配煤煤灰熔融特性模拟研究

王芳杰¹,唐玉林²,夏国富¹,崔龙鹏¹,王树青¹,王大川¹ (1.中国石化石油化工科学研究院,北京 100083;2.中国石化长城能源化工(宁夏)有限公司,宁夏银川 751400)

摘 要:煤灰熔融特性是影响液态排渣气化炉运行稳定性的重要因素,高熔点煤会造成气化炉排渣困 难,从而导致气化炉非计划停工。为了将高灰熔融温度的朱集西煤应用于液态排渣的 SE-东方炉,利 用热力学软件 Factsage,研究朱集西煤、神华煤、门克庆煤及朱集西-神华配煤、朱集西-门克庆配煤的 煤灰熔融特性,包括全液相温度、灰渣矿物组成及煤灰黏度的变化规律。朱集西-门克庆配煤和朱集 西-神华配煤的完全熔化温度分别为1390℃和1400℃,配煤灰熔融温度并不是单纯2种煤的灰熔 融温度加和;800℃时2种配煤中董青石和钙长石含量较高,900℃时朱集西-神华配煤灰中出现少 量尖晶石;朱集西-神华配煤在黏度为25 Pa·s时的温度为1400℃。结果表明,朱集西-门克庆配 煤可满足 SE-东方炉入炉煤的煤灰流动温度要求,但其在 SE-东方炉正常操作温度下灰渣黏度较大, 无法顺利排出;朱集西-神华配煤在有效降低灰熔融温度的同时,改善了灰渣的黏温特性,与主体煤 朱集西煤相比,灰渣黏度为25 Pa·s时的温度的同时,改善了灰渣的黏温特性,与主体煤 朱集西煤相比,灰渣黏度为25 Pa·s时的温度降低100℃,渣型由"塑性渣"变为"玻璃渣",适用于 SE-东方炉。朱集西-神华配煤中熔融温度低的董青石和钙长石含量较高,钙长石和尖晶石形成低温 共熔体,是配煤灰熔融温度低的主要原因。

关键词:SE-东方炉;配煤;Factsage;熔融温度;煤灰黏温特性

中图分类号:TQ546.5 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)04-0059-06

Simulation study of coal ash fusion characteristics of blended coal

WANG Fangjie¹, TANG Yulin², XIA Guofu¹, CUI Longpeng¹, WANG Shuqing¹, WANG Dachuan¹

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083, China; 2. Sinopec Great Wall Energy and

Chemical (Ningxia) Co., Ltd., Yinchuan 751400, China)

Abstract: The fusion characteristics of coal ash are important factors of affecting the operation stability of the liquid slagging gasifier. The high fusion point coal will make it difficult to discharge slag from gasifier, which will lead to unplanned shutdown of the gasifier. In order to apply the Zhujixi coal with high ash fusion temperature to SE gasification furnace with liquid slagging, the ash fusion characteristics of Zhujixi coal, Shenhua coal, Menkeqing coal and Zhujixi–Shenhua blended coal were studied by thermodynamic software of Factsage, including the whole liquid phase temperature, ash mineral composition and ash viscosity. The complete fusion temperatures of Zhujixi–Mengkeqing blended coal and Zhujixi–Shenhua blended coal are 1 390 °C and 1 400 °C, respectively. The fusion temperature of coal blending ash is not the sum of the ash fusion temperatures of the two coals. At 800 °C, the content of cordierite and anorthite in the two kinds of blended coal is relatively high. At 900 °C , a small amount of spinel appears in Zhujixi–Shenhua blended coal ash. The temperature of Zhujixi–Shenhua blended coal is 1 400 °C when its viscosity is 25 Pa · s. The results show that Zhujixi–Mengkeqing blended coal can meet the temperature requirements of fly ash flowing in SE gasification furnace, but its ash viscosity is high at the normal operating temperature of SE gasification furnace and cannot be discharged smoothly. The Zhujixi–Shenhua blended coal can not only effectively reduce the ash fusion temperature, but also improve the flow type of ash and reduce the ash viscosity. Compared with the main coal Zhujixi coal , the temperature is reduced by 100 °C when the ash viscosity is 25 Pa · s, and the slag type is changed from "plastic slag" to "glass slag", which is suitable for SE gasification furnace. The content of cordierite and feldspar with low melting temperature is higher in Zhujixi–Shenhua blended coal. Calcium feldspar and spinel form low temperature eutectic, which is the main reason of low temperatu

Key words: SE gasification furnace; coal blending; Factsage; fusion temperature; viscosity-temperature characteristics of coal ash

收稿日期:2018-10-19;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18101901

引用格式:王芳杰,唐玉林,夏国富,等.配煤煤灰熔融特性模拟研究[J].洁净煤技术,2019,25(4):59-64.

