

神木煤焦与流化床气化带出细粉的 CO₂ 气化特性

樊红莉¹, 李风海¹, 黄戒介²

(1. 菏泽学院 化学化工学院, 山东 菏泽 274000; 2. 中国科学院 山西煤炭化学研究所, 山西 太原 030001)

摘要:为了研究煤焦与流化床气化带出细粉的 CO₂ 气化特性, 采用热重分析仪考察了不同气化温度和 CO₂ 分压对神木煤焦与细粉气化行为的影响。结果表明, 固定 CO₂ 分压提高气化温度或固定气化温度提高 CO₂ 分压都能加快神木煤焦和细粉气化反应的进行, 缩短达到一定碳转化率所需时间; 神木煤焦和细粉的反应速率随碳转化率的增大均先快速增大到最大值, 而后缓慢降低; 神木煤焦和细粉的 CO₂ 气化反应活化能均随碳转化率的升高而增大, 在相同的碳转化率下, 神木煤焦的反应活化能大于神木煤焦。与神木煤焦相比, 神木煤细粉的反应活化能较低。

关键词:煤焦; 细粉; CO₂ 气化; 等温气化; 气化活性

中图分类号: TQ546

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)01-0098-05

CO₂ gasification properties of coal chars and fine chars from fluidized bed gasification of Shenmu coal

FAN Hongli¹, LI Fenghai¹, HUANG Jiejie²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Heze University, Heze 274000 China;

2. Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China)

Abstract: To investigate the CO₂ gasification properties of coal chars and fine chars from fluidized bed gasification, the influences of gasification temperature and CO₂ partial pressure on Shenmu coal chars and fine chars were analyzed by thermogravimetric analyzer. The results show that increase in gasification temperature with constant CO₂ partial pressure or increase in CO₂ partial pressure with constant temperature could all accelerate the gasification reaction, thus shortens the required reaction time of a certain conversion rate. With increasing carbon conversion rate, the carbon reaction rates of Shenmu coal chars and fine chars increase quickly and then decrease slowly after reaching the maximum value. The gasification reaction activation energy of Shenmu coal chars and fine chars with CO₂ are all increased with increasing carbon conversion rate, the reaction activation energy of fine chars is higher than that of coal chars at the same carbon conversion rate. Shenmu coal char has higher CO₂ reactivity than Shenmu fine chars.

Key words: coal chars; fine chars; CO₂ gasification; isothermal gasification; gasification reactivity

0 引 言

流化床气化具有煤种适用性广、炉内物料均匀、操作温度温和、成本低等优点, 是一种煤炭高效洁净转化技术。煤气化过程包括煤炭热解反应、煤焦气化反应以及一些复杂的气相反应。其中, 煤焦气化反应是煤气化的速率控制步骤, 其特性的研究对气

化炉的发展和设计具有重要意义^[1-2]。流化床气化合成气带出细粉由反应产物、未反应物和冷凝产物聚集而成^[3]。因流化床操作温度相对较低, 细粉中的残碳含量通常很高^[4-5]。因此, 细粉再利用直接关系到流化床气化工艺的碳利用效率。近年来, 国内外学者对煤焦和细粉特性进行研究。景旭亮等^[6]对襄垣烟煤和晋城无烟煤的流化床气化带出

收稿日期: 2018-12-03; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18120301

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21875059); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2018MB037)

作者简介: 樊红莉(1981—), 女, 山东东明人, 讲师, 硕士, 主要从事煤气化和煤灰化学方面的研究。E-mail: fanhl2007@163.com。通讯作者: 李风海, 教授。E-mail: hzlfh@163.com

引用格式: 樊红莉, 李风海, 黄戒介. 神木煤焦与流化床气化带出细粉的 CO₂ 气化特性[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 98-102.

FAN Hongli, LI Fenghai, HUANG Jiejie. CO₂ gasification properties of coal chars and fine chars from fluidized bed gasification of Shenmu coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 98-102.



