

煤炭加工与环保

气化配煤对煤灰熔融特性的影响

李海鹏¹, 刘全润¹, 张敬杰¹, 李凤海², 马修卫¹

(1. 河南理工大学 化学化工学院, 河南 焦作 454000; 2. 菏泽学院 化学化工系, 山东 菏泽 274000)

摘要: 为了降低煤灰对气流床气化的影响, 提高气流床的气化效率, 将灰熔融性不同的煤按一定比例进行配比, 采用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 研究了煤灰化学组成对煤灰熔融温度的影响, 利用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析了混合煤样加热过程中矿物组成的变化。结果表明, 配煤调控煤灰熔融温度的效果不同, 神木煤降低方正煤与长治煤的灰熔融温度效果明显优于孙家壕煤, 硅铝比较低是孙家壕煤灰熔融温度改善效果不明显的主要原因。煤的灰熔融温度与煤灰中的碱酸比和硅铝比呈负相关, 与硅比呈正相关。煤的灰熔融温度不仅与煤中的化学组成有关, 还与矿物质间的低温共熔作用有关。

关键词: 气化配煤; 灰熔融特性; 气流床气化

中图分类号: TQ536

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)10-0203-06

Influence of gasification coal blending on ash fusion characteristics

LI Haipeng¹, LIU Quanrun¹, ZHANG Jingjie¹, LI Fenghai², MA Xiuwei¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Heze University, Heze 274000, China)

Abstract: In order to reduce the influence of coal ash on entrained flow gasification, and improve the efficiency of gasification, coal samples with different ash fusion temperatures (AFTs) were blended with different ratios. The chemical composition and content of coal ash were analyzed by X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF). Mineral evolution in fusing process were investigated with the X-ray Diffraction (XRD). The results show that coal blending has different effects on their AFTs. The Shenmu coal can decrease the AFTs of Fangzheng coal and Changzhi coal significantly, while it isn't obvious for Sunjiahao coal. This difference mainly results from the lower ratio of Si/Al ratio of Sunjiahao coal. The coal AFTs is direct proportional with the Si ratio, and is inverse with the basic to alkali and acid ratio and the Si/Al ratio. Besides, it is also indicated that the AFTs of coal is not only related to the chemical composition, but also to mineral interactions at low temperatures.

Key words: gasification coal blending; ash melting characteristics; entrained flow gasification

0 引言

煤炭的高效洁净利用是实现节能减排与可持续发展的有效途径^[1-2]。气流床技术具有气化强度大、煤种适应性强等特点, 代表着煤气化技术的发展方向^[3], 但在使用高灰、高灰熔融性等劣质煤时, 还存在诸多问题。气流床技术采用液态排渣方式, 灰熔融温度过高或者过低都不适合气流床气化, 一般控制煤灰

的流动温度在 1 300~1 400 °C。灰熔融温度过高达不到液态排渣要求, 灰熔融温度过低气化灰渣不能在气化炉水冷壁上形成一定程度的渣层, 达不到“以渣抗渣”的效果, 会降低气化炉的使用寿命。高灰熔融性煤(流动温度 1 400 °C) 占我国已探明煤炭储量的 57% 左右^[4], 对于高灰熔融性煤, 一般采用添加助熔剂或配煤的方式调节煤的灰熔融性。高娜等^[5]研究了碱性氧化物对煤灰熔融特性的影响及机理, 发现采

收稿日期: 2017-05-08; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.10.034

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA05010304); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2014BM014)

作者简介: 李海鹏(1990—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, Tel: 18839133137, E-mail: hzlihaipeng@163.com。通讯作者: 刘全润, 副教授, 硕士生导师, Tel: 13653917335, E-mail: qrlu@163.com

引用格式: 李海鹏, 刘全润, 张敬杰, 等. 气化配煤对煤灰熔融特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 203-208.

LI Haipeng, LIU Quanrun, ZHANG Jingjie, et al. Influence of gasification coal blending on ash fusion characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 203-208.

