

准东煤加压气化过程中 Na 迁移规律的热力学研究

王建江¹, 魏博¹, 张雪慧¹, 李显¹, 谭厚章²

(1. 新疆大学 煤炭清洁转化与化工过程自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:准东煤中高含量的碱金属会在燃烧过程中引发严重的结渣与沾污问题,但准东煤气化过程中,在加压条件下碱金属的迁移转化规律仍不明确。为探究准东煤中 NaCl 在加压条件下的迁移转化机制,根据系统吉布斯自由能最小原则的热力学计算方法,采用 HSC Chemistry 的化学热力学平衡计算模块,对纯 NaCl 和准东煤中 NaCl 在加压过程中 Na 基化合物的物质的量进行计算。研究表明,压力显著影响纯 NaCl 的气化温度,在常压下,开始气化温度和气化完成温度分别为 800 °C 和 1 400 °C;压力升至 4 MPa 时,气化开始温度和气化完成温度分别升至 1 500 °C 和 2 200 °C。准东煤中 Si、Al、H 和 O 参与反应时,在 0.1 MPa 条件下,300 °C 开始,NaCl 逐渐与煤灰中的 SiO₂、Al₂O₃ 和 H₂O 反应生成大量的 NaAlSi₃O₈、NaAlSiO₄ 和 Na₂SiO₃ 等 Na 基化合物。在 1 500 °C 时,生成的气相 NaCl 仅占 Na 物质的量的 25% 左右。系统反应压力越高,生成低熔点且具有助熔作用的 NaAlSi₃O₈、NaAlSiO₄、Na₂SiO₃ 就越多,导致炉内产生结渣的风险越高。

关键词:准东煤;加压气化;HSC Chemistry;碱金属;迁移转化

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)02-0134-05

Thermodynamic research on Na migration rules during the pressurized gasification process of Zhundong coal

WANG Jianjiang¹, WEI Bo¹, ZHANG Xuehui¹, LI Xian¹, TAN Houzhang²

(1. Key Laboratory of Coal Cleaning Conversion & Chemical Engineering Process, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The high content of alkali metals in Zhundong coal induces serious slagging and fouling problems during combustion, however, the migration and transformation rules of alkali metals under pressurized condition in Zhundong coal gasification are still ambiguous. In order to obtain the migration and transformation mechanism of NaCl in Zhundong coal under pressurized condition, according to the thermodynamic calculation method of Gibbs free energy minimum principle of the system, the thermodynamic equilibrium calculation module of HSC Chemistry was adopted to calculate the molar mass of sodium-based compounds in the pressurized gasification process of pure NaCl and Zhundong coal. The results show that pressure impacts the gasification temperature of pure NaCl significantly. At ordinary pressure, the start and finish temperatures of gasification are 800 °C and 1 400 °C respectively. When the reaction pressure up to 4 MPa, the start and finish temperatures of gasification increase to 1 500 °C and 2 200 °C respectively. When the Si, Al, H, O of Zhundong coal participate in the reaction under the condition of 0.1 MPa, 300 °C, the NaCl will react with SiO₂, Al₂O₃ and H₂O in the coal ash to form a large number of sodium-based compounds, such as NaAlSi₃O₈, NaAlSiO₄, Na₂SiO₃, etc. In 1 500 °C, the generated gaseous NaCl accounts for only about 25% of the molar mass of Na. The higher the reaction pressure of the system is, the more NaAlSi₃O₈, NaAlSiO₄ and Na₂SiO₃ with low melting point and fluxing action will be generated, and the higher risk of slagging in the furnace will be.

Key words: Zhundong coal; pressurized gasification; HSC Chemistry; alkali metal; migration and transformation

收稿日期:2019-01-01;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19010110

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2016D01C059)

作者简介:王建江(1987—),男,四川射洪人,博士研究生,主要从事高碱金属煤燃烧与锅炉现场结焦研究。E-mail: xju_wang@163.com。通讯作者:魏博(1985—),男,陕西高陵人,副教授,博士,从事高碱金属燃料燃烧与结焦研究。E-mail: weiboxju@163.com

引用格式:王建江,魏博,张雪慧,等.准东煤加压气化过程中 Na 迁移规律的热力学研究[J].洁净煤技术,2019,25(2):134-138.

