

气化细渣基础燃烧特性试验研究

杜杰¹, 戴高峰², 李帅帅², 王学斌², 孙晓伟¹, 谭厚章²

(1. 陕西延长中煤榆林能源化工有限公司, 陕西 榆林 718501; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:煤气化过程中产生大量含碳量较高的气化细渣,其填埋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,如何高效环保地对气化细渣进行资源化利用是目前研究的热点。在获得气化细渣工业分析、元素分析、粒径分布、灰成分和微观形貌等基础上,利用热重对气化细渣单独燃烧及与燃料煤混合燃烧特性进行研究,对比了气化细渣与典型煤种燃烧特性的差异,并考虑掺混比例对混燃的影响。研究表明:气化细渣的 $M_{ar} = 69.7\%$, $A_d = 54.5\%$, $w(C_d) = 43.4\%$, $Q_{gr,d} = 16.14$ MJ/kg,干化后的气化细渣中碳含量和发热量与对比劣质烟煤相当;干燥后的气化细渣粒径普遍小于 $200\ \mu\text{m}$,且孔隙结构发达,电镜结果显示其微观结构由球形颗粒和不规则多孔形状颗粒组成。气化细渣与其他煤种燃烧特性对比表明:气化细渣的着火温度和燃尽温度分别为 $601.6\ ^\circ\text{C}$ 和 $680.8\ ^\circ\text{C}$,着火和燃尽特性对比煤样和对应的原煤略差。气化细渣和原煤在不同掺烧比例下的热重燃烧试验结果表明,气化细渣和原煤掺烧存在显著的协同效应,与原煤掺烧能显著改进气化细渣的燃烧特性,在25%气化细渣掺烧比例下,气化细渣的燃烧特性得到显著改善,且相比于纯烧原煤,掺烧气化细渣后混煤的燃烧特性未显著下降。研究表明,干化后高含碳量的气化细渣极具应用价值,且与原煤掺烧对混煤的燃烧特性影响较小,还能显著改进混煤的燃烧特性,将干化后的气化细渣与原煤掺烧是一种可行的利用气化细渣热值的技术方案。

关键词: 气化细渣; 燃烧; 热重; 混燃; 协同效应

中图分类号: TQ53

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)02-0083-06

Experimental study on the fundamental combustion characteristics of fine slag from gasification

DU Jie¹, DAI Gaofeng², LI Shuaishuai², WANG Xuebin², SUN Xiaowei¹, TAN Houzhang²

(1. Shaanxi Yanchang Coal Yulin Energy and Chemical Co., Ltd., Yulin 718501, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the process of coal gasification, a large amount of fine gasification slag (HC-ash) with high carbon content is produced. The ash-waste landfilling occupies a lot of land, causes the pollution of soil and water, and also wastes the energy. How to utilize the coal-gasification ash (HC-ash) is attracting more and more attentions recently. Based on the proximate and ultimate analysis, particle size distribution, ash compositions, and micro-morphologies of HC-ash, the characteristics of HC-ash combustion alone and combustion with raw coal were studied by thermogravimetric analysis (TGA). The difference of combustion characteristics between HC-ash and typical coal was compared. The influence of mixing ratio on mixture combustion was also considered. The results show that the moisture of HC-ash (as received basis) reaches 69.7%, the ash of dried HC-ash is 54.5%, the carbon content in dried HC-ash is 43.4% with a heating value of 16.14 MJ/kg. The carbon content and calorific value of dried HC-ash are equivalent to that of inferior bituminous coal. The particle size of dried HC-ash is generally smaller than $200\ \mu\text{m}$, but with a very developed porous structure. The results of SEM show that the microstructure of HC-ash is composed of sphere and porous irregular shapes. HC-ash compared with other types of combustion characteristics show that the ignition temperature and

收稿日期: 2019-01-03; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19010310

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0603902)

作者简介: 杜杰(1987—),男,陕西府谷人,工程师,主要从事煤化工行业的技术工艺研究。E-mail: du_jie@ycynh.com

通讯作者: 王学斌(1984—),男,山东潍坊人,副教授,主要从事清洁燃烧和污染物控制方面研究。E-mail: wxb005@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 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.



