

碱/碱土金属对煤热解半焦燃烧特性的影响

郑洪岩¹, 黄有航¹, 曾浩¹, 赵消旭¹, 冯智皓², 侯冉冉², 白宗庆²

(1. 太原工业学院 化学与化工系, 山西 太原 030008; 2. 中国科学院 山西煤炭化学研究所 煤转化国家重点实验室, 山西 太原 030001)

摘要: 低温热解提油-半焦燃烧可以实现低阶煤的梯级高效利用, 是目前低阶煤高效利用的研究热点。由于热解半焦挥发分低, 导致其燃点高、难燃尽, 而添加助燃剂是改善低挥发分煤热解半焦燃烧特性的有效途径。采用热重法研究了碱金属(K_2CO_3)和碱土金属($CaCO_3$)添加剂对半焦燃烧特性的影响, 并利用 Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) 模型对不同条件下的燃烧活化能进行研究。结果表明, 半焦着火温度高、燃烧性能差, 半焦中碱性矿物质对其燃烧性能有一定催化作用; $CaCO_3$ 的添加对半焦燃烧特征参数的影响不大, 说明其对半焦燃烧性能的促进作用不明显; 与碱土金属 $CaCO_3$ 不同, 添加碱金属 K_2CO_3 能显著降低煤热解半焦的燃点、最大燃烧峰温及燃烧指数; 同时随着 K_2CO_3 添加比例的增加, 半焦表观燃烧活化能显著降低, 说明其能明显促进半焦的燃烧反应性; 在本研究试验条件下, 添加 2% K_2CO_3 对改善半焦燃烧性能效果最好, 同时采用浸渍法添加 K_2CO_3 的分散效果更好, 因此相比机械混合方式, 浸渍法添加 K_2CO_3 更能改善半焦的燃烧特性。

关键词: 半焦; 燃烧; 添加剂; 热重分析; 燃烧活化能

中图分类号: TQ53

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2021)04-0062-06

Effects of alkali and alkaline metal on combustion characteristics of coal pyrolysis semi-coke

ZHENG Hongyan¹, HUANG Youhang¹, ZENG Hao¹, ZHAO Xiaoxu¹, FENG Zhihao², HOU Ranran², BAI Zongqing²

(1. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China; 2. State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Pyrolysis to recover oil accompanied by semi-coke combustion can realize the high-efficiency and staged utilization of low-rank coal, which is the research hotspot of high-efficiency utilization of low rank coal. However, because of its low volatile, the ignition temperature of semi-coke is high, and it is hard to burn out as well. The addition of flux is a promising method to improve the combustion properties of the hard-to-burn semi-coke with low volatile. In this paper, the effects of alkali (K_2CO_3) and alkaline metal ($CaCO_3$) on the combustion characteristics of semi-coke were studied by thermogravimetric analysis, and the activation energy of the semi-coke combustion were investigated by Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) model. The results show that the semi-coke has the high ignition temperature and low combustion reactivity. The inherent mineral matters in semi-coke have some catalytic effects on its combustion performance. The addition of $CaCO_3$ has little promotion effect on the characteristics of semi-coke combustion, which indicates that $CaCO_3$ does not improve its combustion properties. However, compared with alkali earth metal $CaCO_3$, the addition of K_2CO_3 obviously lowers the ignition temperature, the peak temperature of combustion and the combustion index. At the same time, with the increase of addition ratio of K_2CO_3 , the apparent activation energy of semi-coke combustion decreases obviously, which means that the addition of K_2CO_3 can apparently improve the combustion reactivity of semi-coke. 2% addition of K_2CO_3 shows the best improvement for the combustion of semi-coke in this experiment, and the dispersion effect of adding K_2CO_3 by impregnation method is better. In addition, the addition of K_2CO_3 with impregnation is more favorable for the improvement of semi-coke combustion than physical mixture.

