

水煤浆气化用煤的成浆性及气化活性研究

段阳阳

陕西长青能源化工有限公司 陕西 宝鸡 721405

摘要: 水煤浆气化技术中, 煤的成浆性与气化活性是决定气化效率和经济性的两项核心指标, 二者往往相互制约。本文选取 6 种不同变质程度气化用煤, 测定煤质特征、最大成浆浓度及 CO_2 气氛下的气化反应活性, 分析煤质参数与两项性能的关联规律, 揭示成浆性与气化活性间的内在矛盾及成因。结果表明, 煤阶是影响两项性能的共性关键因素, 高变质煤成浆性优良但活性偏低, 低变质煤活性突出但成浆性差, 根源在于孔隙结构与碳化学有序度的协同差异。研究为气化厂煤种优选与配煤优化提供了实验依据。

关键词: 水煤浆; 成浆性; 气化活性; 煤质特征; 气化效率

引言: 水煤浆气化对入炉煤的成浆性与气化活性均有明确要求。成浆性决定可制浆浓度与输送稳定性, 直接影响投煤量与能效; 气化活性决定煤焦反应速率与碳转化率, 影响合成气产量与氧耗。然而, 成浆性优良的高变质煤气化活性偏低, 活性突出的低阶煤成浆困难, 这一矛盾长期困扰煤种适配与配煤决策。现有研究多针对单一指标, 缺乏对二者关联的系统审视。本文通过典型煤样的成浆性与气化活性测试, 揭示煤质对两项性能的交叉影响及权衡机制, 为科学选煤提供依据。

1 实验方案与测试方法

1.1 煤样的选取与制备

选取国内典型气化装置常用的 6 种代表性煤样, 涵盖褐煤、长焰煤、不粘煤、气煤、肥煤和无烟煤等不同变质程度, 干燥无灰基碳含量 65%~90%, 灰分 8%~25%, 以充分反映不同煤质条件下的行为差异。煤样经破碎后筛分处理, 成浆性测试用煤粉细度控制为 200 目以下占比不低于 75%, 气化活性测试用煤样进一步研磨至 200 目以下占比不低于 95%, 以消除粒度对气化动力学的干扰。制备后煤样密封保存于干燥器, 48 小时内完成测试, 避免氧化变质。

1.2 煤质基本特性分析

工业分析依据 GB/T 212 测定水分、灰分、挥发分及固定碳, 水分影响成浆浓度上限, 灰分影响成浆稳定性与灰渣行为。元素分析测定碳、氢、氧、氮、硫含量, 计算 O/C 和 H/C 原子比, 表征化学成熟度及含氧官能团丰富程度。煤灰熔融特性在弱还原气氛下测定变形、软化及流动温度, 评估排渣适应性。哈氏可磨性指数按 GB/T 2565 测定, 反映研磨难易。比表面积与孔结构采用

N_2 吸附法在 77K 下测定, BET 法计算比表面积, BJH 法计算孔径分布^[1]。

1.3 成浆性测试方法

以确定各煤样在工业可接受粘度内的最大成浆浓度为目标。采用干法磨矿工艺, 羧酸盐甲醛缩合物为分散剂 (添加量 1.0%), 辅以微量羧甲基纤维素钠为稳定剂。按设定浓度称取煤粉、去离子水和添加剂, 高速搅拌 10 分钟均化。旋转粘度计在 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 下测定表观粘度, 剪切速率 $10 \sim 100 \text{ s}^{-1}$, 以 100 s^{-1} 下粘度为基准。采用逐步增浓法, 以 $1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 为粘度上限, 逐次提高浓度 2%, 插值确定最大成浆浓度。通过宾汉姆和幂律模型拟合判定流变类型, 静置沉降法评价稳定性 (72 小时析水率及沉积物观察)。