用添加助熔剂的方式可以改善煤的灰熔融特性,但在降低煤灰熔融温度的同时,会增加排渣量和氧耗。与添加助熔剂相比,配煤对降低气流床气化用煤灰熔融性是一种高效、可行的方法。文献[6-7]从矿物质演变角度研究了配煤对煤灰熔融特性的影响,发现配煤比与配煤灰熔融温度之间是非线性关系。王敏龙等^[8]研究表明,高温下矿物形态的转变是导致配煤灰熔融性变化的主要原因。另有研究^[9-10]表明 Si 和 Al 含量较高的煤灰熔融性较高,并且 SiO₂和 Al₂O₃含量的比值是影响煤灰在高温下熔融特性的重要因素。由于配煤矿物质相互作用的复杂性,对配煤熔融过程中矿物质相互作用的机制还不十分清楚,已有研究者^[11-13]从碱酸比角度研究了混煤灰熔融温度的变化,但从硅铝比、硅比角度研究配煤对煤灰熔融特性影响的报道较少。基于此,笔者采用低灰熔融性煤分别与 3 种不同的高灰熔融性煤进行两两混配,对比不同配比对同一煤样灰熔融温度的影响。在讨论碱酸比对配煤灰熔融特性影响的基础上,从硅铝比、硅比角度对混煤灰熔融特性的影响进行了深入分析,以期 为配煤调控高灰熔融性煤的熔融特性提供理论支持。

1 试 验

1.1 试验原料

选用的原煤样为神木煤、方正煤、孙家壕煤和长治煤,分别记为 M_{SM}、M_{FZ}、M_{SJH}和 M_{CZ},煤样由中国科学院山西煤炭化学研究所粉煤气化中心中试基地提供。将煤样破碎研磨至粒径 0.178 mm(80 目)以下。工业分析按照 GB/T 30732—2014《煤的工业分析方法》进行。

1.2 煤灰熔融温度的测定

根据 GB/T 219—2008《煤灰熔融性的测定方法》中规定的方法,将煤样放在 815 ℃下的马弗炉内充分燃烧,冷却后将煤灰制成灰锥,利用 ALHR-2

型智能灰熔融性测试仪,在弱还原性(封碳法)气氛下测定各煤样的灰熔融特征温度(变形温度 DT、软化温度 ST、半球温度 HT、流动温度 FT)。

1.3 煤灰化学组成分析

根据国标 GB/T 30732—2014《煤的工业分析方法》,将煤样研磨至粒径 0.1 mm 以下,在 815 ℃下制成待用煤灰,然后在玛瑙研钵中将待用煤灰研磨至粒径 0.074 mm 以下,使用 X 射线荧光光谱法(XRF)分析原煤样及混煤的化学组成。

1.4 煤灰矿物组成分析

在弱还原性气氛下,灰样升温至所需温度,并恒温 300 s,取出后迅速放入冷水中淬冷,防止缓慢冷却过程中发生矿物质晶型转变,以保持此温度下应有的矿物结晶^[14-15]。获得的试样经玛瑙研钵研磨后,采用 D/MAX-2500 型 X 射线衍射仪进行分析,衍射条件:Cu 靶,管电流 100 mA,管电压 40 kV。

2 结果与讨论

2.1 原煤灰熔融特性和煤灰成分分析

原煤样灰熔融特征温度见表 1,煤灰化学组成分析及碱酸比 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/w(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)$ 、硅铝比 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、硅比 $100w(\text{SiO}_2)/w(\text{SiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO})$ 见表 2。由表 1 可以看出,M_{FZ}、M_{SJH}、M_{CZ}三种煤均为高灰熔融性煤,且 FT>1 500 ℃,因此 3 种煤样均不适宜单独气流床气化。结合表 2 可知,煤灰的熔融温度与煤灰的化学组成有关,即 SiO₂和 Al₂O₃含量越高,灰熔融性就越高,煤灰中的 Fe₂O₃和 CaO 含量越高,煤灰的灰熔融性就越低,因此可以利用高低灰熔融性煤灰化学组成的差异,将低灰熔融性神木煤和其他 3 种高灰熔融性煤相配达到合理利用的效果。