Key words: semi-coke; combustion; additive; thermogravimetric analysis; combustion activation energy

收稿日期: 2021-03-30; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CE21033003

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0602002)

作者简介: 郑洪岩(1979—), 女, 山东乳山人, 副教授, 从事生物质和煤的清洁转化等方面科研工作。E-mail: 45989503@qq.com。通讯作者: 白宗庆, 研究员, 从事煤化学方面的研究。E-mail: baizq@sxicc.ac.cn

引用格式: 郑洪岩, 黄有航, 曾浩, 等. 碱/碱土金属对煤热解半焦燃烧特性的影响[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(4): 62-67.

ZHENG Hongyan, HUANG Youhang, ZENG Hao, et al. Effects of alkali and alkaline metal on combustion characteristics of coal pyrolysis semi-coke[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 62-67.



移动阅读

0 引言

我国低阶煤储量丰富,占现有煤炭探明储量的55%以上,其典型特点为高挥发分、高热反应性。如果将低阶煤直接用于燃烧气化等,会造成丰富碳氢资源的严重浪费。将低阶煤先进行低温热解提油,副产品半焦燃烧的工艺路线可以回收其中的碳氢资源制备高品位燃料和化学品,是实现我国低阶煤高效分级利用的重要途径,同时也被列入了国家发改委和能源局的《能源发展“十三五”规划》^[1]。然而,作为煤热解主要产品的半焦(收率>60%),由于挥发分低,具有燃点高、燃尽温度高、NO_x排放量高、燃尽率低等缺点。因此如何促进半焦燃烧性能、提高半焦燃烧效率,是实现低阶煤高效分级利用的关键技术瓶颈之一。

前人在半焦单独燃烧特性方面开展了较多实验室基础研究^[2-3],对影响半焦燃烧特性的相关因素也进行了探讨。中试及反应器开发方面,针对低挥发分半焦难燃及污染物排放高等特点,中科院工程热物理研究所开发了预热燃烧技术。在半焦进入锅炉前首先经过高温(800~950℃)预热,使半焦中的燃料氮在预热器弱还原气氛下以N₂形式脱除,不仅提高了燃烧效率,还降低了燃烧过程中的NO_x排放。该技术已开展了相应的中试放大试验^[4-6],实现了低挥发分半焦的清洁高效燃烧。同时也有学者针对低挥发分半焦与煤的掺烧混燃进行研究^[7],并在工业电站粉煤锅炉上实现了烟煤掺烧兰炭的相关试验,大幅降低了烟气污染物的排放^[8-9]。

添加助燃剂是提高劣质煤或无烟煤燃烧效率的重要途径,同时具有工艺简单、成本低廉等优势。目前研究的催化剂或助燃剂主要有碱金属、碱土金属、稀土和过渡金属的氧化物、氢氧化物及其盐类等^[10-13]。Ma等^[14]研究了高灰分煤添加碱金属、碱土金属后的燃烧行为,发现KCl、NaCl、Ca(NO₃)₂都对改善高灰分煤的燃烧特性有积极作用,降低着火温度,加快挥发分的燃烧速率,还可以提高煤粉的燃

烧放热量。此外研究的助燃剂还有一些强氧化剂,如硝酸盐、高锰酸盐等;还有添加低分子醇、酸类等有机化合物,此类物质的助燃相当于增加了燃料的易挥发性^[15],但成本会增加。

将助燃剂应用于劣质煤的催化燃烧已有较多研究,然而针对低挥发分的煤热解半焦,添加助燃剂能否有效提高其燃烧性能还需进一步研究。户英杰等^[16]利用热重-红外联用仪研究了Fe₂O₃对烟煤/半焦燃烧特性的影响,发现Fe₂O₃能明显降低前期燃烧反应的活化能,并能催化后期固定碳的燃烧,提高了混合燃料的综合燃烧性能。本文将劣质煤助燃剂(碱金属和碱土金属)用于促进低挥发分半焦的单独燃烧,选用K₂CO₃和CaCO₃而非其盐酸盐或硝酸盐,目的是避免燃烧过程中氯化物或硝酸盐分解生成的NO_x对设备和环境带来二次危害。探讨了2种添加剂对燃烧燃点、最大燃烧峰温以及燃烧指数等参数的影响。采用多重速率扫描方法研究了不同条件下半焦燃烧的表现活化能,同时探讨了不同添加方式对半焦燃烧性能的影响,为低挥发分煤热解半焦的高效燃烧提供基础数据和理论指导。