WANG Fangjie, TANG Yulin, XIA Guofu, et al. Simulation study of coal ash fusion characteristics of blended coal [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4):59-64.



移动阅读

作者简介:王芳杰(1989—),女,河北南宫人,高级工程师,博士,从事煤种适应性及配煤研究。E-mail:wangfangjie.ripp@sinopec.com

0 引 言

SE-东方炉是具有中国石化自主知识产权的新型气化炉,为单喷嘴冷壁式粉煤加压气化炉^[1]。该气化炉采用液态排渣,要求入炉煤的灰流动温度在1400℃以下,而朱集西矿煤是典型的高灰熔融温度淮南煤,灰熔融温度约1600℃,因此无法直接用于东方炉。使朱集西煤在SE东方炉中稳定气化是保证淮南煤化工基地顺利投产的关键,因此,如何使朱集西矿煤与SE-东方炉相匹配,是亟待解决的问题,具有重要的现实意义。

配煤是改善煤灰熔融特性的常用方法[2-6].李 寒旭[7]研究了配煤对淮南煤灰熔融温度和灰渣黏 度的影响,将3种低灰熔融温度煤与4种高灰熔融 温度的淮南煤相配,并利用多元线性回归原理,建立 了煤灰流动温度与配煤比和灰比之间的数学模型。 李继炳^[8]研究了配煤与新型助熔剂改进 Shell 煤气化 工艺,考察了煤灰组成与煤灰熔融温度间的关系,同 时考察了配煤降低皖北刘桥二矿混煤的灰熔融温度 效果,并采用最小二乘法进行线性回归,建立了皖北 刘桥二矿混煤配煤的灰熔融温度预测关系式。丰 芸^[9]研究了淮南煤用于德士古气化的适应性,通过配 煤及添加助熔剂降低淮南煤灰熔融温度,改善灰渣黏 温特性,同时采用 Aspen Plus 软件对淮南煤在德士古 气化工艺中的应用进行模拟。芦涛^[10]研究了淮北煤 在德士古气化工艺中的适应性及技术经济性,考察了 配煤对淮北煤水煤浆性能的影响。以上研究均表明 配煤能有效改善煤灰熔融特性,配煤灰熔融温度与配 比之间为非线性关系。李风海等[11]研究了煤灰熔融 特性的影响因素,从煤灰化学组成和矿物质演变角度

分析引起灰熔融温度变化的原因。

Factsage 是世界最大的集成热化学数据库计算 系统之一,李寒旭^[7]从采用 Factsage 热力学模型计 算高温煤灰液相含量和煤灰矿物组成的转变。研究 发现,液相生成量为75%~80%时,采用计算温度 来预测淮南煤灰流动温度是较有效的方法。同时该 软件也较好地解释了煤灰中矿物组成随温度的变化 趋势,从机理上阐述了煤灰熔融温度变化的原因。 李德侠^[12]采用 Factsage 热力学模型计算煤灰液相 温度,进而预测灰熔融温度,线性回归法确定的液相 温度 T₁ 与流动温度 FT 之间的关系式为:FT= 0.749 36T₁+216.248 97,相关性系数为0.924,表明 煤灰流动温度与液相温度间具有较强的线性相关 性。文献[13-19]利用 Factsage 软件计算煤灰液相 温度并预测灰熔融温度,精度均很高(误差为5~10 ℃),且方便有效。但以上研究并未涉及温度变化 过程中不同配煤全液相温度、灰渣矿物组成及煤灰 黏度的变化,并以此指导配煤方案的工业应用。