移动阅读

burnout temperature of HC-ash is 601.6 °C and 680.8 °C, respectively, which are slightly worse than those of contrastive coal samples. The TGA results with different mixing ratio of HC-ash and raw coal show that a significant synergistic effect is observed during the co-combustion of HC-ash and raw coal, which can significantly improve the combustion property of HC-ash. When mixing ratio is 25%, the combustion property of HC-ash is significantly improved and the combustion characteristics of mixed coal with HC-ash decreases slightly compared with pure raw coal. This study indicates that the dried HC-ash is of great application value, its co-firing with raw coal has little influence on the combustion characteristics of mixed coal and is able to improve the overall combustion properties. The overall results suggest that combustion of dried HC-ash with raw coal is a feasible technical scheme to utilize the calorific value of HC-ash.

Key words: fine slag from gasification; combustion; TGA; co-combustion; synergistic effect

0 前 言

煤气化过程会产生大量灰渣,主要包括气化粗渣和气化细渣。气化粗渣的发热量低,可用作建筑材料和回填;气化细渣含碳量和烧失量大,超过国家标准和行业标准,难以用做建材、建工道路及回填工程^[1]。气化细渣的产生不仅造成资源浪费,且占用大量土地,其渗滤液还会造成土壤和水体污染。气化细渣含碳量较高,采用合理的燃烧方式处理气化细渣不仅可减轻其对环境的污染,同时还可回收其中的能量,提高企业的经济效益。但气化细渣的含水量高、挥发分极低、着火燃烧特性差,难以直接作为燃料燃烧;气化细渣与燃烧特性良好的燃料煤进行混烧可改善其着火和燃尽特性,被认为是一种可行的技术方案^[2]。

目前对气化细渣的物理和化学特性已有较多的研究,杨帅等^[1]测量了神华宁夏煤业集团有限公司的德士古水煤浆气化炉、四喷嘴对置式气化炉和GSP气化炉3种气化炉产生气化细渣的烧失率及氧化物成分,发现3种气化细渣烧失率过高,难以用做建材、建工、道路及回填工程,建议送入循环流化床锅炉与煤掺烧或对细渣进行分选后利用。赵世永等^[3]对Texaco气化炉产生灰渣的物理化学特性进行了全面分析,并用药剂与超声波预处理的方法对气化细渣的未燃碳进行处理。刘嘉鹏^[4]对气流床产生的气化细灰进行热重分析,发现气化细灰的着火和燃尽特性差,认为综合燃烧指数显著低于煤粉,因此无法在煤粉锅炉内掺烧气化细渣,并提出采用新型的气化残炭燃烧技术用于气化细渣的处理。Xu等^[5]发现气化细渣的气化活性小于酸洗处理后的细化细渣的气化活性,认为气化细渣的高碳层厚度和低含量的催化物质是导致气化细渣气化活性低的主要原因。高旭霞等^[6]利用XRD、TGA、可燃物含量测定等方法对气化细渣和粗渣进行了研究,发现气化细渣在气化炉的停留时间短于粗渣,是气化细渣可燃物含量高的原因。Tao等^[7]研究了气化细渣的微观形貌和粒径分布,

