

不同煤质对干粉煤气化性能的影响

贺行行

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃一分公司 宁夏 银川 750004

摘要: 干粉煤气化的反应进程受煤质属性多维度制约, 煤的变质程度、灰分组成、挥发分含量与水分特征共同塑造着炉内温度场与浓度场的分布格局。灰分中碱金属组分虽可催化碳转化反应, 但过高的灰含量会稀释有效产气能力并加剧排渣负荷。挥发分的快速析出有利于孔隙结构发育, 低挥发分煤种则依赖表面反应完成碳转化。水分在消耗炉内热量的同时亦参与水煤气反应, 呈现双重作用特征。灰熔融特性为操作温度窗口的设定提供了刚性约束, 配煤进料与工况动态调整是适配多煤质条件的主要技术手段。

关键词: 干粉煤气化; 煤质特性; 灰熔融特性; 碳转化率; 配煤进料

引言: 干粉煤气化以粉煤为原料, 在高温高压条件下经干燥、热解、燃烧与还原四个阶段完成碳质物料的气化转化。煤质的内在理化特征贯穿反应全过程, 从碳骨架的反应活性到灰分的熔融特性, 从挥发分的析出规律到微量元素的催化侵蚀效应, 各参数之间通过孔隙结构与热力条件形成耦合关系。深入剖析不同煤质指标对气化反应路径、炉内工况及排渣状态的作用机理, 对工艺参数优化与碳转化效率提升具有直接的工程指导价值。

1 干粉煤气化反应体系与煤质构成特征

1.1 干粉煤气化的完整反应体系与反应流程

干粉煤气化以粉煤为原料, 在高温高压条件下与氧气、蒸汽等气化介质发生一系列复杂的气固反应。煤粉进入气化炉后依次经历干燥、热解、燃烧与还原四个阶段, 干燥阶段煤粉中的水分被高温气流蒸发带走, 热解阶段煤的有机大分子断裂为挥发分与半焦, 燃烧阶段半焦与氧气发生放热反应提供气化所需热量, 还原阶段则由水蒸气与二氧化碳和炽热碳层反应生成一氧化碳与氢气^[1]。整个反应体系以碳转化为主线, 以热量平衡为约束, 多种气固反应相互交织、彼此制约, 构成了一个热力学与动力学双重控制的复杂过程。

1.2 动力煤基础煤质组成与内在理化特征

动力煤作为干粉煤气化的主要原料, 内在理化特征直接决定气化反应的走向与深度。煤的变质程度影响挥发分含量与碳结构排列方式, 高变质程度煤碳含量高但反应活性偏低, 低变质程度煤挥发分丰富但碳骨架疏松。灰分由矿物质在高温下转化而来, 灰中各组分比例与赋存形态影响灰熔点与结渣倾向。硫分以有机硫与无机硫两种形态存在, 气化过程中转化为硫化氢等含硫气体。水分则以外在水与结晶水两种形式分布于煤体孔隙与矿物晶格之中, 对气化炉热平衡产生直接干扰。

1.3 干粉煤制备环节对原始煤质的改造特征

原煤在进入气化炉前须经过破碎与研磨制成干粉, 这一制备过程会对煤的物理结构产生显著改造。磨煤环节将煤体打碎为微米级颗粒, 大幅增加比表面积, 使气化介质能够充分接触碳表面。研磨过程中煤的孔隙结构被打开, 原有的微孔与中孔连通为更大的扩散通道, 有利于气化剂向碳颗粒内部渗透。制备环节还会改变煤的表面化学特性, 新鲜断裂面暴露大量活性官能团, 短期内可提升反应速率。但过度研磨会导致粒度偏细, 在密相输送中出现架桥堵塞, 反而削弱连续供料的稳定性。

1.4 煤质属性与干粉煤气化反应的关联逻辑

煤质属性从反应活性、热量供给与传质条件三个维度影响干粉煤气化的全过程。变质程度决定碳骨架的反应活性与挥发分析出规律, 灰分含量与组成影响炉内热平衡与排渣状态, 水分与粒度则控制气化介质与煤粉的接触效率。煤质各参数之间并非孤立存在, 而是通过孔隙结构、表面化学与热力条件形成耦合关系, 共同约束气化炉内的温度场与浓度场分布。理解煤质属性与气化反应之间的内在关联, 是优化工艺操作参数与提升碳转化效率的前提。

2 工业分析煤质指标对干粉煤气化的作用机制

2.1 水分指标对干粉煤气化反应进程的作用

入炉煤的水分含量直接参与干粉煤气化的热平衡核算。水分在气化炉入口区域吸收大量热量完成蒸发, 这部分热量本可用于驱动碳的气化反应, 因此高水分煤种会拉低炉内有效反应温度, 减缓碳转化速率。水分蒸发产生的蒸汽进入还原区后可参与水煤气反应生成一氧化碳与氢气, 在一定程度上弥补热损失带来的产气量下降^[2]。但入炉水分过高会导致磨煤机能耗攀升, 粉煤输送管道内出现黏附堵塞, 连续供料的稳定性受到干扰。水

