

水煤浆浓度对气化效率的影响试验分析

张婷婷 阴明其

宁夏和宁化学有限公司 宁夏 灵武 750411

【摘要】：水煤浆气化过程中，浆体浓度直接影响入炉水分、雾化状态、炉内温度及碳转化程度，浓度偏低易造成汽化耗热增加，浓度过高则可能引起黏度升高、雾化粒径增大及反应不充分。设置不同水煤浆浓度开展气化试验，对碳转化率、有效气含量、冷煤气效率及比氧耗进行对比，结合炉温和气体组成变化优化浓度控制区间。试验结果表明，合理提高水煤浆浓度并同步匹配氧煤比及给料条件，可减少无效热耗，改善合成气品质，提高碳资源利用程度，使气化效率保持在较优水平。

【关键词】：水煤浆浓度；气化效率；碳转化率；冷煤气效率；气化试验

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.057

1 水煤浆浓度变化下气化运行参数响应

1.1 浆体浓度改变引起入炉水分波动

水煤浆浓度决定单位质量浆料中的煤粉含量和水分比例，浓度降低后，随浆料进入气化炉的水量增加，水分升温、蒸发及过热过程持续消耗炉内显热，使燃烧区释放的热量更多用于水相转化，气化反应可利用热量相应减少。浓度提高则能够降低单位原煤对应的入炉水量，但固体颗粒占比增加后，浆料输送负荷、泵送阻力及给料稳定性也会同步变化。浓度调整幅度过大时，入炉水分波动还会改变炉内蒸汽分压和水煤气反应条件，进一步影响 CO、H₂ 等有效气体生成比例，因此浓度控制需兼顾降低无效蒸发热耗、维持稳定给料以及保持适宜反应介质组成。

1.2 浆体黏度变化作用于喷嘴雾化质量

浆体浓度升高通常伴随表观黏度和屈服应力增加，煤颗粒间接触概率上升后，浆体流动阻力加大，喷嘴出口处液膜破碎难度随之提高。雾化液滴粒径偏大时，煤颗粒分散程度下降，氧气难以在较短时间内与浆滴充分接触，局部区域可能出现氧量不足、燃烧反应迟缓及未反应碳增加^[1]。浓度偏低虽然有利于改善流动性，但过多水分会削弱雾化后颗粒的有效热利用。较合理的控制方式应将浓度、黏度、粒径级配及喷嘴压差纳入同一调节体系，通过改善煤粉级配和浆体流变状态，在较高固含量条件下维持稳定喷射速度和较小液滴尺度，使氧煤接触面积保持在有利于快速气化反应的范围。

1.3 浓度梯度变化引发炉温区间迁移

水煤浆浓度变化会重新分配气化炉内部的热量消耗结构，浓度偏低时，较高水分负荷吸收大量汽化潜热，燃烧反应产生的热量不能充分用于煤焦气化，炉膛中心温度容易下移，熔渣流动性、反应速率及碳转化程度随之受到影响。浓度持续提高后，入炉煤量相对增加，单位浆料释放的化学能增大，若氧气供给未同步修正，炉温可能出现局部升高，并引起耐火材料热负荷增加或灰渣黏温特性改变。浓度梯度控制因而不能脱离氧煤比和炉温反馈独立进行，应结合气化炉温度场、粗煤气组成

以及渣口运行状态动态修正，使高温反应区保持合理位置，减少热量无效损失，提升煤中化学能向有效合成气转化的比例。

2 不同浓度条件下气化效率试验规律

2.1 浓度梯度下碳转化率变化特征

水煤浆浓度由低值逐步提高后，碳转化率通常呈现先升高、进入稳定区间后趋缓的变化特征，其本质取决于单位浆料中有效碳输入、炉内反应温度及煤焦停留反应程度之间的匹配关系。较低浓度条件下，入炉浆料含水比例偏大，可供氧化和气化反应利用的煤质成分相对不足，部分热量被水分相变消耗，煤焦与 CO₂、H₂O 之间的异相反应速率受到限制，灰渣残碳量相对偏高。浓度提升至适宜区间后，单位时间进入炉内的碳量增加，高温区反应强度提高，固定碳向 CO 及其他含碳气体转化更加充分，碳转化率随之改善。若浓度继续升高而氧气供给、喷射负荷及停留时间未同步修正，局部富碳状态可能造成部分煤焦不能完全反应，使碳转化率增幅减小甚至出现回落。试验判定时应同步分析灰渣残碳、合成气含碳组分及炉温变化，避免仅依据单一转化率数值判断最佳浓度。

