

西北地区气流床煤气化细灰理化特性研究

王文钰^{1,2}, 李伟^{1,3}, 梁晨¹, 任强强^{1,2,3}

(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;3.中国科学院洁净能源创新研究院,辽宁大连 116023)

摘要: 气化细灰是气流床气化炉的出口粗煤气经过洗涤后黑水沉淀得到的产物,是一种煤基固体废物,尚无大规模资源化处置方案。为了开发气化细灰高效脱碳技术,利用激光粒度仪、元素分析仪、扫描电子显微镜及能谱仪、X 射线衍射仪、X 射线荧光光谱仪、BET 比表面积分析仪、热重分析仪等分析设备针对我国西北地区 3 种气流床煤气化细灰(DSG、HL、SH)的化学成分、粒径、微观形貌、孔隙结构、熔融特性和燃烧特性进行分析。结果表明:气化细灰水分较高均在 40% 以上,热值均低于 10 MJ/kg,挥发分低,且孔隙结构差,表面存在熔融渣层。较差的孔隙结构阻碍未燃碳与氧气接触,制约了气化细灰的脱碳反应。热重分析中 DSG、HL、SH 的失重率分别为 13%、29% 和 17%,相比 3 种气化细灰中原有的残碳 16%、37% 和 48%,DSG 气化细灰残碳消耗 81%,HL 气化细灰残碳消耗 78%,SH 气化细灰残碳消耗 35%。氧气浓度由 21% 升至 30%,一定程度上提高了气化细灰反应活性。目前常规的燃烧脱碳技术无法实现气流床煤气化细灰的高效脱碳,因此需开发新型的燃烧脱碳技术,为气化细灰的资源化利用提供支撑。

关键词: 气流床;煤气化;细灰;理化特性;脱碳

中图分类号:TQ53;X703

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)03-0094-07

Research on physicochemical characteristics of fine slag from gasification in Northwest China

WANG Wenyu^{1,2}, LI Wei^{1,3}, LIANG Chen¹, REN Qiangqiang^{1,2,3}

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Dalian National Laboratory For Clean Energy, Chinese Academy of Science, Dalian 116023, China)

Abstract: Fine slag from gasification is a coal-based solid waste product, which is precipitated by black water after the coarse gas at the outlet of entrained flow gasifier is washed. There is no large-scale resource disposal plan. In order to develop efficient decarbonization technology of fine slag from gasification, the chemical composition, particle size, micro morphology, pore structure, particle size, pore size and pore size of three kinds of entrained bed coal gasification fine ash (DSG, HL, SH) in Northwest China were analyzed by using laser granulometer, elemental analyzer, scanning electron microscope and energy spectrometer, X-ray diffractometer, X-ray fluorescence spectrometer, BET specific surface area analyzer, thermogravimetric analyzer and other analysis equipment. The results show that the moisture content of gasification fine ash is higher than 40% and the calorific value is lower than 10 MJ/kg. The poor pore structure and the existence of molten slag layer on the surface lead to the low reactivity of fine slag from gasification. In thermogravimetric analysis, the weight loss rates of DSG, HL and SH are 13%, 29% and 17%, respectively. Compared with the original residual carbon of 16%, 37% and 48% in the three kinds of fine slag from gasification, the residual carbon consumptions of DSG, HL and SH are 81%, 78% and 35%, respectively. When the oxygen concentration increases from 21% to 30%, the sample reactivity is improved to a certain extent. At present, the conventional combustion decarbonization technology cannot realize the efficient decarbonization of fine slag from gasification. Therefore, the new combustion decarbonization technology should be developed to provide support for the resource utilization of fine slag from gasification.

Key words: airflow bed; gasification; fine slag; physicochemical characteristics; decarbonization

收稿日期:2021-02-18;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.SW21021801

基金项目:气化细灰流化熔融燃烧脱碳关键技术研究项目(E02C030201);中国科学院青年创新促进会项目(E029030401)

作者简介:王文钰(1995—),男,山东潍坊人,硕士研究生,从事固体废物资源化利用研究。E-mail:wangwenyu@iet.cn。通讯作者:李伟,副研究员,从事富氧燃烧及固体废物资源化利用研究。E-mail:liweili0@iet.cn

引用格式:王文钰,李伟,梁晨,等.西北地区气流床煤气化细灰理化特性研究[J].洁净煤技术,2021,27(3):94-100.

