

研究论文

煤及配煤黏温特性研究

鲍金源¹,冯长志¹,淡树林¹,刘臻²,方薪晖²,安海泉²

(1. 国能榆林化工有限公司, 陕西 榆林 719319; 2. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

摘要: 煤灰的黏温特性对气流床气化过程的稳定排渣有重要影响, 使用高温旋转黏度计 Theta 研究了西湾煤、小保当煤及二者混煤的黏温特性, 结合灰组分的三元相图分析, 确定了适合气流床气化技术的配煤比例。结果显示, 西湾煤灰渣为结晶渣, 当温度低于临界温度 T_c 后, 灰渣黏度急剧上升, 造成排渣困难。在西湾煤中加入小保当煤, 灰渣的酸碱比和硅铝比逐渐降低, 灰成分由黄长石向钙长石转变, 灰渣形态由结晶渣向玻璃渣转变, 最佳硅铝比在 2.35~2.97、酸碱比在 1.05~2.08、钙铁比在 0.70~1.98。随着混煤中小保当煤的质量分数超过 30%, 灰渣在黏度为 2.5~25.0 Pa·s 对应的温差高于 100 °C, 且渣型变化趋于稳定。同时, 气化工艺要求灰渣的临界温度 T_c 不在灰渣黏度 2.5~25.0 Pa·s 对应的温度区间, 以便确保排渣稳定, 因此适合气流床气化应用的混煤中西湾煤与小保当煤质量比为 3:7 或 7:3。

关键词: 灰分; 黏温特性; 硅铝比; 酸碱比; 混煤

中图分类号: TQ53; TK114 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2022)05-0118-07

Viscosity-temperature characteristics of coal and coal blending

BAO Jinyuan¹, FENG Changzhi¹, DAN Shulin¹, LIU Zhen², FANG Xinhui², AN Haiquan²

(1. CHN Energy Yulin Chemical Industry Co., Ltd., Yulin 719319, China; 2. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: The viscosity-temperature characteristics of coal ash have an important influence on the stable slag discharge in the entrained flow gasification process. The viscosity-temperature characteristics of Xiwan coal, Xiaobaodang coal and their blends were studied using a Theta high-temperature rotational viscometer. Combined with the ternary phase diagram analysis of ash components, the coal proportion suitable for entrained flow gasification technology was determined. The results show that the slag of Xiwan coal is crystalline slag, and when the temperature is lower than the critical temperature T_c , the viscosity of the slag increases sharply, causing difficulty in slag discharge. By Xiaobaodang coal is added to Xiwan coal, the acid-aluminum ratio and silica-aluminum ratio of ash gradually decrease, the ash composition changes from yellow feldspar to calcium feldspar, and the ash slag form changes from crystalline slag to glass slag, and the optimal silica-aluminum ratio is 2.35-2.97, the acid-aluminum ratio is 1.05-2.08 and the calcium-iron ratio is 0.70-1.98. With the content of Xiaobaodang coal in the blended coal exceeding 30%, the temperature difference corresponding to the ash slag in the viscosity of 2.5-25.0 Pa·s is higher than 100 °C, and the slag type change tends to be stable. At the same time, the gasification process requires that the critical temperature of ash slag T_c is not in the temperature range of corresponding temperature when the viscosity of ash is 2.5-25.0 Pa·s in order to ensure the stability of slag discharge, therefore, the ratio of the coal blends of Xiwan coal and Xiaobaodang coal suitable for entrained flow gasification applications is 3:7 or 7:3.

Key words: ash; viscosity-temperature characteristics; silica-alumina ratio; acid-base ratio; coal blending

0 引言

大型气流床气化技术具有高效、大容量、低污染等特点, 是煤炭清洁利用及碳资源充分利用的主要技术之一^[1-3]。水煤浆气化技术是通过物理加工煤

(60%~65%)、水(34%~39%)和添加剂(约 1%)得到的一种流体燃料为原料的气化技术, 具有输送稳定、煤种适应性强等特点, 同时在气化过程中生产大量 H_2 , 在氢能源、煤化工领域均具有独特优势^[4-5]。在气流床气化炉内, 煤中大部分灰在高温高压条件

收稿日期: 2021-08-13; 责任编辑: 张鑫 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21081301

作者简介: 鲍金源(1988—), 男, 安徽庐江人, 工程师。E-mail: 502599640@qq.com

引用格式: 鲍金源, 冯长志, 淡树林, 等. 煤及配煤黏温特性研究[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(5): 118-124.