WANG Jianjiang, WEI Bo, ZHANG Xuehui, et al. Thermodynamic research on Na migration rules during the pressurized gasification process of Zhundong coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 134-138.



移动阅读

0 引言

准东煤田位于中国新疆昌吉地区,煤炭预测储量达到 164 Gt,是中国未来主要能源基地之一^[1-2]。准东煤易开采,目前均以露天煤为主,价格低廉,具有挥发分高、灰分低、燃点较低等特点,是良好的动力用煤^[3-4]。

由于高含量的碱金属,准东煤的强结渣性与沾污性已受到广泛关注^[5-8]。煤中碱金属可分为水溶性、酸溶性和不可溶性 3 种^[9]。对于准东煤,可溶性碱金属占碱金属总量的 70% 以上^[10-12]。可溶性碱金属在燃烧初期即会释放至烟气中,在更高温度时会生成 Na_2SO_4 、 CaSO_4 等气相碱金属化合物或碱土金属化合物,当烟气温度降低,气相碱金属化合物遇冷凝结,形成熔融态化合物,导致严重结渣^[13]。不可溶的碱金属通常与硅铝等相结合,以长石类、霞石类等低熔点化合物形式存在,其部分黏在熔融态化合物上,加重结渣^[13-14]。前人研究均以常压条件下准东煤在电站锅炉中的燃烧状况为背景,对于高压条件下煤中碱金属的迁移转化及与灰中其他成分的反应却鲜有报道。

煤气化过程是煤炭清洁高效利用的龙头和关键

技术,是发展煤制氢、煤基化学品、煤基液体燃料等工业的基础^[15]。在煤气化过程中,为了提高气化炉的气化率,采用增加炉内压力,促进煤焦与 CO_2 和 H_2O 发生反应^[16]。目前,常见的气化炉气化压力为 4 MPa,最高可达 10 MPa。一般来说,提高压力可增加物质的饱和温度(即降低物质挥发量),也可提高反应速度^[17]。但对于煤中碱金属来说,在加压条件下的迁移转化特性仍鲜见报道。为了获得加压条件下准东煤气化过程中碱金属的迁移特性,本文采用化学热力学方法,利用系统吉布斯自由能最低原理,对纯 NaCl 和准东煤中与硅、铝等化合物共存情况下的 NaCl 在不同压力下随温度升高的气化特性和演变机制进行研究,以期了解气化炉加压运行过程中由碱金属引发的结渣机理。

1 研究对象与方法

1.1 燃料特性

选取准东五彩湾地区煤样作为试验对象,煤质分析见表 1。从表 1 可以看出,该煤样挥发分较高,达 37.05%,灰分仅为 12.97%,煤灰中碱金属 Na_2O 含量为 2.71% (大于国际高碱煤 2% 的指标),属于典型的准东煤。

表 1 准东煤的工业分析、元素分析及灰成分分析

Table 1 Proximate analysis, elemental analysis and ash composition analysis of Zhundong coal

工业分析/%				元素分析/%				
M_{ad}	A_{d}	V_{daf}	FC_{d}	C_{d}	H_{d}	N_{d}	O_{d}	$S_{\text{t,d}}$
11.00	12.97	37.05	48.76	64.16	4.24	1.58	15.82	1.24
灰成分分析/%								
Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	SiO_2	SO_3	K_2O	Na_2O
12.29	14.66	17.84	2.63	0.67	31.01	17.28	0.36	2.71