由表 1 和表 2 可以看出,煤灰的碱酸比和硅铝比越高,煤的灰熔融温度越低;硅比越高,煤的灰熔

表 1 煤样的工业分析和灰熔融特征温度

Table 1 Proximate analysis and ash fusion temperature of coal samples

煤样	工业分析/%				灰熔融特征温度/℃			
	M _{ad}	A _d	V _{daf}	FC _{daf}	DT	ST	HT	FT
M _{SM}	2.44	8.78	35.21	53.57	1 115	1 140	1 170	1 267
M _{FZ}	3.88	12.30	29.89	53.93	1 450	>1 500	>1 500	>1 500
M _{SJH}	4.73	13.46	26.05	55.76	>1 500	>1 500	>1 500	>1 500
M _{CZ}	0.46	9.67	21.03	68.79	1 500	>1 500	>1 500	>1 500

表 2 煤样的煤灰组成

Table 2 Ash composition of coal samples

煤样	煤灰成分质量分数/%										碱酸比	硅铝比	硅比
	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			
M _{SM}	34.06	14.32	16.95	27.62	1.88	0.97	3.08	0.22	0.62	0.28	1.02	2.38	42.31
M _{FZ}	45.34	34.90	9.34	6.34	0.98	1.24	0.32	0.41	1.10	0.07	0.21	1.30	73.13
M _{SH}	46.33	38.32	6.72	4.38	1.09	1.24	0.23	0.66	1.01	0.02	0.15	1.21	79.17
M _{CZ}	48.32	33.20	8.23	4.78	1.59	2.37	0.24	0.31	0.95	0.04	0.13	1.46	83.11

融温度越高。3 种高灰熔融性煤的碱酸比和硅铝比要远低于低灰熔融性煤的相应值,而硅比要远高于低灰熔融性煤,并且同为高灰熔融性煤的孙家壕煤和长治煤的灰熔融温度要高于方正煤,这是孙家壕煤和长治煤的碱酸比小于方正煤的碱酸比,硅比大于方正煤的缘故。而神木煤碱性组分尤其是钙和铁的含量明显高于另外 3 种煤,高温下会与煤灰中的

