DOI:10.20176/j.cnki.nxdz.20260906

配煤对煤灰熔融温度和黏温特性的影响

冯 斌[1,2], 赵 薇[1], 李 伟[2], 宋旭东[1*], 白永辉[1], 于广锁[1,2,3]

(1.宁夏大学 省部共建煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室, 宁夏 银川 750021;
2.兖州煤业榆林能化有限公司, 陕西 榆林 718000; 3.华东理工大学 洁净煤技术研究所, 上海 200030)

摘 要:针对榆林地区煤灰的熔融温度(t_m)、黏度(η)与气化工艺要求不匹配问题,采用榆林地区6种煤(金鸡滩沫煤、5种精煤)进行配煤实验,研究配煤对t_m、η的影响。结果表明,随着混入精煤质量(m)增加,配煤煤灰的t_m、η呈非线性降低趋势;FactSage模拟结果显示,随着配煤煤灰中碱性组分质量分数(w_a)增加,熔渣中生成的低熔点矿物质(如$CaAl_2Si_2O_8$)增多,导致煤灰t_m降低;配煤J8H2煤灰虽呈玻璃渣状态,但其η较高,易导致气化炉结渣;随着混入精煤的m增加,煤灰呈现结晶渣状态,但η=2.5~25.0 Pa·s下对应的温度范围扩大,利于气化炉稳定运行;非桥氧键、桥氧键的计算结果(n_{NBO}/n_{BO})显示,混入精煤的m增加,降低了煤灰熔渣的硅酸盐网络结构稳定性,导致煤灰的η下降。配煤有效调控了榆林煤灰的t_m、η,为煤在气化炉中的高效利用提供了理论依据。

关键词:配煤;煤灰熔融温度;黏温特性;非桥氧键与桥氧键
分类号:(中图)TQ536 **文献标志码:**A

煤气化是煤炭清洁高效利用的核心工艺,在合成气制备、整体煤气化联合循环发电系统(integrated gasification combined cycle, IGCC)及多联产系统中发挥着关键作用[1-3]。煤气化工艺可将煤炭转化为电能以及合成气等清洁气体产品,不仅显著提高了煤炭转化率,还大幅度降低了有害气体排放量[4]。其中,气流床气化技术具有原料适应性广、转化率高及污染物排放量小等优势,是当前煤炭大型化、商业化应用的主要技术之一[5-6]。当气流床气化炉在高温高压下运行时,煤灰熔融后在重力作用下以液态形式沿气化炉壁排出,该方式称为液态排渣[7]。对于液态排渣气流床气化炉,煤灰流动温度(t_f)是判断煤适用性及确保煤灰熔渣顺畅排出的关键指标[8-9]。因此,为避免气流床气化炉发生结渣、堵渣或耐火材料侵蚀等问题,气化炉的操作温度(t)要比t_f高50~100 ℃,且在该t下,煤灰黏度(η)应保持在2.5~25.0 Pa·s[10]。精准调控煤灰熔融温度(t_m)及黏温特性(η随着t变化的规律),可保证气流床气化炉长期稳定运行。煤灰的化学组成是决定其t_m、η特性的内在因素。在实际生产过程中,许多煤灰的t_m、η不能满足气化炉稳定结渣、连续排渣的运行要求,因此需向煤灰中添加不同氧化物来调节t_m、η[11-12]。氧化物对t_m、η的调节与其离子势(φ)有关[13],其中,酸性组分具有较高φ,易与氧原子结合形成稳定的硅酸盐网络结构,从而大大提高煤灰的t_m、η;碱性组分的φ较低,可降低煤灰的t_m,破坏煤灰熔渣的硅酸盐网络结构,进而降低煤灰的t_m、η[14-15]。例如,SiO_2、Al_2O_3可增强煤灰熔渣的网络结构;而CaO、MgO倾向于破坏煤灰熔渣的网络结构,进而降低煤灰的t_m、η。Mao等[16]通过添加SiO_2增强煤灰熔渣网络结构的稳定性,进而抑制晶体生长,减小η突变速率,从而利于气化炉操作;但过量的SiO_2则导致煤灰的η超出工业指标(>25 Pa·s)。麻栋等[17]通过向神东煤中添加Al_2O_3,提高煤灰的t_m,当Al_2O_3的添加量较大时,煤灰熔渣中生成莫来石相,使煤灰的t_m急剧升高。Li等[18]通过添加含有不同质量SiO_2、Al_2O_3的煤矸石,研究富钙富铁煤灰的t_m、η。实验结果显示,t_m随着煤矸石添加质量的增加

收稿日期:2025-09-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(22108132)
作者简介:冯斌(1984—),男,高级工程师,主要从事煤化工技术与管理相关工作,(电子信箱)fengbin1208@163.com。
*通信联系人:宋旭东(1988—),男,博士,硕士研究生导师,主要从事煤气化反应动力学及灰化学、气化火焰光谱诊断研究,(电子信箱)xdsong@nxu.edu.cn。
引用格式:冯斌,赵薇,李伟,等.配煤对煤灰熔融温度和黏温特性的影响[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2026,47(5):451-457.