1.2 计算方法

1.2.1 计算模型

本文采用 HSC Chemistry 软件的反应平衡热力学计算模块,利用吉布斯自由能最低原理和熵增加原理^[18],按式(1)~(4)计算。

$$\Delta H^{\theta} = \sum \Delta H^{\theta}(\text{生成物}) - \sum \Delta H^{\theta}(\text{反应物}) \quad (1)$$

$$\Delta S^{\theta} = \sum \Delta S^{\theta}(\text{生成物}) - \sum \Delta S^{\theta}(\text{反应物}) \quad (2)$$

$$\Delta G^{\theta} = \Delta H^{\theta} - T\Delta S^{\theta} \quad (3)$$

$$K^{\theta} = \exp(-\Delta G^{\theta}/RT) \quad (4)$$

式中, ΔH^{θ} 为焓变; ΔS^{θ} 为熵增; ΔG^{θ} 为吉布斯自由能变; K^{θ} 为反应平衡常数; R 为气体常数; T 为开尔

文温度。

针对系统可能发生的反应,先用 HSC Chemistry 软件分别计算各反应的 ΔG 随 T 变化,比较 ΔG 变化趋势,得出反应进行的相对难易程度^[18]。

1.2.2 计算条件

煤中 Na 主要以 NaCl 水溶态形式存在^[19-20],因此,重点考虑 NaCl 在加压条件下的迁移转化特性。首先对纯 NaCl 在加压条件下的气化特性进行研究,其次,依据准东煤中碱金属赋存形态的研究结果^[9-12],假设煤中 Na 均以 NaCl 形式存在,以了解 NaCl 与 Si、Al、H、O 等煤中主要元素组成的化合物在加压条件下的反应特性。为了对比纯 NaCl 和准东煤中 NaCl 的迁移转化特性,物质的量保持一致。

采用 HSC Chemistry 的化学热力学平衡模块计算,设置反应压力分别为 0.1、1、2、3、4 MPa,计算反应系统中不同温度下主要 Na 基化合物含量。

假设反应系统内准东煤为 1 000 kg,以表 1 为依据,计算得到煤中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 NaCl 和 H_2O 的实际物质的量分别为 0.50、0.14、0.08、56.36 kmol,取压力为 0.1、1、2、3、4 MPa,在 0~2 500 °C 进行计算。

2 试验结果与讨论

2.1 加压条件下纯 NaCl 的迁移转化特性

采用 HSC Chemistry 软件的反应平衡热力学计算模块对反应系统中仅存在 NaCl 时,计算不同压力下 NaCl 的转化行为,固相 NaCl 和气相 NaCl 物质的量变化如图 1 所示。纯 NaCl 在 0.1 MPa、低于 800 °C 左右保持在固态,高于 800 °C 后开始气化,气化速度随温度上升迅速增加,接近 1 400 °C 时几乎完全转化为气相。随压力升高,NaCl 开始气化的温度升高。1 MPa 时,1 200 °C 左右开始气化,接近 1 800 °C 时全部气化;4 MPa 时,1 500 °C 左右开始气化,在接近 2 200 °C 全部气化。

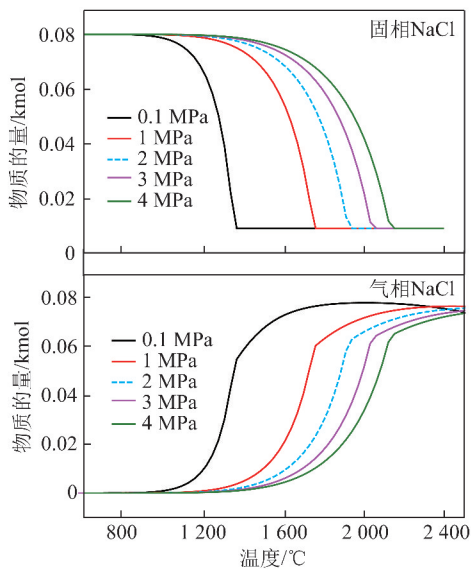


图 1 不同压力下,纯 NaCl 中固相 NaCl 和气相 NaCl 物质的量随温度的变化

Fig. 1 Molar mass variations of solid NaCl and gaseous NaCl of pure NaCl with the temperature under different pressures