BAO Jinyuan, FENG Changzhi, DAN Shulin, et al. Viscosity-temperature characteristics of coal and coal blending[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(5): 118-124.



移动阅读

下变为液态流出气化炉,既可以保护炉膛耐火砖或水冷壁,又可以降低合成气中飞灰含量。因此,气流床气化炉的操作温度往往高于煤灰熔融温度 100~150 ℃。灰渣的黏温特性是影响气化炉能否稳定排渣的关键因素^[6-8]。对于气流床气化炉,要求灰渣黏度控制在 2.5~25.0 Pa·s,其对应的温度范围就是气化炉的在此黏度范围内的操作温度。

煤灰是一种复杂的无机混合物^[9-10],由 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、Na₂O、K₂O、TiO₂ 等氧化物组成。煤灰组成较为复杂,在气流床气化过程中,煤灰中各氧化物组分之间相互反应,如形成低熔点的共熔物、受热分解为熔点较高的物质等。

国内外学者研究了煤灰中不同氧化物对灰熔融特性的影响^[11-13]。如煤灰中 SiO₂ 质量分数变化对灰熔融温度产生不同影响,质量分数较低时, SiO₂ 易与其他氧化物形成玻璃体的物质,增强煤灰流动性;质量分数很高时, SiO₂ 常以单体形式存在于煤灰中,使得煤灰的熔融温度变高。大量学者^[14-16] 研究了煤灰中酸碱比和硅铝比对灰熔融特性的影响,结果表明,酸碱比和硅铝比与灰熔融温度有较强的相关性。然而,鲜见酸碱比、硅铝比与灰黏温特性的关系研究。王芳杰等^[9] 使用 Factsage 研究了配煤对煤灰熔融和黏温特性的影响,模拟结果显示配煤可以有效改善渣型结构,改善灰黏温特性。吉恒松等^[17] 研究弱还原性气氛下生物质掺混量对神华烟煤的灰熔融特性和黏温特性的影响,结果显示,当生物质添加比例为 20% 时,混合物的临界黏度温度最低,满足气化使用要求。刘硕等^[18] 研究宁东地区混煤对煤灰熔融及黏温特性的影响,结果显示,配煤比例与灰熔融特性、灰黏温特性均呈非线性关系。前人研究证明了配煤能有效改善混煤的黏温特性,然而,混配特性与混配前煤灰特性无良好的线性关系,混配后的黏温特性需要专业的测试仪器,且费用较高。

神东地区西湾煤和小保当煤混配后的黏温特性无法使用前人研究成果推定。笔者使用高温旋转黏度计对西湾煤、小保当煤及其混煤进行黏温特性试验,研究混合比例对其黏温特性和灰渣形态的影响,使用混煤中金属氧化物的酸碱比 R 值、硅铝和钙铁比等为指标,研究适合气流床气化应用的混煤黏温特性范围,以指导气化应用。

1 试验方法

1.1 试验样品

采用试验样品为小保当煤(XBD)、西湾煤(XW)及小保当煤和西湾煤按质量比 3:7、4:6、

5:5、7:3 和 8:2 混合的混煤,按照 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》制成灰样品。西湾煤具有高热值、低灰分、低灰熔融温度的特点,是一种优质的原料煤,高于 1 210 ℃ 时,西湾煤黏温特性曲线较缓和,低于 1 200 ℃ 时,其黏温特性曲线较陡,操作温窗较窄,不利于气化炉的稳定排渣。灰样品的组成结果见表 1。

表 1 试验样品的灰成分

Table 1 Ash composition of the experimental samples

项目	西湾煤	%					
		混煤 1 8:2	混煤 2 7:3	混煤 3 5:5	混煤 4 4:6	混煤 5 3:7	小保 当煤
SiO ₂	26.21	29.83	31.64	35.26	37.06	38.87	44.30
Al ₂ O ₃	12.82	13.24	13.45	13.88	14.09	14.30	14.93
Fe ₂ O ₃	13.42	14.08	14.41	15.08	15.41	15.74	16.73
CaO	35.82	30.99	28.58	23.75	21.34	18.92	11.68
MgO	3.57	3.12	2.89	2.44	2.21	1.98	1.30
TiO ₂	0.52	0.55	0.56	0.59	0.60	0.61	0.65
SO ₃	4.79	4.52	4.38	4.11	3.97	3.84	3.43
P ₂ O ₅	0.02	0.05	0.06	0.09	0.10	0.11	0.15
K ₂ O	0.23	0.53	0.68	0.98	1.12	1.27	1.72
Na ₂ O	0.74	0.85	0.91	1.03	1.08	1.14	1.31
MnO	0.28	0.30	0.31	0.34	0.35	0.36	0.39
SrO	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	0.32	0.34
BaO	0.67	0.94	1.08	1.35	1.49	1.62	2.03
总计	99.37	99.29	99.25	99.17	99.12	99.08	98.96