先降低后升高。含较高质量SiO_2、Al_2O_3的煤矸石，阻止了冷却过程中结晶相形成，有利于降低煤灰的η。Jiang等[19]通过分子动力学模拟和热力学计算，研究煤灰中各组分对煤灰η的影响。结果显示，CaO、MgO破坏了煤灰熔渣的硅酸盐结构，导致煤灰的η随着CaO、MgO的质量增加而降低。Zhang等[20]通过分子动力学模拟和热力学计算，发现CaO、MgO均可提供自由氧，进而连续解聚煤灰熔渣的网络结构，降低煤灰的η；而Mg^{2+}不仅提供了更多电荷，还能解聚煤灰熔渣的网络结构，进而导致煤灰的η降低。因此，为保证气流床气化炉稳定运行，需对煤灰的t_m、η进行调控。通常，采用加入添加剂、生物质和配煤方法，因为这3种方法均能改变煤灰的化学组成[21]。其中，添加剂虽能定向调节煤灰的t_m、η，但会增加气化炉的运行成本和能耗、引入新杂质[7, 22-23]；生物质虽然能降低碳足迹，但受季节限制且能量密度低、预处理成本高[24-25]；相比之下，配煤凭借原料间的性能互补性、产品优化优势，具有更高的效率和经济性。Li等[26]向霍林河煤中添加高铝煤P4，发现随着P4的质量增加，煤灰-熔渣体系中生成高熔点矿物质(钙长石、堇青石和莫来石等)，导致煤灰的t_m逐渐增加；而煤灰熔渣中非桥氧键与桥氧键的物质的量比(n_{NBO}/n_{BO})逐渐减小，使煤灰熔渣的硅酸盐网络结构更稳定，进而使煤灰的η增加。Wang等[27]将贵州高黏煤(H煤)与内蒙古低黏煤(L煤)进行配煤，发现随着H煤的质量增加，煤灰熔渣中莫来石的质量增加，且晶体析出导致煤灰的η增大并发生结晶现象；随着L煤的质量增加，莫来石的质量降低，使煤灰熔渣η缓慢增大并呈玻璃渣状态。

文中采用陕西省榆林市本地6种煤进行配煤实验，在降低高运输成本的同时，协同调控煤灰的t_m、η，使其满足气流床气化炉运行要求，进而实现区域煤炭资源的高效利用。采用灰熔点仪和煤灰黏温特性分析仪，测试煤灰的t_m和η-t特性曲线。通过FactSage模拟软件计算、分析t及煤灰化学组成对煤灰-熔渣体系中矿物相演变过程的影响。根据煤灰的化学组成，计算煤灰熔渣硅酸盐网络结构的参数，进而揭示煤灰η的变化机理。研究结果可为多种榆林煤在气流床气化炉中的稳定运行提供基础数据支撑和理论参考。

1 实验部分

1.1 原料

煤样均来自陕西省榆林市，分别为金鸡滩沫煤、金鸡滩精煤、转龙湾精煤、朱家峁精煤、隆德精煤、营盘壕精煤。其中，混精煤按照m(金鸡滩精煤)∶m(转龙湾精煤)∶m(朱家峁精煤)∶m(隆德精煤)∶m(营盘壕精煤)=6∶1∶1∶1∶1配制；再以m(金鸡滩沫煤)∶m(混精煤)=8∶2、6∶4、5∶5、2∶8进行配制，配煤样依次命名为J8H2、J6H4、J5H5、J2H8。配煤过程中，先将煤样粉碎并研磨至粒径小于75 μm。为分析配煤组分，根据GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》、GB/T 476—2008《煤中碳和氢的测定方法》分别对金鸡滩沫煤和混精煤进行工业和元素分析(表1)。

表1 煤、配煤的工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of coal and coal blends

w/%

煤及配煤	工业分析			元素分析				
	挥发分	固定碳	灰分	C	H	N	S	O
金鸡滩沫煤	33.00	53.78	13.42	68.25	4.18	0.90	0.35	12.90
混精煤	34.49	55.38	10.10	72.21	4.40	1.01	0.80	11.48