指出细渣中的所有玻璃态颗粒均小于150 μm,而以质量计的大部分残余碳(75.6%)大于160 μm,通过简单的筛分操作可降低碳含量,可用作混凝土的添加剂。有研究指出^[8],气化细渣中未燃尽碳含量可达60%,说明干化后的气化细渣仍有很大的热量应用价值,将其与燃烧特性较好的煤掺烧可实现气化细渣的燃烧,进而实现气化细渣的资源化利用。目前对于煤与半焦掺烧的研究较多,西安热工院在国内首次将热解半焦于135 MW煤粉炉内掺烧,试验结果表明,掺烧30%左右的半焦对锅炉运行经济性影响较小,且在当前煤炭价格下对供电成本的影响低于1%^[9-10],并对半焦在电站锅炉内掺烧的着火性和制粉系统适应性提出了评价指标^[11-12]。张旻晓^[13]研究表明,气化半焦在流化床内掺烧时易导致锅炉效率大幅下降,需对锅炉结构进行改造后才能实现气化半焦的高效混燃。文献[14]对低阶煤提质后半焦与原煤混燃的试验结果表明,半焦混燃显著降低了燃烧过程中细颗粒物的排放量。但目前对于气化细渣燃烧及混燃特性的研究相对较少,还未有成功的工程示范案例报道。因此,全面深入掌握气化细渣的综合物理化学特性、燃烧反应活性和掺烧特性对发展可靠的气化细渣资源化利用技术十分迫切。

本文对某型气化炉产生细渣的基本燃料特性、粒径分布、微观形貌和灰成分特性等进行分析,利用热重试验平台研究了气化细渣的燃烧反应动力学特性,并与多种常见煤种进行对比,最后对气化细渣与原煤的混燃特性进行了研究,重点讨论了细渣与原煤混燃过程中可能存在的协同效应。

1 试 验

1.1 燃料特性

试验燃料选用陕西延长中煤榆林能源化工有限公司使用的燃料煤和生产的气化细渣,并选取该公司燃料煤、劣质烟煤、贫煤、无烟煤和石墨作为对比煤样。气化细渣和各煤种的工业分析、元素分析和发热量见表1。

表1 燃料的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of fuel samples

燃料	工业分析/%				元素分析/%				$Q_{gr,d}/$ (MJ·kg ⁻¹)
	M_{ar}	V_d	FC_d	A_d	C_d	H_d	N_d	S_d	
燃料煤	13.1	34.2	59.4	6.4	76.8	5	1.1	1.8	30.30
气化细渣	69.7	2.1	43.4	54.5	47.8	0.5	0.3	1.9	16.14
劣质烟煤	1.9	18.1	36.8	45.1	44.2	2.9	0.7	1.3	16.80
贫煤	4.3	12.1	65.3	22.6	63.7	1.5	1.0	1.1	23.50
无烟煤	9.7	9.4	71.3	19.3	74.0	3.3	1.2	1.4	28.10

由表1可知,燃料煤品质较优,其挥发分和固定碳较高,分别为34.2%和59.4%,灰分仅有6.4%;气化细渣的基础燃料特性较差,其水分达69.7%,气化细渣干燥基灰分达54.5%,远高于燃料煤和其他对比煤种,固定碳为43.4%, V_d 仅为2.1%。气化细渣的碳元素含量和高位发热量分别为47.8%和16.14 MJ/kg,与劣质烟煤较为接近。

1.2 试验方法

燃料粒径分布采用 OMEC LS-909 型激光粒度分析仪,微观形貌采用 Gemini SEM 500 型场发射扫描电子显微镜,放大倍数为 100~500 倍;分析的样品包括干化后的气化细渣和燃料煤。灰的制备方法根据 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》,灰的元素分析采用 S4-Pioneer 型 X 射线荧光光谱仪,灰的矿物组成采用 D/max2400 型 X 射线衍射仪。

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% O₂/80% N₂ 混合气模拟空气气氛。测试燃料包括燃料煤、气化细渣、对比用贫煤、对比用劣质烟煤、对比用无烟煤、对比用石墨粉、80% 气化细渣+20% 燃料煤、75% 气化细渣+25% 燃料煤、50% 气化细渣+50% 燃料煤、25% 气化细渣+75% 燃料煤。