2.2 准东煤中 NaCl 在加压条件下的变化

采用 HSC Chemistry 软件的反应平衡热力学计算模块对五彩湾煤样中主要成分进行计算,固相 NaCl 含量的变化如图 2 所示。由图 2 可知,0.1 MPa 时,固态 NaCl 的物质的量在 300 °C 左右开始降低,并在接近 650 °C 时固态 NaCl 的物质的量降至 0,转变速率随温度的升高而增加。随着压力升

高,固态 NaCl 含量减少的起始点也随之提高。反应压力为 1 MPa 时,400 °C 左右固态 NaCl 含量开始减小,750 °C 降至 0。当反应压力升至 4 MPa 时,450 °C 左右固态 NaCl 开始减小,接近 800 °C 完成转化。

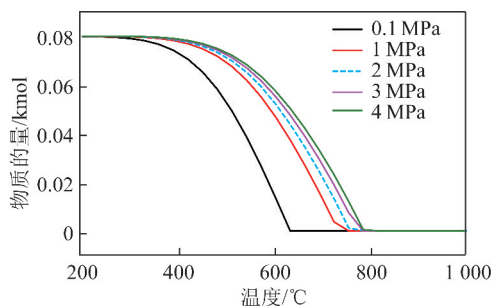


图 2 不同压力下,准东煤中固相 NaCl 含量随温度的变化
Fig. 2 Molar mass variations of solid NaCl of Zhundong coal with temperature under different pressures

通过对比图 1 与图 2 可以看出,系统中加入 Si、Al、H 和 O 等元素后,常压下固相 NaCl 开始转化为其他化合物的温度大幅降低,从 800 °C 左右降至 300 °C 左右;同时,固相 NaCl 全部转化为其他化合物的温度也显著降低,从 1 400 °C 左右降至 650 °C 左右。当系统反应压力为 4 MPa 时,固相 NaCl 开始转化和全部转化为其他化合物的温度分别从 1 500 °C 和 2 200 °C 降至 450 °C 和 800 °C。

2.3 常压下 Na 基化合物的迁移转化特性

0.1 MPa 下准东煤灰中 Na 基化合物的迁移特性如图 3 所示。可见,300 °C 开始,固相 NaCl 的物质的量迅速降低,650 °C 左右降至 0,全部转化为其他化合物。NaCl 开始降低的同时,系统中发现 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, 随温度升高,其物质的量先升后降,在 650 °C 左右达到最高点,达 0.06 kmol 以上,最终在 1 500 °C 降至约 0.05 kmol。400 °C 开始生成 NaAlSiO_4 , 随温度升高, NaAlSiO_4 物质的量先升后降,600 °C 前的升高速率随温度的升高而增加,而在 600~1 000 °C, 升高的速率随温度的升高而降低;温度高于 1 000 °C 后,其物质的量略降低; Na_2SiO_3 从 500 °C 开始出现,其物质的量先升后降,在 600 °C 左右达到最高点。气相 NaCl 从 600 °C 开始出现,其物质的量随温度的升高而逐渐升高,最终在 1 500 °C 达约 0.02 kmol, 约占总 Na 物质的量的 25%。

分析可知,准东煤中 NaCl 在 300 °C 以下仍保持固态,从 300 °C 开始,与 SiO_2 和 Al_2O_3 反应生成 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$;400 °C 开始,与 SiO_2 和 Al_2O_3 反应生成 NaAlSiO_4 ;500 °C 开始与 SiO_2 反应生成 Na_2SiO_3 ;600 °C 和 700 °C, Na_2SiO_3 和 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 含量开始降低,即与其他含 Cl 化合物或 Cl_2 反应生成气相 NaCl。

