺是现代煤化工的前段支柱产业,是煤炭清洁、高效利用的主要途径[3]。煤气化渣是煤气化过程产生的副产物,通常分为粗渣和细渣,我国气化渣每年排放量巨大,年产超 3 000 万 t(湿基),目前主要通过填埋或渣场堆存处理,尚未大规模工业化应用,填埋或堆存易造成严重的环境污染与资源浪费[4],因此,亟需对其进行综合利用[5]。气化粗渣碳含量与发热量相对较低,多用于建筑材料[6],但气化细渣因普遍含碳量高、烧失量大,超过国家标准和行业标准,难以用作建材、建筑道路及回填工程[7],气化细渣中的碳、灰组分相互制约,阻碍了其资源化利用。因此,气化细渣中的残碳与灰组分分离是实现其高值化、减量化、无害化利用的关键,分离回收的残炭可用于配煤掺烧或制作功能材料[8],而脱碳后的灰组分含有 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO、MgO、TiO_2、Na_2O、K_2O 等氧化物[9],可用于制备水泥或混凝土等。

脱碳技术主要包括浮选脱碳、重选脱碳及电选脱碳等,主要根据灰渣和碳的赋存状态、密度、电磁性等方面的性质差异,实现碳灰分离[10]。由于气化细渣粒度较细,浮选法是目前煤气化细渣中脱除或回收残碳的主要研究方法[11-12],浮选是由于不同固体矿物的表面性质差异,通过其对矿浆中液体和气体的作用不同而实现分选的方法[13]。葛晓东[14]对气化细渣的表面性质进行分析,FTIR 及润湿热试验表明,气化细渣氧化严重但仍具有一定的疏水性,采用浮选法实现气化细渣中残碳与灰渣的分离和提纯具有可行性。赵世永等[15]对关中地区 Texaco 水煤浆气化炉产生的气化细渣进行浮选试验研究,柴油用量 4.0 kg/t、起泡剂用量 3.5 kg/t 时,精矿产率 4.82%,精矿烧失量 50.78%,尾矿烧失量 41.92%。刘冬雪等[16]对煤气化炉渣进行浮选提碳,煤油用量为 10 kg/t、2 号油用量为 1.5 kg/t 时,精炭产率为 21.81%,烧失量为 85.03%。Guo 等[17-18]对宁夏气化细渣进行浮选试验,捕收剂用量 7.0 kg/t、起泡剂用量 14 kg/t 时,得到精矿产率 20%,精矿烧失量 64.47%。Zhang[19]、Wang[20]等通过在矿浆中加入盐离子或采用超声处理方式,在一定程度提高了气化细渣的分选效果。浮选法脱碳效率较高,但最大的缺点是浮选药剂用量过大,目前研究水平下工业应用可行性不大。重选是利用颗粒间密度差异在重力场作用下实现松散分层分离的过程[13],任振场等[21]对宁夏 GSP 干粉气化炉产生的气化细渣利用水介旋流器进行重力分选,得到产率 8.37%、灰分 12.69%的富碳产品和产率 24.36%、灰分 95.68%的富灰产品。由于气化细渣粒度较小,而重选过程细颗粒最终运动速度与粒度关系密切,在单一重力场中所受分选力相对于细粒级间的黏滞阻力较弱,脉石矿物和目的矿物之间难以产生足够的位移差,目前针对气化细渣进行重力分选的研究较少,未来可通过叠加其他力场来强化重选脱碳过程[22]。电选是矿物按其本身电性质差异分离的过程[23],目前电选脱碳技术主要针对粉煤灰开展相关研究[24-25],但煤气化细渣与粉煤灰在矿物组成、润湿性能等方面都不同[26],粉煤灰电选脱碳研究相关结论,不能直接用于气化细渣,且气化细渣含水率较高,脱水困难,不适用于干法电选分离。

本文着眼于煤气化细渣综合利用的重大需求,基于气化细渣的粒度特性,研究通过粒度分级实现气化细渣中碳灰的分离富集,并对分级后各粒度级产品特性进行分析,探讨气化细渣按粒度分级实现碳灰分离的应用可行性。

1 基础特性和试验方法

1.1 煤气化细渣基础特性

1.1.1 粒度特性

为了充分研究煤气化细渣的筛分分级粒度特性,分别采集榆林地区水煤浆炉气化细渣、驻马店地区粉煤炉气化细渣、鄂尔多斯地区水煤浆炉气化细渣以及鄂尔多斯地区粉煤炉气化细渣样品,在 75 ℃烘箱中烘干脱水,将空气干燥状态下的煤气化细渣样品充分混匀,并按照 GB/T 477—2008《煤炭筛分试验方法》规定,分别采用 0.5、0.25、0.125、0.074 和 0.045 mm 标准套筛进行湿法小筛分试验,结果如图 1、2 所示。