WANG Wenyu, LI Wei, LIANG Chen, et al. Research on physicochemical characteristics of fine slag from gasification in Northwest China[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 94-100.



移动阅读

0 引言

我国煤炭是主要的一次能源,煤炭的转化利用是国家经济发展的重要支柱,根据国家统计局公布的2019年中国能源消费结构数据,我国煤炭消费量占能源消费总量的58%^[1]。煤炭利用主要包括燃烧发电和煤化工转化两大方面。其中煤化工行业近年来发展迅速,目前每年近1亿t煤炭用于煤化工领域,且逐年增加^[2]。

煤气化技术是煤化工行业龙头技术,是发展煤基化学品、煤基液态燃料、IGCC发电、多联产系统、制氢和燃料电池等过程工业的基础。煤气化技术的重要性使其不断发展创新,主要分为固定床、流化床和气流床三大技术流派^[3]。气流床煤气化技术因具有气化指标高、气化强度大和单炉处理能力大等优点,被广泛应用于煤化工领域^[4]。目前国内气流床气化炉的市场占有率达80%以上。

气流床气化炉在运行过程中会产生大量的气化灰渣,年排放量达3000万t以上,累计堆存数亿吨。目前,气化灰渣处理方式仍以堆存为主,极易发生自燃和粉尘飞扬,造成严重的大气污染和水污染,尚没有大规模资源化处置方案。因此,气化灰渣被认为是煤基固废的代表,是煤化工领域的技术短板之一。

气化灰渣分为粗渣和细灰2种,其中气化细灰是气流床出口粗煤气洗涤净化过程中产生的黑水沉淀得到的固体废弃物,占气化灰渣总量的20%~40%。气化细灰具有高碳、高含水的特点,高碳限制了其资源化利用^[5-8]。目前主要的脱碳技术包括浮选脱碳和燃烧脱碳等^[9-10]。目前煤气化细灰的浮选脱碳研究较多^[11-17],大多通过浮选技术实现残碳回

收,由于残碳有较多的微孔隙结构,浮选脱碳的产品常用于活性炭制备以及作为其他吸附材料的原材料使用。但浮选脱碳存在气化细灰浮选药剂消耗量大、成本高等问题,难以实现浮选脱碳的推广^[18]。燃烧脱碳也是一种可行的思路,中国煤炭科工集团^[19]、航天长征化学工程股份有限公司^[20]、华电电力科学研究院^[21]、阳煤集团等^[22]进行了气化细灰用于循环流化床锅炉混煤燃烧的探索研究,但受限于气化细灰粒径较细、水分较高,气化细灰与常规燃料的掺混比例难以超过30%,无法满足大规模处理的要求。因此,目前的技术无法实现气化细灰的高效脱碳,已成为气化细灰大规模增值化利用的瓶颈技术。

为了开发气化细灰的高效燃烧脱碳技术,需针对气化细灰的理化特性进行深入研究。目前针对气化细灰的理化特性分析较少^[23],主要包括工业分析、粒径分析等基础分析,分析结果无法支撑高效燃烧脱碳技术的开发。气流床包括干粉气化和水煤浆气化,涵盖航天炉、华东理工四喷嘴气化炉、GSP和Shell等多种炉型,目前尚无系统性的结果比对。

因此,本文从宁夏和大同等西北地区的煤化工基地选取3种气流床气化细灰,进行化学成分、粒径、微观形貌、孔隙结构、熔融特性和燃烧特性等系统分析,探究气化细灰的理化特性,为气化细灰高效脱碳技术的开发提供基础理论数据。

1 样品来源与样品分析

1.1 样品来源

3种气化细灰取自宁夏和大同等煤化工基地,炉型涵盖德士古、航天炉和壳牌等国内主流炉型(表1),气化细灰样品均采用四分法取样。

表1 气化细灰样品

Table 1 Fine slag samples from gasification

样品	来源	炉型	原煤	运行特性
宁夏宁煤德士古气化细灰(DSG)	神华宁夏煤业集团	德士古水煤浆加压气化炉	宁东矿区烟煤	1 350 ℃, 4.0 MPa
宁夏宝丰航天炉气化细灰(HL)	宁夏宝丰能源集团	HT-L粉煤加压气化炉	宁东矿区褐煤	1 400 ℃, 4.0 MPa
山西大同壳牌炉气化细灰(SH)	同煤广发化学工业有限公司	壳牌粉煤加压气化炉	大同烟煤	1 500 ℃, 4.0 MPa