分对气化反应进程的影响呈现双重特征,既是热量的消耗者,又是产气反应的参与者,两者之间的消长关系决定了水分指标在不同工况下的净作用方向。

2.2 灰分指标对干粉煤气化反应过程的作用

灰分在干粉煤气化中扮演着惰性稀释与催化促进的双重角色。灰分本身不参与气化主反应,含量越高意味着单位质量煤粉中可燃组分越少,有效产气能力随之下降。灰分中的碱金属与碱土金属氧化物在高温下可催化碳与蒸汽的反应,促进一氧化碳与氢气的生成。但灰分过高会导致炉内渣量增大,排渣系统负荷加重,若灰熔点偏低则在高温区软化熔融形成结渣,堵塞排渣口并侵蚀炉壁耐火材料。灰分的矿物组成与含量共同决定了炉内渣的流动特性与排渣顺畅程度,进而影响气化炉长期运行的可靠性。

2.3 挥发分指标对干粉煤热解气化的作用

挥发分是煤在热解阶段释放出的可燃气体组分,挥发分含量高低直接反映煤的变质程度与热解反应的剧烈程度。高挥发分煤种在进入气化炉后迅速释放大焦油、甲烷与轻质烃类,这些挥发分在高温区发生二次裂解与重整反应,转化为合成气的有效组分。挥发分的快速析出在煤粉颗粒内部形成丰富的孔隙网络,为后续气化剂向碳骨架内部扩散创造了有利条件。低挥发分煤种热解速率缓慢,焦油产率低但碳骨架致密,气化剂渗透阻力大,碳转化主要依赖表面反应而非内部扩散。挥发分指标从热解反应强度与孔隙结构发育两个层面深刻影响着干粉煤气化的反应路径与产气特征。在工程应用中,挥发分过高虽有利于孔隙发育,却会导致焦油产率上升,增加后续气体净化系统的负荷,而挥发分过低则碳转化效率受限,因此挥发分的最优区间需结合气化炉类型与下游净化能力综合确定。

2.4 固定碳指标对碳转化反应的内在作用

固定碳是干粉煤气化中生成合成气的核心物质基础,固定碳含量越高意味着单位质量煤粉可供转化的碳源越充足。固定碳的反应活性受煤种变质程度与微观结构的共同控制,高变质程度煤的碳结构排列趋于有序,石墨微晶片层间距缩小,气化剂分子难以插入碳层间发生反应,碳转化速率偏低。低变质程度煤的碳骨架无序度高,缺陷位与边缘活性位丰富,碳与气化剂的接触反应更为充分。固定碳的粒度分布与孔隙发达程度也制约着气固反应的传质效率,颗粒越细、孔隙越丰富则碳转化越彻底,冷煤气效率越高。

3 元素及灰熔融煤质指标对干粉煤气化的影响机理

3.1 煤中主要元素组分对气化反应氛围的影响

碳元素构成干粉煤气化中合成气生成的物质基础,碳含量高低直接关系单位质量煤粉的产气潜力。氢元素在气化过程中参与水煤气变换与甲烷化反应,氢含量丰富的煤种在还原区可生成更多甲烷,提升粗煤气的热值。氧元素以含氧官能团形式赋存于煤的有机结构中,高温下释放的含氧气体参与炉内燃烧反应,为气化过程提供部分反应热量。氮元素在气化炉内主要转化为氨气与氰化氢,氮含量偏高会增加粗煤气净化系统的负荷。硫元素以有机硫与黄铁矿硫两种形态存在,气化后生成硫化氢与羰基硫,对下游变换催化剂产生毒害。煤中各主要元素的比例关系共同塑造了炉内的化学气氛与反应方向^[1]。在实际生产中,碳氢比与氧碳比的协同变化直接决定了合成气中有效组分的摩尔比,进而影响下游合成工艺的原料气品质,因此元素分析不仅服务于气化炉本身的运行优化,更是整个煤化工产业链质量控制的上游基础。

3.2 煤中有害微量元素对气化过程的干扰作用

煤中碱金属与碱土金属虽然含量极微,但在高温气化环境下会产生显著的催化与侵蚀效应。钠与钾的化合物可大幅降低灰熔点,导致炉内结渣加剧,破坏床层的透气性与流动性。铁元素在强还原气氛中被还原为金属态析出,渗透进耐火材料的微裂纹中造成炉衬剥落。氯元素在气化炉内与碱金属形成低熔点共熔体,加速水冷却壁的腐蚀速率。砷与铅等重金属元素则会毒化下游变换与合成催化剂,降低工艺系统的整体运行效率。微量有害元素的累积效应不可忽视,长期运行中会对气化炉的结构安全与产品气体品质形成持续性干扰。