由图 1、2 可以看出,随粒级减小,煤气化细渣各粒级灰分基本呈增大趋势,榆林水煤浆炉气化细渣样品,主导粒级为<0.045 mm,产率为 36.93%,灰分

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

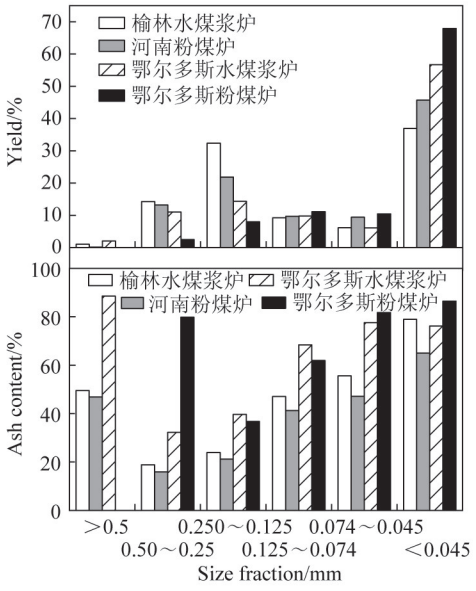


图 1　煤气化细渣粒度特性

Fig.1　Size analysis of coal gasification fine slag

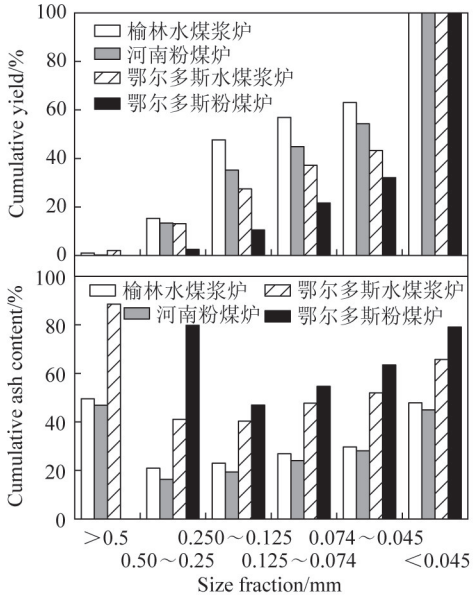


图 2　煤气化细渣粒度累积特性

Fig.2　Particle size accumulation characteristics of coal gasification fine slag

达 78.95%,固定碳较低;0.250～0.125 mm 粒级含量较高,产率为 32.36%,灰分为 23.96%,固定碳较高,具有综合回收利用价值。随着粒度减小,各粒级灰分整体呈增大趋势,其中>0.5 mm 粒级灰分较高,但其产率低,仅为 1.03%,故不再对该粒级样品单独处理。对各粒级样品综合计算,>0.125 mm 粒级产率为 47.66%,灰分为 22.99%;>0.074 mm 粒级产率为 56.91%,灰分为 26.90%;>0.045 mm 粒级产率为 63.07%,灰分为 29.70%,可以发现,该煤气化细渣具有显著的粒度特性规律,不同粒级样品碳灰含量差异明显,通过粒度分级即可实现较好的碳灰分离,在浮选等分选方法效率不高的情况下,筛分分级可作为一种简单有效的碳灰分离方法进行深入研究。

未燃炭在不同粒度细渣中富集,可能与气化过程中渣的形成和流动特性有关。在气化炉内,气化剂与碳在表面和毛细孔内发生反应,反应速率和扩散速率密切相关,扩散速率受孔扩散的影响,孔扩散阻力随粒径的增大而增大。大颗粒具有较低的气化速率,含碳量高;小颗粒气化反应相对完全,含碳量相对较低,因此,细渣中粗颗粒含碳量多,而小粒级含碳量较少[27]。粒度分级实现碳灰分离工艺具有广泛的适应性,特别是针对灰分较低(<50%)的样品;对于灰分较高(>50%)的样品,具有细粒高灰分特征,可通过重选等分选方法预先脱除部分易选高灰物料,再通过筛分分级方法脱除细粒级难选高灰物料,从而实现碳灰的高效分离。

1.1.2　基础燃料特性

通过小筛分试验可知,煤气化细渣(Coal gasification fine slag,CGFS)各粒级产品灰分具有显著的差异性,通过筛分分级可实现碳灰的有效分离,因此,为了充分探讨筛分分级工艺的可行性,以榆林水煤浆炉气化细渣样品为例,其工业分析结果为:M_{ad} = 2.81%、A_{ad} = 47.89%、V_{ad} = 6.67%、FC_{ad} = 42.63%,对各粒度级产品特性进行深入研究,各粒级产品固定碳含量如图 3 所示。

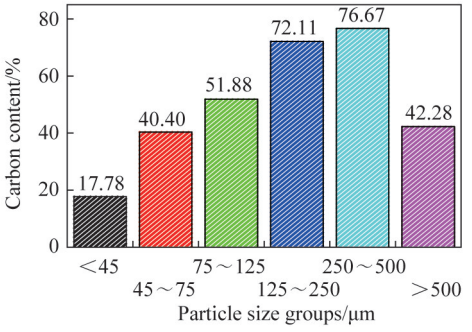


图 3　煤气化细渣各粒级固定碳含量

Fig.3　Carbon content of size-segmented CGFS

该煤气化细渣挥发分较低,固定碳较高,发热量较高,具有潜在加工利用价值;氧元素含量较高,存在氧化严重、表面疏水性较差的特征,浮选分离较困难。由图 3 可知,固定碳随粒级减小呈降低趋势。250～500、125～250、75～125 μm 粒级产品固定碳较高,分别为 76.67%、72.11%、51.88%,<45 μm 粒级产品固定碳较低。对该煤气化细渣样品,可通过 125 μm 筛分分级,得到高固定碳与高发热量的产品,实现碳灰的高效分离。

1.2　试验方法

对各粒度级产品进行特性分析,灰的制备方法

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

根据 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》,灰的成分分析采用 S4-Pioneer 型 X 射线荧光光谱仪,矿物组成采用 D/max2400 型 X 射线衍射仪,微观形貌采用 Gemini SEM 500 型场发射扫描电子显微镜,并进行 EDS 分析,利用 ASAP2020 型物理吸附仪进行孔隙结构分析。

热重分析采用 Netzsch STA-409PC 型热重分析仪,样品质量为(10±0.5) mg,线性升温的升温速率为 20 K/min,温度范围为室温~1 100 ℃,总气流量为 200 mL/min,燃烧气氛选取 20% O_2/80% N_2混合气模拟空气气氛。

吸附性能分析根据 GB/T 7702.7—2008《煤质颗粒活性炭试验方法 碘吸附值的测定》、GB/T 7702.8—2008《煤质颗粒活性炭试验方法 苯酚吸附值的测定》,分别测试碘吸附值及苯酚吸附值。