1.2 样品分析方法

采用马尔文 Mastersizer 2000 型激光粒度仪对气化细灰进行粒度分析;采用德国 element 元素分析仪对气化细灰元素组成进行分析;采用日本电子

的 JSM-7800 型原位超高分辨场发射扫描电镜及能谱仪观察气化细灰的表面微观形貌特征并对其中颗粒采用能谱仪(EDS)分析其各元素含量;采用上海思百吉公司 AXIOS 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)对

气化细灰的各元素含量进行半定量分析;采用 ASAP2020 型全自动比表面积和孔隙度分析仪对气化细灰的孔隙结构进行分析;采用德国耐驰集团 NETZSCH 生产的 STA 449F3 型热重分析仪对燃烧特性进行分析。

2 结果与讨论

2.1 成分分析

表 2 为气化细灰的工业分析。可知,气化细灰收到基水分较高,在 40.05%~54.68%,原因在于气流床气化细灰是粗煤气中通过文丘里洗涤之后产生的黑水沉淀得到;固定碳为 9.91%~25.01%,热值较低,仅 2.13~8.48 MJ/kg;由于气化细灰是气化炉高温气化后的产物,因此气化细灰中的挥发分较低,小于 2%,气化细灰高水、低挥发分和低热值的特征决定其高效燃烧脱碳技术难度大。通过脱水干燥处理后,干燥基固定碳为 16.19%~48.39%,热值为 3.48~15.51 MJ/kg。对比 3 种不同的炉型,SH 气化细灰固定碳最高,HL 次之,DSG 最低,说明德士古气化炉在运行过程中碳转化率较高。

表 2 气化细灰工业分析

Table 2 Proximate analysis of fine slag from gasification

样品	$M_d/\%$	$V_d/\%$	$A_d/\%$	$FC_d/\%$	$Q_{net,d}/(MJ \cdot kg^{-1})$
DSG	2.08	3.01	78.72	16.19	3.48
HL	2.03	3.14	57.66	37.18	11.56
SH	0.50	1.43	49.68	48.39	15.51

样品	$M_{ar}/\%$	$V_{ar}/\%$	$A_{ar}/\%$	$FC_{ar}/\%$	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$
DSG	40.05	1.84	48.20	9.91	2.13
HL	54.68	1.45	26.67	17.2	5.35
SH	48.57	0.74	25.68	25.01	8.48

由于德国 element 元素分析仪要求样品必须是不含吸附水的均匀固体微粒,因此对 3 种气化细灰的干燥基进行元素分析(表 3)。可以看到,气化细灰的 H 含量均小于 1%,主要是因为煤在气化过程中挥发分全部析出。气化细灰中的 N 和 S 含量也较低,可能是气化过程中以 NH_3 和 H_2S 等气体析出。

表 3 气化细灰干燥基元素分析

Table 3 Ultimate analysis of fine slag from gasification of dry basis %

样品	C	H	O	N	S
DSG	15.81	0.61	4.32	0.09	0.44
HL	36.57	0.81	4.57	0.15	0.25
SH	47.34	0.37	1.74	0.21	0.65

利用 X 射线荧光光谱仪,分析得到气化细灰的灰成分分析结果见表 4。可知,气化细灰中主要元素为 SiO_2 、 Al_2O_3 、CaO 和 Fe_2O_3 ,与原煤无明显差别。其中 SiO_2 含量最多,在 43.64%~53.25%, Al_2O_3 (15.56%~21.33%)、CaO (9.93%~14.00%) 和 Fe_2O_3 (7.43%~10.81%) 次之。气化细灰中 CaO 含量较高,是由于在气化炉运行过程中,为了降低灰渣熔点、保证连续液态排渣,加入 CaO 作为助熔剂的缘故。

表 4 气化细灰中灰成分分析

Table 4 Compositions of fine slag from gasification %

样品	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
DSG	53.25	15.56	9.93	7.43	3.70	2.98	2.29	2.08
HL	46.62	16.02	14.00	10.81	2.52	3.28	1.68	2.32
SH	43.64	21.33	12.16	9.04	1.03	6.52	1.38	1.05

2.2 粒径分布

利用马尔文 Mastersizer 2000 型激光粒度仪对气化细灰进行粒度分析,见表 5。

表 5 细灰粒径分布

Table 5 Particle size distribution of fine slag from gasification

样品	体积平均直径/ μm	$D_{10}/$ μm	$D_{50}/$ μm	$D_{90}/$ μm	粒径/ μm
DSG	29.68	1.52	12.70	82.87	0.32~282
HL	36.29	2.81	22.76	89.88	0.32~252
SH	114.48	4.86	52.07	322.40	0.40~710