注：实验在干燥基下测试。

配煤的煤灰样品按照GB/T 212－2008制备：将配煤样品放入马弗炉，30 min内从室温(t=25 ℃)加热到500 ℃，并在t=500 ℃下恒温30 min。然后，将t从500 ℃升高到815 ℃，并在t=815 ℃下恒温2 h。根据GB/T 1574－2007《煤灰成分分析方法》，采用X-射线荧光光谱仪(X-ray fluorescence spectrometer, XRF，荷兰帕纳科-日本理学)对配煤煤灰样品进行化学成分分析(表2)。

1.2 配煤煤灰的t_m测定

将三角形配煤煤灰放入SDAF4000型全自动灰熔融温度分析仪(湖南三德科技股份有限公司)中，测定其t_m。在测试过程中，采用封碳法使气化炉内保持还原性气氛。程序升温过程，先以15 ℃/min加热至900 ℃，然后以5 ℃/min加热至实验结束。将每个煤灰灰锥的实时形状与GB/T 219—2008《煤灰熔融性的测定方法》中描述的形状进行比较，确定4个特征温度(图1)，即变形温度(DT，t_d)、软化温度(ST，t_s)、半球温度(HT，t_h)、流动温度(FT，t_f)。

1.3 配煤煤灰黏温特性曲线的测定

1.3.1 配煤煤灰的预熔 对配煤煤灰进行预熔处理的目的是，在测定煤灰的η前去除其中杂质。将盛有80 g配煤煤灰的坩埚放入马弗炉中，进行预熔处理，以获得测定η所需的煤灰熔渣。为确保配煤煤灰均匀熔化成液态，通常将马弗炉的预熔温度设定为比配煤煤灰的t_f高150 ℃。

表 2　配煤煤灰的化学成分

Tab. 2　Chemical composition of blended coal ash

w/%

配煤	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	Na_2O	MgO	K_2O	TiO_2	P_2O_5
J8H2	45.35	23.81	8.95	8.16	6.69	1.64	1.55	1.55	0.75	0.11
J6H4	43.68	23.33	9.47	9.48	7.30	1.74	1.37	1.51	0.73	0.19
J5H5	44.12	23.61	8.91	9.08	7.39	1.74	1.54	1.42	0.78	0.16
J2H8	40.92	22.43	10.22	10.87	9.10	1.82	1.50	1.11	0.70	0.19

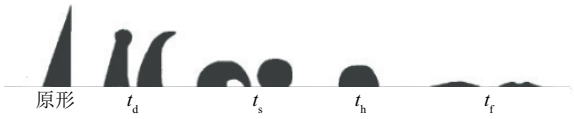


图 1　配煤煤灰灰锥的熔融特性

Fig. 1　Melting characteristics of ash cone of blended coal ash

1.3.2　配煤煤灰的 η 测定　根据 GB/T 31424—2015《煤灰黏度测定方法》，使用 RV-DVIII 型高温黏度计（美国 Theta 公司），测定还原性气氛下煤灰熔渣的 η-t 特性曲线。将煤灰熔渣（大约 40 g）加入刚玉坩埚，然后移动至加热炉中心。抽真空，将体积流量为 100 mL/min 的气体混合物（$V(CO):V(CO_2)$=6:4）通入大刚玉管中，以确保刚玉管中保持还原性气氛。在测定煤灰 η 的过程中，黏温仪以 3 ℃/min 的降温速率从最高温度降至 1 100 ℃。当 η 过高（>200 Pa·s）时，煤灰熔渣从牛顿流体变为非牛顿流体，黏度仪自动停止运行，实验结束[28]。

1.4　FactSage 模拟计算

通过 FactSage 8.2 中的 Equilib 模块，计算、分析在还原性气氛、常压（0.1 MPa）条件下，煤灰中矿物相演变及固液相变行为。鉴于煤灰的主要化学成分为 SiO_2、Al_2O_3、CaO、Fe_2O_3、MgO 等氧化物，文中选择 FactPS 与 FToxide 数据库，在 800～1 500 ℃内，以 20 ℃为间隔，开展热力学平衡计算。

2　结果与讨论

2.1　配煤煤灰的 t_m

不同配煤煤灰的 t_m 变化见图 2。由图 2 可知，随着混精煤的质量（m）增加，t_m 的特征温度变化趋势呈现一定差异：t_d 呈现先下降后升高的趋势；t_s、t_h 在配煤 J6H4 中出现小幅上升，随后逐渐降低。t_f 是保证气流床气化炉稳定运行的关键指标，随着混精煤的 m 增加，其变化趋势较复杂：当混精煤的质量分数（w_b）由 20% 增加到 40% 时，t_f 降低；当 w_b 增加到 50% 时，t_f 又明显升高；当 w_b 增加到 80% 时，t_f 显著