2　试验结果与讨论

2.1　矿物成分

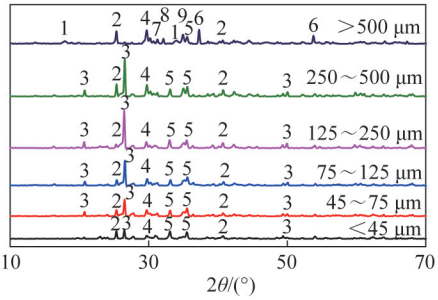
表 1 为榆林煤气化细渣样品灰成分分析结果,各粒级中均含有较多的 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO 以及少量 SO_3、K_2O、Na_2O、TiO_2、MgO。<500 μm 各粒级中,氧化物含量比例相差不大,SiO_2和 Al_2O_3含量较高,特别是 125~250 μm 粒级,SiO_2含量达44.7%,Al_2O_3含量为 24.0%;>500 μm 粒级氧化物含量呈不同的分布规律,CaO 含量最大,为 37.1%,SiO_2含量为 19.8%,Fe_2O_3含量为 13.9%,SO_3和 Al_2O_3含量分别为 9.51%和 9.34%。除>500 μm 粒级,其余各粒级的 $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$含量均>70%。

表 1　煤气化细渣各粒级灰成分分析

Table 1　Ash elemental analysis of size-segmented CGFS

CGFS 粒级/μm	占比/%								
	MgO	TiO_2	Na_2O	K_2O	SO_3	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
<45	1.09	1.20	2.33	2.47	4.45	11.6	12.6	21.7	39.9
45~75	0.88	0.95	2.01	1.96	4.88	11.8	16.9	20.2	37.8
75~125	0.79	0.94	2.04	2.06	4.37	11.0	14.5	21.5	40.2
125~250	0.75	1.19	1.60	2.08	2.02	8.61	12.2	24.0	44.7
250~500	0.77	1.02	1.33	1.69	5.38	10.9	12.1	22.5	41.6
>500	1.12	0.59	0.79	1.03	9.51	37.1	13.9	9.34	19.8

图 4 为榆林煤气化细渣样品各粒级产品的 XRD 图谱,<500 μm 粒级的矿物晶相组成基本相同,主要为 SiO_2、Fe_2O_3、$CaMgSi_2O_6$、$CaSO_4$等;>500 μm 组成较复杂,主要为 $CaSO_4$、$CaMgSi_2O_6$、CaO、Fe_2O_3,还含有 $Al_2Fe_3(SiO_4)_3$、$Ca(OH)_2$等。



1—$Ca(OH)_2$; 2—$CaSO_4$; 3—SiO_2; 4—$CaMgSi_2O_6$; 5—Fe_2O_3; 6—CaO; 7—$Ca_2Al(AlSi)O_7$; 8—$Ca_2Al_2SiO_7$; 9—$Al_2Fe_3(SiO_4)_3$

图 4　煤气化细渣各粒级 XRD 图谱

Fig.4　XRD patterns of size-segmented CGFS

2.2　微观形貌

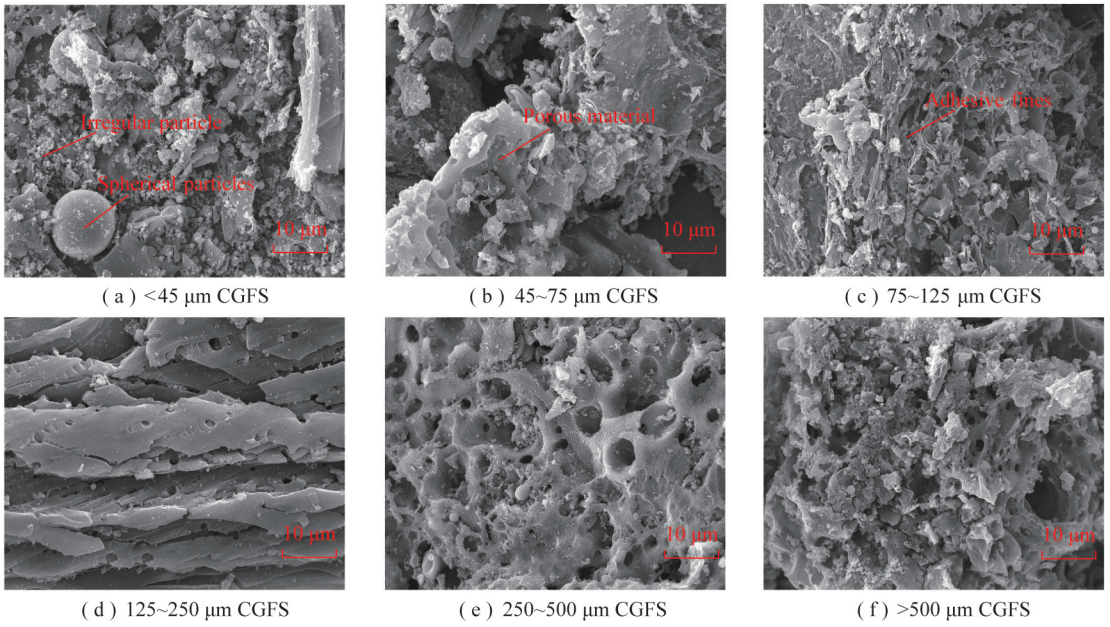
图 5 为榆林煤气化细渣各粒级的扫描电镜图,可知,煤气化细渣微观形貌主要由多孔基体、单独的不规则颗粒、黏附于多孔基体上小颗粒以及圆球颗粒组成,各形貌呈相互混杂、附着、包裹状态。45~500 μm 各粒级具有发达的孔隙结构,各类孔由表面贯穿至内部。随着粒级减小,多孔基体上附着的颗粒和小圆球颗粒不断增多,独立的圆球颗粒不断富集。<45 μm 粒级,孔结构不发达,不规则颗粒及圆球状物质较多,大圆球一般成独立个体,表面光滑,但易附着较多不规则小颗粒,小圆球(<1 μm)数量较多,且呈堆积状存在,该粒级碳灰分离难度较大。