DSG、HL、SH 三种气化细灰粒径分布在 0.32~282、0.32~252、0.40~710 μm ,中位粒径 D_{50} 分别为 12.70、22.76、57.06 μm 。与入炉煤相比,粒径明显降低。原煤到气化细灰粒径变化的过程主要包括煤焦的膨胀与破碎、灰渣的熔融和破碎。3 种气化细灰粒径区别主要是由原煤煤质、原煤矿物质组成、气化炉的工艺条件和操作条件不同导致,其中德士古水煤浆气化细灰粒径最小。

2.3 BET 比表面积和孔体积

图 1 为不同气化细灰的吸附脱附特性曲线,吸附等温线整体上均呈现为反 S 型等温线特征^[24]。由氮吸附分析结果可知,气化细灰的吸附过程分为单层吸附阶段与多层吸附阶段,其中转变过程存在拐点。

升压时的吸附曲线与降压时的脱附曲线不重合,且样品的吸附-脱附曲线均在相对压力为 0.40~0.50 处发生分离,出现吸附迟滞,脱附曲线在吸附曲线左侧,且属于 H3 型回线^[25],说明气化细灰颗粒的孔隙结构中存在裂缝型孔隙结构,发生毛细管凝聚现象。

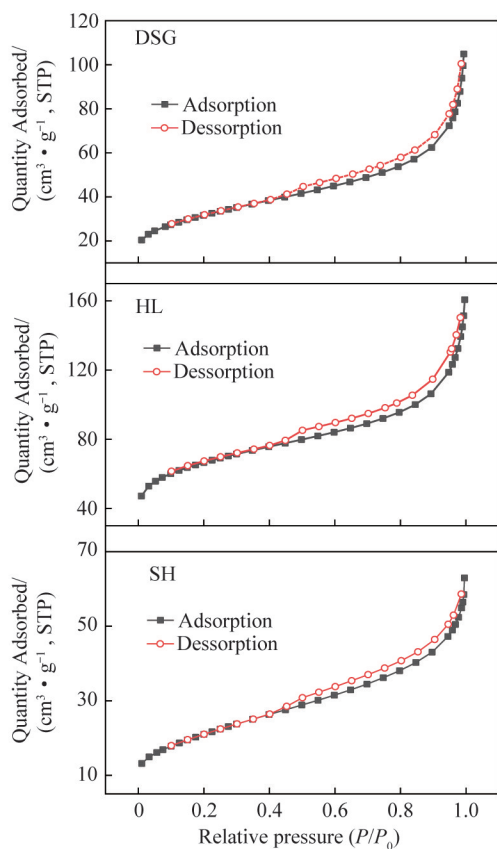


图1 吸附脱附曲线

Fig.1 Quantity adsorbed and desorption of fine slag from gasification

表6为BET比表面积与比孔容积,可知,3种气化细灰的峰值孔径均小于2 nm,说明孔隙均属于微孔结构,在燃烧脱碳过程中,需打开微孔,增加残炭与O₂的接触面积,增强气化细灰的反应活性。

表6 BET比表面积与比孔容积

Table 6 BET surface area pore volume of fine slag from gasification

样品	BET surface area $A/(m^2 \cdot g^{-1})$	Total pore volume $\gamma/(m^3 \cdot g^{-1})$	峰值孔径/ nm
DSG	110.34	143.31	1.58
HL	220.98	178.79	1.58
SH	74.19	80.78	1.78

由表6可知,不同炉膛下气化细灰的BET比表面积和比容积相差较大,孔隙比表面积在74.19~220.98 m²/g,孔隙比容积在80.78~178.79 m³/g,是因为比表面积和孔隙比容积数值与气化细灰颗粒粒径存在直接关系,粒径越大,比表面积和比容积越小。SH气化细灰粒径最大,因此该种气化细灰的孔隙比表面积最小。相对于壳牌炉和德士古炉,HL气化细灰孔隙结构更发达,由于HL气化细灰粒径较小,其比表面积较大。