移动阅读

细粉和相应煤焦的水蒸气气化特性进行研究,发现 2 种煤的细粉和相应煤焦的石墨化程度相差不大,但因细粉比表面积较大,所以反应活性较高。Aranda 等^[7]研究了印度高灰煤焦水蒸气或 CO₂ 气化时温度和压力对其反应特性的影响。研究表明,煤焦的反应活性随温度的升高而增大。水蒸气分压越大,煤焦的反应活性越高;CO₂ 压力较低时,煤焦的反应活性随压力的增大而增大,但压力达到 1 MPa 时,反应活性反而降低。张玉魁等^[8]研究了准东煤流化床气化带出细粉的理化特性,研究表明,虽然细粉的石墨化程度高于煤焦,但其孔隙结构更为发达,比表面积更大,因而 CO₂ 气化反应活性更高。刘玉波等^[9]研究发现,因灰分中含有大量对气化反应具有较强催化作用的 K、Na 及 Fe 等元素,神华煤流化床气化带出细粉脱除灰分后 CO₂ 气化反应速率降低;细粉的 CO₂ 气化活性随粒径的减小先降低后升高,与孔径结构关系不大。这些研究对煤炭热解焦的气化和流化床气化带出细粉的再利用提供了理论基础。但由于煤炭组成及结构的复杂性造成了不同煤种的热解焦和流化床气化带出细粉的反应特性存在一定差异,还需要对热解煤焦和细粉气化特性进

行相关研究。煤焦与 CO₂ 的气化反应较煤焦与水蒸气的气化反应慢且两者具有相似性,因此常用于检测不同原煤和不同制焦过程所得煤焦的反应活性^[10]。目前热重分析是常用的测定物质气化反应特性的方法^[10-12]。本文采用热重分析仪对神木煤焦和细粉在等温下的 CO₂ 气化特性进行研究,讨论了温度和 CO₂ 分压对气化反应的影响,旨在为神木煤焦气化和神木煤细粉再气化提供参考。

1 试 验

1.1 试验样品选取与制备

选用自制神木煤焦和中国科学院山西煤炭化学研究所加压灰熔聚流化床中试试验过程中二级旋风分离器捕集的神木煤细粉作为样品,分别记作 C_{SM} 和 F_{SM}。参考文献^[9]在 900 °C 下制备 C_{SM}。C_{SM} 和 F_{SM} 的工业分析、元素分析分别按照 GB/T 212—2012《煤的工业分析方法》和 GB/T 476—2008《煤中碳和氢的测定方法》进行,结果见表 1。可知,F_{SM} 的碳含量较高,具有较好的利用价值。样品的灰成分分析采用荷兰 PANalytical 公司 AXIOS advanced 波长色散型 X-射线荧光光谱仪进行,结果见表 2。

表 1 C_{SM} 和 F_{SM} 的工业分析及元素分析

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of C_{SM} and F_{SM}

样品	工业分析/%				元素分析/%				
	V _{ad}	M _{ad}	A _{ad}	FC _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{1,ad}
C _{SM}	5.21	1.68	15.98	77.13	77.64	1.41	1.96	0.58	0.75
F _{SM}	4.27	6.13	19.79	69.81	66.08	2.03	5.09	0.64	0.24

表 2 C_{SM} 和 F_{SM} 的灰成分分析

Table 2 Ash compositions of C_{SM} and F_{SM}

样品	灰成分分析/%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
C _{SM}	32.04	13.64	19.97	24.47	2.41	1.52	3.99	0.87	0.91	0.18
F _{SM}	34.66	14.82	17.95	26.38	2.37	0.99	1.68	0.20	0.74	0.21