1.4 气化活性测试方法

采用热重分析法, 在常压等温条件下以 CO_2 为气化剂进行动力学研究。煤焦制备: 取约 100mg 煤样于坩埚中, N_2 气氛下以 $15^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 1000°C , 恒温热解 30 分钟脱除挥发分, 冷却后立即实验。等温气化设定 900°C 、 950°C 、 1000°C 、 1050°C 四个温度点, 温度精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。稳定后切换为 CO_2 ($100 \text{ mL}/\text{min}$), 记录质量变化至转化率达 95% 以上。转化率 α 按失重法计算, 绘制转化率-时间曲线并求得转化速率曲线。采用缩核模型和随机孔模型分别拟合, 通过 Arrhenius 方程计算活化能和指前因子。

2 煤样基本特性及成浆性实验结果

2.1 煤质特性分析结果

6 种煤样煤质特性呈现显著差异。工业分析显示,

水分随煤阶升高而降低,褐煤 28.6%,无烟煤仅 2.1%;灰分分布较宽,长焰煤最低 7.8%,不粘煤最高 22.4%;挥发分随变质程度加深递减,褐煤与长焰煤 35%~42%,无烟煤降至 8.5%。元素分析表明,干燥无灰基碳含量从 65.4% (褐煤) 升至 90.7% (无烟煤),氧含量由 26.8% 降至 4.2%,O/C 原子比从 0.31 降至 0.03,反映化学结构的逐步缩聚。煤灰流动温度 FT 分布在 1200~1420℃。哈氏可磨性指数随煤阶先升后降,肥煤和气煤超过 70,无烟煤和褐煤低于 55。BET 比表面积随煤阶降低而增大,褐煤 185m²/g,无烟煤仅 18m²/g。

2.2 成浆性测试结果

成浆性测试结果与煤阶高度相关。分散剂添加量 1.0% 时,最大成浆浓度由高到低为:无烟煤 74.2% > 肥煤 71.5% > 气煤 68.3% > 不粘煤 64.7% > 长焰煤 60.2% > 褐煤 55.6%,随煤阶降低显著下降。流变特性方面,高变质煤浆体呈剪切变稀特性,幂律指数 n 值 0.68~0.82,流动性良好;低阶煤浆体剪切变稀行为较弱,粘度对浓度敏感性增强,浓度每提高 2% 粘度增幅超 400mPa·s。稳定性方面,高浓度浆体 72 小时析水率低于 3.5%,沉积物松散可恢复;褐煤浆体析水率高达 9.8%,底部形成硬沉积,稳定性难以保障。

2.3 煤质参数与成浆性的关联分析

将煤质参数与最大成浆浓度进行系统关联分析,明确了影响成浆性的主导因素及其作用规律。相关性分析表明,干燥无灰基碳含量与最大成浆浓度呈显著正相关 ($R^2 = 0.93$),挥发分含量则呈显著负相关 ($R^2 = -0.89$),说明煤阶是成浆性最有效的单一预测指标。灰分含量与成浆浓度的相关性较弱 ($R^2 = 0.31$),但在灰分超过 18% 的高灰煤中,灰分对煤粉堆积效率的稀释效应开始显现,导致最大成浆浓度出现不同程度下降^[2]。比表面积与最大成浆浓度呈强负相关 ($R^2 = -0.87$)——比表面积越大,煤粉表面吸附水分子的能力越强,自由水减少导致相同浓度下表观粘度显著升高,这是低阶煤成浆性差的根本物理原因。O/C 原子比与最大成浆浓度之间也存在良好负相关 ($R^2 = -0.84$),反映了煤表面含氧官能团数量对亲水性和吸附水量的直接影响。通过多元线性回归建立了包含碳含量和比表面积两项参数的成浆性预测模型,拟合优度 R^2 达到 0.94,可为同类煤种的成浆浓度快速估算提供参考依据。