2.4 扫描电镜及能谱

2.4.1 微观结构

3种气化细灰的扫描电镜照片如图2所示。可知气化细灰的表面孔隙结构差,表面有明显的熔渣状物体,主要原因是气化炉温度高于1300℃,高于煤灰的熔融温度。较差的孔隙结构阻碍未燃碳与氧气接触,制约了气化细灰的脱碳反应。因此实现气化细灰的高效脱碳,必须先打开气化细灰的熔渣外壳,提高气化细灰的反应活性。

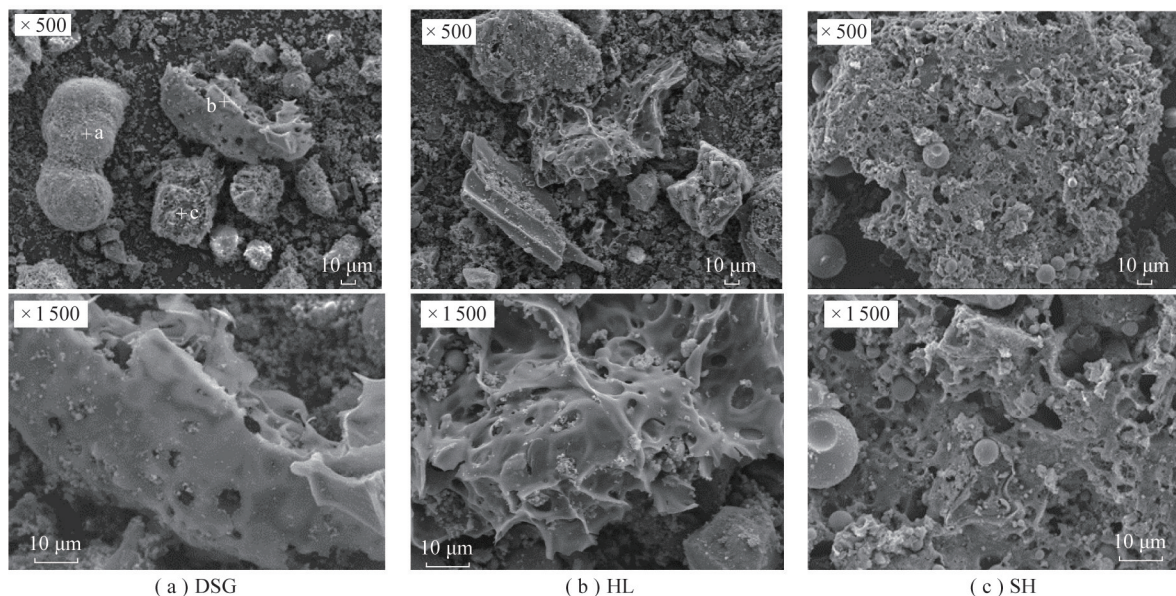


图2 细灰SEM照片

Fig.2 SEM images of fine slag from gasification

2.4.2 能谱分析

气化细灰颗粒可分为残碳含量较高的絮状物颗粒和形状较为规则的球形颗粒。气化细灰的能谱分析如图3所示。可以看出,残碳在b、c点(图2(a))特征明显的絮团状物中含量较高,在a点残碳含量较低,无机物(SiO_2 、 AlO_3 、 CaO 和 Fe_2O_3)含量较高。Zhao等^[26]研究发现,气化细灰表面覆盖细小球体和絮团状部分,气化细灰中的球体与凝絮物分离,且絮团状物的残碳含量始终高于球体。

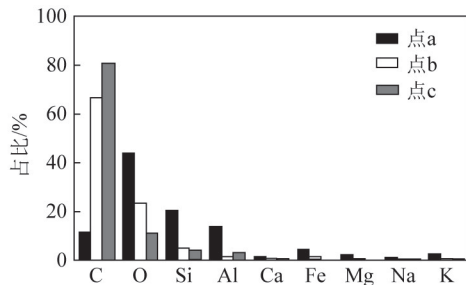


图3 气化细灰局部能谱分析

Fig.3 EDS of DSG fine slag from gasification

2.5 煤灰熔融性

根据GB/T 219—2008《煤灰熔融性测定方法》,在弱还原性气氛下,测定4种气化细灰的灰熔温度,(表7)。宁煤德士古气化炉与宝丰航天炉气化炉生成的气化细灰最高,达1300℃以上,壳牌炉气化细灰的熔融温度为1110℃。由于宁煤德士古炉与宝丰航天炉使用原料均为宁东矿区煤种,导致气化细灰熔融温度接近,且均比壳牌炉气化细灰高。