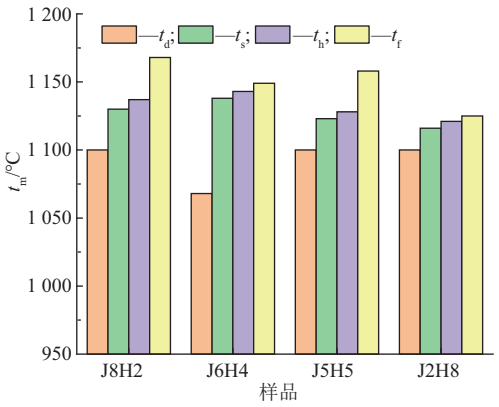


图 2　不同配煤煤灰的熔融温度变化

Fig. 2　Variation of melting temperature of different blended coal ashes

降低。配煤 J5H5 煤灰的 t_f 与配煤 J8H2 的差异较小；而 t_d、t_s、t_h 虽亦呈下降趋势，但变化幅度相对较小。虽然 4 个特征温度变化呈现一定差异，但随着混精煤的 m 增加，煤灰的熔融行为向低温区偏移，其 t_f 下降较显著。t_m 与煤灰的化学组成密切相关，其中，碱性组分可降低煤灰的 t_m、η[13, 20, 29]。J6H4 中碱性氧化物的质量分数（w_a）大于 J8H2、J5H5 中碱性氧化物的质量分数（w_a）（表 2），这可能是导致 J6H4 煤灰的 t_m 相对较低的主要原因。而 J2H8 中 w_a 最高，这是导致 J2H8 煤灰的 t_m 最低的主要原因。

2.2　配煤煤灰的 η-t 特性曲线

随着 t 降低，不同配煤煤灰的 η 逐渐降低（图 3）。在较高 t 下，J8H2 煤灰的 η 最大，随着 t 降低，η 缓慢增加，煤灰呈玻璃渣状态。值得注意的是，J8H2 煤灰的 η-t 曲线在 1 300～1 400 ℃出现小幅度波动，可能是因为降温过程中煤灰熔渣中固体析出不均匀，但这并不影响 J8H2 煤灰 η 较高并呈现玻璃渣状态。随着混精煤的 m 增加，同一温度下配煤煤灰的 η 呈现降低趋势，但是 J6H4 煤灰的 η 小于 J5H5 煤灰的 η，推测主要是因为 J6H4 中 w_b 大于 J5H5 中的 w_b。随着 t 降低至 1 290 ℃，J6H4、J5H5 煤灰 η 突然增加并呈现结晶渣状态；同一温度下，J2H8 煤灰的 η 最小，但在

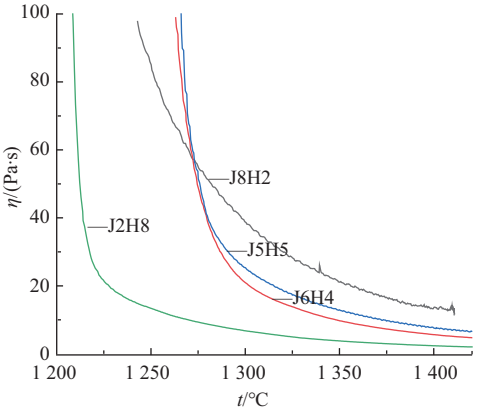


图 3 不同配煤煤灰的黏温变化曲线

Fig. 3 Viscosity-temperature curves of different blended coal ashes

1 225 ℃左右急剧增加,且煤灰呈现明显结晶渣状态。综上所述,虽然 J8H2 煤灰呈玻璃渣状态,但其 η 较大(>25.0 Pa·s),导致在实际应用中气流床气化炉易出现结渣、堵渣情况;J6H4、J5H5 煤灰 η 降低并呈现结晶渣状态,而当 t 低于 1 290 ℃时,η 突然增加,导致气流床气化炉发生结渣堵渣,严重时甚至停车;J2H8 煤灰的 η 最低,虽然在 1 22 5 ℃时急剧增加,使煤灰呈现结晶渣状态,但 η=2.5~25.0 Pa·s 下的温度范围较广,拓宽了气流床气化炉实际运行时的温度调控范围,保证了气化炉稳定运行。