3 煤焦气化活性实验结果及动力学分析

3.1 煤焦气化行为特征

1000℃等温条件下,褐煤焦达 95% 转化率仅需 28 分

钟,长焰煤约 40 分钟,气煤约 58 分钟,肥煤约 72 分钟,不粘煤约 82 分钟,无烟煤需 128 分钟,反应时间跨度达 4.5 倍。转化速率峰值出现在转化率 20%~50% 区间,褐煤焦峰值速率 0.052min⁻¹,无烟煤仅 0.011min⁻¹。温度影响显著——气煤焦从 900℃升至 1050℃,达 90% 转化率时间从 135 分钟缩短至 35 分钟,温度每升 50℃速率提升约 1.5~2.0 倍。各煤焦转化率曲线呈反 S 形,初始速率较低(表面反应控制),中段加快(孔隙充分发展),后期衰减(反应界面缩小与灰层扩散阻力增大),符合典型气固反应特征。

3.2 气化反应动力学参数

缩核模型拟合线性相关系数 R^2 普遍在 0.96 以上,适用性良好。计算得各煤焦表观活化能 E_a :褐煤 126.5、长焰煤 138.2、不粘煤 152.7、气煤 158.4、肥煤 163.8、无烟煤 186.5kJ/mol,低阶煤因碳结构无序、活性位点丰富而能垒较低。指前因子 A 与活化能呈动力学补偿效应。随机孔模型在转化率中后段 ($\alpha > 0.5$) 拟合精度更优,尤其适用于发达孔结构的低阶煤,但缩核模型因参数物理意义明确、计算简便,工程适用性更广。1000℃反应速率常数 k 排序:褐煤 (0.089) > 长焰煤 (0.062) > 不粘煤 (0.043) > 气煤 (0.034) > 肥煤 (0.028) > 无烟煤 (0.016)min⁻¹,与活化能排序完全对应。

3.3 煤质参数与气化活性的关联分析

煤化程度参数与气化活性相关性最为紧密——碳含量与活化能强正相关 ($R^2 = 0.91$),挥发分与活化能强负相关 ($R^2 = -0.89$)。活性差异根源在于碳化学结构:高变质煤碳微晶趋于有序化、石墨化程度升高,边缘碳和缺陷位点密度低,CO₂ 难以攻击活性反应位点;低变质煤碳结构无序、缺陷位和含氧官能团丰富,提供大量活性中心^[3]。煤焦比表面积对活性影响同样显著, $R^2 = 0.79$,褐煤焦比表面积 156m²/g,远大于无烟煤焦的 21m²/g,发达孔隙为气化剂扩散和反应界面扩展提供良好条件。灰分影响较为复杂,碱性组分具催化效应,但灰分过高时的熔融覆盖和扩散阻碍又会抑制反应,未呈现明显单调趋势。

4 成浆性与气化活性的关联分析及权衡机制

4.1 成浆性与气化活性的直接相关性分析

以各煤样的最大成浆浓度为横坐标、气化反应活化能为纵坐标绘制相关性散点图,结果显示两者呈现明显的正相关趋势——最大成浆浓度越高的煤种,其活化能越高,即气化活性越低。无烟煤具有最高的成浆浓度 (74.2%) 和最高的活化能 (186.5kJ/mol),居于

相关性曲线的一端；褐煤则处于另一端，成浆浓度最低（55.6%）而活化能最低（126.5kJ/mol）；其余煤样沿趋势线依次排列，展现出有序的递变规律。线性拟合 R^2 为 0.87，相关性具有高度统计显著性（ $p < 0.01$ ）。这一结果以定量化的方式严格验证了工程实践中长期存在的经验判断：成浆性优异的煤种往往气化活性不足，而气化活性高的煤种成浆普遍困难，两项性能指标的优劣在煤阶维度上呈现“剪刀差”式分布。这一矛盾关系的根源在于两类性能对煤质特征的需求方向恰好相反——成浆性要求煤表面疏水、孔隙稀少以降低吸附水含量，而气化活性要求碳结构无序、孔隙发达以增加活性反应位点和扩散通道。