1 试验

1.1 试验材料

选取陕西煤化集团低阶煤低温热解半焦(CC)为研究对象,研磨至小于0.2 mm并放于棕色瓶中备用,基础分析见表1(O_{daf}由差减法获得),灰成分分析见表2。选取纯度99%的CaCO₃和K₂CO₃作为半焦燃烧助燃剂,添加比例分别为1%、2%和4%,在研钵中手动研磨10 min,得到添加助燃剂后的半焦样品,分别记为CC-Ca1、CC-Ca2、CC-Ca4,CC-K1、CC-K2、CC-K4。为了探讨助燃剂添加方式对半焦燃烧特性的影响,将K₂CO₃配制成一定浓度溶液,采用等体积浸渍法将半焦质量占比2%的K₂CO₃添加到半焦中,样品记为CC-K2-JZ。同时利用HCl-HF酸洗方法脱除了半焦中固有的矿物质以探究其对半焦燃烧特性的影响,脱矿物质半焦记为dem-CC。

表1 半焦基本性质

Table 1 Basic properties of semi-coke

工业分析/%				元素分析/%					Q _{gr,d} /(MJ·kg ⁻¹)
M _{ad}	A _d	V _{ad}	FC _{daf}	C _{daf}	H _{daf}	N _{daf}	S _{daf}	O _{daf}	
2.54	14.39	9.10	89.09	92.29	1.19	1.08	0.54	4.90	27.47

表2 半焦炭成分分析

Table 2 Ash composition of semi-coke

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	SrO	BaO
质量分数/%	23.30	8.84	8.03	46.86	1.08	7.28	0.31	0.13	0.65	0.34	0.60	0.39	0.28

1.2 燃烧试验

燃烧试验在法国 Setaram Setsys Evolution 热天平上进行。取 10 mg 样品置于刚玉坩埚中,在气体流速 100 mL/min 空气气氛中,样品以 10、20 和 40 °C/min 升温速率从室温升至终温 900 °C 后自然降温,结束试验。试验重复性良好。

1.3 燃烧特征参数的确定

本文采用着火温度 T_s 、燃烧峰温 T_{max} 、燃尽温度 T_h 和燃烧反应指数 T_R 来研究半焦样品的燃烧性能。其中着火温度、燃烧峰温可通过燃烧失重曲线及微分失重曲线获得^[17-18],燃尽温度为失重达到 98% 时对应的温度点。燃烧反应指数是燃烧时碳转化率到达 20% 对应的温度点,半焦的燃烧反应指数越低,说明其燃烧反应性越高,该指数可以反映半焦的燃烧反应性^[19]。

1.4 动力学参数的确定

本研究采用国际热分析及量热学会 (ICTAC) 推荐的多重速率扫描法中的 KAS (Kissinger - Akahira - Sunose) 法计算半焦燃烧反应动力学参数^[20]。相较于单一速率法,多重扫描速率法无需预先假定机理函数 $G(\alpha)$ 即可进行 Arrhenius 参数求解,结果更可靠。KAS 法的具体计算方法为

$$\ln \frac{\beta}{T^2} = -\frac{E}{RT} + \ln \frac{AR}{EG(\alpha)}, \quad (1)$$

其中, β 为升温速率, °C/min; T 为温度, K; E 为活化能, J/mol; R 为气体常数, 取 8.314 J/(mol · K); A 为指前因子, s⁻¹; α 为转化率; $G(\alpha)$ 为机理函数。在相同转化率 α 下, $G(\alpha)$ 是恒定值,因此在相同 α 、不同升温速率 β 下, $\ln(\beta/T^2)$ 与 $1/T$ 呈线性关系,从直线斜率可得到对应转化率 α 下的表观活化能 E 。ICTAC 推荐的 KAS 法计算表观活化能的转化率为 $0.05 \leq \alpha \leq 0.095$, 然而有研究^[21]表明固相反应的初始阶段与终止阶段易受到传热传质的影响,因此计算活化能时采用的转化率为 0.2~0.8。