2.3 FactSage 模拟计算

通过 FactSage 软件,基于煤灰的化学组成,模拟计算配煤煤灰中矿物质演变过程(图 4)。由图 4 可知,随着混精煤的 m、实验的 t 变化,煤灰熔渣中矿物质的质量分数(w_m)发生变化。不同配煤煤灰熔渣中主要的矿物质均为长石类,其中,钙长石的 w_m 在 40% 以上。表 2 显示,煤灰中含有 SO_3、Fe_2O_3。结合图 4 分析,发现在还原性气氛下,Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+},S 与 Fe^{2+} 生成 FeS;且随着 t 升高,煤灰中 S 以气体(SO_2)形式逸出。由于 J6H4 煤灰中 w_a 高于 J8H2、J5H5 中 w_a,而 J6H4 煤灰熔渣中钙长石($CaAl_2Si_2O_8$,t_{mp}=1 250~1 550 ℃)和易变辉石($FeMgSi_2O_6$,t_{mp}=1 276 ℃)的 w_m 较高,堇青石($Al_4Mg_2Si_5O_{18}$,t_{mp}=1 460 ℃)和石英(SiO_2,t_{mp}=1 610~1 750 ℃)的 w_m 较低,这些矿物质的 w_m 变化,使 J6H4 煤灰的 t_m 较低。J2H8 中 w_a 最高,其煤灰的 t_m 也最低。图 4 显示,煤灰熔渣中 $CaAl_2Si_2O_8$ 的 w_m 最高,SiO_2 的 w_m 最低且几乎消失;同时,$Al_4Mg_2Si_5O_{18}$ 消失,出现了少量新的矿物质斜辉石($CaMgSi_2O_6$,t_{mp}=1 540 ℃)和斜方辉石($Mg_2Si_2O_6$,t_{mp}=1 577 ℃)。结合 t_m 变化(图 2)分析,发现煤灰熔渣中高熔点矿物质(SiO_2、$Al_4Mg_2Si_5O_{18}$)的 w_m 降低、低熔点矿物质($CaAl_2Si_2O_8$、$FeMgSi_2O_6$)的 w_m 增加,导致煤灰的 t_m 降低。因此,煤灰熔渣中 w_m 变化较小,是导致不同

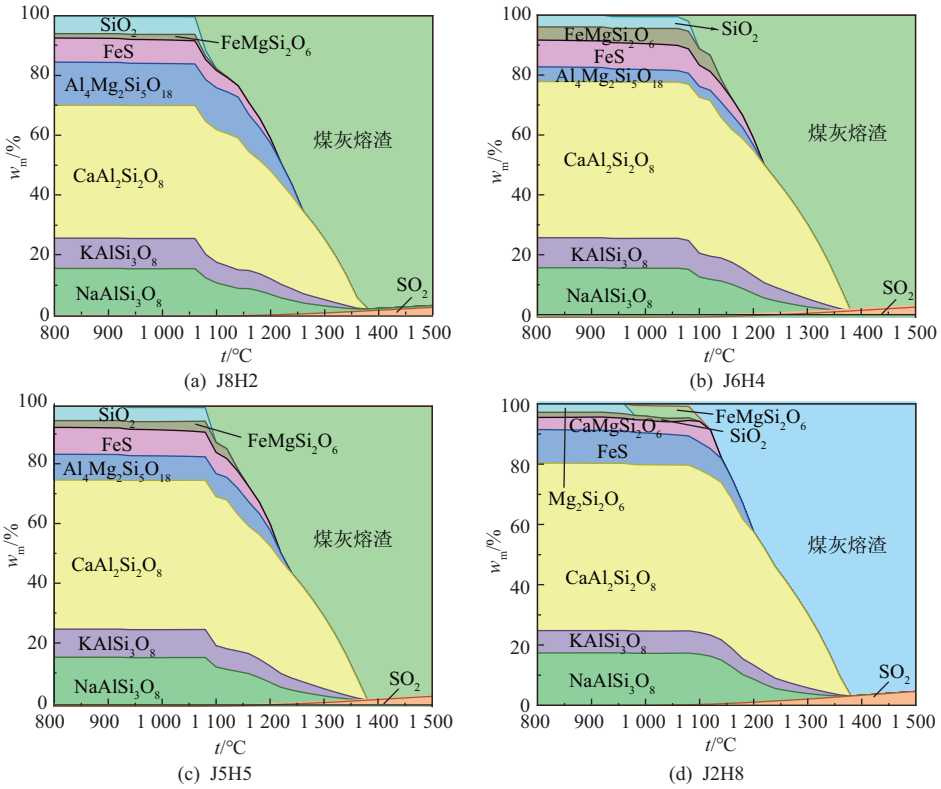


图 4 不同温度下配煤煤灰中矿物质演变

Fig. 4 Mineral evolution of blended coal ash at different temperatures

配煤煤灰的t_m变化较小的主要原因。

2.4　不同配煤煤灰熔渣的硅酸盐网络结构

高温下配煤煤灰熔渣是复杂硅酸盐熔体。煤灰的t_m、η与其熔渣的硅酸盐网络结构稳定性相关，而硅酸盐网络结构稳定性由结构中非桥氧键（NBO：Si－O）和桥氧键（BO：Si（Al）－O－Si(Al)）的物质的量比（n_{NBO}/n_{BO}）决定。计算结果显示，配煤煤灰熔渣中n_{NBO}/n_{BO}随着煤灰化学组成变化而变化，这也导致配煤煤灰的t_m、η发生变化。n_{NBO}/n_{BO}的计算公式[31]为

$$n_{NBO}/n_{BO}=\frac{n(CaO)+n(MgO)+n(K_2O)+n(FeO)-n(Al_2O_3+Fe_2O_3)}{n(SiO_2)+2n(Al_2O_3+Fe_2O_3)}。\tag{1}$$