注:比例为 XW 与 XBD 的质量比。

1.2 试验装置及试验步骤

试验在弱还原气氛(CO/CO₂=6:4,体积比)下采用 Theta-1700 高温旋转黏度计进行灰样品的黏度测试^[19]。

试验依据 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》将煤样制灰,将采集的 2 种煤样缩分,以保证具有代表性。按照比例混合放入灰皿,将灰皿送入低于 100 ℃ 马弗炉中,30 min 内缓慢升温至 500 ℃,保持 30 min 后,升温至(815±10)℃ 后灼烧 2 h,取出冷却后研磨至 0.1 mm,再置于(815±10)℃ 灼烧直到其质量变化不超过灰样质量的千分之一。

使用制备好的灰样进行黏度试验,具体试验步骤如下:① 利用高温炉炭化炉将制备好的灰样加热至其灰熔融流动温度以上,成为熔渣,缓慢降温后形成渣块;② 将预熔渣灰样品粉碎至 2 mm 以下,取 50 g 样品放置在刚玉坩埚内。坩埚固定在炉子中央,在弱还原气氛下以 10 ℃/min 速度加热到 1 200 ℃,恒温 5 min;③ 以 5 ℃/min 速度加热到比

Factsage 计算的渣液温度 (T_1) 高 150 °C 的温度, 并保持 30 min 以达到平衡状态; ④ 将转子放入液面下 20 mm, 待温度稳定后, 以 3 °C/min 冷却速度开始试验。黏度数据以 0.1 °C 间隔进行记录, 直到扭矩超过最大值的 90% 或黏度超过 300 Pa·s。转子和坩埚的参数用标准 717A 玻璃进行校准; ⑤ 试验结束后, 将转子取出, 并通入高纯氮气降温, 结束试验。

2 结果与讨论

2.1 不同配比混煤灰渣黏温特性分析

根据灰渣黏度随温度降低而逐渐增大的变化情况对熔渣形态进行分类, 煤灰渣形式分为玻璃渣、晶体渣、塑性渣^[20-21]。玻璃渣是指在整个黏温曲线范围内呈玻璃体态; 塑性渣是指随着灰渣温度降低到某个点时, 灰渣黏度迅速增大, 这个转折点是由熔渣

内部晶体析出而导致, 塑性渣的特点是塑性区域长, 结晶析出和消融速度较慢, 保持有一定的变形能力; 结晶渣是指在达到某个温度时, 晶体迅速大量析出, 导致黏度随温度下降而剧烈增加, 灰渣黏度曲线陡然上升。塑性渣和结晶渣具有临界温度。

灰渣类型与煤灰中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 + CaO + MgO 质量分数有关, 研究表明, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}) < 30\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) < 24\%$ 时, 煤灰熔体多成玻璃体渣。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 在 24% ~ 30% 时, 煤灰溶体多为塑性渣, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) > 30\%$ 或 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}) > 30\%$ 时, 煤灰熔体多为结晶渣。