1.2 样品比表面积和孔容的测定

C_{SM} 和 F_{SM} 的比表面积及孔容测定采用德国 Bruker 公司生产的 Micromeritics TristarII 3020 型比表面积和孔径分析仪进行。样品于 105 °C 下在空气干燥箱中干燥 2 h 后取出置于干燥器内冷却至室温,称取 200 mg 左右的样品转移至样品管内,在 N₂ 气流中于 150 °C 脱气 5 h,然后进行低温(液氮-196 °C)吸脱附试验。采用 Brunauer-Emmett-Teller (BET)二参数法计算样品的比表面积。C_{SM} 和 F_{SM}

的比表面积及总孔容分别为 241.040 4、202.765 1 m²/g 和 0.122 570、0.120 427 cm³/g。

1.3 气化试验

C_{SM} 和 F_{SM} 的气化试验在德国 NETZSCH 公司 STA449-F3 型热重分析仪上采用常压等温气化程序进行。试验方法:将 5 mg 左右样品放入热重分析仪炉体中的坩埚内,在流量为 60 mL/min 的 N₂ 气氛下以 10 °C/min 速率升温到设定的气化温度,稳定 5 min 后切换成设定的反应气氛,反应结束后切

换气氛为 30 mL/min O₂ 与 30 mL/min N₂ 组成的混合气体以燃尽残炭。气化温度分别设定为 965、995 和 1 025 °C, 该温度范围接近于煤流化床气化的操作范围; 反应气氛分别设定为 60 mL/min 纯 CO₂ 气氛, 45 mL/min CO₂ 与 15 mL/min N₂ 的混合气氛和 30 mL/min CO₂ 与 30 mL/min N₂ 的混合气氛。

C_{SM} 和 F_{SM} 的 CO₂ 气化过程中的碳转化率 x 由式(1)计算, 同时利用反应性指数 R_S 来比较 C_{SM} 和 F_{SM} 的反应活性差异^[13], 其定义式见式(2)。C_{SM} 和 F_{SM} 的反应速率由式(3)计算。

$$x = \frac{w_0 - w_t}{w_0 - w_{+\infty}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_S = \frac{0.5}{\tau_{0.5}} \quad (2)$$

$$r = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

式中, w_0 为气化反应开始瞬间样品的质量, mg; w_t 为气化过程中某时刻的样品质量, mg; $w_{+\infty}$ 为气化结束后残渣的质量, mg; $\tau_{0.5}$ 为碳转化率达到 50% 所需时间, min; t 为气化过程中某时刻的时间, min。

2 结果与讨论

2.1 CO₂ 分压对 C_{SM} 和 F_{SM} 反应性能的影响

气化剂分压是影响煤焦反应活性的重要因素^[14]。气化温度为 995 °C 时 CO₂ 分压对 C_{SM} 和 F_{SM} 反应性能的影响如图 1 所示 ($V(\text{CO}_2)$ 和 $V(\text{N}_2)$ 表示 CO₂ 和 N₂ 的分压)。C_{SM} 和 F_{SM} 达到相同碳转化率所需反应时间都随 CO₂ 分压的增大而减小, CO₂ 流量由 30 mL/min 增大到 60 mL/min 时, C_{SM} 碳转化率达 80% 所需时间由 21 min 缩短为 15 min, 而 F_{SM} 由 88 min 缩短为 56 min。因此在相同 CO₂ 分压下, 达到相同的碳转化率, C_{SM} 所需反应时间远小于 F_{SM}。随碳转化率的增大, C_{SM} 和 F_{SM} 的反应速率 (dx/dt) 都是先快速增加到最大值后又降低。这是由于 C_{SM} 和 F_{SM} 的比表面积及孔隙率较大, 活性位点较多, 反应开始就能迅速达到最大反应速率^[15-16]; 随着反应进行, 反应活性高的组分优先消耗使得煤焦结构的石墨化程度逐渐增加, 因此反应速率逐渐降低。还可能是由于煤焦中具有催化作用的组分损失, 如 Na 和 K 的蒸发、迁移、烧结及转化成矿物相, 也使煤焦反应速率降低^[7]。另外, 同一 CO₂ 分压下, 整个气化过程中 C_{SM} 的气化反应速率明显大于 F_{SM}, 随着反应气氛中 CO₂ 分压的增加, C_{SM} 和 F_{SM} 的最大反应速率逐渐增大。