4.2 共性煤质参数对两项性能的交叉影响

煤阶是同时影响成浆性与气化活性的最核心共性因素，但其作用方向截然相反，形成典型的“双刃剑”效应。在成浆性方面，煤阶升高带来的碳缩聚度增加使煤表面疏水性增强、极性含氧官能团减少，颗粒间水化膜减薄，自由水比例升高，从而在相同粘度下允许更高的固相装载浓度；同时高变质煤孔隙率降低，颗粒内部吸水存储量减少，也有利于成浆浓度的提升。在气化活性方面，同一煤阶升高过程导致的碳微晶结构有序化、石墨化程度加深，使得 CO_2 分子攻击碳骨架所需克服的能垒大幅增高，反应活性位点密度显著下降，气化反应速率明显降低。煤的孔隙结构对两项性能也构成反向影响——发达孔隙为气化反应提供了丰富的扩散通道和反应界面从而提升活性，但同时也增大了煤粉内表面吸水量，降低了可流动自由水的比例从而损害成浆性^[4]。灰分的作用同样呈现两面性：适量碱性灰分对气化有催化作用，但灰分升高会降低煤粉中可燃组分的有效含量并增加成浆难度。正是上述煤质参数对两项性能的反向作用规律，构成了成浆性与气化活性难以兼得的本质原因。

4.3 基于综合性能的煤种评价与优化思路

面对成浆性与气化活性之间的矛盾，气化厂应根据自身工艺特点与成本构成，建立差异化的煤种综合性能评价体系。对于以降低制浆成本和系统能耗为核心诉求

的气化装置，成浆性应赋予较高权重，优选成浆浓度高于 68% 的中高变质烟煤，以保证投煤量和系统能效；对于以提升碳转化率和降低残碳损失为优先目标的气化炉，气化活性应优先考虑，可在成浆性可接受的前提下尽可能选用气化活性较高的煤种。解决两项性能矛盾更有效且更具操作性的路径是配煤优化——以高成浆性的中等变质煤为主体（占比 70%~85%），掺配高气化活性的低阶煤（占比 15%~30%），使混合煤在维持工业可接受成浆浓度（不低于 62%~64%）的同时显著提升整体气化反应活性。配煤效应并非简单线性叠加，掺配 15% 褐煤的混合煤成浆浓度下降通常不超过 3 个百分点，而气化活性可提升 20%~30%，综合气化效率的增益远大于成浆浓度略降带来的损失，具有良好的工程可行性。

结束语

本研究通过对 6 种不同变质程度典型气化用煤成浆性与气化活性的系统测试与关联分析，明确了煤质特征对两项性能的影响规律及二者间的内在权衡关系。研究表明煤阶是控制两项性能的核心共性因素——高变质煤成浆性优良但气化活性偏低，低变质煤气化活性突出但成浆性较差，根本原因在于碳化学结构缩聚程度与孔隙发育特征对两类性能的反向作用。基于综合性能评价的分级选煤策略及高、低阶煤互补配煤方案是化解该矛盾的有效工程路径。

参考文献

- [1] 李雯, 钟梅, 俞音, 等. 基于煤/焦组成和结构解析的水煤浆成浆性能研究 [J]. 燃料化学学报 (中英文), 2026, 54(1): 89-103.
- [2] 宋伟明, 周建安, 李数, 等. 煤焦在转炉煤气中气化反应特性及动力学行为 [J]. 工程热物理学报, 2026, 47(1): 342-347.
- [3] 彭宝仔, 方薪晖, 刘臻, 等. 煤质对水煤浆气化性能的影响研究 [J]. 热科学与技术, 2021, 20(5): 488-494.
- [4] 齐志丽, 田进梅, 曹晶, 等. 煤气化细渣炭-灰分离高碳产品对水煤浆成浆性能的影响研究 [J]. 煤化工, 2025, 53(5): 12-16.