2 试验结果与讨论

2.1 气化细渣的粒径分布和微观形貌特性

燃料煤和气化细渣的粒径分布如图1(a)所示,可以看出,气化细渣的粒径分布微分曲线呈单峰分布,燃料煤和气化细渣粒径分布的峰值分别在 45 μm 和 140~180 μm 附近。

利用 50、125、160 和 200 μm 筛子对气化细渣进行筛分,并对筛分后粒径<50、50~125、125~160、160~200 和>200 μm 的气化细渣进行称量,气化细渣的质量粒径分布如图1(b)所示。可以

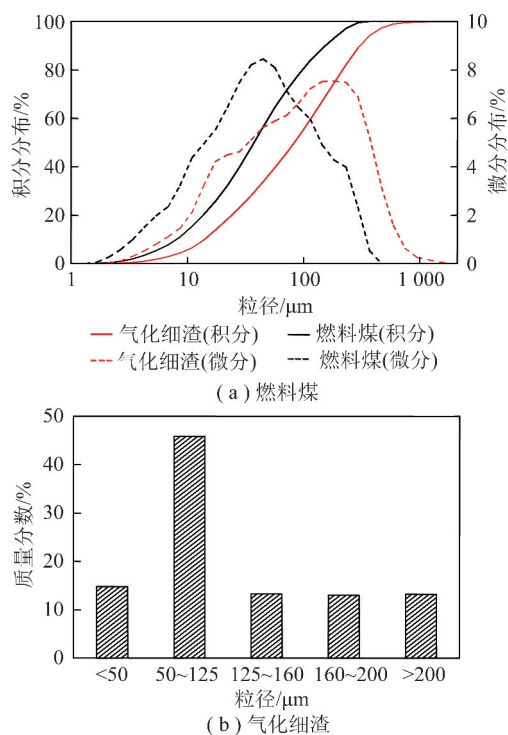


图1 燃料煤和气化细渣的粒径分布

Fig. 1 Particle size distributions of raw coal and HC-ash

看出,50~125 μm 的气化细渣质量占比为 45.8%,<50、125~160、160~200 和>200 μm 的气化细渣质量占比差异很小,分别为 14.8%、13.3%、13.0%和 13.2%。

燃料煤和气化细渣的微观形貌对比如图2所示。燃料煤和气化细渣的微观形貌具有显著差异,燃料煤主要由形状不规则的颗粒组成,气化细渣主要由疏松多孔的焦炭颗粒和部分高温下熔融的球形灰颗粒组成,气化细渣中2种颗粒的形成机理不同,前者主要是由气化过程中煤焦膨胀和破碎形成,球形灰颗粒是由高温下煤种外在矿物质发生熔融聚合形成。