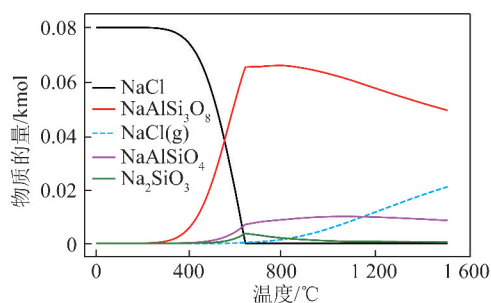


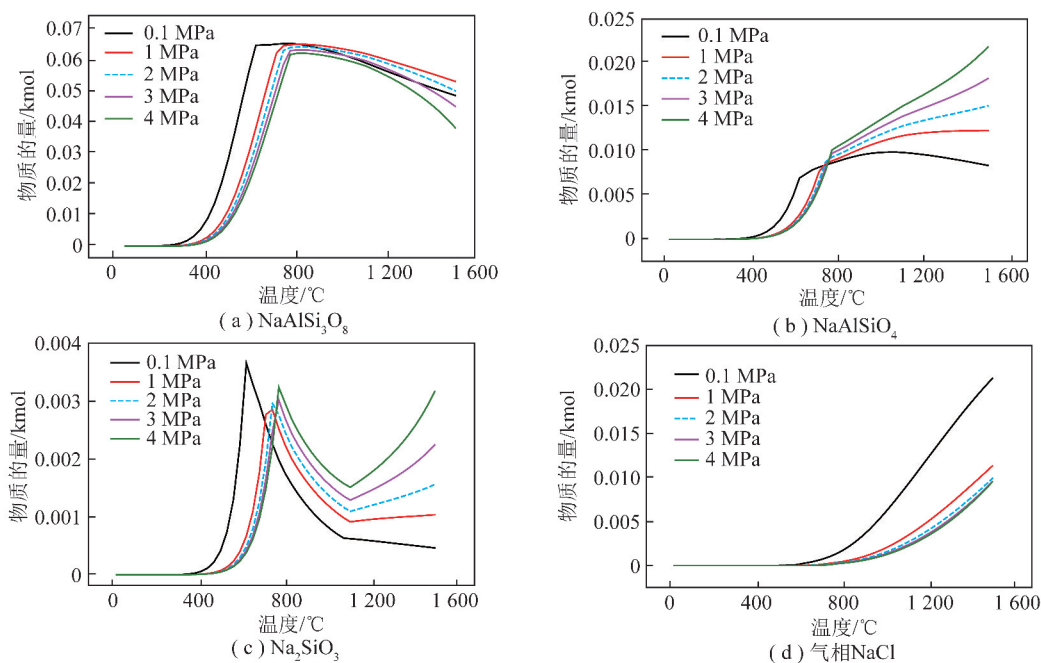
图 3 0.1 MPa 各 Na 基化合物物质的量随温度变化曲线

Fig. 3 Molar mass variation curve of each Na-based compound with the temperature at 0.1 MPa

2.4 加压条件下主要 Na 基化合物迁移转化特性

不同压力下,准东煤灰中 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、 NaAlSiO_4 、 Na_2SiO_3 和气相 NaCl 的物质的量随温度的变化规律如图 4 所示。由图 4(a) 可见,与常压条件相比,随压力升高, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 的物质的量变化趋势保持一致,但出现的“拐点”逐渐降低并后移。由图 4(b)

可见,与常压下 NaAlSiO_4 物质的量的变化趋势不同,系统反应压力大于 1 MPa 时, NaAlSiO_4 的物质的量随温度单调上升,800 °C 前的生成速率随温度的升高而增加,800 °C 后基本直线上升,且物质的量高于常压下。由图 4(c) 可见,低于 1 100 °C 时,加压条件下 Na_2SiO_3 物质的量的变化趋势与常压条件相似,均为先快速升高达到最高值后快速降低,但加压条件下 Na_2SiO_3 物质的量的最高点低于常压条件下。800 ~ 1 100 °C 时,随着温度升高, Na_2SiO_3 的物质的量呈下降趋势,在相同温度下随压力升高, Na_2SiO_3 的物质的量增加。温度升高至 1 100 °C 以上时,加压条件下 Na_2SiO_3 的物质的量逐渐上升,且增长速度随压力的升高而增加。由图 4(d) 可见,常压下气态 NaCl 在 600 °C 时呈逐渐上升趋势,其物质的量在 1 500 °C 时达 0.02 kmol; 反应压力越大,随温度的升高,气态 NaCl 物质的量的生成速率越慢,生成量也越低。