小保当煤、西湾煤及其混煤的黏温特性结果见表 2 (S/A 为硅铝比; T_i 为灰渣黏度为 i (Pa·s) 时对应灰渣温度; T_c 为临界温度)。

表 2 试验样品的黏温特性结果

Table 2 Results of viscosity-temperature properties of the experimental samples

项目	XW	XW : XBD=8 : 2	XW : XBD=7 : 3	XW : XBD=5 : 5	XW : XBD=4 : 6	XW : XBD=3 : 7	XBD
S/A	2.04	2.25	2.35	2.54	2.63	2.72	2.97
R	0.79	0.96	1.05	1.27	1.39	1.53	2.08
$T_{2.5}/\text{°C}$	1 307.1	1 255.2	1 250.6	1 297.7	1 309.9	1 330.1	1 394.5
$T_5/\text{°C}$	1 249.7	1 223.4	1 208.4	1 236.7	1 246.6	1 262.8	1 315.7
$T_{10}/\text{°C}$	1 202.6	1 219.1	1 185.2	1 188.2	1 194.0	1 207.0	1 252.6
$T_{15}/\text{°C}$	1 180.6	1 216.6	1 169.9	1 172.2	1 171.1	1 178.4	1 220.4
$T_{20}/\text{°C}$	1 168.3	1 213.6	1 159.6	1 166.7	1 160.4	1 159.3	1 199.2
$T_{25}/\text{°C}$	1 159.3	1 210.8	1 150.3	1 164.7	1 155.4	1 145.3	1 183.3
$T_c/\text{°C}$	1257.0	1 223.0	1 104	1 164.0	1 152.0		
$(T_{2.5} - T_{25})/\text{°C}$	147.8	44.4	100.3	133.0	154.5	184.8	211.2
渣型	结晶渣	结晶渣	塑性渣	结晶渣	结晶渣	玻璃渣	玻璃渣
灰渣流动温度/ °C	1 143	1 140	1 139	1 137	1 135	1 134	1 130

由表 2 可知, 随着小保当煤的加入, 混煤酸碱比 R 为 0.79~1.05 时, 煤灰熔融温度随 R 值的增加快速降低, 黏度 2.5 Pa·s 对应的温度下降了 56.5 °C, 小保当煤起到了助熔的作用。这主要因为小保当煤 SiO_2 质量分数较高, 形成了共熔物使西湾煤灰熔融温度降低, 共熔物的不断熔融又使黏度下降。

此外, 随着小保当煤加入比例增加, $T_{2.5} - T_{25}$ 由 44.4 °C 增加到 211.2 °C, 气化炉的操作温度区间变大, 说明小保当煤改善了西湾煤的黏温特性, 有利于生产操作。试验样品的黏温特性曲线如图 1 所示。

试验结果表明, 当混煤中的西湾煤质量分数高于 30% 后, 混煤的灰渣属于塑性渣和结晶渣。临界温度 T_c 是灰渣的一个主要参数, 低 T_c 有利于排渣, 可以避免排渣过程中黏度急剧上升和堵塞^[22]。混煤中的西

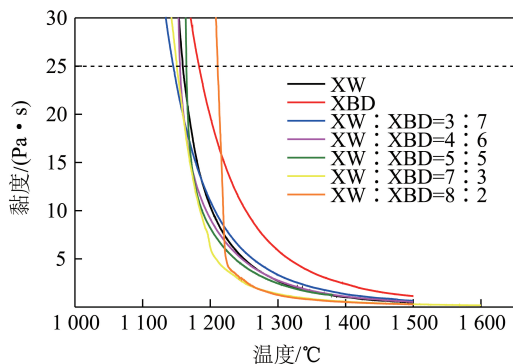


图 1 小保当煤、西湾煤及其混煤的黏温特性曲线

Fig.1 Viscosity-temperature characteristic curves of Xiaobaodang coal, Xiwan coal and their blends

湾煤比例为 80% 时, 黏温曲线具有黏度临界温度 1 223 °C, 位于其黏度 2.5~25.0 Pa·s 对应的温度,

当温度低于临界温度时,混煤的黏度急剧上升,极易突破 $25 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 形成结晶渣, 造成排渣困难等问题; 同理, 纯西湾煤的黏度临界温度也处于黏度 $2.5 \sim 25.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 对应的温度。而当混煤中的西湾煤比例为 70% 时, 其黏温曲线的临界值为 $1104 \text{ }^\circ\text{C}$, 不在黏度 $2.5 \sim 25.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 对应的温度, 因此在此黏度范围内的操作温度不宜造成黏度的急剧升高。而当混煤中西湾煤比例继续下降时, $2.5 \sim 25.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的黏度下对应的温度范围不断增大, 但临界温度与 T_{25} 温度 (西湾煤质量分数为 50% 和 40%) 十分相近, 在气化炉操作温度内有造成黏度急剧变化的风险。当西湾煤比例继续降低至 30% 后, 混煤的灰渣形态变为玻璃渣, 已无温度降低后灰渣黏度急剧变化的危险。