不同配煤煤灰熔渣中n_{NBO}/n_{BO}见图5。随着混精煤的m增加，n_{NBO}/n_{BO}增加，显示煤灰的t_m、η降低。J6H4煤灰熔渣中n_{NBO}/n_{BO}大于J8H2、J5H5煤灰熔渣中的n_{NBO}/n_{BO}，表明J6H4煤灰中w_m较高且生成的NBO较多，导致J6H4煤灰熔渣的硅酸盐网络结构不稳定及其t_m、η降低。而J2H8煤灰熔渣中w_m最高、n_{NBO}/n_{BO}最大，显示J2H8煤灰熔渣的硅酸盐网络结构最不稳定，因此，其t_m、η均最低。由n_{NBO}/n_{BO}变化可知，n_{NBO}/n_{BO}与t_m、η表现出完全相反的变化趋势，说明n_{NBO}高可导致煤灰熔渣硅酸盐网络结构稳定性下降，进而使其t_m、η均降低。

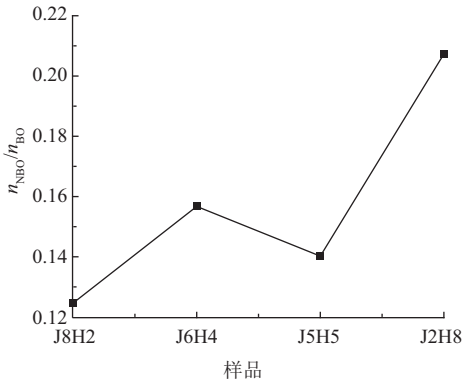


图5　不同配煤煤灰熔渣中n_{NBO}/n_{BO}的变化

Fig. 5　Changes of molar ratio of NBO to BO in molten slag of different blended coal ashes

3　结论

1）随着混精煤的质量分数（w_b）增加，煤灰的熔融温度（t_m）呈现增加趋势，且配煤J6H4煤灰的t_m大于J8H2、J5H5煤灰的t_m。FactSage模拟计算结果显示，J6H4煤灰熔渣中低熔点矿物质的质量分数（w_m）高于J8H2、J5H5煤灰熔渣中的w_m，导致J6H4煤灰的t_m较低。

2）配煤J8H2煤灰黏度（η）最大并呈明显玻璃渣状态；随着配煤中碱性组分质量分数（w_a）增加，煤灰的η降低并呈现结晶渣状态；煤灰η=2.5～25.0 Pa·s时，对应的温度范围较宽，这有利于气流床气化炉稳定运行。

3）根据配煤煤灰的化学组成，计算煤灰熔渣硅酸盐网络结构中非桥氧键和桥氧键的物质的量比（n_{NBO}/n_{BO}）。随着混精煤的质量（m）增加，煤灰熔渣中n_{NBO}/n_{BO}增加，这与煤灰的t_m、η变化趋势完全相反，说明n_{NBO}增加，降低了煤灰熔渣硅酸盐网络结构的稳定性，导致其t_m、η降低。

参考文献：

[1] Shi Jingxin, Wan Ning, Li Lucheng, et al. Review on treatment technologies of coal gasification wastewater in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 333: 130166.

[2] Gui Guoyang, Jiao Facun, Dong Zhongbing, et al. Mechanisms governing coal ash fusion temperature by phosphorus[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2025, 87: 323-334.

[3] 郭庆华，卫俊涛，龚岩，等. 多喷嘴对置式气流床气化炉内热态行为的研究进展[J]. 煤炭学报，2020，45(1)：403-413.

[4] Cao Xi, Kong Lingxue, Bai Jin, et al. Effect of water vapor on coal ash slag viscosity under gasification condition[J]. Fuel, 2019, 237: 18-27.

[5] Yang Ziqiang, Li Fenghai, Ma Mingjie, et al. Effecting mechanisms of iron-rich sludge on ash fusion characteristics of coal with high ash fusion temperature under reducing atmosphere[J]. Waste Management, 2024, 174: 328-339.

[6] 赵薇，李风海，马名杰，等. 高硅铝煤和高钙铁煤配煤对灰熔融温度的影响[J]. 洁净煤技术，2023，29(7)：164-172.