本文利用 Factsage 软件计算在还原性气氛 下 SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-CaO-MgO-TiO₂-K₂O-Na₂O 八元体系升温过程中转化行为,揭示模拟气化炉操 作条件下配煤全液相温度、灰渣矿物组成及煤灰黏 度的变化规律,为高灰熔融温度的朱集西矿煤 在 SE-东方炉的应用提供指导。

1 试 验

1.1 原料煤性质

选取门克庆、神华2种低灰熔融温度煤分别与 朱集西矿煤掺配,3种煤的工业分析和元素分析见 表1。

%

样品 -		工业	分析				元素分析		
	$M_{ m ad}$	$A_{\rm d}$	$V_{\rm d}$	$FC_{\rm d}$	C _d	\mathbf{H}_{d}	Od	\mathbf{N}_{d}	$S_{t,d}$
朱集西	1. 29	20.74	30. 95	48.31	71.12	3.42	6.31	0. 94	0.23
神华	3.15	13.53	24.71	61.76	73.18	3.24	11.73	1.13	1.72
门克庆	2.56	28.98	28.10	42.92	56.81	3. 55	8.25	0.86	1.54

表 1 煤样工业分析和元素分析 Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal samples

计口	测空亚田古控测县注
注:Ud	侧止不用且按侧里伝。

根据 GB/T 1574 采用 X 射线荧光光谱仪测定 煤灰化学组成,根据 GB/T 219—2008 采用 SDAF 2000d 型灰熔融温度测试仪(湖南三德)测定煤灰的 熔融特征温度,煤灰化学组成及灰熔融温度测定结 果见表2。表2中只列出了本文考察范围内煤灰化 学组成的种类,由于神华煤灰中 SO3 质量分数达 11.80%,因此表中列出的神华煤灰化学组成加和为85.63%。

由表2可知,SiO₂和Al₂O₃含量越高,灰熔融温 度越高,Fe₂O₃和CaO含量越高,灰熔融温度越低。 朱集西煤SiO₂和Al₂O₃含量高,Fe₂O₃和CaO含量 低,其灰熔融温度高;门克庆煤SiO₂和Al₂O₃含量 较高,但其 Fe₂O₃ 和 CaO 含量也较高,因此其灰熔 融温度低于朱集西煤;神华煤 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量 低, Fe₂O₃和 CaO 含量高, 因此其灰熔融温度低于其他 2种煤。

表 2	煤灰化学组成及熔融温度

Table 2	Chemical	composition	and	fusion	temperature	of	coal	ash
---------	----------	-------------	-----	--------	-------------	----	------	-----

样品 -		灰成分含量/%								CTE /9C	UT /90	ETE /9C
	SiO ₂	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	CaO	MgO	${\rm TiO}_2$	K20	Na ₂ O	DI/ C	517 C	пı/ с	г 1/ С
朱集西	50.8	35.6	2.94	1.89	0.66	2.9	1.27	0. 79	1 418	>1 500	>1 500	>1 500
神华	35.3	22.6	8.77	13.8	1.03	1.46	1.26	1.41	1 132	1 178	1 182	1 186
门克庆	51.34	17.5	11.83	5.92	1.66	1.06	2.62	1.32	1 063	1 079	1 081	1 082

1.2 试验方法

1.2.1 煤灰特性模拟

将煤灰的组成成分简化为 8 种氧化物(SiO₂、 Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、TiO₂、K₂O 和 Na₂O),60% CO 和 40% CO₂ 混合气体模拟还原性气氛,利用 Factsage 7.0 的 Equilib 多元多相平衡计算模块,根 据煤灰的矿物组成计算煤灰开始熔化温度、完全熔 化温度、在不同温度下煤灰中的固相相对含量以及 煤灰渣矿物组成,计算的最初温度和最终温度分别 为 800 $^{\circ}$ 和 1 600 $^{\circ}$,温度间隔为 10 $^{\circ}$ 。利用 Factsage 7.0 的 Viscosity 模块计算煤灰的高温黏度。