C_{SM} 和 F_{SM} 在不同 CO₂ 分压下的 R_S 值见表 3。

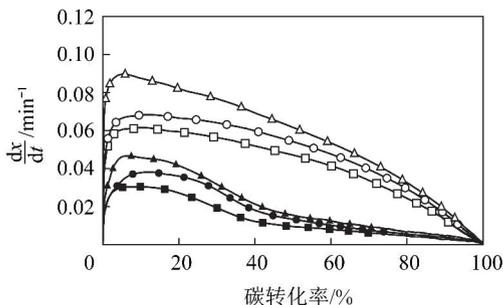
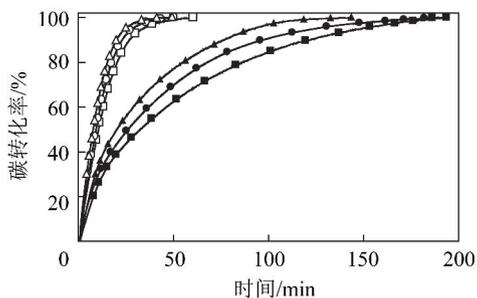


图 1 CO₂ 分压对 C_{SM} 和 F_{SM} 的反应性能的影响
 —■— F_{SM}- $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2)=30:30$ —□— C_{SM}- $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2)=30:30$
 —●— F_{SM}- $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2)=45:15$ —○— C_{SM}- $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2)=45:15$
 —▲— F_{SM}- $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2)=60:0$ —△— C_{SM}- $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2)=60:0$

图 1 CO₂ 分压对 C_{SM} 和 F_{SM} 的反应性能的影响

Fig. 1 Influence of CO₂ partial pressure on reactivity of C_{SM} and F_{SM}

由式(2)可知, R_S 值越大说明物质的反应活性越强。由表 3 可知, C_{SM} 和 F_{SM} 的 R_S 值均随 CO₂ 分压的增大而增大, CO₂ 分压相同时, C_{SM} 的 R_S 大于 F_{SM}。说明在相同 CO₂ 分压下, C_{SM} 的反应活性大于 F_{SM}, 这与文献[6, 8]细粉气化反应活性高于煤焦的结论不一致; C_{SM} 和 F_{SM} 的反应活性都随 CO₂ 分压的增大而增大, 这与文献[6, 14, 17]报道的结果相符。

表 3 C_{SM} 和 F_{SM} 在不同 CO₂ 分压下的 R_S 值

Table 3 Reactivity indexes of C_{SM} and F_{SM} at different CO₂ partial pressure

样品	R_S/min^{-1}		
	$V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2)=0:30$	$V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2)=5:15$	$V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2)=60:0$
F _{SM}	0.015 1	0.018 8	0.024 4
C _{SM}	0.047 0	0.053 8	0.064 9

2.2 温度对 C_{SM} 和 F_{SM} 反应性能的影响

温度也是影响煤焦气化反应活性最重要的因素之一^[13, 18]。CO₂ 流量为 60 mL/min 时温度对 C_{SM} 和 F_{SM} 反应性能的影响如图 2 所示。随着温度的升高, C_{SM} 和 F_{SM} 达到同一碳转化率所需时间缩短, 且在相同温度下, 碳转化率相同时 C_{SM} 反应时间明显小于 F_{SM}。气化温度为 965 °C, 碳转化率达到 80% 时 C_{SM} 和 F_{SM} 所需时间分别为 93 和 27 min, 而