硅酸盐反应生成含铁和含钙的低灰熔融性矿物质从而使煤的灰熔融性降低^[16]。

2.2 配煤对煤灰熔融温度的影响

试验将低灰熔融性神木煤按照 10%、20%、30%、40%和 50%的比例与其他 3 种高灰熔融性煤进行混配,混煤灰的灰熔融特征温度测定结果如图 1 所示。

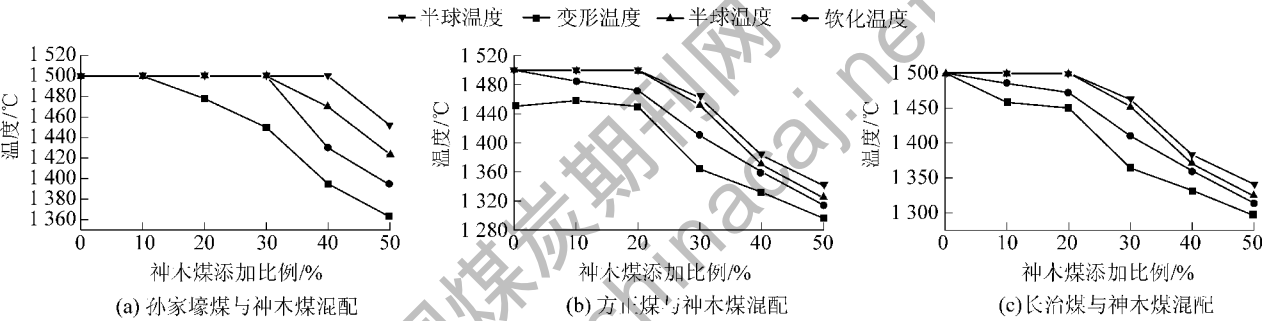


图 1 还原性气氛下混合煤的灰熔融性变化

Fig. 1 Ash fusion temperature for blending coal in reducing atmosphere

由图 1 可知,配煤的灰熔融特征温度 DT 、 ST 、 HT 、 FT 均呈非线性的变化规律。随着神木煤配比的增加,3 种高灰熔融性煤均可被低灰熔融性神木煤不同程度地降低,但是对于同一煤样在不同的配比下,灰熔融性温度降低的幅度不同;不同煤样,在同一配比下的降熔效果也不尽一致。长治煤和方正煤的降熔效果较好,孙家壕煤偏差。方正煤和长治煤与神木煤相配时,在神木煤配比为 20%~30%时,灰熔融性温度下降幅度较大,并且在神木煤配比为 30%时,2 种高灰熔融性煤的灰熔融温度已能满足气流床气化工艺要求,降熔效果较好。孙家壕煤与神木煤相配时,当神木煤配比为 40%时,虽然其他 3 种灰熔融特征温度已发生改变,但是流动温度仍然没有改变,在神木煤配比达到 50%时,流动温度才开始降低,不过仍然没有达到气流床气化工艺的要求。这种现象应该是由孙家壕煤中 Al_2O_3 含量过高所致,文献[9,17]指出煤灰中 Al_2O_3 的含量对灰熔

融温度的影响程度最高,且呈正相关性,这是由于 Al_2O_3 的晶体结构牢固,且熔点很高,在煤灰熔化过程中起“骨架”作用。

2.3 配煤中硅铝比、硅比对煤灰熔融温度的影响

不同配比下,混合煤灰的碱酸比、硅铝比、硅比结果见表 3。由图 1 可知,神木煤对长治煤和方正煤的降熔效果和灰熔融特征温度下降趋势基本一致,而对孙家壕煤的降熔效果较差。在神木煤配比为 30%时,3 种配比煤的碱酸比和硅比相差较小,但是孙家壕煤的硅铝比与方正煤和长治煤相差较大,在孙家壕煤的流动温度开始下降时,即神木煤配比为 50%时,其硅铝比上升到 1.53,与方正煤和长治煤在神木煤配比为 30%的硅铝比才较为接近。通过观察表 3 可知,在神木煤的任意配比中,3 种配比煤灰的碱酸比与硅比均较为接近,只有孙家壕煤的硅铝比与另外 2 种煤相差较大。因此可以得出硅铝比是导致孙家壕煤降熔效果差的主要因素。

表 3 不同配比下混合煤样的碱酸比、硅铝比、硅比对比

Table 3 Comparison of alkali and acid ratio, Si/Al ratio, Si ratio in mixed coal samples with different ratios

项目	混煤样	神木煤添加比例/%					
		0	10	20	30	40	50
碱酸比	M _{SM} 与 M _{SH} 混配	0.15	0.20	0.26	0.32	0.39	0.47
	M _{SM} 与 M _{CZ} 混配	0.13	0.24	0.29	0.35	0.42	0.49
	M _{SM} 与 M _{FZ} 混配	0.21	0.26	0.32	0.38	0.44	0.52
硅铝比	M _{SM} 与 M _{SH} 混配	1.21	1.26	1.31	1.37	1.44	1.53
	M _{SM} 与 M _{CZ} 混配	1.46	1.50	1.55	1.60	1.66	1.73
	M _{SM} 与 M _{FZ} 混配	1.30	1.35	1.40	1.46	1.53	1.61
硅比	M _{SM} 与 M _{SH} 混配	79.17	74.29	69.73	65.49	61.53	57.82
	M _{SM} 与 M _{CZ} 混配	83.11	72.50	68.44	64.58	60.92	57.44
	M _{SM} 与 M _{FZ} 混配	73.13	69.24	65.56	62.12	58.83	55.71