2 结果与讨论

2.1 半焦燃烧特性及内部矿物质的影响

由表 1 可知,半焦挥发分仅为 9.10%, 与无烟煤接近,初步判断其燃烧特性较差。但其发热量较高,达到 27.47 MJ/kg。由表 2 可知,半焦灰中主要以 CaO、SiO₂、Fe₂O₃ 为主, XRD 结果也显示半焦中矿物质以 CaCO₃ 和石英为主。通过热重试验研究了不同升温速率下陕煤半焦的燃烧失重特性,总结了相关的燃烧特征参数(图 1 和表 3)。由表 3 可知,半焦燃点都在 500 °C 以上,明显高于挥发分较高的原煤,

甚至高于无烟煤^[22],说明其燃烧性能较差。这是因为经过 500~600 °C 低温热解过程,低阶煤中高反应性的侧链、桥键及含氧官能团等明显断裂,煤中碳结构更趋向于石墨化,导致其本身燃烧反应性降低,同时挥发分的降低使得其着火性能变得更差。由图 1 可知,随着升温速率提高,热失重和微分失重曲线均明显向高温方向移动,同时表 3 中 T_s 、 T_{max} 、 T_h 、 T_R 均随升温速率的增加而提高。这说明升温速率升高,半焦燃烧反应性降低。这主要与半焦燃烧过程中的传热有关,升温速率提高,环境温度和半焦颗粒温度之间的差距增加,导致半焦着火、燃烧等反应与慢速升温下相比有所滞后,因此体现在燃烧热失重上的滞后^[12]。同样,从 DTG 曲线 650~750 °C 半焦中主要矿物 CaCO₃ 的分解失重峰可以看出,随燃烧升温速率的增加,该峰逐渐向高温移动,在升温速率达到 40 °C/min 时,该峰成为固定碳燃烧失重峰的肩峰而变得不明显。

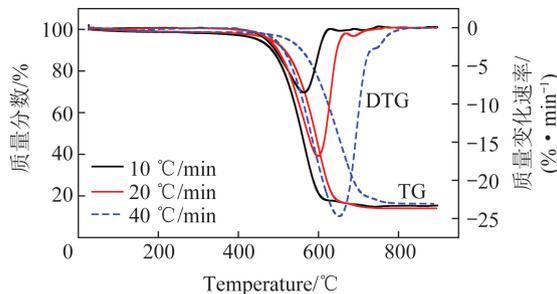


图 1 半焦在不同升温速率下的燃烧失重曲线

Fig.1 TG and DTG curves of semi-coke combustion at different heating rates

表 3 不同升温速率下半焦燃烧特征参数

Table 3 Combustion characteristic parameters of semi-coke at different heating rates

升温速率/ (°C · min ⁻¹)	燃烧特征参数/°C			
	T_s	T_{max}	T_h	T_R
10	507.3	564.7	651.0	558.7
20	536.0	599.1	687.1	592.3
40	570.2	653.1	747.2	646.7

由于半焦本身含有较多的钙、铁等矿物质,利用 HCl-HF 酸洗方式将半焦中大部分矿物质脱除,考察了半焦内部矿物对其燃烧反应性的影响,结果如图 2 和表 4 所示。图 2 中酸洗脱矿物质半焦的燃烧最终失重量趋于 0,说明 HCl-HF 酸洗可以将半焦中大部分矿物质脱除。由于半焦中矿物质,尤其是具有催化燃烧作用的碱性金属和铁化合物的脱除,脱矿物半焦 T_s 、 T_{max} 和 T_R 等都不同程度升高,即燃烧反应性降低。说明半焦中固有矿物质,主要是碱性组分及铁对半焦燃烧反应性有一定促进作用。张文

达等^[23]利用盐酸-氢氟酸对准东次烟煤进行处理,并研究了酸洗处理对煤结构和燃烧反应性的影响,发现脱灰煤燃烧反应性与原煤相比显著降低,归因于煤中具有催化作用的碱金属灰分被大量脱除。同时由于燃尽温度对应的是燃烧失重达到98%时的温度,半焦存在CaCO₃在高温下的分解失重,导致得到的燃尽温度高于脱矿物质半焦。