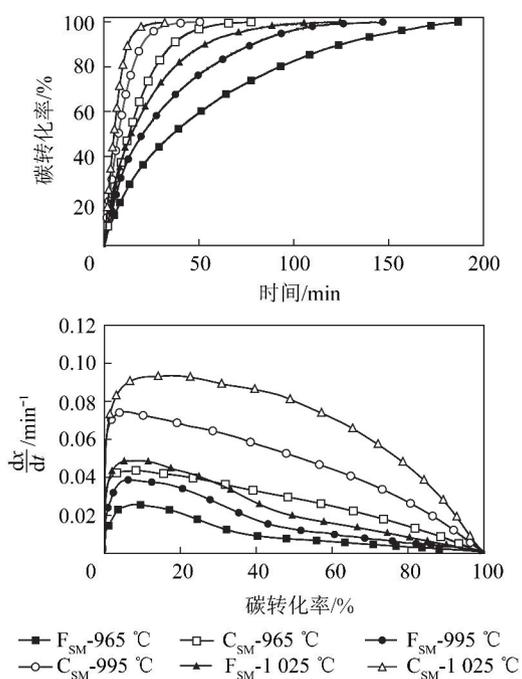


图 2 气化温度对 C_{SM} 和 F_{SM} CO₂ 反应性能的影响
Fig. 2 Influence of temperature on CO₂ reactivity of C_{SM} and F_{SM}

在 1 025 °C 时,达到这一碳转化率 C_{SM} 和 F_{SM} 分别仅需 37 和 10 min。随着碳转化率的增加,C_{SM} 和 F_{SM} 的 CO₂ 气化反应速率都是先快速增加到最大值后又逐渐降低,相同温度的同一碳转化率下,C_{SM} 的气化反应速率明显大于 F_{SM},且随温度升高,F_{SM} 和 C_{SM} 的最大反应速率都逐渐增大。

F_{SM} 和 C_{SM} 在不同温度下的等温 CO₂ 气化的 R_s 值见表 4。由表 4 可知,C_{SM} 和 F_{SM} 的 R_s 值均随温度的升高而增大,说明 C_{SM} 和 F_{SM} 的反应活性都随温度升高而增大。这是因为在 1 100 °C 以下,CO₂ 与煤焦中碳的反应属于动力学控制过程,在恒定的总压及 CO₂ 分压下,温度是煤焦反应活性的最大影响因素,温度升高煤焦的反应活性增加;此外,温度增加造成气化剂与煤焦碰撞、接触机会增加,提高了煤焦的反应活性。温度升高有利于提高煤焦的气化反应活性,这与文献[15, 19-20]报道的结果相符。由表 4 还可知,相同气化温度下,C_{SM} 的 R_s 大于 F_{SM},说明温度相同时 C_{SM} 的反应活性大于 F_{SM}。

C_{SM} 和 F_{SM} 的 CO₂ 反应活性的差异原因可能有:
① 与 F_{SM} 相比,C_{SM} 具有更大的比表面积和更发达的孔隙结构,能提供更多的活性位点,同时气固接触更充分,较发达的孔隙结构有利于减小气化剂到达活性位点的扩散阻力,增强样品反应活性^[6,15];② C_{SM} 比 F_{SM} 含有更多的具有催化作用的 Fe、K 和 Na 等元素(表 2),促使气化反应更易进行^[21]。

表 4 C_{SM} 和 F_{SM} 在不同温度下的反应活性指数 R_s 值

Table 4 Reactivity indexes of C_{SM} and F_{SM} at different temperatures

样品	R _s /min ⁻¹		
	965 °C	995 °C	1 025 °C
C _{SM}	0.037 5	0.064 9	0.093 6
F _{SM}	0.013 8	0.024 4	0.034 1

3 反应动力学

煤焦气化反应是典型的气固反应,反应机理较为复杂,对于恒温气化反应可采用分布活化能模型描述,分布活化能模型的积分式^[15]如下:

$$\ln t = -\ln k_0 + \ln[-\ln(1-x)] + \frac{E}{RT} \quad (4)$$

式中,k₀ 为指前因子;E 为活化能,kJ/mol;R 为气体常数,取 8.314 J/(mol·K);T 为绝对温度,K。

在不同碳转化率下作 ln t-1/T 曲线,求直线斜率和截距,得到温度区间气化过程中碳转化率对应的平均活化能和平均指前因子。C_{SM} 和 F_{SM} 等温 CO₂ 气化的分布活化能随碳转化率的变化如图 3 所示。由图 3 可知,C_{SM} 和 F_{SM} 的反应活化能均随碳转化率的升高而增大。在相同的碳转化率下,F_{SM} 的 CO₂ 反应活化能大于 C_{SM}。