2.4 煤灰中矿物质对煤灰熔融温度的影响

由图 1 可知,神木煤对方正煤和长治煤的灰熔融特性影响的变化规律相似且降熔效果良好,而对于孙家壕煤却表现一般,为了进一步探究配煤对煤灰熔融温度的影响机制,现从高灰熔融性煤调控低灰熔融性煤的角度出发,结合 X 射线衍射仪进一步深入探究煤灰中硅铝比、硅比以及矿物质对混煤灰熔融特性的影响,结果如图 2 和表 4 所示。由图 2 可知,孙家壕煤的加入使神木煤的灰熔融温度逐渐增加,对比表 3 和表 4 中的孙家壕煤与神木煤的配比测定数据可以得出,以神木煤为主的混合煤的灰熔融温度变化正常,且随着配比煤灰熔融温度的增加,碱酸比、硅铝比逐渐变小,硅比逐渐变大^[18]。另外,孙家壕煤配比在 30%~40%时,配比煤的灰熔融特征温度增幅最大,且增幅均在 100℃ 以上。对比

表 3 和表 4,以孙家壕煤配比神木煤,配比煤灰中硅铝比的变化幅度是以神木煤配比孙家壕煤的 2 倍还要多,而硅比和碱酸比二者相比变化的幅度相差不大,因此硅铝比偏小是导致神木煤降熔孙家壕煤效果不佳的主要原因。

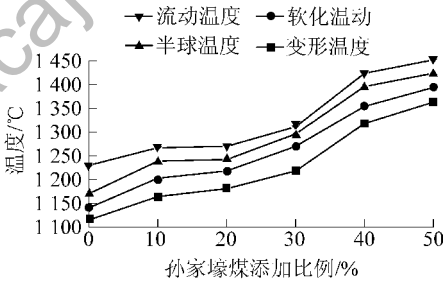


图 2 还原性气氛下混合煤的灰熔融性变化
Fig. 2 Ash fusion temperature for blending coal in reducing atmosphere

表 4 孙家壕煤与神木煤混煤灰分中碱酸比、硅铝比、硅比对比

Table 4 Comparison of alkali and acid ratio, Si/Al ratio, Si ratio in mixeding coal samples with different ratios

项目	混煤样	孙家壕煤添加比例/%					
		0	10	20	30	40	50
碱酸比	M _{SH} 与 M _{SM} 混配	1.02	0.88	0.75	0.65	0.55	0.47
硅铝比	M _{SH} 与 M _{SM} 混配	2.38	2.11	1.91	1.75	1.63	1.53
硅比	M _{SH} 与 M _{SM} 混配	42.31	45.06	47.98	51.06	54.34	57.82

由以上分析发现,硅比越大、硅铝比越小,煤灰熔融温度越高,现从矿物质演变的角度揭示混煤灰熔融温度变化的机理。神木煤与孙家壕煤配比为 7:3 时不同温度下的 XRD 测定结果如图 3 所示。由图 3 可知混合煤灰在不同温度下主要的晶体矿物质是石英(SiO₂)、莫来石(3Al₂O₃·2SiO₂)、钙长石(CaO·Al₂O₃·2SiO₂)、钙黄长石(2CaO·Al₂O₃·SiO₂)、镁橄榄石(Mg₂SiO₄)、赤铁矿(Fe₂O₃)和高岭

石(Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O)。在 1 050℃,混煤灰主要矿物质为石英、钙长石、钙黄长石、赤铁矿,随着温度的升高,石英和赤铁矿对应的衍射峰强度逐渐降低,赤铁矿衍射峰降低主要是在升温过程中生成了含铁的硅酸盐矿物质,熔点较低生成了玻璃态物质,其衍射峰消失的过程正好是莫来石、钙长石生成至生成量最大的过程。莫来石在 1 050℃ 时开始形成,且含量随着温度的继续升高先增加后下降,主要