2.2 气化细渣的灰成分及熔融特性

燃料煤灰和气化细渣灰的元素分析见表2,矿物组成如图3所示。由表2可知,燃料煤灰样和气

化细渣灰样主要由 Si、Al、Ca、Fe 组成,4 种元素氧化物质量分数合计超过灰样的 80%。燃料煤灰和气

化细渣中还含有少量的碱金属元素(Na、K)、碱土金属元素 Mg、过渡金属元素 Ti 和非金属元素 S。

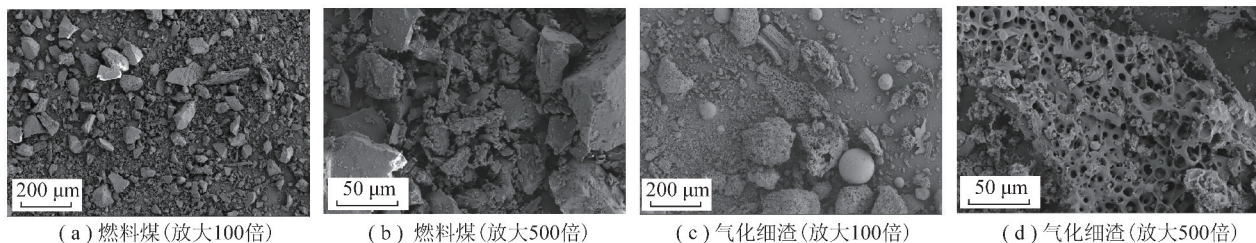


图2 燃料煤和气化细渣的微观形貌

Fig. 2 Morphology of raw coal and HC-ash

表2 燃料煤和气化细渣的灰成分元素分析

Table 2 Elemental analysis of ash from raw coal and HC-ash

样品	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
燃料煤	1.19	1.51	13.92	21.90	8.45	1.41	28.20	2.46	20.91
气化细渣	2.24	0.79	16.33	35.50	5.08	3.56	13.92	2.67	19.91

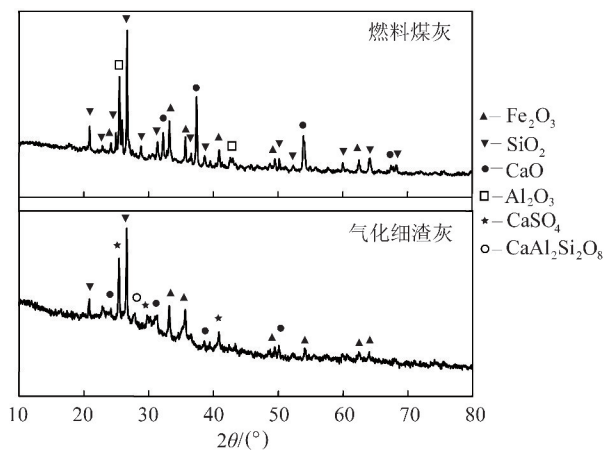


图3 燃料煤灰和气化细渣灰的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD of ash of raw coal and HC-ash

由图3可以看出,燃料煤灰和气化细渣灰中的矿物晶相组成基本相同,燃料煤灰主要含有 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 等,气化细渣灰中的主要成分为 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 CaSO_4 、 CaO 和 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 。

2.3 气化细渣的燃烧动力学特性

图4为燃料煤、气化细渣和对比劣质烟煤、贫煤、无烟煤、石墨燃烧的 TG-DTG 曲线。由图4可知,煤样、气化细渣和石墨粉燃烧失重均呈单峰分布;燃料煤燃烧失重对比劣质烟煤、贫煤、无烟煤显著提前,而气化细渣燃烧失重落后于对比劣质烟煤、贫煤、无烟煤,但比石墨粉显著提前。对于最终的残余成灰率,石墨粉最低,燃料煤、无烟煤和贫煤次之,气化细渣最大。

在图4的 TG-DTG 曲线上,可进一步获得样品燃烧的起始温度 T_i 和燃尽温度 T_h ,并由 DTG 曲线

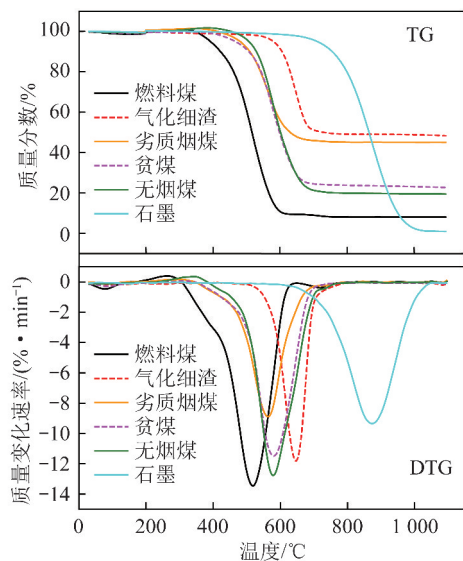


图4 燃料煤、气化细渣以及对比煤种燃烧的 TG-DTG 曲线

Fig. 4 TG-DTG curves of raw coal and other coal samples

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_{peak} [15]。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贡献;燃烧特性指数越大,综合燃烧特性越好 [16-17]。