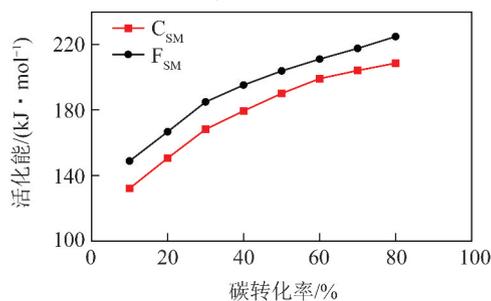


图 3 分布活化能随碳转化率的变化

Fig. 3 Change of distributed activation energy with carbon conversion

4 结 论

1) 恒定气化温度下,增大 CO₂ 分压,C_{SM} 和 F_{SM} 达到一定碳转化率所需反应时间缩短;恒定 CO₂ 分压下,升高温度,C_{SM} 和 F_{SM} 达到一定碳转化率所需反应时间缩短。C_{SM} 和 F_{SM} 的反应速率随温度/CO₂ 分压的增大先快速增加到最大值后逐渐降低。

2) C_{SM} 和 F_{SM} 的 CO₂ 反应活化能均随碳转化率的升高而增大,在相同的碳转化率下,F_{SM} 的反应活化能大于 C_{SM}。

3) C_{SM} 和 F_{SM} 的 CO₂ 气化反应活性都随温度和

CO₂分压的增大而增加,且F_{SM}的反应活性低于C_{SM}。

参考文献(References):