是莫来石在高温下参与生成了钙长石。钙长石灰熔融温度大于1 500 ℃导致神木煤灰熔融温度升高。镁橄榄石随着温度的升高其含量先增加而后降低。镁橄榄石含量减少的原因可能是随着温度的升高转变成非晶态物质而引起的。

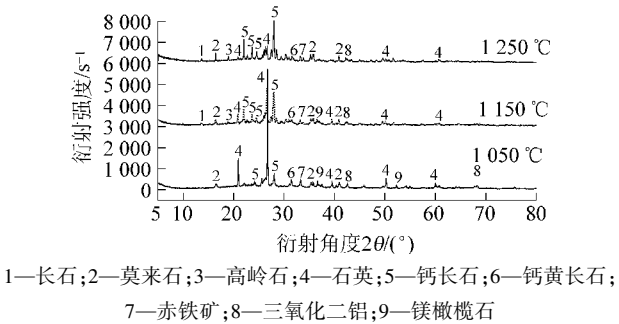
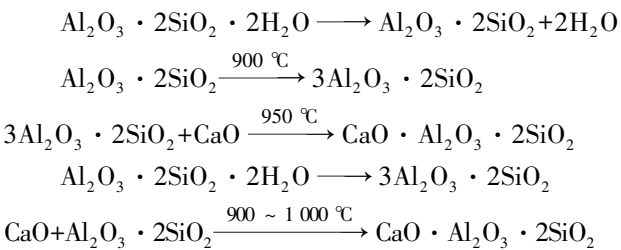


图3 混合煤灰在不同温度下的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of mixed coal ash at different temperatures

基于本文与前人的研究成果,可以推断出混

合煤灰中一些主要矿物质发生了下列固相反应^[19-23]:



将神木煤、孙家壕煤和两者以7:3的比例混合,煤灰中的SiO₂、Al₂O₃、CaO含量换算成标准百分含量,见表5。3种煤灰分的组成在SiO₂-Al₂O₃-CaO三元相图上的位置如图4所示,三元相图上存在E和F两个低温共熔点,并形成一个熔点较低的区域。孙家壕煤灰组成落在了高灰熔融性的莫来石区,而神木煤灰组成则正好位于低温共熔区域。

表5 神木煤与孙家壕煤灰主要灰分的标准百分含量

Table 5 Normalized content for M_{SM}、M_{SJH} and blending of them for mass ratio 7:3 of coal ashes

煤灰样品	煤灰组成质量分数/%			煤灰标准组成质量分数/%		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
M _{SM}	34.06	14.32	27.62	44.82	18.84	36.34
M _{SJH}	46.33	38.32	4.38	52.04	43.04	4.92
混合煤灰	34.74	21.52	20.65	45.17	27.98	26.85

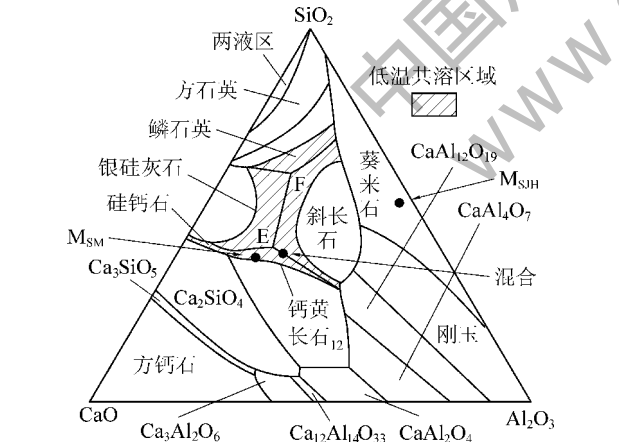


图4 CaO-SiO₂-Al₂O₃三元相图

Fig. 4 CaO-SiO₂-Al₂O₃ ternary equilibrium phase diagram

神木煤灰熔融温度比孙家壕煤灰熔融温度要低,表明煤的灰熔融温度不仅与煤中的化学组成有关,还与矿物质间的低温共熔作用有关。另外,神木煤与孙家壕煤的混合煤(7:3)灰组成落在了2种单一煤样之间的低温共熔区内,可知随着2种煤样混掺比的改变,混合煤在三元相图中的位置会分别