2.2 酸碱比、硅铝比和钙铁比对黏温特性的影响

灰渣中的金属成分是决定灰渣黏温特性和结渣倾向的重要原因, 研究表明, 煤灰中金属氧化物的 R 值、硅铝和钙铁比等 (式 (1)、(2)) 对灰熔融特性与黏温特性均有重要影响。小保当煤、西湾煤及其混煤的 R 值、硅铝比 S/A 、钙铁比 C/F 如图 2 所示。

$$R = \frac{m(\text{SiO}_2) + m(\text{Al}_2\text{O}_3)}{m(\text{CaO}) + m(\text{Fe}_2\text{O}_3)}, \quad (1)$$

$$S/A = \frac{m(\text{SiO}_2)}{m(\text{Al}_2\text{O}_3)}, \quad (2)$$

$$C/F = \frac{m(\text{CaO})}{m(\text{Fe}_2\text{O}_3)}, \quad (3)$$

式中, $m(i)$ 为煤灰中各物质的质量, kg。

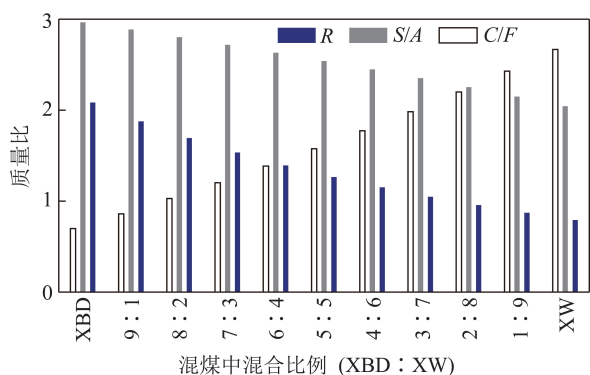


图2 XBD、XW 及其混煤的组分比变化

Fig.2 Variation of component ratio of XBD, XW and their blends

R 为煤灰中主要酸性氧化物和碱性氧化物的比, R 越高, 煤灰熔融温度越高, 结渣倾向越弱, 但同时煤灰黏度为 $2.5 \sim 25.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时对应的温度也越高, 气化温度也越高, 因此, R 不应过大或过小。硅铝比增加^[23-26], 结晶温度会向低温方向偏移, 易产生低温共

熔物, 主要以生成钙长石和透辉石晶体为主, Fe_2O_3 比例增加, 会使结晶倾向增强, 晶体生长速率加快, 且结晶温度向高温方向移动, 可能导致较高的临界温度, 影响稳定排渣。CaO 质量分数较低时, 结晶倾向很弱, 随着 CaO 比例增加, 结晶倾向增强, 在 20%~40% 时初始结晶温度下降, 低温区结晶倾向增强, 主要生成辉石、钙长石和黄长石; 当 CaO 比例继续增大超过 40% 时, 生成硅酸钙晶体, 使结晶温度急剧升高至 $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 高温区结晶增强, 影响稳定排渣。

试验测试结果显示, 西湾煤和小保当煤中 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 质量分数相近, SiO_2 和 CaO 差别较大, 因此, 如图 2 所示, 随着混煤中西湾煤质量分数的增加, R 和硅铝比不断下降, 钙铁比不断升高, 造成混煤的灰熔融温度有所降低, 结渣倾向逐渐严重, 结晶温度不断升高。结合图 1 的黏温特性曲线分析, 当混煤中西湾煤比例为 70%, 临界温度低于 T_{25} , 且 $2.5 \sim 25.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 对应的温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$, 气化操作过程可以顺利排渣; 而当西湾煤比例升至 80% 后, 临界温度位于 $2.5 \sim 25.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 对应的温度, 极易发生黏度急剧升高, 影响顺利排渣。因此, 对于西湾煤和小保当煤的混煤, 较为合理的 R 值、硅铝和钙铁比分别为 $1.05 \leq R \leq 2.08$ 、 $2.35 \leq S/A \leq 2.97$ 和 $0.7 \leq C/F \leq 1.98$ 。

2.3 不同配比混煤三元相图分析

西湾煤、小保当煤不同配比下混煤对液相线的温度存在影响, 通过相图结果可以分析煤灰的渣型结构。利用 FactSage6.2 软件建立小保当煤和西湾煤混合的“ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ ”体系三元相图如图 3 所示。

由图 3 可知, 沿图中红色箭头方向, 混合物中西湾煤比例降低。随着西湾煤比例的降低, 灰组成在相图中的区域由黄长石区 (Melilite: $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) 向钙长石区 (Anorthite: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) 移动。黄长石是由含铝、镁的硅酸钙组成的硅酸盐类矿物中的一类矿物, 试验中黄长石以钙铝黄长石为主, 钙铝黄长石易与灰中其他矿物质发生低温共熔反应, 使灰分熔融温度突然降低^[18,24], 且较多的钙离子在网站结构中游离, 导致熔渣黏温特性变差^[25]。