$$S = w_{\max} w_{\text{mean}} / T_i^2 T_h \quad (1)$$

式中, w_{mean} 为平均质量变化速率, %/min。

表3为气化细渣和对比样品燃烧 TG-DTG 曲线的特征参数,可见,燃料煤燃烧的 T_i 、 T_h 最低,气化细渣燃烧的 T_i 、 T_h 均高于对比劣质烟煤、贫煤和无烟煤,但低于石墨粉,6种燃料燃烧特性指数的排序为:燃料煤>无烟煤>贫煤>劣质烟煤>气化细渣>石墨。

表 3 气化细渣和其他对比样品燃烧 TG-DTG 曲线的特征参数

Table 3 TG-DTG characteristic parameters of HC-ash and other coal samples

燃料	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_h/^\circ\text{C}$	$T_{\text{peak}}/^\circ\text{C}$	$w_{\text{max}}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$w_{\text{mean}}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$S/(\% ^2 \cdot (\text{min}^2 \cdot ^\circ\text{C}^3)^{-1})$
燃料煤	439.1	577.9	517.9	13.46	3.03	3.66×10^{-7}
气化细渣	601.6	680.8	646.3	11.80	1.42	6.80×10^{-8}
劣质烟煤	493.3	619.7	563.1	8.89	1.63	9.61×10^{-8}
贫煤	514.2	642.0	580.0	11.50	2.24	1.52×10^{-7}
无烟煤	520.6	648.8	578.5	12.77	2.28	1.66×10^{-7}
石墨	778.8	948.1	873.2	9.34	1.62	2.63×10^{-8}

2.4 气化细渣与燃料煤混燃的协同效应

虽然干化后的气化细渣含碳量高达 47.8%,但其挥发分非常低,只有 2.1%,因此即使干化后的气化细渣也无法在常规锅炉中维持自稳燃过程,通常需要与其他煤种掺烧。本文研究了不同掺混比例下的混燃失重 TG-DTG 曲线,并根据 2 者纯烧时的试验曲线,利用式(2)、(3)计算得到 2 者质量平均后的 TG 和 DTG 理论曲线,将理论失重曲线与实际失重曲线进行对比,分析气化细渣和燃料煤是否存在协同作用。

$$\xi_T = v\xi_A + (1-v)\xi_C \quad (2)$$

$$\left(\frac{d\xi}{d\tau}\right)_T = v\left(\frac{d\xi}{d\tau}\right)_A + (1-v)\left(\frac{d\xi}{d\tau}\right)_C \quad (3)$$

式中, v 为气化细渣混合比例,%; ξ 为燃料失重率,%; τ 为反应时间,s;下标 A、C、T 分别为气化细渣、燃料煤以及理论计算值。

气化细渣和燃料煤混燃的 TG-DTG 曲线如图 5 所示,图中“E”表示试验曲线,“T”表示理论计算得到的失重曲线。由图 5 可知,气化细渣/燃料煤混合样品燃烧的 DTG 曲线呈现双峰分布,分别对应燃料煤的燃烧和气化细渣的燃烧过程;且随燃料煤添加比例提高,燃烧的失重曲线提前,着火特性显著改善,第 1 个失重峰的峰值增大,第 2 个失重峰的峰值减小。对比混燃样品的实际失重曲线和理论计算值可知,在气化细渣掺烧比例为 25%~75% 时,气化细渣和燃料煤混燃呈现显著的促进协同效应,实际混燃的 DTG 曲线第 1 个失重峰的峰值高度均大于理论计算值,在气化细渣掺烧比例为 25% 时,实测