对榆林煤气化细渣各粒级进行 EDS 分析,如图 6 所示。可知,不同粒级产品中多孔基体与圆球颗粒的元素组成规律基本一致,多孔基体主要由 C 元素构成,含量 95%以上;圆球颗粒成分复杂,主要由 C、O、Al、Si 元素构成,不同粒级中 C 元素含量相差较大,可能由矿物气化熔融过程中包裹不同量的未燃炭造成,>500 μm CGFS 圆球颗粒中还含有较多的 Ca。不规则颗粒和黏附小颗粒元素含量仍以 C 为主,其他元素含量规律性不强,与所选择的分析点密切相关。

2.3　孔隙结构

对榆林煤气化细渣各粒级产品进行孔隙结构分析,图 7 为吸脱附曲线,表 2 为孔隙结构分析结果。该煤气化细渣各粒级吸附曲线形状一致,孔隙发达,

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net



(a) <45 μm CGFS　(b) 45~75 μm CGFS　(c) 75~125 μm CGFS

(d) 125~250 μm CGFS　(e) 250~500 μm CGFS　(f) >500 μm CGFS

图 5　煤气化细渣各粒级产品表面形貌

Fig.5　Morphology of size-segmented CGFS

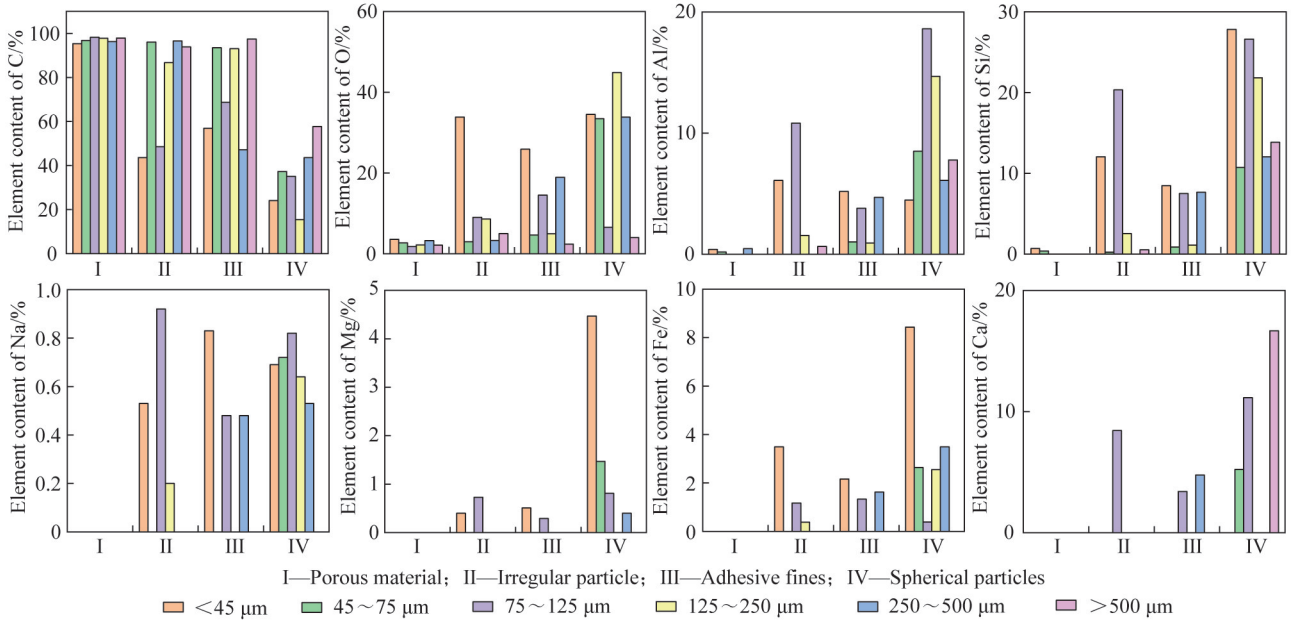


图 6　煤气化细渣各粒级 EDS 元素组成

Fig.6　EDS analysis of size-segmented CGFS

以中微孔为主,比表面积丰富。125~250 μm 粒级比表面积达 562.22 m^2/g,总孔容为 0.43 cm^3/g,平均孔径 3.06 nm;75~125 μm 粒级比表面积为 427.27 m^2/g,总孔容为 0.40 cm^3/g,平均孔径 3.71 nm;250~500 μm 粒级比表面积为 331.53 m^2/g,总孔容为 0.23 cm^3/g,平均孔径 2.81 nm;>500 μm 粒级产品比表面积较小,为 61.88 m^2/g,总孔容为 0.054 cm^3/g,平均孔径 3.47 nm。由孔隙结构分析可知,该煤气化细渣可作为吸附材料,通过 75 μm 筛分分级,>75 μm 粒级直接作为优质的吸附材料用于废水及废气处理,大幅提升其综合利用价值。

2.4　吸附性能

榆林煤气化细渣具有丰富的比表面积与孔隙结构,因此有必要对其吸附性能进行深入研究,分别对各粒级进行碘吸附及苯酚吸附值测定,同时以市售煤质活性炭(BET 比表面积 1 022.76 m^2/g,总孔容 0.88 cm^3/g,平均孔径 3.45 nm)与木质活性炭(BET 比表面积 1 322.43 m^2/g,总孔容 1.14 cm^3/g,平均孔径 3.44 nm)进行比对,以充分模拟其吸附与处理废水能力,结果如图 8 所示。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