1.2.2 煤灰黏温特性

我国煤灰黏温特性的测定可参照的标准为 DL/ T 660—2007《煤灰高温黏度特性试验方法》。采用 美国 Theta 公司研制的高温旋转黏度仪测定朱集 西-神华配煤的黏温特性曲线,测试步骤为:① 制备 煤灰;② 根据煤灰流动温度或完全液相温度确定测 试温度;③ 煤灰在高温炉中进行预熔,冷却降温后 形成渣块用于测试;④ 渣块置于测试坩埚中,真空 保护管抽真空后,通入制定气体;⑤ 升温至测定温 度,待温度恒定后开始测试,降温速率为1℃/min; ⑥ 当黏度值超过 300 Pa·s 或更高时,停止测试,并 继续降温。

2 试验结果与分析

2.1 煤灰熔融温度

图 1 为还原气氛下,3 种原料煤和 2 种配煤灰 渣液相生成量随温度的变化。可以看出,对于高灰 熔融温度朱集西煤来说,随温度升高,液相的生成可 分为 4 个阶段:① 液相开始生成阶段。在 910 ℃开 始有液相生成,1 170 ℃时液相生成量为 38.42%, 平均每升高 1 ℃,液相生成量增加 7.36%;② 液相 迅速生成阶段。该阶段对应的温度为 1 170~1 310 ℃,1 310 ℃时液相生成量为 75.18%,平均每升高 1 ℃,液相生成量增加26.26%。①、②阶段对应于煤 灰加热后的收缩阶段。③ 灰渣软化和变形阶段。 液相生成量随温度升高而增加的趋势变缓,该阶段 对应的温度为1310~1560℃,1560℃时液相生成 量为100%,平均每升高1℃,液相生成量增加 9.93%。④ 灰渣流动阶段。灰渣已完全成为液态。



different temperatures

门克庆煤、神华煤以及 2 种配煤灰渣液相生成 量随温度的变化趋势与朱集西煤一致,但 5 种煤样 的开始熔化温度(液相生成量为 0)和完全熔化温度 (液相生成量为 100%)相差较大。从图 1 可以看 出,朱集西-门克庆配煤和朱集西-神华配煤的完全 熔化温度分别为1 390 ℃和1 400 ℃,可达到 SE-东 方炉的入炉煤要求。从图 1 还可看出,配煤灰熔融 温度并不是单纯 2 种煤的灰熔融温度加和,这与煤 灰成分之间的相互作用有关。

2.2 煤灰矿物组成

采用 Factsage 7.0 对高温还原性气氛下 3 种原 料煤和 2 种配煤灰的矿物组成变化进行模拟计算, 结果如图 2 所示。

由图 2(a)可知,高温下朱集西煤灰中主要含有 石英(SiO₂)、刚玉(Al₂O₃)、钙长石(CaAl₂Si₂O₈)、透 长石(KAlSi₃O₈)、钠长石(NaAlSi₃O₈)、金红石 (TiO₂)、堇青石(Mg₂Al₄Si₅O₁₈)等矿物。800 ℃左右 时,石英和刚玉含量在40%、30%左右;900 ℃后,灰 洁净煤技术



Fig. 2 Mineral composition of coal ash slag at different temperatures

渣中开始出现液相,石英含量增加,钠长石和透长石 快速消失;温度继续升高至1200℃左右,钙长石和 金红石消失;1300℃左右,石英和堇青石消失,剩 余的固相物质为刚玉;1575℃左右时,刚玉消失, 此时灰渣中只剩液相,说明 Al₂O₃含量高是导致朱 集西煤灰熔融温度高的主要原因。

由图 2(b)、(c)可知,与朱集西煤不同,800 ℃ 时煤中主要矿物质是钙长石,在门克庆煤和神华煤 中的含量分别为 30%、50% 左右。门克庆煤与朱集 西煤灰矿物质种类基本相同,而神华煤与朱集西煤 灰矿物质种类相差较大。除钠长石、钙长石和刚玉 外,高温下神华煤灰中主要含有霞石(NaAlSiO₄)、白 榴石(KAlSi₂O₆)、钙钛矿(CaTiO₃)等矿物。钙长石 含量高、刚玉含量低是神华煤灰熔融温度低的主要 原因。