西湾煤是典型的高钙煤, 煤灰中钙质量分数超过 35%, 随着混合物中的西湾煤比例不断降低, 混合物 CaO/SiO_2 比逐渐降低, 生成黄长石的倾向变低^[26], 灰渣的黏温特性逐步向玻璃渣转变。西湾煤比例为 70% 时, 混合物位于黄长石区和钙长石区交界处, 灰渣形态为塑性渣。在配煤中 CaO/SiO_2 质量比小于

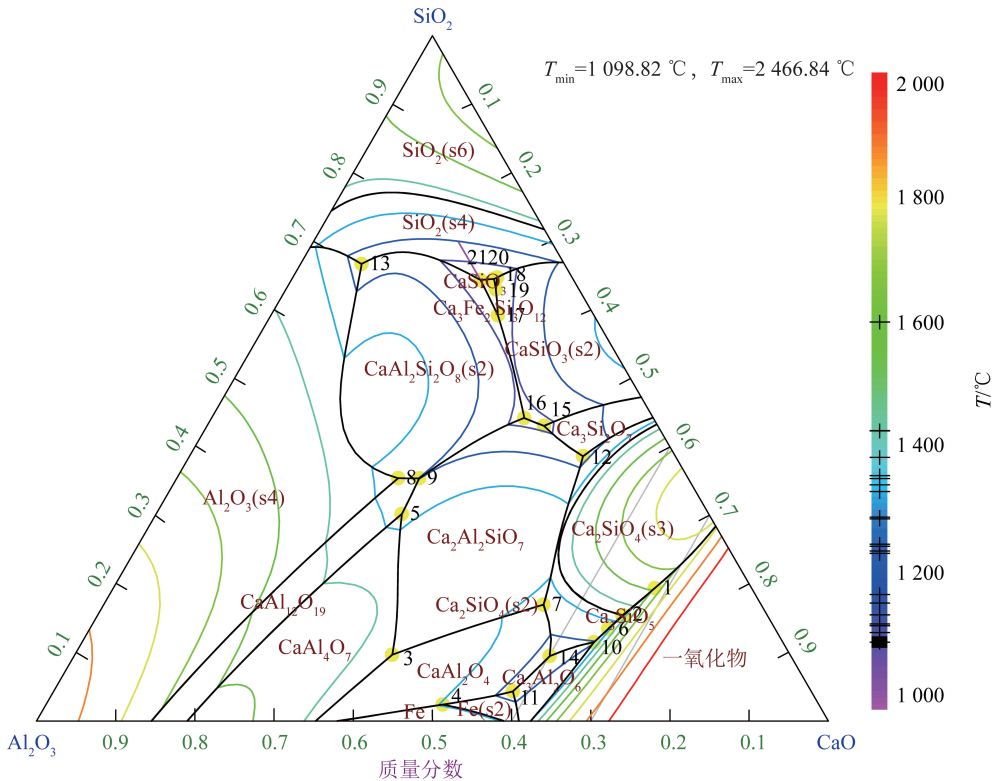


图3 西湾与小保当配煤煤灰的平衡相图

Fig.3 Equilibrium phase diagram of coal ash distribution with blending of Xiwan and Xiaobaodang

0.49,混合物的渣型为玻璃渣,混合物有较好的黏温特性。对于类似西湾煤的高钙煤,混配时适当降低CaO/SiO₂比,可以使混合物灰渣形态为玻璃渣。

2.4 不同配比混煤的 XRD

黏度测试后,将混煤的渣样进行 XRD 分析,不同配比混煤的 XRD 分析如图 4 所示。

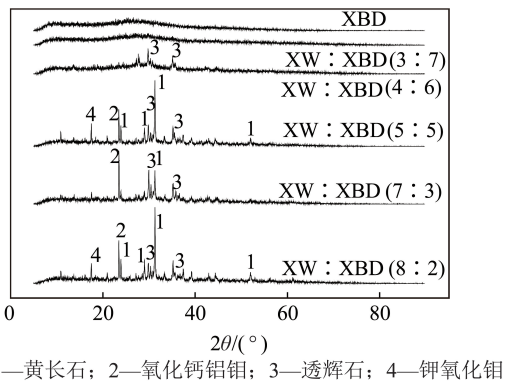


图4 混煤的 XRD 分析

Fig.4 XRD analysis results of blending coals

由图 4 可知,除了 XBD 煤和混煤(XW : XBD = 3 : 7)以外,其余混煤渣样均有晶体生成。因此, XBD 煤和混煤(XW : XBD = 3 : 7)的渣型为玻璃渣,其余混煤渣型为塑性渣和结晶渣,其中主要晶相物质为钙黄长石、透辉石及含钼的氧化物。其结果