表7 气化细灰熔融性

Table 7 Fusibility characteristics of fine slag from gasification

样品	DT/℃	ST/℃	HT/℃	FT/℃
DSG	1 090	1 120	1 150	1 320
HL	1 120	1 130	1 140	1 330
SH	1 020	1 030	1 040	1 110

2.6 热重分析

对3种干燥后气化细灰(含水量<3%)的燃烧特性进行分析,升温速率为10 K/min,温度0~1200℃,气氛为 O_2/N_2 , O_2 占比21%、30%和50%。

气流床气化细灰TG和DTG曲线如图5所示,由于3种气流床气化细灰中无挥发分,因此常规煤在400℃左右挥发分析出阶段并未发生。3种气化细灰的主要失重阶段在487~700℃,DSG、HL、SH的失重率分别为13%、29%和17%,相比3种气化细灰中原有的残碳16%、37%和48%,DSG气化细灰残碳消耗81%,HL气化细灰残碳消耗78%,SH气化细灰残碳消耗35%。说明在常规燃烧温度下

(<1200℃),无法实现气化细灰的高效脱碳,这是由于气化细灰颗粒内部可燃碳被熔渣覆盖甚至包裹(图2),可燃碳表面覆盖的矿物熔渣是在气化炉内接近甚至超过流动温度的反应条件下形成的,在燃烧脱碳过程中,必须高于熔融温度才能打开熔渣包裹层,实现内部可燃碳完全燃烧。因此需要进一步提高燃烧温度至1300℃以上。

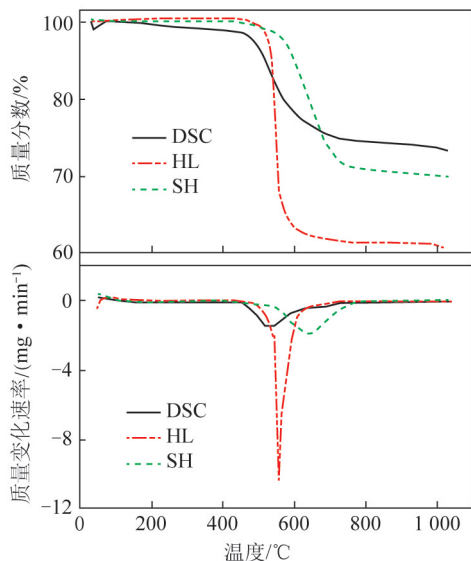


图4 气流床气化细灰TG曲线与DTG曲线

Fig.4 TG & DTG curve of fine slag from gasification

通过着火特性、燃尽特性和综合燃烧特性对3种气化细灰的燃烧特性进行对比。

着火特性由着火温度 T_i 表征, T_i 越低,着火特性越好, T_i 通过TG-DTG方法^[27]确定。

燃尽特性由肖三霞^[28]提出的燃尽特性指标 H_j 表征, H_j 越大,样品的燃尽特性越好。

$$H_j = \frac{\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\max}}{T_i T_{\max} \frac{\Delta T_h}{\Delta T}}, \quad (1)$$

式中, T_{\max} 为样品的燃烧最大失重峰温度,℃; $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\max}$ 为样品燃烧最大质量变化速率,mg/min; ΔT_h 为DTG曲线后半峰温宽温度差,℃; ΔT 为DTG曲线总峰温度差,℃。

综合燃烧特性由陈建原等^[29]提出的综合燃烧特性指数 S 表征, S 综合反映了样品的着火特性和燃尽特性, S 值越大,说明样品的着火和燃尽特性越好。

$$S = \frac{\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\max} \left(\frac{dw}{dt}\right)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_b}, \quad (2)$$

式中, $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\text{mean}}$ 为平均燃烧速率, mg/min; T_b 为样品的燃尽温度, °C。

3种气化细灰的各项燃烧特性指标见表8, 可知 $O_2/N_2 = 21\%/79\%$ 时, DSG、HL、SH 三种气化细灰着火温度分别为 487.0、540.7、587.6 °C, DSG 气流床气化细灰燃点最低, 487 °C 即可到达着火温度, SH 气流床气化细灰燃点温度最高, 须达到 587.6 °C 才可燃烧。HL 气化细灰的综合燃烧特性最佳, 其次是 DSG 气化细灰, SH 气化细灰综合燃烧特性较差, 着火较为困难且燃尽性较差, 综合燃烧特性远低于 HL 气化细灰。