在还原性气氛下,朱集西-门克庆配煤和朱集 西-神华配煤的煤灰矿物组成随温度的变化规律如 图 2(d)、(e)所示。2 种配煤在 800 ℃的矿物组成 为石英、刚玉、钙长石、透长石、钠长石、金红石、堇青 石等。随着温度升高,矿物之间发生分解、聚合反应 和物相改变。2种配煤中,熔融温度低的堇青石和 钙长石含量较高,是配煤灰熔融温度低的主要原因。 900℃左右,朱集西-神华配煤灰中出现少量尖晶 石,钙长石与尖晶石易发生低温共熔作用,形成低熔 点的共晶体使煤灰熔融温度降低。

2.3 煤灰黏温特性

对于液态排渣炉来说,仅靠煤灰熔融温度的高低 无法正确判断煤灰渣在液态时的流动特性,还需要测 定煤灰在熔融态时的黏温特性。SE-东方炉要求必 须控制操作温度,使灰黏度保持在适宜的范围内,以 保证顺利排渣和炉内耐火材料不被腐蚀,不出现堵渣 现象。一般要求煤灰流动温度小于1400℃,1300~ 1450℃时的黏度控制在2.5~25.0 Pa・s。本问选 择的黏度值目标为灰渣黏度 25 Pa・s,对应的温度 $T_{25} \leq 1450 ℃$ 。

图 3 为 3 种原料煤和 2 种配的煤灰黏温特性, 可知,朱集西煤和门克庆煤对温度的变化反应灵敏, 随温度降低,黏度迅速升高,属于"塑性渣"类型, 在 SE-东方炉正常操作温度下灰渣黏度较大,无法 顺利排出;神华煤的灰渣黏度达 25 Pa·s时,对应



图3 煤灰黏温特性分析

Fig. 3 Viscosity-temperature characteristics of coal ash slag 的温度为1 300 ℃,随温度升高,黏度逐渐减小,属于"玻璃渣"类型,较为适合 SE-东方炉使用;朱集 西-门克庆配煤的灰渣黏度达 25 Pa・s 时,对应的 温度为1 500 ℃,不适用于液态排渣的 SE-东方炉; 朱集西-神华配煤的灰渣黏度达 25 Pa・s 时,对应 的温度为1 400 ℃,处于 SE-东方炉正常操作温度 的临界值。

朱集西-神华配煤的黏温特性曲线如图 4 所示。可知, 黏度值为 25 Pa · s 时对应的温度为1 400 ℃左右, 与 Factsage 软件预测黏度值基本一致。







3 结 论

1)朱集西煤灰中存在大量的 Al₂O₃ 是灰熔融温 度高于1 500 ℃ 的主要原因,添加神华煤可以将煤 灰流动温度降低到1 400 ℃,比原煤灰降低了 100 ℃以上。

2) 朱集西 - 神华配煤中的 Ca²⁺破坏了煤灰 Al₂O₃ 的晶体结构,在升温过程中,灰中矿物质发生 反应,生成大量的钙长石,随着温度升高,灰渣中钙 长石与尖晶石易发生低温共熔作用,是朱集西煤灰 熔融温度降低的主要原因。

3)朱集西-神华配煤在有效降低灰熔融温度的 同时,也可改善灰渣的流动类型,降低灰渣黏度,与 主体煤朱集西煤相比,灰渣黏度达 25 Pa·s 时的温度降低了 100 ℃,渣型也由"塑性渣"变为"玻璃渣",适用于 SE-东方炉。

参考文献(References):