2.2 有效气组分随浆体浓度变化规律

不同浓度条件下，粗合成气中 CO、H₂ 及 CO₂ 的体积分数变化能够直接反映水煤浆浓度对气化反应路径的调节程度。浆体浓度偏低时，炉内水蒸气分压较高，水煤气反应和变换反应所占比例增加，H₂ 生成具有一定条件优势，但过量水分会降低炉内有效反应温度，限制 CO 生成速率，同时可能推动 CO 向 CO₂ 转化，使有效气总含量难以持续提高。浓度逐步增加后，单位体积浆料所携带的可燃质增加，碳氧反应强度增强，CO 生成比例通常明显上升，H₂ 含量则受蒸汽参与程度和温度条件共同制约^[2]。进入较优浓度区间后，CO、H₂ 两类有效组分能够保持较高水平，CO₂ 占比相对受控，合成气低位热值随之改善。若浓度过高导致局部反应不均，粗煤气中未充分转化产物增加，有效气组成稳定性反而下降，因此浓度评价需结合 CO+H₂ 总量、CO₂ 比例及气体热值进行综合判定。

2.3 冷煤气效率及比氧耗试验差异

冷煤气效率能够反映原料煤化学能转化为合成气化学能的实际程度,比氧耗则体现获得单位有效气体所需氧气的量,两项指标对水煤浆浓度变化具有较强敏感性。低浓度运行时,浆料携带水量较大,气化炉需投入更多氧气维持反应温度,部分煤炭化学能用于弥补水分蒸发和升温造成的热量损失,导致比氧耗偏高,冷煤气效率受到抑制。浓度提高后,单位煤对应的水负荷下降,热量利用方向由水分相变逐渐转向气化反应,有效气产量增加,比氧耗具有下降趋势,冷煤气效率同步改善。继续提高浓度并不必然带来效率持续增长,当给氧量、喷嘴负荷及炉温控制未形成匹配时,局部燃烧比例可能上升,更多碳直接转化为 CO_2 并释放热量,虽然炉温维持较高水平,却会消耗可用于生成 CO 的碳资源。试验评价应将冷煤气效率、比氧耗、有效气产率及氧碳比放在同一工况下对照,才能识别真正具有节能降耗价值的浓度区间。

3 偏离适宜浓度区间产生的效率损失

3.1 低浓度状态下水分汽化热耗增加

低浓度水煤浆进入气化炉后,单位煤量所携带的水分明显增加,水分由常温升至汽化温度并完成相变,需要持续吸收大量显热和潜热,炉内有效热量因此被额外分流。热耗增大后,高温反应区温度稳定性下降,煤焦气化所需热量供给不足,固定碳转化速度受到抑制。与此同时,维持炉温所需氧量会相应增加,部分原料煤被用于燃烧供热而非生成有效合成气,造成 CO 产率下降、比氧耗上升,单位原料煤对应的化学能利用程度随之降低。

3.2 高浓度状态下浆体流动性能下降

高浓度状态会显著提高浆体内部固相体积分数,煤颗粒间摩擦、碰撞及架桥倾向增强,浆体表观黏度和屈服应力随之升高^[3]。流动阻力加大后,输送泵负荷增加,管路压降扩大,给料量易产生周期性波动,气化炉难以维持均匀稳定的进料节奏。局部浓度过高还可能造成浆料流变特性偏离设计区间,使喷嘴入口压力和浆氧配比发生波动,直接影响反应区物料分布。若高固含量仅追求减少水分而忽视可泵送性,容易形成给料不稳、局部富煤及反应负荷失配,削弱气化效率提升空间。