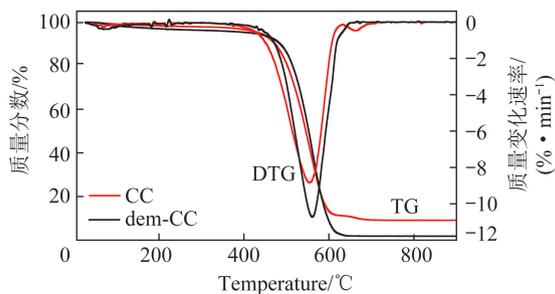


图2 半焦与脱矿物质半焦的燃烧特性曲线

Fig.2 TG and DTG curves of combustion of semi-coke and demineralized semi-coke

表4 不同条件下半焦的燃烧特征参数

Table 4 Combustion characteristic parameters of semi-coke under different conditions

样品	燃烧特征参数/°C			
	T_s	T_{max}	T_h	T_R
CC	507.3	564.7	651.0	558.7
dem-CC	517.4	569.0	645.1	560.3
CC-Ca1	497.9	565.7	685.9	559.0
CC-Ca2	493.5	563.7	679.5	559.4
CC-Ca4	497.6	565.4	688.2	559.0
CC-K1	490.3	556.4	676.8	545.2
CC-K2	466.3	530.6	677.0	521.6
CC-K4	471.9	537.4	666.8	524.2
CC-K2-JZ	442.9	528.4	667.5	518.5

2.2 添加CaCO₃和K₂CO₃对半焦燃烧特性的影响

由于半焦的低挥发分导致其燃点、燃尽温度等都比原煤偏高,即燃烧反应性低。常用的提高燃烧反应性的方法有添加助燃剂、混煤燃烧等方法。本文考察了碱金属和碱土金属助剂对陕煤半焦燃烧性能的影响。选取CaCO₃、K₂CO₃为助燃剂,探讨了不同添加比例助剂对半焦燃烧特性的影响。添加不同比例CaCO₃和K₂CO₃后半焦的燃烧TG-DTG曲线及燃烧特征参数结果如图3、4和表4所示。由图3可知,即使CaCO₃添加量达到4%,对半焦燃烧的热失重和微分失重都影响不大;由表4可知,碳酸钙的添加对燃点的降低有一定促进作用,而对最大燃烧峰温、燃尽温度的影响不明显。而K₂CO₃的添加对半焦的燃烧反应性有较明显的催化作用,导致燃点、燃烧峰温、燃烧反应指数等参数明显降低。随着

K₂CO₃添加量由1%升高到2%时,燃烧热失重和微分失重曲线明显向低温区移动。燃点由原半焦的507.3 °C显著降低至466.3 °C,反应指数 T_R 由558.7 °C降至521.6 °C。K₂CO₃对半焦燃烧催化作用可以用氧传递机理^[15]解释,即高温下半焦中的碳具有良好的还原性,可将K₂CO₃还原为K₂O,后者充当了氧的载体,促进了氧从气相向碳表面扩散,从而提高了半焦的燃烧反应速率。从表4也可以看出,K₂CO₃添加量进一步提高到4%时,相应的燃烧参数不降反升。这说明K₂CO₃对半焦燃烧的催化作用存在最佳值,当添加量超过最佳值时,过量的K₂CO₃可能会与半焦中的矿物质反应生成低温共融体,覆盖于未燃半焦表面,阻碍氧气扩散,从而导致半焦燃烧反应性降低。这与魏砾宏等^[24]研究结果一致,但相关的反应机制还需进一步试验验证。同时考察了浸渍和机械混合2种方式添加的K₂CO₃对半焦燃烧特性的影响,结果见表4。可知同样添加2% K₂CO₃,浸渍法加入的K₂CO₃比机械混合加入更能促进半焦特征燃烧参数的降低,这是因为浸渍法加入的K₂CO₃在半焦上有更好的分散性,对半焦燃烧反应性的催化作用更明显。实际应用中可采用喷淋含钾溶液的方法将助燃剂均匀分散到半焦上,起到较好的助燃效果,同时进一步降低钾的添加量。