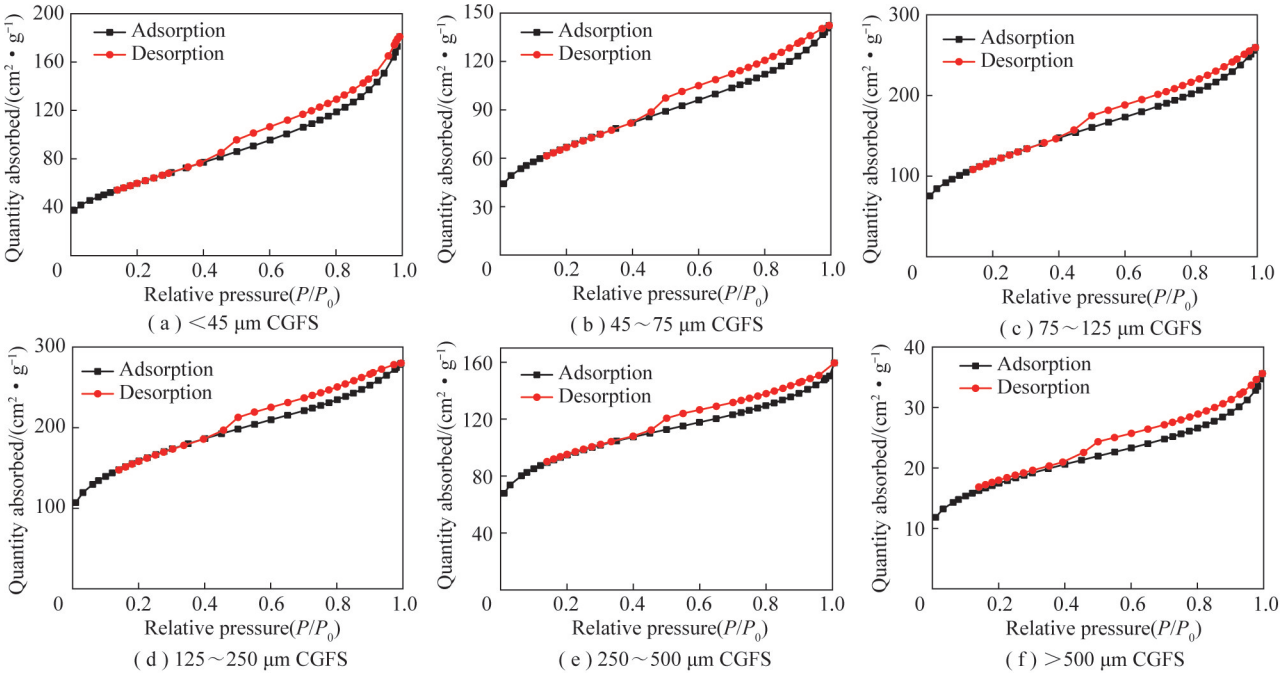


图 7　煤气化细渣各粒级产品吸脱附曲线

Fig.7　Adsorption/desorption isotherms of size-segmented CGFS

表 2　煤气化细渣各粒级孔隙结构参数

Table 2　Pore structure parameters of size-segmented CGFS

CGFS 粒级/μm	BET 比表面积/(m² · g⁻¹)	总孔容/(cm³ · g⁻¹)	微孔孔容/(cm³ · g⁻¹)	平均孔径/nm
<45	215.99	0.270	0.000 15	4.95
45～75	239.41	0.220	0.015 00	3.64
75～125	427.27	0.400	0.015 00	3.71
125～250	562.22	0.430	0.065 00	3.06
250～500	331.53	0.230	0.058 00	2.81
>500	61.88	0.054	0.007 00	3.47

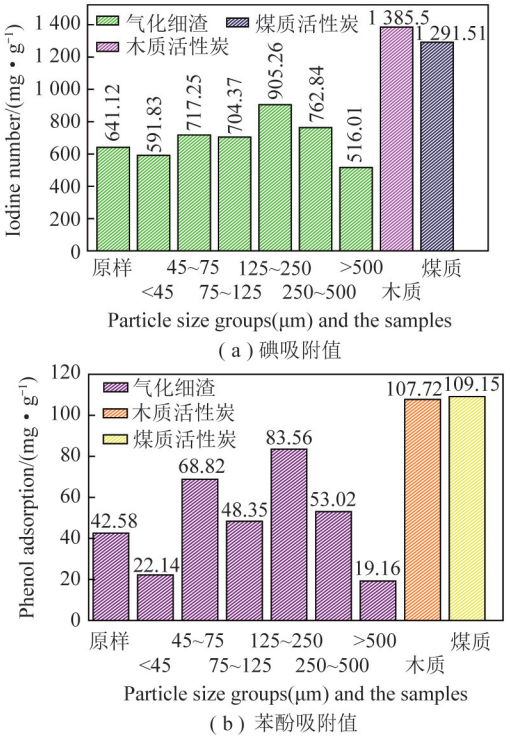


图 8　煤气化细渣各粒级吸附特性

Fig.8　Adsorption characteristics of size-segmented CGFS

由图 8 可知，榆林煤气化细渣总样的碘吸附值、苯酚吸附值为 641.12 、42.59 mg/g，市售木质活性炭分别为 1 385.50、107.72 mg/g，市售煤质活性炭分别为 1 291.51、109.15 mg/g，说明该气化细渣具有良好的吸附性能，未进行活化的吸附能力已接近市售活性炭的 50%。0.50～0.25 mm 粒级的碘吸附值和苯酚吸附值分别为 762.84、53.03 mg/g，0.250～0.125 mm 粒级分别为 905.26、83.57 mg/g，与孔隙结构分析结果一致，粗粒度级具有相对更强的吸附特性，因此，可通过分级工艺，将粗粒级产品分离富集，作为高价值吸附材料进行资源化综合利用。