表8 燃烧特性指标

Table 8 Burning characteristics of fine slag from gasification

样品	气氛(O_2/N_2)	$T_i/^\circ\text{C}$	$H_j/10^{-6}$	$S/10^{-9}$
DSG7921	21%/79%	487.0	0.857	0.107
DSG7030	30%/70%	480.1	1.080	0.174
DSG5050	50%/50%	469.0	1.020	0.160
HL7921	21%/79%	540.7	5.760	4.430
HL7030	30%/70%	534.3	19.000	30.900
HL5050	50%/50%	536.3	16.600	28.400
SH7921	21%/79%	587.6	1.420	0.191
SH7030	30%/70%	554.8	1.660	0.268
SH5050	50%/50%	531.9	1.020	0.097 1

从表8可以看到, 随着氧气体积分数从 21% 升到 30% 的富氧浓度, 2种气化细灰的燃尽特性指标均呈上升趋势, 其中增幅最大的是 HL 气化细灰, 燃尽特性指标提高 230%, 其次是 DSG 与 SH 气化细灰, 分别提高为 26%、17%; 从 30% 升到 50% 时, 不同气化细灰的燃尽特性指标均呈下降趋势, 燃烧特性变差。DSG、HL、SH 气化细灰的燃烧特性指数分别减少 5.6%、12.6%、38.6%。

通过对3种气流床煤气化细灰的理化特性分析, 目前常规的燃烧脱碳技术无法实现气流床煤气化细灰的高效脱碳, 因此需开发新型的燃烧脱碳技术, 为气化细灰的资源化利用提供支撑。

3 结 论

1) 气化细灰含水较多, 3种样品中水分均在 40% 以上, 因此热值较低, 低于 10 MJ/kg。由于气流床 1 400~1 600 °C 运行特性, 挥发分几乎完全脱除。各气化细灰样品中位粒径均小于 100 μm 。

2) 气化细灰孔隙结构差, SH 样品尤为显著, 比表面积仅为 74.19 m^2/g ; 孔隙结构更好的 HL 样品比表面积为 220.98 m^2/g , 综合燃烧特性指数说明

HL 样品反应活性远高于 SH。较差的孔隙结构不利于氧化剂通过气体扩散作用抵达反应界面处, 阻碍了残碳反应。

3) 气化细灰表面存在熔融渣层, 燃尽特性差, 增加了高效脱碳难度。氧气体积分数由 21% 升至 30%, 有助于促进氧化剂气体扩散作用, 一定程度上提高了气化细灰的反应活性。

参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [2] 岑可法. 煤炭高效清洁低碳利用研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(10): 66-74.
CEN Kefa. Research progress and outlook for efficient, clean and low-carbon coal utilization [J]. Science & Technology Review, 2018, 36(10): 66-74.
- [3] 于广锁, 牛苗任, 王亦飞, 等. 气流床煤气化的技术现状和发展趋势[J]. 现代化工, 2004(5): 23-26.
YU Guangsuo, NIU Miaoren, WANG Yifei, et al. The technical status and development trend of gas bed coal gasification [J]. Modern Chemical Industry, 2004(5): 23-26.
- [4] 王辅臣. 煤气化技术在中国: 回顾与展望[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 1-33.
WANG Fuchen. Coal gasification technologies in China: Review and prospect [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 1-33.
- [5] ACOSTA A, IGLESIAS A, AINETO M, et al. Utilisation of IGCC slag and claysteriles in soft mud bricks (by pressing) for use in building bricks manufacturing [J]. Waste Management, 2002, 22(8): 887-891.
- [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] ISHIKAWA Y. Utilization of coal gasification slag collected from IGCC as fine aggregate for concrete [R]. Thessaloniki Greece: Proceedings of the Eurocoalash 2012 Conference, 2012.
- [8] MARTIN I, ECHEVERIA A, GARCIA-ROMERO E. Recycling of residual IGCC slags and their benefits as degreasers in ceramics [J]. Journal of Environment Management, 2013, 129: 1-8.
- [9] 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 Chenmian, et al. Research progress on decarburization technology of coal gasification ash [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 1-10.
- [10] 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 decarbonization of fine slag in gasification [J]. Huadian Technology, 2020, 42(7): 81-86.