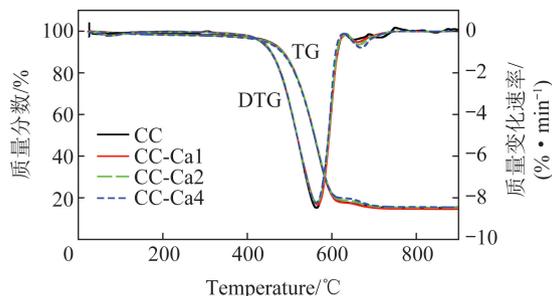
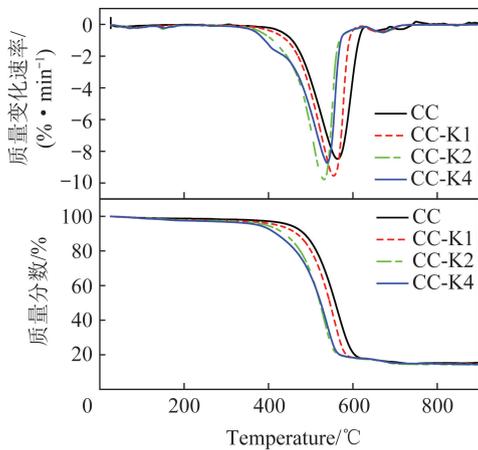


图3 添加不同比例CaCO₃后半焦燃烧的TG-DTG曲线

Fig.3 TG and DTG curves of combustion of semi-coke with CaCO₃ addition

2.3 半焦燃烧反应动力学

鉴于添加CaCO₃对半焦燃烧性能的促进作用不明显,因此本文仅探讨了添加不同比例K₂CO₃对半焦燃烧反应表观活化能的影响。半焦燃烧反应的KAS法动力学分析曲线如图5所示,添加不同K₂CO₃的动力学曲线与此类似,拟合的相关系数都大于0.9,说明拟合效果较好。添加不同比例K₂CO₃时半焦燃烧活化能随燃烧转化率的变化趋势如图6所示,可知随着半焦燃烧转化率的增加,半焦燃烧表观活化能逐渐降低,这是因为随着转化率提高,可燃

图4 添加不同比例 K_2CO_3 后半焦燃烧的 TG-DTG 曲线Fig.4 TG and DTG curves of combustion of semi-coke with K_2CO_3 addition

炭逐渐反应,半焦孔隙率增加,导致反应活化能逐渐降低。对比半焦和添加不同比例 K_2CO_3 半焦的燃烧活化能,可以看出整体上添加 K_2CO_3 后半焦燃烧活化能降低,说明添加 K_2CO_3 对半焦燃烧性能有明显的催化和促进作用,这从反应的平均活化能对比可以明显看出。半焦及添加 1%、2% 和 4% K_2CO_3 后的燃烧平均活化能分别为 84.84、72.76、70.40 和 63.96 kJ/mol,可见添加 4% K_2CO_3 时活化能降低最多。但从实际应用角度考虑, K_2CO_3 的加入会导致钾在锅炉中的沉积、腐蚀等问题,应尽量将 K_2CO_3 添

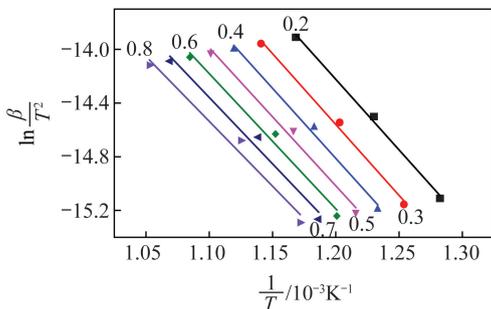
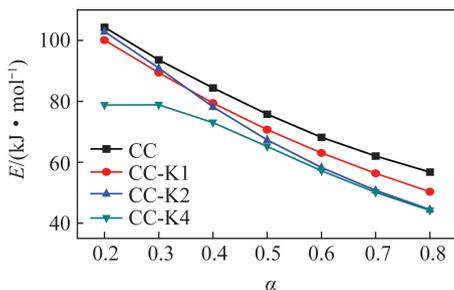