2.5　燃烧动力学特性

为了充分研究榆林煤气化细渣的各粒级的燃烧特性，与工业园区燃料用煤及一种无烟煤作比对，燃料煤固定碳为 59.41%、灰分为 6.42%、挥发分为 34.20%；无烟煤固定碳为 69.88%、灰分为 23.17%、挥发分为 6.95%，气化细渣各粒级及燃料煤和无烟煤的 TG-DTG 曲线如图 9 所示。气化细渣各粒级（除>500 μm）、燃料煤、无烟煤燃烧失重呈单峰分布，

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

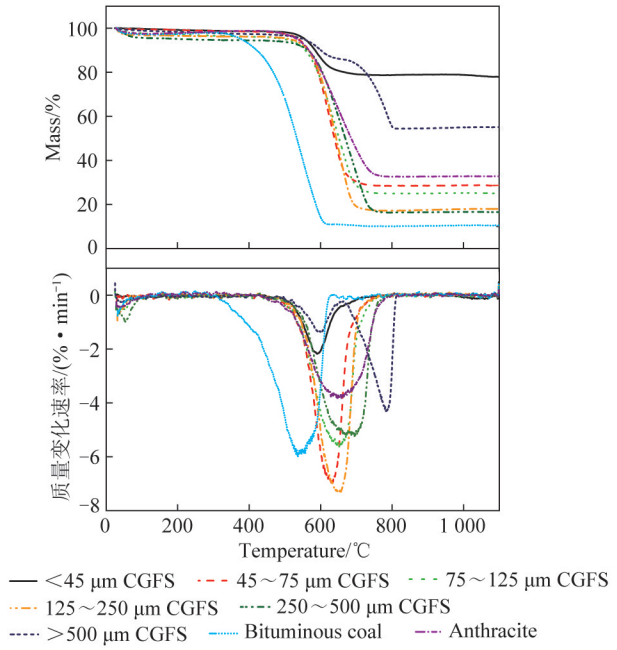


图 9　煤气化细渣及煤样热重分析

Fig.9　TGA analysis of CGFS and coal samples

燃料煤燃烧失重比气化细渣各粒级及无烟煤提前,气化细渣 45~500 μm 的燃烧失重较无烟煤略提前,<45 μm 和>500 μm 粒级因组分和粒径的影响燃烧失重略延迟。对于最终的残余成灰率,燃料煤最低,其次为 250~500 、125~250、75~125、45~75 μm 粒级和无烟煤,>500 μm 粒级相对较大,<45 μm 粒级最大。

在图 9 的 TG-DTG 曲线上,可获得样品燃烧的着火温度 T_i 和燃尽温度 T_h,并由 DTG 曲线上的最大极值点确定最大质量变化速率 W_{max} 及其对应的峰值温度 T_p。为更好地综合评价燃料的着火特性和燃尽特性,引入燃烧特性指数 S(式(1)),其综合考虑了最大失重率、平均失重率、着火温度和燃尽温度的影响,燃烧特性指数越大,综合燃烧特性越好[28-29]。

$$S=\frac{W_{max}W_{mean}}{T_i^2T_h} \tag{1}$$

式中,W_{mean} 为平均质量变化速率,%/min。

表 3 为气化细渣各粒级产品及对比样品燃烧 TG-DTG 曲线的特征参数,可见,燃料煤燃烧的 T_i、T_h 最低,最易着火与燃尽;无烟煤的着火温度与 45~75 μm 粒级相当,燃尽温度与 250~500 μm 粒级较接近;气化细渣各粒级(除>500 μm)随粒级增大,T_i、T_h 呈规律性升高;燃料燃烧特性指数的排序为:燃料煤>125~250 μm >45~75 μm>75~125 μm>250~500 μm>无烟煤>(>500 μm)>(<45 μm);>500 μm和<45 μm 粒级燃烧特性最差,无烟煤燃烧特性略优,其他粒级燃烧特性优于无烟煤,燃料煤燃烧特性最优。

表 3　煤气化细渣各粒级及对比样品燃烧 TG-DTG 曲线的特征参数

Table 3　Characteristic parameters of combustion TG-DTG curves of size-segmented CGFS and reference samples

CGFS 粒级/μm	T_i/℃	T_p/℃	T_h/℃	W_{max}/(%·min^{-1})	W_{mean}/(%·min^{-1})	S/(%^{2}·(min^2·℃^{3})$^{-1}$)
<45	548.5	588.5	629.9	−0.21	−2.18	2.37×10^{-9}
45~75	566.5	629.9	671.3	−0.67	−6.97	2.16×10^{-8}
75~125	569.3	651.9	691.8	−0.70	−5.62	1.76×10^{-8}
125~250	581.0	650.7	687.1	−0.77	−7.32	2.42×10^{-8}
250~500	581.6	694.6	736.0	−0.78	−5.24	1.64×10^{-8}
>500	550.5	602.8	625.6	−0.42	−4.34	9.59×10^{-9}
Bituminous coal	457.9	536.0	601.7	−0.84	−6.01	3.99×10^{-8}
Anthracite	561.4	658.4	731.6	−0.63	−3.85	1.05×10^{-8}

图 10 为煤气化细渣不同粒级产品的特征温度,可知,与燃料煤相比,气化细渣燃烧的特征温度均显著高于原煤。从着火温度看,除<45 um 粒级外,其他粒级着火特征温度均高于无烟煤;对于峰值温度与燃尽温度,除>500 μm 粒级外,其他粒级 T_p 皆低于无烟煤,T_h 差距更大,说明除>500 um 粒级外,气化细渣中挥发分低于无烟煤,导致燃烧初期挥发分的着火延迟时间比无烟煤长;由于气化细渣中存在丰富的孔隙率,增大了焦炭颗粒与氧气的接触面积,使燃烧后阶段的燃烧峰值温度低于无烟煤,且燃尽温度显著低于无烟煤。