[7] Kong Lingxue, Bai Jin, Li Wen. Viscosity-temperature property of coal ash slag at the condition of entrained flow gasification: A review[J]. Fuel Processing Technology, 2021, 215: 106751.

[8] Wang Jiajian, Guo Qinghua, Wei Juntao, et al. Understanding the influence of iron on fluidity and crystallization characteristics of synthetic coal slags[J]. Fuel Processing Technology, 2022, 209: 106532.

[9] Liu Xia, Yu Guangsuo, Xu Jianliang, et al. Viscosity fluctuation behaviors of coal ash slags with high content of calcium and low content of silicon[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 158: 115-122.

[10] Collot A G. Matching gasification technologies to

coal properties[J]. International Journal of Coal Geology,2006,65(3/4):191-212.
[11] 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):3243-3254.
[12] 王嘉剑. 气流床气化条件下碱性氧化物对煤灰渣流动性影响研究[D]. 上海:华东理工大学, 2022.
[13] 李文,白进. 煤的灰化学[M]. 北京:科学出版社,2013.
[14] 赵超越,白永辉,宋旭东,等. 气流床煤气化熔渣流动行为参数预测模型的研究进展[J]. 洁净煤技术,2023,29(10):66-81.
[15] 洪千惠,刘霞,唐龙飞,等. 农林废弃生物质与煤共气化灰渣的理化特性研究进展[J]. 燃料化学学报,2022, 50(6): 641-651.
[16] Xia Baoliang, Mao Lirui, Liu Jinpeng, et al. Influence of SiO_2 on the mechanism for abrupt viscosity increase of coal ash near T_{CV}[J]. Materials Today Communications,2025,43:111582.
[17] 麻栋, 白向飞. Al_2O_3对神东煤灰渣熔体特性的影响[J]. 煤炭转化, 2017, 40(1): 59-64.
[18] Li Huaizhu, Kong Lingxue, Bai Jin, et al. Modification of ash flow properties of coal rich in calcium and iron by coal gangue addition[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2021,35: 239-246.
[19] Jiang Chunhe, Li Kejiang, Zhang Jianliang, et al. The effect of CaO and MgO on the structure and properties of coal ash in the blast furnace: A molecular dynamics simulation and thermodynamic calculation [J]. Chemical Engineering Science,2019,210:115226.
[20] Zhang Linmin, Zhao Wei, Li Yuchen, et al. Illustrating the effect of CaO and MgO charge compensation capacity on the fluidity of SiO_2-Al_2O_3-CaO-MgO slag in industrial processes: Insights from molecular dynamics simulations [J]. Journal of Molecular Liquids,2024,409: 125476.
[21] 杨自强,李风海,马名杰,等. 鸡粪对小麦秸秆燃烧过程中结渣影响的机理[J]. 煤炭学报,2023,48(6):2378-2387.
[22] 石文举,白进,孔令学,等. 不同气氛下Ca-Fe二元助剂改变高硅铝煤灰熔融温度的规律和机制[J]. 化工学报,2022,73(10):4638-4647.
[23] Guo Qinghua, Zhou Zhijie, Wang Fuchen, et al. Slag properties of blending coal in an industrial OMB coal water slurry entrained-flow gasifier [J]. Energy Conversion and Management,2014,86: 683-688.
[24] Li Fenghai, Ma Xiuwei, Xu Meiling, et al. Regulation of ash-fusion behaviors for high ash-fusion-temperature coal by coal blending[J]. Fuel Processing Technology,2017,166: 131-139.
[25] Zhang Yan, Zhang Xuemei, Fan Di, et al. A promising approach to co-processing calcium-rich coal and an aqueous condensate from biomass carbonization [J]. Fuel,2014,133: 82-88.
[26] Li Fenghai, Zhou Meijie, Zhao Wei, et al. Ash fusion behavior modification mechanisms of high-calcium coal by coal blending and its ash viscosity predication[J]. Energy,2024,288: 129829.
[27] Wang Dachuan, Liang Qinfeng, Gong Xin, et al. Influence of coal blending on ash fusion property and viscosity[J]. Fuel, 2017, 189: 15-22.
[28] Wu Hao, Wang Jiajian, iu Xia, et al. Effects of phosphorous-based additive on flow properties of high silicon-aluminum coal ash[J]. Fuel, 2022, 328(15): 125238.
[29] 吴家威,梁永煌,黄科杰,等. 生物质高温灰行为特性研究[J]. 燃料化学学报(中英文),2026,54(5):231-242.
[30] Li Fenghai, Fan Hongli, Guo Mingxi, et al. Influencing mechanism of additives on ash fusion behaviors of straw[J]. Energy Fuels,2018, 32:3272-3280.