图5 半焦燃烧的 KAS 法动力学分析曲线

Fig.5 Kinetic analysis curves of semi-coke combustion determined by KAS method

图6 添加不同比例 K_2CO_3 半焦燃烧活化能随转化率的变化Fig.6 Change of activation energy of semi-coke combustion with different addition of K_2CO_3

加量控制在较小范围,同时可以考虑通过添加含钾的混合助剂,如 K/Ca 复合助剂,以消除钾的引入对设备的腐蚀等问题。

3 结 论

1) 陕煤半焦中固有矿物质对半焦燃烧反应性有一定促进作用,来源于煤中碱性组分的催化作用。

2) K_2CO_3 的添加对半焦的燃烧反应性有较明显的促进作用,而 $CaCO_3$ 基本没有作用;添加 2% K_2CO_3 对半焦燃烧特征参数的降低最有利,燃点由原半焦的 507.3 °C 显著降至 466.3 °C,反应指数 T_R 由 558.7 °C 降至 521.6 °C;浸渍法添加的 K_2CO_3 比机械混合方法更能促进半焦燃烧反应性的提高。

3) 从燃烧反应活化能来看, K_2CO_3 的添加明显降低了半焦的燃烧活化能,添加 1% K_2CO_3 即可使半焦燃烧平均活化能由 84.84 kJ/mol 降至 72.76 kJ/mol。因此 K_2CO_3 的添加对半焦燃烧反应性有较明显的促进作用,且随着添加比例增加促进作用更明显。由于过量钾的加入会腐蚀设备,在考虑促进半焦燃烧性能的同时,应尽量控制钾的添加量或与其他助剂同时添加。

参考文献 (References):

- [1] 国家发改委,国家能源局. 能源发展“十三五”规划[R]. 北京,2016.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The 13th Five-Year-Plan for energy development [R]. Beijing, 2016.
- [2] 薛新巧,冯钰,靳立军,等. 不连沟煤热解半焦燃烧特性研究[J]. 化工进展,2017,36(9):3287-3292.
XUE Xinqiao, FENG Yu, JIN Lijun, et al. Combustion characteristics of pyrolysis char of Buliangou coal [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(9): 3287-3292.
- [3] 何选明,付鹏睿,张杜,等. 低阶煤低温热解半焦在模拟高炉喷吹条件下的燃烧性能[J]. 化工进展,2014,33(7):1702-1706.
HE Xuanming, FU Rui, ZHANG Du, et al. Experimental investigation of combustion behavior of low rank coal char under simulated blast furnace conditions [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(7): 1702-1706.
- [4] 朱书俊. 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,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, 2019.
- [5] 朱书俊,吕清刚,朱建国,等. 基于循环流化床预热的半焦燃烧试验研究[J]. 工程热物理学报,2018,39(4):887-892.
ZHU Shujun, LYU Qinggang, ZHU Jianguo, et al. Experimental study on pulverized char combustion preheated by a circulating fluidized bed [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39