落在高灰熔融性的莫来石(熔点1 850 ℃)区、斜长石(1 100~1 550 ℃)区和由斜长石和钙黄长石组成的低温共熔区。由图4可知,随着孙家壕煤配比的增加,混合煤的主要结晶矿物由低温共熔区经斜长石区向莫来石区转变,这与图2的变化趋势一致。

3 结 论

1)配煤是调控高灰熔融性煤灰熔融温度的有效方法,但对于不同性质的煤效果不同,并且配煤比与煤灰熔融温度呈非线性关系。

2)煤灰化学组成是影响配煤灰熔融温度的重要因素,碱酸比、硅铝比、硅比是衡量煤灰熔融温度的重要参考指标,煤灰熔融温度与碱酸比、硅铝比呈负相关,与硅比成正相关,硅铝比偏小是影响孙家壕煤降熔效果差的主要原因。

3)高铝煤熔融温度较高的原因是在升温过程中形成了高灰熔融性的莫来石等矿物质。煤灰熔融温度不仅与煤中的化学组成有关,还与矿物质间的低温共熔作用有关。

参考文献(References):

- [1] 王金华.我国煤炭高效洁净利用新技术[J].煤炭科学技术, 2012,40(1):1-4.
WANG Jinhua. New technology of coal high efficient and cleaning utilization in China[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(1):1-4.
- [2] JING X, WANG Z, Yu Z, *et al.* Experimental and kinetic investigations of CO₂ gasification of fine chars separated from a pilot-scale fluidized bed gasifier[J]. Energy Fuels, 2013, 27(5):2422-2430.
- [3] 贺国章,周敏,雷佳莉,等.我国气流床气化技术发展现状及工艺选择原则[J].煤炭科学技术, 2011, 39(6):110-113.
HE Guozhang, ZHOU Min, LEI Jiali, *et al.* Development status and technique selection principle of entrained flow bed coal gasification technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6):110-113.
- [4] 乌晓江,张忠孝,朴桂林,等.高灰熔点煤加压气流床气化特性[J].燃料科学与技术, 2009, 15(2):182-186.
WU Xiaojang, ZHANG Zhongxiao, PIAO Guilin, *et al.* Gasification characteristics of coal with high ash fusion temperature in lab-scale down-flow gasifier[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(2):182-186.
- [5] 高娜,刘胜华,刘勇晶,等.碱性氧化物对煤灰熔融特性的影响及机理研究[J].煤炭转化, 2014, 37(3):42-45.
GAO Na, LIU Shenghua, LIU Yongjing, *et al.* Effect of alkali oxides on ash melting characteristic[J]. Coal Conversion, 2014, 37(3):42-45.
- [6] 焦发存,李慧,邓蜀平,等.配煤对煤灰熔融特性影响的实验研究[J].煤炭转化, 2006, 29(1):11-14.
JIAO Facun, LI Hui, DENG Shuping, *et al.* Experimental study of the effect of coal blending on coal ash fusibility[J]. Coal Conversion, 2006, 29(1):11-14.
- [7] 刘胜华,高娜,郭延红,等.配煤对煤灰熔融特性的影响[J].煤炭转化, 2014, 37(3):46-49.
LIU Shenghua, GAO Na, GUO Yanhong, *et al.* Experimental study on effect of coal blending on coal ash melting characteristic[J]. Coal Conversion, 2014, 37(3):46-49.
- [8] 王敏龙,邓蜀平,郝栩,等.配煤降低潞安煤灰熔融温度及其机理研究[J].煤炭转化, 2007, 30(3):25-30.
WANG Minlong, DENG Shuping, HAO Xu, *et al.* An experimental study of the effect of Lu'an coal blending on coal ash fusibility[J]. Coal Conversion, 2007, 30(3):25-30.
- [9] WU X, ZHANG Z, CHEN Y, *et al.* Main mineral melting behavior and mineral reaction mechanism at molecular level of blended coal ash under gasification condition[J]. Fuel Process Technology, 2010, 91(11):1591-1600.
- [10] 马志斌,白宗庆,白进,等.高温弱还原气氛下高硅铝比煤灰变化行为的研究[J].燃料化学学报, 2012, 40(3):279-285.
MA Zhibin, BAI Zongqing, BAI Jin, *et al.* Evolution of coal ash with high Si/Al ratio under reducing atmosphere at high temperature[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(3):279-285.