- [1] 丁家海.SE-东方炉粉煤加压气化技术煤种适应性工业试验
 [J].大氮肥,2016,39(6):361-365.
 DING Jiahai. Coal adaptablitity experience in SE pulverized coal gasification [J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2016,39(6):361-365.
- [2] 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 on the effect of coal blending on coal ash fusibility[J]. Coal Conversion,2006,29(1):11-14.
 [3] 刘硕,周安宁,杨伏生,等. 配煤对煤灰熔融性及黏温特性的影
- [5] 对映,周安丁,物认生,寺. 配燥对煤灰熔融性及黏温特性的影响[J]. 洁净煤技术,2017,23(3):89-93. LIU Shuo, ZHOU Anning, YANG Fusheng, et al. Effect of coal blending on ash-fusion and viscosity-temperature characteristics [J]. Clean Coal Technology,2017,23(3):89-93.
- [4] 刘胜华,高娜,郭延红,等. 配煤对煤灰熔融特性的影响煤炭转 化[J].煤炭转化,2013,37(7):46-49.
 LIU Shenghua,GAO Na,GUO Yanhong, et al. Experimental study on effect of coal blending on ash fusion characteristics [J]. Coal Conversion,2013,37(7):46-49.
- [5] 白进,孔令学,李怀柱,等.山西典型无烟煤灰流动性的调控
 [J].燃料化学学报,2013,41(7):805-813.
 BAI Jin, KONG Lingxue, LI Huaizhu, et al. Adjustment in high temperature flow property of ash from Shanxi typical anthracite
 [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013,41(7): 805-813.
- [6] 汤永新,陈迎,纪明俊,等. 配煤对煤灰熔点和水煤浆性能影响的研究[J].煤炭技术,2002,21(11):67-69.
 TANG Yongxin, CHEN Ying, JI Mingjun, et al. Research on the effects of coal blending on the ash fusing point and coal water slurry[J]. Coal Technology,2002,21(11):67-69.
- [7] 李寒旭.还原性气氛下淮南煤灰行为特征的研究[D].淮南: 安徽理工大学,2009.
- [8] 李继炳. 配煤与新型助熔剂改进 Shell 煤气化工艺的研究[D]. 上海:华东理工大学,2010.
- [9] 丰芸.淮南煤用于德士古气化的适应性研究[D].淮南:安徽 理工大学,2009.
- [10] 芦涛.淮北煤在德士古气化工艺中适应性及技术经济研究 [D].淮南:安徽理工大学,2010.
- [11] 李风海,黄戒介,房倚天,等. 小龙潭褐煤灰熔融特性影响因素的研究[J]. 洁净煤技术,2010,16(6):49-53.
 LI Fenghai, HUANG Jiejie, FANG Yitian, et al. Research on the effect of the fusion characteristics of Xiaolongtan lignite ashes
 [J]. Clean Coal Technology,2010,16(6):49-53.
- [12] 李德侠.煤灰熔融及黏温特性的研究[D].上海:华东理工大学,2012.
- [13] 周志杰,李德侠,刘霞,等.煤灰熔融黏温特性及对气流床气

化的适应性[J]. 化工学报,2012,63(10):3243-3253. ZHOU Zhijie,LI Dexia,LIU Xia,et al. Characteristic of cohesiveness-temperature of coal molten ash and its adaptability to entrained flow gasifier[J]. CIESC Journal, 2012,63(10):3243-3253.

- [14] 宋文佳. 高温煤气化炉中煤灰熔融、流动和流变行为特性研究[D]. 上海:华东理工大学,2011.
- [15] 宋文佳,唐黎华,朱学栋,等. Shell 气化炉中灰渣的熔融特性 与流动特性[J].化工学报,2009,60(7):1781-1786.
 SONG Wenjia,TANG Lihua,ZHU Xuedong, et al. Fusibility and flow properties of Shell gasifier slag[J]. CIESC Journal,2009,60 (7):1781-1786.
- [16] 舒红宁.钙的多元组合对灰渣熔融特性的影响及数值模拟 [D].杭州:浙江大学,2006.

- [17] VAN DYK J C. Understanding the influence of acidic components (Si, Al and Ti) on ash flow temperature of South African coal sources[J]. Materials Engineering, 2006, 19(3):280-286.
- [18] 李寒旭,陈方林. 配煤降低高灰熔融性淮南煤灰熔融温度的研究[J]. 煤炭学报,2002,27(5):529-533.
 LI Hanxu, CHEN Fanglin. Coal blending to reduce the ash fusion temperature of high fusibility Huainan coal [J]. Journal of China coal society,2002,27(5):529-533.
- [19] 郑常昊,王倩,张建胜. 气化中煤灰熔点和黏度预测模型[J]. 燃料化学学报,2016,44(5):521-527.
 ZHENG Changhao, WANG Qian, ZHANG Jiansheng. Prediction model of ash fusion temperature and viscosity in coal gasification[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016,44 (5):521-527.