3　结　　论

1)通过对榆林水煤浆炉气化细渣、驻马店粉煤炉气化细渣、鄂尔多斯水煤浆炉气化细渣、鄂尔多斯粉煤炉气化细渣的粒度特性进行分析,表明煤气化

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

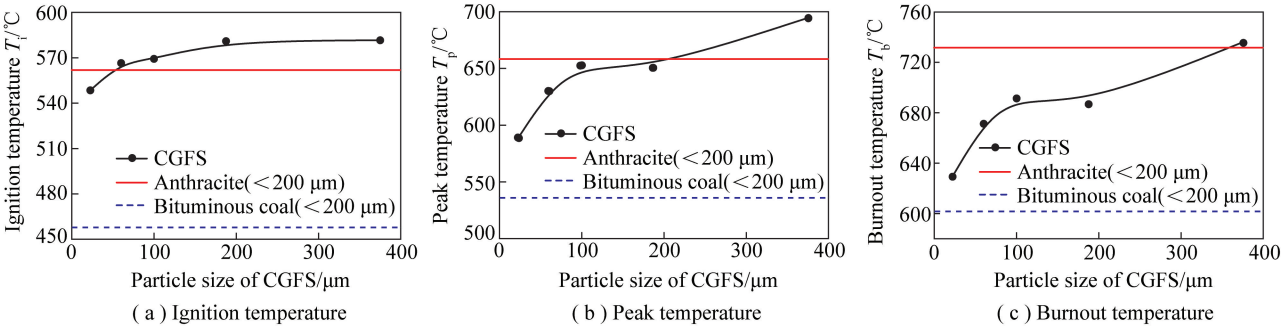


图 10　煤气化细渣不同粒级产品的特征温度

Fig.10　Characteristics temperature for CGFS with varying particle size

细渣各粒级灰分基本随粒级减小呈增大趋势,通过粒度分级可实现较好的碳灰分离,在浮选等分选方法效率不高的情况下,粒度分级可作为一种简单有效的碳灰分离方法进行深入研究。

2)榆林煤气化细渣各粒级均含有较多的 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO,微观形貌主要由多孔基体、不规则颗粒、黏附小颗粒及圆球颗粒组成,各形貌呈相互混杂、附着、包裹状态,结构中均含有 C 元素。该煤气化细渣孔隙发达,以中微孔为主,比表面积丰富,粗粒度级产品具有相对更强的吸附特性,因此,可通过筛分分级工艺,将粗粒级产品分离富集,作为高价值吸附材料进行利用。

3)与气化燃料煤相比,气化细渣各粒级燃烧的特征温度均显著提高。从着火温度看,除<45 um 外,着火特征温度均高于无烟煤;由于气化细渣存在丰富的孔隙率,增大了焦炭颗粒与氧气的接触面积,使燃烧后阶段的燃烧峰值温度低于无烟煤,且燃尽温度显著低于无烟煤。

参考文献(References):

[1] 朱子祺.煤制油选煤厂煤显微组分迁移规律[J].洁净煤技术,2020,26(6):89-95.
ZHU Ziqi. Migration rule of coal macerals in coal - to - oil preparation plant [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26 (6): 89-95.

[2] 文凡,刘军,牛东晓,等.低碳背景下的省域一次能源供给情景预测:以浙江省为例[J].中国电力,2020,53(2):20-28.
WEN Fan, LIU Jun, NIU Dongxiao, et al. Scenario prediction of provincial primary energy suppy under low carbon background: A case study of Zhejiang Province [J]. Electric Power, 2020, 53 (2): 20-28.

[3] 史兆臣,戴高峰,王学斌,等.煤气化细渣的资源化综合利用技术研究进展[J].华电技术,2020,42(7):63-73.
SHI Zhaochen, DAI Gaofeng, WANG Xuebin, et al. Review on the comprehensive resources utilization technology of coal gasification fine slag [J]. Huadian Technology, 2020, 42(7): 63-73.

[4] 曲江山,张建波,孙志刚,等.煤气化渣综合利用研究进展[J].洁净煤技术,2020,26(1):184-193.
QU Jiangshan, ZHANG Jianbo, SUN Zhigang, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gasification slag [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 184-193.

[5] 吴阳,赵世永,李博.宁东煤气流床气化残渣特性研究[J].煤炭工程,2017,49(3):115-118.
WU Yang, ZHAO Shiyong, LI Bo. Study on the residue features of Ningdong coal in entrained flow gasifiers [J]. Coal Engineering, 2017, 49(3): 115-118.

[6] LI Zuzhong, ZHANG Yayun, ZHAO Hongyan, et al. Structure characteristics and composition of hydration products of coal gasification slag mixed cement and lime [J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 265-274.

[7] 杜杰,戴高峰,李帅帅,等.气化细渣基础燃烧特性试验研究[J].洁净煤技术,2019,25(2):83-88.
DU Jie, DAI Gaofeng, LI Shuaishuai, et al. Experimental study on the fundamental combustion characteristics of fine slag from gasification [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 83-88.

[8] 胡俊阳.北方某煤气化炉渣的综合利用研究[D].绵阳:西南科技大学,2015.
HU Junyang. Studyon the comprehensive utilization of a coal gasification slag in the north [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015.

[9] 章丽萍,温晓东,史云天,等.煤间接液化灰渣制备免烧砖研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):354-358.
ZHANG Liping, WEN Xiaodong, SHI Yuntian, et al. Research on making non-burnt brick from indirect coal liquefaction residues [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(2): 354-358.