3.3 雾化粒径异常造成碳反应程度降低

雾化粒径偏大时,浆滴比表面积下降,氧气向液滴内部扩散的路径延长,煤颗粒升温、脱挥发分及焦炭气化过程均会受到限制。部分较大浆滴尚未完成充分破碎便进入高温反应区,外层发生快速氧化,内部煤粒却因传热和传质受阻保留较高残碳,导致灰渣含碳量增加。粒径分布过宽还会造成不同颗粒反应历程差异扩大,局部区域出现过氧或缺氧状态, CO 、 H_2 生成稳定性下降。喷嘴压差、浆体黏度、气液速度比失配时,这类雾化偏差更为明显,最终反映为碳转化率降低和有效气产率

波动。

4 气化效率提升条件下浓度参数调控

4.1 依据热量平衡修正水煤浆浓度区间

气化炉热量平衡可作为确定水煤浆最低允许浓度的重要依据,浓度参数不宜只按照制浆能力或输送上限单独设定,而应将原料煤低位热值、入炉水量、氧气消耗、炉膛温度、粗煤气显热、灰渣带出热量及系统散热统一纳入计算。水煤浆浓度降低后,单位干煤对应的入炉水量增加,可依据水分从进料温度升至饱和温度所需显热、汽化潜热及蒸汽继续升温消耗的热量,核算额外热负荷占煤炭化学能输入的比例。当炉温接近稳定运行下限、粗煤气出口温度下降且碳转化率同步降低时,应限制继续下调浓度,防止依靠增加氧量维持温度而造成更多碳直接燃烧。浓度修正还需结合煤质变化进行动态调整,灰熔点、固定碳含量、水分及发热量发生变化后,原有浓度设定值对应的热量收支关系也会改变。控制系统可将炉温、氧耗、碳转化率及有效气产量建立关联区间,以热效率而非单一浓度值作为调节依据,使水分输入与气化反应吸热需求保持协调,减少无效汽化热耗。

4.2 结合流变参数控制高浓度浆体黏度

高浓度水煤浆的调控重点应由单纯提高固含量转向浓度、黏度、稳定性和可泵送性的协同控制。煤颗粒粒径组成直接决定浆体内部自由水比例及颗粒堆积状态,粗细颗粒比例不合理时,即使浓度相同,也可能出现黏度偏高、沉降加快或触变性增强。制浆环节可依据粒径分布优化级配,使细颗粒填充较大颗粒之间的空隙,降低颗粒群运动过程中的内摩擦,同时控制过细煤粉比例,避免比表面积过大导致自由水大量被吸附^[4]。添加剂用量需根据煤表面性质、浆体剪切特性和目标浓度确定,分散剂不足会造成煤粒团聚,过量则增加制浆成本并可能改变浆体稳定状态。浆体温度同样需要保持适宜范围,温度过低会提高黏度和泵送阻力,过高又可能加剧水分损失,使实际浓度偏离设定值。生产控制可增加在线黏度、管路压差、泵出口压力和流量波动监测,将高浓度浆体是否具备连续输送能力作为浓度上限判据,使固含量提高建立在稳定给料基础上,而不是以牺牲流动性换取表面上的浓度提升。

4.3 匹配氧煤比改善喷嘴雾化反应条件

水煤浆浓度调整后,氧煤比、给浆量及喷嘴运行参数需要同步修正,否则浓度变化会直接改变单位时间进入气化炉的干煤量,使原有供氧设定失去匹配基础。浓度提高时,相同体积流量所对应的干煤量增加,若氧气流量保持不变,反应区容易形成局部缺氧,碳颗粒不能充分氧化并释放足够热量;若仅通过大幅增加氧量补偿,又可能提高完全燃烧比例,使更多碳转化为 CO_2 ,削弱有效气产率。调节过程应依据干煤实际进料量计算氧碳比,同时参考炉膛温度、粗煤气中 CO 、 H_2 、 CO_2 含量

和灰渣残碳进行微调。喷嘴压差也需与浆体黏度及流量协调,压力不足会使液膜破碎不充分,压力过高则可能加快喷嘴磨损并扰乱火焰形态。可将浓度、给浆流量、氧气流量和喷嘴压差建立联动控制关系,使浆滴尺寸、射流速度和氧煤接触强度保持相对稳定。通过气体组成和炉温反馈对氧煤比进行连续修正,可降低浓度变化造成的工况漂移,使较高固含量真正转化为有效气增加和单位氧耗下降。