图 4 加压条件下 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、 NaAlSiO_4 、 Na_2SiO_3 、气相 NaCl 物质的量随温度的变化Fig. 4 Molar mass variations of $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, NaAlSiO_4 , Na_2SiO_3 , NaCl with the temperature under pressurized condition

通常气化炉中反应温度均超过 1 000 °C, 温度高于 1 000 °C 时, 随压力增加, 气化 NaCl 含量降低, 生成更多低熔点的 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、 NaAlSiO_4 、 Na_2SiO_3 。这 3 种化合物熔点较低, 具有较强的助熔作用, 可显著降低煤的灰熔融温度^[10]。因此, 气化炉中反应压力越高, 产生结渣的风险越高。

3 结 论

1) 压力显著影响纯 NaCl 的气化温度, 常压下,

开始气化温度和气化完成温度分别为 800 °C 和 1 400 °C, 压力升至 4 MPa 时, 2 个温度分别升至 1 500 °C 和 2 200 °C。

2) 准东煤中 NaCl 在 300 °C 以下仍保持固态, 300 °C 开始, NaCl 与煤灰中的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 H_2O 反应生成 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、 NaAlSiO_4 和 Na_2SiO_3 等 Na 基化合物, 生成的气相 NaCl 仅占 Na 物质的量的 25%。

3) 气化炉中反应压力越高, 生成的低熔点且具有助熔作用的 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、 NaAlSiO_4 、 Na_2SiO_3 越多,

在炉内产生结渣的风险越高。

参考文献(References):