The Impact of Coal Blending on the Melting Temperature and Viscosity Characteristics of Coal Ash

FENG Bin[1,2], *ZHAO Wei*[1], *LI Wei*[2], *SONG Xudong*[1*], *BAI Yonghui*[1], *YU Guangsuo*[1,2,3]

(1. State Key Laboratory of High-efficiency Utilization of Coal and Green Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Yanzhou Coal Mining Company, Yulin Energy and Chemical Co. ,Ltd, Yulin 718000, China; 3. Institute of Clean Coal Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200030, China)

Abstract: To address the mismatch between the melting temperature (t_m) and viscosity (η) of coal ash in the Yulin area and the requirements of gasification process, coal blending was conducted using six types of local coal (Jinjitan slack coal and five cleaned coals) to study the effect of coal blending on t_m and η. The results indicate that with an increase in the mass of cleaned coal (m) blended, the t_m and η of coal ash slag exhibit a nonlinear decreasing trend. FactSage simulation results show that as the mass fraction of alkaline components (w_a) in the coal ash slag increases, the amount of low-melting-point minerals (such as $CaAl_2Si_2O_8$) increases, leading

to a decrease in the t_m of coal ash slag. Although J8H2 coal ash exhibits a glassy slag state, its η is relatively high, which can easily lead to slagging in the gasifier. With an increase in the mass of blended cleaned coal (m), the coal ash slag shows a crystalline slag state, but the temperature range corresponding to η=2.5-25.0 Pa·s is expanded, which is beneficial for the stable operation of the gasifier. The calculation results of non-bridging oxygen bonds and bridging oxygen bonds (n_{NBO}/n_{BO}) show that an increase in the mass of blended cleaned coal (m) reduces the stability of the silicate network structure of coal ash slag, resulting in a decrease in η. Coal blending effectively regulates the t_m and η of Yulin coal, providing a theoretical basis for its efficient utilization in gasifiers.

Key words: coal blending; melting temperature of coal ash; viscosity temperature characteristics; non-bridging oxygen bonds and bridging oxygen bonds

（责任编辑　高继红）

（上接第 450 页）

Design of Na-Fe/C catalysts and Their Performance in CO Hydrogenation to Olefins

ZHANG Xuejian[1,2], *WANG Wenqing*[1,2], *ZHAO Shuanghong*[3], *ZHANG Shuai*[4,5], *GAO Xinhua*[1,2], *ZHAO Tiansheng*[1,2], *ZHANG Jianli*[1,2*]

(1. School of Chemistry & Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. State Key Laboratory of High-efficiency Utilization of Coal and Green Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. National Measurement and Testing Center for Coal Chemical Industry, Ningxia Institute of Metrology & Quality Inspection, Yinchuan 750411, China; 4. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ningxia Normal University, Guyuan 756099, China; 5. Ningxia Key Laboratory of Green Catalytic Materials and Technology, Ningxia Normal University, Guyuan 756099, China)

Abstract: Fischer-Tropsch synthesis (FTS) is a process that converts synthesis gas into clean liquid fuels and high-value chemicals through heterogeneous catalytic reactions. In it, rational design of the structure of Fe-based catalysts can achieve the directional conversion of synthesis gas to high-value olefins. A carbon support was prepared using a sucrose solution as the carbon source; the texture and surface properties of the carbon support were adjusted through pyrolysis reactions; C-loaded Fe-based catalysts were prepared, and Na promoter was used to modify the catalyst surface; the influence of the catalyst surface properties on FTS performance was investigated. The results indicate that 600 ℃ is the optimal pyrolysis reaction temperature, and the C-600 support prepared at this temperature possesses abundant oxygen-containing groups, high specific surface area, and suitable pore structure. The introduction of the support significantly promotes metal dispersion; the oxygen-containing groups are conducive to improving olefin selectivity and carbon chain growth ability; the addition of Na increases the electron cloud density of the Fe sites due to the electron transfer effect, thereby enhancing the catalyst's ability to adsorb and dissociate CO, promoting the carbon chain growth of catalytic reaction products, and inhibiting hydrogenation side reactions; when the mass fraction of Na modification is 2%, the catalytic performance is optimal, with a CO conversion of 86.76%, a C_2-$C_4^=$ selectivity of 41.92%, an olefin to paraffin molar ratio (O/P) of 5.68, and a linear α-olefin selectivity of 66.31% of the total hydrocarbons, effectively optimizing the product distribution. The research results can provide insights into the design of high efficiency Fe-based catalysts.

Key words: Fischer-Tropsch synthesis; Fe/C catalysts; surface modification; product distribution

（责任编辑　高继红）