的 TG 曲线也明显提前于理论计算曲线。张锦萍等^[18]对烟煤与半焦掺烧的研究也表明,掺烧过程中存在较为显著的交互促进作用。

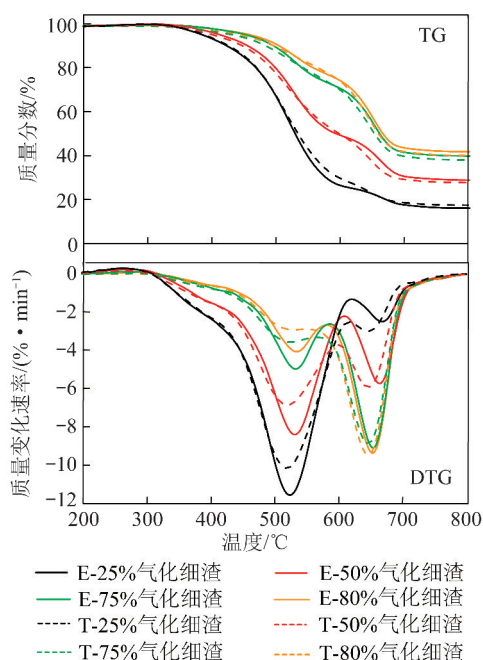


图 5 混合比例对气化细渣/燃料煤混燃 TG-DTG 曲线的影响

Fig. 5 Effect of mixing ratio on TG-DTG curve of HC-ash and raw coal co-combustion

表 4 为不同气化细渣混燃比例下对应实测混燃 TG-DTG 曲线的特征参数,可见,随着气化细渣添加比例由 20% 增至 75%,气化细渣/燃料煤混燃的起始温度 T_i 由 447.5 °C 升至 465.7 °C,燃烧特性指数由 1.98×10^{-7} 降低至 1.04×10^{-7} ,总体燃烧特性变差。

表 4 气化细渣和燃料煤混燃的特征参数

Table 4 Characteristic parameters of co-combustion of HC-ash and raw coal

气化细渣比例	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_h/^\circ\text{C}$	$T_{\text{peak}}/^\circ\text{C}$	$w_{\text{max}}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$w_{\text{mean}}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$S/(\% ^2 \cdot (\text{min}^2 \cdot ^\circ\text{C}^3)^{-1})$
25%	447.5	703.2	523.3	11.55	2.41	1.98×10^{-7}
50%	456.6	694.7	531.4	8.40	2.03	1.18×10^{-7}
75%	464.5	684.7	653.8	9.09	1.71	1.05×10^{-7}
80%	465.7	684.5	652.9	9.37	1.65	1.04×10^{-7}

3 结 论

1) 气化细渣的 $M_{ar} = 69.7\%$, $w(C_d) = 43.4\%$, $Q_{gr,d} = 16.14$ MJ/kg, 干燥后的气化细渣粒径普遍小于 $200\ \mu\text{m}$, 且孔隙结构发达, 干化后高含碳量的气化细渣极具应用价值。

2) 气化细渣的着火温度和燃尽温度分别为 $601.6\ ^\circ\text{C}$ 和 $680.8\ ^\circ\text{C}$, 着火和燃尽特性比无烟煤略差; 气化细渣与原料煤混燃时, 随气化细渣添加比例增大, 燃烧特性指数下降, 燃烧特性变差, 但是二者掺烧存在显著的协同效应, 混合燃烧的实测失重曲线提前于理论失重曲线, 且实测失重速率显著大于理论值。因此, 气化细渣与燃料煤掺烧在一定程度上可改进混煤的总体着火和燃尽特性。

参考文献 (References):

[1] 杨帅, 石立军. 煤气化细渣组分分析及其综合利用探讨[J]. 煤化工, 2013, 41(4): 29-31.
YANG Shuai, SHI Lijun. Composition analysis of the fine slag from coal gasification and its comprehensive utilization[J]. Coal Chemical Industry, 2013, 41(4): 29-31.