- (4):887-892.
- [6] 朱建国,贺坤,欧阳子区,等. 0.2 MW 细粉半焦预热燃烧试验研究[J]. 电站系统工程,2015,31(5):9-12.
ZHU Jianguo, HE Kun, OUYANG Ziqu, et al. 0.2 MW experimental study on preheated combustion of pulverized semi-coke [J]. Power System Engineering, 2015, 31(5):9-12.
- [7] 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.
- [8] 刘家利,郭孟师,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-coke [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2):86-91.
- [9] 杨忠灿,王志超,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(3):80-85.
YANG Zhongcan, WANG Zhichao, LI Yan, et al. Experimental research on pulverized coal power station blending with semi-coke [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(3):80-85.
- [10] 公旭中,郭占成,王志. Ca-Fe-Ce 系催化剂对无烟煤燃烧的影响[J]. 燃料化学学报,2009,37(4):421-426.
GONG Xuzhong, GUO Zhancheng, WANG Zhi. Anthracite combustion catalyzed by Ca-Fe-Ce catalyst [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009, 37(4):421-426.
- [11] CHENG J, ZHOU F, XUAN X, et al. Comparison of the catalytic effect of eight industrial wastes rich in Na, Fe, Ca and Al on anthracite coal combustion [J]. Fuel, 2017, 187:398-402.
- [12] ZOU C, ZHAO J X, LI X M, et al. Effects of catalysts on combustion reactivity of anthracite and coal char with low combustibility at low/high heating rate [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 126(3):1469-1480.
- [13] 龚志军,武文斐,张凯,等. 白云鄂博稀土矿物催化半焦燃烧与脱硝特性的研究[J]. 中国稀土学报,2018,36(5):564-570.
GONG Zhijun, WU Wenfei, ZHANG Kai, et al. Study on influence of Baiyun Obo rare earth tailing on semi-coke combustion and denitration [J]. Chinese Rare Earths, 2018, 36(5):564-570.
- [14] MA B G, LI X G, XU L, et al. Investigation on catalyzed combustion of high ash coal by thermogravimetric analysis [J]. Thermochim Acta, 2006, 445(1):19-22.
- [15] 朱川,姜英,丁华. 国内燃煤助燃剂的研究进展[J]. 煤质技术,2010(4):41-44.
ZHU Chuan, JIANG Ying, DING Hua. Research progress of the coal-combustion catalysts in China [J]. Coal Quality Technology, 2010(4):41-44.
- [16] 卢英杰,王志强,程星星,等. 基于 TG-FTIR 研究 Fe_2O_3 对烟煤/半焦混合燃烧特性和动力学的影响[J]. 工程热物理学报,2019,40(4):938-944.
HU Yingjie, WANG Zhiqiang, CHENG Xingxing, et al. Investigation into the effect of Fe_2O_3 on combustion characteristics and kinetic of coal/char co-combustion based on TG-FTIR [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(4):938-944.
- [17] WU J Z, WANG B F, CHENG F Q. Thermal and kinetic characteristics of combustion of coal sludge [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 129(3):1899-1909.
- [18] MENG F, YU J, TAHMASEBI A, et al. Pyrolysis and combustion behavior of coal gangue in O_2/CO_2 and O_2/N_2 mixtures using thermogravimetric analysis and a drop tube furnace [J]. Energy & Fuels, 2013, 27(6):2923-2932.
- [19] ZHU X, SHENG C. Evolution of the char structure of lignite under heat treatment and its influences on combustion reactivity [J]. Energy & Fuels, 2010, 24(1):152-159.
- [20] VYAZOVKIN S, BURNHAM A K, CRIADO J M, et al. ICTAC kinetics committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data [J]. Thermochimica Acta, 2011, 520:1-19.
- [21] JANKOVIĆ B, MENTUS S, JELIĆ D. A kinetic study of non-isothermal decomposition process of anhydrous nickel nitrate under air atmosphere [J]. Physica B Condensed Matter, 2009, 404(16):2263-2269.
- [22] 陈鹏. 中国煤炭性质、分类和利用[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2006.
CHEN Peng. Chines coal: Characteristics, classification and utilization [M]. 2nd edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [23] 张文达,王鹏翔,孙绍增,等. 酸洗脱灰对准东次烟煤结构和反应活性的影响[J]. 化工学报,2017,68(8):3291-3300.
ZHANG Wenda, WANG Pengxiang, SUN Shaozeng, et al. Effects of demineralization methods on structure and reactivity of Zhundong subbituminous coal [J]. CIESC Journal, 2017, 68(8):3291-3300.
- [24] 魏砾宏,齐弟,李润东. 碱金属对煤燃烧特性的影响及动力学分析[J]. 煤炭学报,2010,35(10):1706-1711.
WEI Lihong, QI Di, LI Rundong. Effects of alkali metal on combustion of pulverized coal and kinetic analysis [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10):1706-1711.