- [11] LI F H, FANG Y T. Modification of ash fusion behavior of lignite by the addition of different biomasses[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(5):2979-2986.
- [12] DYK J C, BAXTER L L, HEERDEN J H P, *et al.* Chemical fractionation tests on South African coal sources to obtain species-specific information on ash fusion temperatures (AFT)[J]. Fuel, 2005, 84(14/15):1768-1777.
- [13] 李振珠,李风海,马名杰,等.高灰熔点煤灰熔融特性的可控调整研究进展[J].化学工程, 2015, 43(3):60-63, 78.
LI Zhenzhu, LI Fenghai, MA Mingjie, *et al.* Review on controllable adjustment of coal ash melting characteristics with high ash melting point[J]. Chemical Engineering, 2015, 43(3):60-63, 78.
- [14] LI F H, LI Z, HUANG J, *et al.* Understanding mineral behaviors during anthracite fluidized-bed gasification based on slag characteristics[J]. Applied Energy, 2014, 131:279-287.
- [15] BAI J, LI W, LI B Q. Characterization of low-temperature coal ash behaviors at high temperatures under reducing atmosphere[J]. Fuel, 2008, 87:583-591.
- [16] 贾明生,张乾熙.影响煤灰熔融性温度的控制因素[J].煤化工, 2007(3):1-5.
JIA Mingsheng, ZHANG Qianxi. Key factors affecting fusion temperature of coal ash[J]. Coal Chemical Industry, 2007(3):1-5.
- [17] 芦涛,张雷,张晔,等.煤灰中矿物质组成对煤灰熔融温度的影响[J].燃料化学学报, 2010, 38(1):23-28.
LU Tao, ZHANG Lei, ZHANG Ye, *et al.* Effect of mineral composition on coal ash fusion temperature[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2010, 38(1):23-28.
- [18] 杨鑫,黄戒介,赵建涛,等.褐煤配入高熔点煤灰的灰熔点预测模型研究[J].化学工程, 2012, 40(10):80-84.
YANG Xin, HUANG Jiejie, ZHAO Jiantao, *et al.* Ash fusion temperature prediction model of lignite blending high melting point coal ash[J]. Chemical Engineering, 2012, 40(10):80-84.
- [19] 李振珠,李风海,马修卫,等.生物质对呼盛褐煤灰熔融特性的影响[J].化工进展, 2015(3):710-714.
LI Zhenzhu, LI Fenghai, MA Xiuwei, *et al.* Effect of biomass on ash fusion characteristics of Husheng lignite[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015(3):710-714.
- [20] LI F H, HUANG J J, FANG Y T, *et al.* The effects of leaching and floatation on the ash fusion temperatures of three selected lignites[J]. Fuel, 2011, 90(7):2377-2383.
- [21] 马岩,黄镇宇,唐慧儒,等.准东煤灰化过程中的矿物演变及矿物添加剂对其灰熔融特性的影响[J].燃料化学学报, 2014, 42(1):20-25.
MA Yan, HUANG Zhenyu, TANG Huiru, *et al.* Mineral conversion of Zhundong coal during ashing process and the effect of mineral additives on its ash fusion characteristics[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, 42(1):20-25.
- [22] BAI J, LI W, LI C Z, *et al.* Influence of coal blending on mineral transformation at high temperatures[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(3):300-305.
- [23] LIU B, HE Q, JIANG Z, *et al.* Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures[J]. Fuel, 2013, 105:293-300.