与第 2.3 节相图分析结果一致。

3 结 论

1) 西湾煤灰渣形态为结晶渣,黏温特性较差,临界温度 T_c 为 1 257 °C,当温度低于临界温度时,灰渣黏度急剧增加。

2) 在西湾煤中添加黏温特性较好的小保当煤,随小保当煤比例的增加,混煤的灰渣形态逐渐由结晶渣向玻璃渣转变。小保当煤质量分数高于 30% 时,混合物的灰组成区域由黄长石区进入钙长石区,灰渣的黏温特性逐渐转好;小保当煤质量分数为 70% 或更高时,混煤的灰渣形态为玻璃渣。

3) 硅铝比在 2.35~2.97、酸碱比在 1.05~2.08,混煤黏度为 2.5~25.0 Pa·s 时,混煤在黏度 2.5~25.0 Pa·s 对应的温度区间高于 100 °C,灰渣黏温特性可控,不会造成灰渣形态的急剧变化。

4) 气化工艺要求灰渣的黏度应在 2.5~25.0 Pa·s,因此操作温度在此区间内;西湾煤与小保当煤的混煤中,小保当煤质量分数高于 70% 时,渣形态始终为玻璃渣,黏温特性较好,无排渣风险,符合气化用煤要求;混煤中小保当煤质量分数为 30%~70% 时,混煤在黏度为 2.5~25.0 Pa·s 内的黏温特性较好,无明显渣型突变;然而,小保当煤质量分数为 50%

和60%时,其临界温度 T_c 接近 T_{25} 对应的温度且在操作温窗内,具有一定的扰乱稳定排渣的风险;当混煤中小保当煤质量分数低于20%时,混煤的临界温度 T_c 在 $T_{2.5} \sim T_{25}$,气化操作时极易发生黏度急剧升高,发生堵渣风险。

5)结合混煤中酸碱比、硅铝比、灰组成相图、气化技术温度操作要求和灰渣形态等多因素,混煤中西湾煤与小保当煤比例为3:7或7:3时,灰渣是塑性渣和玻璃体渣,操作区间较宽($>100\text{ }^\circ\text{C}$),有利于气化炉操作,此2种配煤方案较为合理。此外,对于其他类似西湾煤的高钙煤种,在充分考虑以上参数和方法的前提下,适当降低混煤中的 CaO/SiO_2 比,也有助于改善混煤的渣型形态。

参考文献(References):