- [11] GUO Fanhui, MIAO Zekai, GUO Zhenkun, et al. Properties of flo-tation residual carbon from gasification fine slag[J]. Fuel, 2020, 267:1-8.
- [12] 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.
- [13] 邹涛, 林益安, 刘军, 等. 基于气化黑水的含油废弃物热洗-细渣高值利用集成工艺: CN110422975A[P]. 2019-11-08.
ZOU Tao, LIN Yi'an, LIU Jun, et al. Integrated process of hot washing of oil-bearing waste and high value utilization of fine slag based on gasification black water: CN110422975A[P]. 2019-11-08.
- [14] ZHOU Feng, YAN Chunjie, WANG Hongquan, et al. The result of surfactants on froth flotation of unburned carbon from coal fly ash[J]. Fuel, 2017, 190:182-188.
- [15] 白雪杰, 朱金波. 煤泥浮选设备研究现状及进展[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(1):40-42, 46.
BAI Xuejie, ZHU Jinbo. Research Status and development of slime flotation equipment[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2017(1):40-42, 46.
- [16] UCURUM M. Influences of Jameson flotation operation variables on the kinetics and recovery of unburned carbon[J]. Power Technology, 2009, 191(3):240-246.
- [17] 李春启, 杨明顺, 康善娇, 等. 煤气化细渣分选及回用的方法: CN105524669A[P]. 2016-04-27.
LI Chunqi, YANG Mingshun, KANG Shanjiao, et al. Separation and reuse of coal gasification fine slag: CN105524669A[P]. 2016-04-27.
- [18] 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, 2018.
HU Junyang. Study on the comprehensive utilization of a coal gasification slag in the North[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [19] 李启辉. 煤气化滤饼资源化利用工艺设计[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(8):73-75.
LI Qihui. Process design of resource utilization of coal gasification filter cake[J]. Comprehensive Utilization of Resources in China, 2019, 37(8):73-75.
- [20] 徐会超, 袁本旺, 冯俊红. 煤化工气化炉渣综合利用的现状与发展趋势[J]. 化工管理, 2017(18):35-36.
XU Huichao, YUAN Benwang, FENG Junhong. Current situation and development trend of comprehensive utilization of coal gasification slag[J]. Chemical Industry Management, 2017(18):35-36.
- [21] 刘奥灏, 张磊, 张贺, 等. 燃煤锅炉掺烧气化灰渣试验研究[J]. 热力发电, 2020, 49(4):19-24.
LIU Aohao, ZHANG Lei, ZHANG He, et al. Experimental study on mixed combustion gasification ash of coal-fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(4):19-24.
- [22] 白振波, 李彦坤, 王翠. 气化炉细灰综合利用改造[J]. 化肥设计, 2017, 55(1):59-62.
BAI Zhenbo, LI Yankun, WANG Cui. Comprehensive utilization of fine ash in gasifier[J]. Chemical Fertilizer Design, 2017, 55(1):59-62.
- [23] 李刚健. 煤化工气化滤饼组份分析与综合利用简述[J]. 科技信息, 2012(35):466, 398.
LI Gangjian. Analysis and comprehensive utilization of coal chemical gasification filter cake components[J]. Science and Technology Information, 2012(35):466, 398.
- [24] 严继民. 吸附与凝聚[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
YAN Jimin. Adsorption and Coagulation[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [25] 刘辉, 吴少华, 姜秀民, 等. 快速热解褐煤焦的低温氮吸附等温线形态分析[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4):507-510.
LIU Hui, WU Shaohua, JIANG Xiumin, et al. Nitrogen adsorption isotherm of lignite char during rapid pyrolysis[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4):507-510.
- [26] ZHAO X, ZENG C, MAO Y, et al. The surface characteristics and reactivity of residual carbon in coal gasification slag[J]. Energy & Fuels, 2009, 24(1):91-94.
- [27] 张建良, 王广伟, 邢相栋, 等. 煤粉富氧燃烧特性及动力学分析[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(4):9-14.
ZHANG Jianliang, WANG Guangwei, XING Xiangdong, et al. Combustion characteristics and kinetics of pulverized coal with oxygen enrichment[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(4):9-14.
- [28] 肖三霞. 煤的热天平燃烧反应动力学特性的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
XIAO Sanxia. Study on kinetic characteristics of thermal balance combustion reaction of coal[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [29] 陈建原, 孙学信. 煤的挥发分释放特性指数及燃烧特性指数的确定[J]. 动力工程学报, 1987, 7(5):15-20.
Jianyuan CHEN, Xuexin SUN. Determination of volatile matter release index and combustion characteristic index of coal[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 1987, 7(5):15-20.