- [1] JAYARAMAN K, GOKALP I. Effect of char generation method on steam, CO₂ and blended mixture gasification of high ash Turkish coals[J]. Fuel, 2015, 153:320-327.
- [2] BAI Y H, ZHU S H, LUO K, et al. Coal char gasification in H₂O/CO₂: Release of alkali and alkaline earth metallic species and their effects on reactivity[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 156-163.
- [3] LI F H, LIU Q R, LI M, et al. Understanding fly-ash formation during fluidized-bed gasification of high-silicon-aluminum coal based on its characteristics[J]. Energy, 2018, 150:142-152.
- [4] ZHANG H X, ZHU Z P, DONG Q, et al. Structural properties and gasification reactivity of Shenmu fly ash obtained from a 5 t/d circulating fluidized bed gasifier[J]. Procedia Engineering, 2015, 102(9):1104-1111.
- [5] 邓鸿翔,任强强,张玉魁. 循环流化床气化细粉灰熔融特性研究[J]. 燃料化学学报, 2018, 46(3):273-282.
DENG Hongxiang, REN Qiangqiang, ZHANG Yukui. Melting characteristics of fine ash from circulating fluidized bed gasifier[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2018, 46(3):273-282.
- [6] 景旭亮,王志青,房倚天. 流化床气化炉半焦细粉水蒸气再气化特性及动力学研究[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(4):400-406.
JING Xuliang, WANG Zhiqing, FANG Yitian. Steam re-gasification properties and kinetics of coal char fines derived from fluidized bed gasifier[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(4):400-406.
- [7] ARANDA G, GROOTJES A J, VAN DER MEIJDEN C M, et al. Conversion of high-ash coal under steam and CO₂ gasification conditions[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 141:16-30.
- [8] 张玉魁,张海霞,朱治平. 准东煤流化床气化飞灰的理化特性研究[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(3):305-313.
ZHANG Yukui, ZHANG Haixia, ZHU Zhiping. Physical and chemical properties of fly ash from fluidized bed gasification of Zhundong coal[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 44(3):305-313.
- [9] 刘玉波,张永奇,王志青,等. 神华煤流化床气化带出细粉的粒径分离及分离后细粉的CO₂气化特性研究[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(1):344-352.
LIU Yubo, ZHANG Yongqi, WANG Zhiqing, et al. Particle size classification and CO₂ gasification of the char fines from fluidized bed gasification of Shenhua coal[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 44(1):344-352.
- [10] JAYARAMAN K, GOKALP I, BONIFACI E, et al. Kinetics of steam and CO₂ gasification of high ash coal-char produced under various heating rates[J]. Fuel, 2015, 154:370-379.
- [11] WANG F, ZENG X, WANG Y G, et al. Non-isothermal coal char gasification with CO₂ in a micro fluidized bed reaction analyzer and a thermogravimetric analyzer[J]. Fuel, 2016, 164: 403-409.
- [12] SCHULZE S, NIKRITYUK P, ABOSTEIF Z, et al. Heat and mass transfer within thermogravimetric analyser: From simulation to improved estimation of kinetic data for char gasification[J]. Fuel, 2017, 187:338-348.
- [13] 韩广怡,朱治平,张海霞. 配煤比例及温度对气化反应特性影响[J]. 化学工程, 2018, 46(4):57-67.
HAN Guangyi, ZHU Zhiping, ZHANG Haixia. Effect of coal blending ratio and temperature on gasification characteristics[J]. Chemical engineering, 2018, 46(4):57-67.
- [14] 阎琪轩,李风海,王建飞,等. 压力对煤焦CO₂气化反应动力学参数的影响[J]. 化学工程, 2014, 42(8):65-75.
YAN Qixuan, LI Fenghai, WANG Jianfei, et al. Effect of pressure on kinetic parameters of coal-char gasification with CO₂[J]. Chemical Engineering, 2014, 42(8):65-75.
- [15] 孙加亮,王永刚,王芳,等. H₂O/O₂气氛下胜利褐煤气化半焦的孔隙特性[J]. 化工进展, 2015, 34(3):695-700.
SUN Jialiang, WANG Yonggang, WANG Fang, et al. Porosity characteristics of chars from Shengli brown coal gasification under H₂O/O₂ atmospheres[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(3):695-700.
- [16] 王姗,周敏. 晋城无烟煤与杨树木屑共气化特性[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(4):72-77.
WANG Shan, ZHOU Min. Co-gasification characteristics of Jincheng anthracite and poplar sawdust[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(4):72-77.
- [17] ZHOU L M, ZHANG G J, SCHURZ M, et al. Kinetic study on CO₂ gasification of brown coal and biomass chars: Reaction order[J]. Fuel, 2016, 173:311-319.
- [18] 李位位,黄戒介,王志青,等. 煤焦CO₂气化反应动力学及内扩散对气化过程的影响分析[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(12):1416-1421.
LI Weiwei, HUANG Jiejie, WANG Zhiqing, et al. Reaction kinetics of coal char gasification with CO₂ and the effect of internal diffusion on the gasification[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(12):1416-1421.
- [19] WANG G W, ZHANG J L, SHAO J G, et al. Investigation of non-isothermal and isothermal gasification process of coal char using different kinetic model[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(1):15-21.
- [20] 金渭龙,顾松园,钟思青,等. 煤焦加压水蒸气催化气化反应特性及甲烷释放规律研究[J]. 应用化工, 2016, 45(6):1111-1123.
JIN Weilong, GU Songyuan, ZHONG Siqing, et al. Catalytic gasification of coal char with steam and methane release at elevated pressure[J]. Applied chemical industry, 2016, 45(6):1111-1123.
- [21] 武琳琳,朱川. 碱和碱土金属对气化焦气化反应性的影响[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(4):78-83.
WU Linlin, ZHU Chuan. Effect of alkali and alkaline earth metal on the gasification reactivity of gasified coke[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(4):78-83.