5 浓度优化后的气化运行效果判定

5.1 碳转化水平提升幅度对比

浓度优化后的碳转化水平应通过灰渣残碳率、合成气含碳组分及单位原料煤碳利用率进行联合判定,单纯比较某一时点的碳转化率容易受到炉温、煤质和负荷波动干扰。较优浓度条件下,进入气化炉的碳量与供氧强度、反应温度形成更稳定的配合,未反应碳随灰渣排出的比例明显下降,碳元素向 CO 、 CO_2 等气相产物迁移更加充分。试验数据可按照相同煤种、相近负荷和稳定运行时段进行对照,计算优化前后碳转化率增量及波动区间,同时观察灰渣残碳是否持续降低。若转化率提升只伴随 CO_2 增加而 CO 产率没有同步改善,则说明部分碳被过度氧化,不能简单判定为气化效率提高。较理想的结果应体现为残碳下降、 CO 生成量提高、碳转化率保持较高且波动减小,使原料煤中可利用碳更多进入有效合成气通道。

5.2 有效气产率改善结果检验

有效气产率的检验应同时考虑 CO 、 H_2 体积分数、单位干煤产气量及合成气低位热值,避免仅以气体组分比例判断浓度优化效果。浓度进入合理区间后,单位浆料携带的有效煤量增加,炉内热量利用更加集中, CO 生成条件得到改善, H_2 产量则受水煤气反应和变换反应共同影响^[5]。试验阶段可将单位干煤对应的 $\text{CO}+\text{H}_2$ 产量作为核心指标,再结合粗煤气总量和有效

气体积分数计算实际产出水平。若 $\text{CO}+\text{H}_2$ 比例升高但总产气量下降,说明气化负荷或反应强度仍存在约束;若有效气产量增加且 CO_2 占比同步受控,则表明浓度优化使更多化学能进入可利用合成气。连续运行数据还应关注有效气组分波动幅度,浓度控制稳定后, CO 、 H_2 含量离散程度应缩小,气体品质更加均匀,有利于后续净化、变换及合成单元保持稳定负荷。

5.3 综合气化能耗降低程度评价

综合气化能耗评价应将氧耗、煤耗、制浆电耗、输送能耗及有效气产出统一折算,避免出现某一指标下降而系统总能耗反而增加的片面判断。浓度优化后,单位干煤对应的入炉水量减少,维持气化温度所需的额外燃烧热量下降,比氧耗通常具备降低空间;同时,高浓度浆体黏度提高又可能增加泵送功率,因此需要比较气化主体节能收益与制浆输送环节新增能耗。评价可采用单位有效气产量氧耗、单位有效气热值煤耗以及吨煤综合电耗等指标进行交叉分析,并将冷煤气效率纳入同一数据体系。若比氧耗下降、有效气热值提高、单位煤气产量增加,而制浆和输送附加能耗保持在可控范围,说明浓度调整实现了实质性的能效改善。进一步结合稳定运行周期、喷嘴寿命和设备负荷,可更加准确判断节能降耗效果是否具备持续运行价值。

6 结语

水煤浆浓度直接关联气化炉热量利用、浆体输送、喷嘴雾化及碳转化过程,浓度偏离合理区间容易造成汽化热耗增加、流动阻力上升及有效气产率下降。依据热量平衡调整浓度范围,配合浆体流变性能控制、氧煤比修正及喷嘴运行参数优化,可使碳转化率、冷煤气效率和有效气产量保持较优水平,同时降低比氧耗及单位气化能耗。建立浓度参数与炉温、气体组分、能耗指标的联动控制关系,有利于提高气化运行稳定性,实现煤炭资源高效、低耗利用。

参考文献:

- [1] 陈红林.水煤浆浓度优化对气化效率及生产成本的影响研究[J].中国化工贸易,2026,18(6):73-75.
- [2] 赵小伟.水煤浆气化工工艺中的问题与改进分析[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(16):190-192.
- [3] 任孝正.水煤浆气化炉协同处置煤化工有机废液的实验研究[D].太原理工大学,2025.
- [4] 秦露源.气流床水煤浆气化炉建模与控制[D].沈阳化工大学,2025.
- [5] 王建斌.危险固废协同制备水煤浆气化关键技术研究[D].浙江大学,2024.