[2] 商晓甫, 游洋洋, 周金倩, 等. 煤气化渣利用技术研究现状及应用趋势浅析[C]//2016 中国环境科学学会学术年会论文集(第3卷). 北京: [s. n.], 2016: 823-826.

[3] 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 Eexaco entrained flow gasifier[J]. Coal Engineering, 2016, 48(9): 29-32.

[4] 刘嘉鹏. 气流床气化细灰燃烧特性及再利用探讨[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(6): 17-20.
LIU Jiapeng. Discussion on combustion characteristics and reuse of entrained-flow gasified fine ash[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2017(6): 17-20.

[5] XU S, ZHOU Z, GAO X, et al. The gasification reactivity of unburned carbon present in gasification slag from entrained-flow gasifier[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(9): 1062-1070.

[6] 高旭霞, 郭晓镭, 龚欣. 气流床煤气化渣的特征[J]. 华东理工大学学报, 2009, 35(5): 677-683.
GAO Xuxia, GUO Xiaolei, GONG Xin. Characterization of slag from entrained flow coal gasification[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 35(5): 677-683.

[7] TAO W, MEI G, LESTER E, et al. Characterisation of residual carbon from entrained-bed coal water slurry gasifiers[J]. Fuel, 2007,

86(7): 972-982.

[8] MONTAGNARO F, BRACHI P, SALATINO P. Char-wall interaction and properties of slag waste in entrained-flow gasification of coal[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(8): 3671-3677.

[9] 刘家利, 郭孟狮, 李炎. 135 MW 机组锅炉掺烧半焦试验及经济性分析[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(2): 86-91.
LIU Jiali, GUO Mengshi, LI Yan. Economic analysis for a 135 MW pulverized coal fired boiler blending with semi-cok[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2): 86-91.

[10] 杨忠灿, 程国安, 李炎, 等. 电站煤粉锅炉掺烧兰炭试验研究[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(1): 80-85.
YANG Zhongcan, CHENG Guoan, LI Yan, et al. Experimental research on pulverized coal power station blending with semi-coke[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 80-85.

[11] 刘家利, 姚伟, 杨忠灿, 等. 半焦与不同制粉系统的适应性分析[J]. 热力发电, 2017, 46(2): 7-14.
LIU Jiali, YAO Wei, YANG Zhongcan, et al. Adaptability analysis for semi-coke in different mill systems[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 7-14.

[12] 杨忠灿, 刘家利, 王志超, 等. 半焦着火性能评价指标在电站锅炉上的应用[J]. 热力发电, 2017, 46(3): 109-113, 120.
YANG Zhongcan, LIU Jiali, WANG Zhichao, et al. Application of ignition performance evaluation indicator of semi-coke in utility boilers[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3): 109-113, 120.

[13] 张曼晓. 气化半焦在流化床实验台上燃烧特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[14] HUANG Q, LI S, LI G, et al. Reduction of fine particulate matter by blending lignite with semi-char in a down-fired pulverized coal combustor[J]. Fuel, 2016, 181: 1162-1169.

[15] WANG X, SI J, TAN H, et al. Kinetics investigation on the combustion of waste capsicum stalks in Western China using thermogravimetric analysis[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012, 109(1): 403-412.

[16] 姜秀民, 李巨斌, 邱健荣. 超细化煤粉燃烧特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 71-74.
JIANG Xiumin, LI Jubin, QIU Jianrong. Study on combustion characteristic of micro pulverized coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 71-74.

[17] WANG X, LI S, ADEOSUN A, 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.

[18] 张锦萍, 王长安, 贾晓威, 等. 半焦-烟煤混燃特性及动力学分析[J]. 化工学报, 2018, 69(8): 3611-3618.
ZHANG Jinping, WANG Chang'an, JIA Xiaowei, et al. Co-combustion characteristics and kinetic analysis of semi-coke and bituminous coal[J]. CIESC Journal, 2018, 69(8): 3611-3618.