- [1] ZHOU J, ZHUANG X, ALASTUEY A, et al. Geochemistry and mineralogy of coal in the recently explored Zhundong large coal field in the Junggar basin, Xinjiang province, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(1/2): 51-67.
- [2] YUAN Y, LI S, YAO Q. Dynamic behavior of sodium release from pulverized coal combustion by phase-selective laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 2339-2346.
- [3] XU J, YU D, FAN B, et al. Characterization of ash particles from co-combustion with a Zhundong coal for understanding ash deposition behavior [J]. Energy & Fuels, 2013, 28(1): 678-684.
- [4] ZHOU H, ZHOU B, LI L, et al. Experimental measurement of the effective thermal conductivity of ash deposit for high sodium coal (Zhundong coal) in a 300 kW test furnace [J]. Energy & Fuels, 2013, 27(11): 7008-7022.
- [5] WANG X, XU Z, WEI B, et al. The ash deposition mechanism in boilers burning Zhundong coal with high contents of sodium and calcium; a study from ash evaporating to condensing [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 80: 150-159.
- [6] WEI B, TAN H, WANG Y, et al. Investigation of characteristics and formation mechanisms of deposits on different positions in full-scale boiler burning high alkali coal [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 119: 449-458.
- [7] WEI B, WANG X, TAN H, et al. Effect of silicon-aluminum additives on ash fusion and ash mineral conversion of Xinjiang high-sodium coal [J]. Fuel, 2016, 181: 1224-1229.
- [8] WU X, ZHANG X, YAN K, et al. Ash deposition and slagging behavior of Chinese Xinjiang high-alkali coal in 3 MWth pilot-scale combustion test [J]. Fuel, 2016, 181(1): 1191-1202.
- [9] 张军, 汉春利, 刘坤磊, 等. 煤中碱金属及其在燃烧中的行为 [J]. 热能动力工程, 1999, 2(2): 83-85.
- ZHANG Jun, HAN Chunli, LIU Kunlei, et al. Various forms of alkali metal in coal and its behavior during coal combustion [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1999, 2(2): 83-85.
- [10] 周永刚, 范建勇, 李培, 等. 高碱金属准东煤灰熔融过程的矿物质衍变 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(8): 1559-1564.
- ZHOU Yonggang, FAN Jianyong, LI Pei, et al. Mineral transmutation of high alkali Zhundong coal in ash melting process [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(8): 1559-1564.
- [11] 王智化, 李谦, 刘敬, 等. 准东煤中碱金属的赋存形态及其在热解过程中的迁移规律 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1): 130-135.
- WANG Zhihua, LI Qian, LIU Jing, et al. Occurrence of alkali metals in Zhundong Coal and its migration during pyrolysis process [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 130-135.
- [12] 王学斌, 魏博, 张利孟, 等. 温度和 SiO₂ 添加物对准东煤中碱金属的赋存形态及迁徙特性的影响 [J]. 热力发电, 2014, 43(8): 84-88.
- WANG Xuebin, WEI Bo, ZHANG Limeng, et al. Effect of temperature and silicon additives on occurrence and transformation characteristics of alkali metal in Zhundong coal [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(8): 84-88.
- [13] 魏博, 谭厚章, 王学斌, 等. 准东煤灰沉积与无机元素迁徙特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(8): 1783-1788.
- WEI Bo, TAN Houzhang, WANG Xuebin, et al. Ash deposition and inorganic element transformation during Zhundong coal combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(8): 1783-1788.
- [14] 俞海森, 曹欣玉, 周俊虎, 等. 高碱灰渣烧结熔融过程中的物相变化 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1316-1319.
- YU Haimiao, CAO Xinyu, ZHOU Junhu, et al. Phase transformation of high alkaline ash residue on the process of sintering and fusion [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1316-1319.
- [15] 金涌, 胡永琪, 胡山鹰, 等. 煤炭热力学高效和化学高价值利用新工艺 [J]. 化工学报, 2014, 65(2): 381-389.
- JIN Yong, HU Yongqi, HU Shanying, et al. New technology for thermo-chemical comprehensive utilization of coal [J]. CIESC Journal, 2014, 65(2): 381-389.
- [16] 杨红深, 谷小虎. 压力对煤气化反应的影响 [J]. 洁净煤技术, 2012, 18(2): 65-68.
- YANG Hongshen, GU Xiaohu. Influence of pressure on coal gasification [J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(2): 65-68.
- [17] 胡日查, 刘春龙, 毕勤成, 等. γ 射线法测量亚临界汽-水两相流截面含气率的实验研究 [J]. 热能动力工程, 2015, 30(6): 842-847.
- HU Richa, LIU Chunlong, BI Qincheng, et al. Experimental study of the γ -ray method for measuring the gas content in a cross section with a subcritical steam-water two-phase flow [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2015, 30(6): 842-847.
- [18] 王艳坤. HSC Chemistry 软件在高校化学科研中的应用 [J]. 河南教育学院学报(自然科学版), 2013, 22(2): 28-30.
- WANG Yankun. Application of HSC chemistry software in university chemical scientific research [J]. Journal of Henan institute of Education (Natural Science Edition), 2013, 22(2): 28-30.
- [19] 卫小芳, 刘铁峰, 黄戒介, 等. 澳大利亚高盐煤中钠在热解过程中的形态变迁 [J]. 燃料化学学报, 2010, 38(2): 144-148.
- WEI Xiaofang, LIU Tiefeng, HUANG Jiejie, et al. Transformation of Na in an Australian high-sodium coal during pyrolysis [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2010, 38(2): 144-148.
- [20] 宋国良, 齐晓宾, 宋维健, 等. 新疆准东高碱煤流态化气化过程中碱金属的迁移特性 [J]. 过程工程学报, 2015, 15(4): 542-546.
- SONG Guoliang, QI Xiaobin, SONG Weijian, et al. Migration characteristics of alkali metals in Zhundong high-alkali coal from Xinjiang during fluidized gasification process [J]. The Chinese Journal Process Engineering, 2015, 15(4): 542-546.