- [1] 安海泉,张忠孝,樊俊杰,等.高灰熔点煤两段供氧气流床气化实验[J].燃烧科学与技术,2018,24(2):146-151.
AN Haiquan, ZHANG Zhongxiao, FAN Junjie, et al. Entrained flow gasification experiment by two-stage oxygen supply with high ash fusion temperature coal[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2018, 24(2): 146-151.
- [2] 王辅臣.煤气化技术在中国:回顾与展望[J].洁净煤技术, 2021, 27(1): 1-33.
WANG Fuchen. Coal gasification technologies in China: Review and prospect[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 1-33.
- [3] 龚泽儒,王晓娜,吕俊复,等.等离子体煤气化技术研究进展[J].洁净煤技术,2019,25(1):35-40.
GONG Zeru, WANG Xiaona, LYU Junfu, et al. Research on plasma gasification technology of coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 35-40.
- [4] AN H, YU J, FAN J, et al. Experiment study on entrained flow gasification technology with dry slag by second-stage water supply[J]. Powder Technology, 2017, 306: 10-16.
- [5] 张蒙恩,李红明,曹真真,等.6.5 MPa水煤浆气化装置 Aspen 模拟与优化[J].氮肥与合成气,2020,48(8):13-17.
ZHANG Meng'en, LI Hongming, CAO Zhenzhen, et al. Simulation and optimization of coal water slurry gasification with aspen plus under 6.5 MPa[J]. Nitrogenous Fertilizer and Syngas, 2020, 48(8): 13-17.
- [6] 邱峰,张娜.浅谈煤气化技术及其用煤的选择[J].现代化工, 2010, 30(S2): 17-20.
QIU Feng, ZHANG Na. Discussion about coal gasification technique and its selection of coal[J]. Modern Chemical Industry, 2010, 30(S2): 17-20.
- [7] 李磊,路文学,傅进军.气化对煤质的要求[J].燃料与化工, 2011, 42(2): 4-6.
LI Lei, LU Wenxue, FU Jinjun. Requirement of gasification on coal quality[J]. Fuel & Chemical Processes, 2011, 42(2): 4-6.
- [8] 韩广怡.配煤对煤灰熔融特性及气化特性的影响[D].北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所),2018.
- [9] 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.
- [10] WEN J S, MARCEL L, MARKUS R, et al. The fusion mechanism of complex minerals mixture and prediction model for flow temperature of coal ash for gasification[J]. Fuel, 2021, 305: 121448.
- [11] 张子利.钙镁协同作用对煤灰熔融特性的影响研究[D].合肥:安徽理工大学,2013.
- [12] 许洁,刘霞,张庆,等.高钙山鑫煤灰熔融及黏温特性分析[J].中国电机工程学报,2013,33(20):46-51.
XU Jie, LIU Xia, ZHANG Qing, et al. Research on ash fusibility and viscosity-temperature characteristics of high-calcium Shanxin coal ash[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(20): 46-51.
- [13] 许洁.典型煤灰与混合灰熔融特性及粘温特性研究[D].上海:华东理工大学,2015.
- [14] LOLJA S A, HAXHI H, MARTIN D J. Correlations in the properties of Albanian coals[J]. Fuel, 2002, 81(9): 1095-1100.
- [15] 武瑞叶.神东矿区煤灰成份和煤灰熔融性变化规律浅析[J].陕西煤炭,2003(4):36-37,40.
WU Ruiye. Analysis of the changes of coal ash composition and coal ash fusion characteristics in Shendong mining area[J]. Shaanxi Coal, 2003(4): 36-37, 40.
- [16] 戴爱军.煤灰成分对灰熔融性影响研究[J].洁净煤技术, 2007, 13(5): 24-27.
DAI Aijun. Research on influence of ash components in coal ash on ash fusibility[J]. Clean Coal Technology, 2007, 13(5): 24-27.
- [17] 吉恒松,李振强,周言,等.生物质与烟煤混合灰渣黏温特性研究[J].燃料化学学报,2021,49(1):11-19.
JI Hengsong, LI Zhenqiang, ZHOU Yan, et al. The research on viscosity-temperature characteristics of the mixed slag of biomass and bituminous coal[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2021, 49(1): 11-19.
- [18] 刘硕,周安宁,杨伏生,等.配煤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.
- [19] CAO X, PENG B, KONG L, et al. Flow properties of ash and slag under co-gasification of coal and extract residue of direct coal liquefaction residue[J]. Fuel, 2020, 264: 116850.
- [20] 宏伟伟.非牛顿煤灰熔渣结晶过程及动力学实验研究[D].北京:清华大学,2015.
- [21] 沈中杰.高温熔渣界面结晶及沉积颗粒反应机理[D].上海:华东理工大学,2017.
- [22] LU H, PENG B, GE Z, et al. The viscosity and crystallization behavior of slag from co-gasification of coal and extraction residue from direct coal liquefaction residue at high temperatures[J]. Fuel, 2021, 285(3): 119119.
- [23] 马芳茹,魏博,买尔哈巴·阿不都热合曼,等.硅铝比对 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 熔体微观结构的影响分析[J].洁净煤技术, 2021, 27(4): 189-194.

- MA Fangru, WEI Bo, MAIERHABA Abdureman, et al. Influence of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio on microstructure of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ melt [J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(4): 189-194.
- [24] 刘涛, 陈雪莉, 李德侠, 等. 生物质与煤混合灰的熔融及黏温特性[J]. *化工学报*, 2012, 63(4): 1217-1225.
- LIU Tao, CHEN Xueli, LI Dexia, et al. Blending ash fusion and viscosity-temperature characteristics of biomass and coal [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2012, 63(4): 1217-1225.
- [25] KONG L, BAI J, Bai Z, et al. Effects of CaCO_3 on slag flow properties at high temperatures[J]. *Fuel*, 2013, 109: 76-85.
- [26] 王萌, 王毅斌, 谭厚章, 等. 工业高碳富钙型灰对准东混煤结渣特性的影响[J]. *燃料化学学报*, 2021, 49(1): 1-10.
- WANG Meng, WANG Yibin, TAN Houzhang, et al. Effect of industrial ashes with high carbon and calcium-rich on slagging characteristics of blending Zhundong coals [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2021, 49(1): 1-10.