[10] 李金凤.气化滤饼中碳赋存形态及循环掺烧可行性研究[J].洁净煤技术,2020,26(6):224-228.
LI Jinfeng. Investigation on the occurrence of carbon in gasification filter cake and its feasibility of circulating combustion [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 224-228.

[11] 李慧泽,董连平,鲍卫仁,等.基于视密度的煤气化渣水介质旋流炭-灰分离[J/OL].化工进展,https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0912.
LI Huize, DONG Lianping, BAO Weiren, et al. Carbon-ash separation of coal gasification slag in swirling water based on apparent density [J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress, https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0912.

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

[12] 吴思萍,赵凯,董永胜,等.气化细渣浮选脱碳研究进展[J].华电技术,2020,42(7):81-86.
WU Siping, ZHAO Kai, DONG Yongsheng, et al. Research progress on flotation decarburization of gasified fine slag [J]. Huadian Technology,2020,42(7):81-86.

[13] 谢广元.选矿学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001.
XIE Guangyuan. Beneficiation science[M].Xuzhou:China University of Mining & Technology Press,2001.

[14] 葛晓东.煤气化细渣表面性质分析及浮选提质研究[J].中国煤炭,2019,45(1):107-112.
GE Xiaodong. Surface properties analysis of coal gasification coal cinder and flotation extraction research [J]. China Coal,2019,45(1):107-112.

[15] 赵世永,吴阳,李博.Texaco 气化炉灰渣理化特性与脱碳研究[J].煤炭工程,2016,48(9):29-32.
ZHAO Shiyong,WU Yang,LI Bo. Study on residue features and decarbonization of Texaco entrained flow gasifier [J]. Coal Engineering,2016,48(9):29-32.

[16] 刘冬雪,胡俊阳,冯启明,等.煤气化炉渣浮选及其精炭制备活性炭的研究[J].煤炭转化,2018,41(5):73-80.
LIU Dongxue, HU Junyang, FENG Qiming, et al. Study on flotation of coal gasification slag and preparation of activated carbon from carbon concentrate [J]. Coal Conversion,2018,41(5):73-80.

[17] GUO Fanhui,MIAO Zekai,GUO Zhenkun,et al. Properties of flotation residual carbon from gasification fine slag [J/OL]. Fuel, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117043.

[18] GUO Fanhui,ZHAO Xu,GUO Yang,et al. Fractal analysis and pore structure of gasification fine slag and its flotation residual carbon [J/OL]. Colloids and Surfaces A,https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124148.

[19] ZHANG Rui,GUO Fangyu,XIA Yangchao,et al. Recovering unburned carbon from gasification fly ash using saline water [J]. Waste Management,2019,98:29-36.

[20] WANG Weidong,LIU Dinghua,TU Yanan,et al. Enrichment of residual carbon in entrained-flow gasification coal fine slag by ultrasonic flotation [J/OL]. Fuel,https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118195.

[21] 任振玙,井云环,樊盼盼,等.气化渣水介重选及其分离炭制备脱硫脱硝活性焦试验研究[J].煤炭学报,2021,46(4):1164-1172.
REN Zhenyang,JING Yunhuan,FAN Panpan,et al. Experimental study on the water-medium gravity separation of gasification slag and the preparation of desulfurization and denitrification activated coke using separated carbon [J]. Journal of China Coal Society,2021,46(4):1164-1172.

[22] 史达,张建波,杨晨年,等.煤气化灰渣脱碳技术研究进展[J].洁净煤技术,2020,26(6):1-10.
SHI Da, ZHANG Jianbo, YANG Chennian, et al. Research progress of the decarburization technology of coal gasification ash slag [J]. Clean Coal Technology,2020,26(6):1-10.

[23] 张杰.粉煤灰旋转摩擦电选脱碳的试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
ZHANG Jie. Research on decarbonization of ash in rotary triboelectrostatic separator[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2015.

[24] 李海生,章新喜,陈英华,等.粉煤灰电选脱碳摩擦器气固两相流场数值模拟[J].煤炭技术,2012,31(11):140-142.
LI Haisheng, ZHANG Xinxi, CHEN Yinghua, et al. Numerical simulation on gas-solid two phase in friction device of decarbonization from fly ash by electrical separation [J]. Coal Technology,2012,31(11):140-142.

[25] 翟秉星,张华,马崇振,等.循环流化床与煤粉炉粉煤灰电选脱碳试验研究[J].粉煤灰,2014,26(3):9-12.
ZHAI Bingxing, ZHANG Hua, MA Chongzhen, et al. Experimental study of circulating fluidized bed and electric separation decarbonization of fly ash from pulverized coal fired boiler [J]. Coal Ash,2014,26(3):9-12.

[26] 张晓峰,王玉飞,范晓勇,等.煤气化细渣浮选脱碳分析[J].能源化工,2016,37(5):54-57.
ZHANG Xiaofeng,WANG Yufei,FAN Xiaoyong,et al. Analysis of decarbonization from coal gasification fine slag by flotation [J]. Energy Chemical Industry,2016,37(5):54-57.

[27] 宋瑞领,李静,付亮亮,等.多喷嘴对置式水煤浆气化炉炉渣特性研究[J].洁净煤技术,2018,24(5):43-49.
SONG Ruiling, LI Jing, FU Liangliang, et al. Characteristics of slags generated from multi-nozzle opposed coal-water slurry gasifier [J]. Clean Coal Technology,2018,24(5):43-49.

[28] WANG Xuebin,LI Shuaishuai,ADEWALE Adeosun,et al. Effect of potassium-doping and oxygen concentration on soot oxidation in O_2/CO_2 atmosphere: A kinetics study by thermogravimetric analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 149: 686-697.

[29] DAI Gaofeng,ZHENG Shijie,WANG Xuebin,et al. Combustibility analysis of high-carbon fine slags from an entrained flow gasifier [J]. Journal of Environmental Management,2020,271:111009.