3.3 灰熔融特性对炉内排渣状态的影响

灰熔融特性由灰的化学组成决定,反映煤灰在高温下从软化到流动再到熔融的温度区间。灰软化温度低于1100℃的煤种在气化炉高温区灰粒迅速软化黏连,形成大块熔渣堵塞排渣口,造成炉内渣层增厚、床层阻力升高。灰流动温度高于1500℃则灰渣黏度增大,流动性变差,排渣系统频繁出现挂渣与架桥现象。熔融温度与气化炉操作温度之间的匹配程度决定了排渣的顺畅与否。操作温度高于灰熔融温度过多会导致熔渣侵蚀炉底耐材,温度低于流动温度则灰渣凝固在炉内难以排出。灰熔融特性为气化炉操作温度窗口的设定提供了关键约束条件。

3.4 灰成分特性对炉内反应环境的影响

灰分的矿物组成深刻影响气化炉内的反应环境与传热特性。高硅灰在高温下黏度较大,有利于在水冷壁表面形成保护渣层,减缓耐火材料的侵蚀速率。高铁灰则

因铁的还原析出行为对炉衬安全构成威胁。氧化钙与氧化镁含量较高的灰分熔点偏高,排渣难度增大但有利于维持炉内渣层的结构稳定性。灰中铝含量影响渣的酸碱度,进而改变碳与水蒸气反应的催化活性。灰成分通过调节炉内渣的物相组成与流变特性,间接影响气固接触效率与碳转化深度,是决定气化炉长周期稳定运行的隐性控制因素。

4 适配不同煤质的干粉煤气化运行适配方式

4.1 基于煤质特性的干粉煤制备适配调整方式

不同煤种的可磨性差异直接决定干粉制备环节的工艺参数设定。硬煤可磨指数偏低,需加大研磨能量投入才能达到目标粒度,但过度研磨会产生过多微细颗粒,在密相输送中引发架桥堵塞。软煤质地疏松易碎,较低的研磨功率即可获得合格粒度,却容易因粒度过细导致粉煤含尘量偏高^[4]。制备环节须根据煤的硬度与塑性特征调整磨机转速与选粉机频率,使出料粒度分布与气化炉的进料要求相匹配。对于高水分煤种,可在磨煤前段增设热风干燥,降低入磨水分以改善研磨效率与输送流畅性。

4.2 适配不同煤质的炉内反应氛围调控方式

煤质变化引发炉内反应氛围的偏移,需要通过调整气化剂配比来维持反应温度与产气组成的稳定。高灰分煤种因惰性物质稀释了可燃组分浓度,需适当提高氧碳比以补偿热值损失,避免炉温跌落。高挥发分煤种热解产生大量焦油与轻烃,还原区需维持较高的水蒸气比例,促使焦油发生二次裂解转化为有效合成气组分。对于硫分偏高的煤种,可通过调节炉内温度窗口抑制硫化氢的生成速率,减轻下游净化系统的处理压力。反应氛围的调控本质上是围绕煤质特征对气固接触条件与化学反应路径进行定向修正。

4.3 依托煤质差异优化气化进料匹配模式

单一煤种难以兼顾气化工艺对灰分、硫分、挥发分与热值的综合要求,配煤进料成为适配多煤质的常用手段。将高挥发分煤与高固定碳煤按比例混合,可在保证产气热值的前提下改善碳转化率。高灰分煤与低灰分煤搭配入炉,能够将入炉灰分控制在排渣系统可承受的范围内。配煤方案的制定须综合考量各单种煤的灰熔点、

碱金属含量与反应活性,避免因混合不均导致炉内工况剧烈波动。对于煤源频繁更换的生产场景,可采用在线脱灰或分仓储存的方式,降低入炉煤质的波动幅度。

4.4 针对差异化煤质的气化工况适配调整思路

气化工况的调整须围绕温度、压力与气化剂配比三个核心变量展开。低反应活性煤种需将操作温度适当上调,以弥补碳骨架有序度高带来的反应速率不足,但提温幅度受限于灰熔融特性的约束。高反应活性煤种则可在较低温度下获得理想的碳转化率,操作弹性更大。氧碳比与蒸汽煤比的设定需随煤种切换而动态修正,切换过程中应采用渐变方式调整进料配比,避免炉温出现阶跃式波动^[5]。气化工况的适配调整是一项围绕煤质特征进行多参数联动优化的系统工程,各变量之间存在强耦合关系,牵一发而动全身。

结束语

煤质属性从反应活性、热量供给与传质条件三个层面深刻约束着干粉煤气化的运行状态。灰分的稀释与催化双重角色、挥发分对孔隙结构的塑造作用、水分的热量消耗与产气参与特征,以及灰熔融特性对排渣顺畅性的刚性约束,共同构成了煤质影响气化性能的完整逻辑链条。配煤进料与工况动态调整作为适配多煤质的技术手段,能够在一定程度上缓解煤质波动带来的运行冲击,保障气化装置的连续稳定运转。

参考文献

- [1]牛田,胡瑞.干粉煤气化炉褐煤干燥装置调试及运行总结[J].煤化工,2025,53(6):70-72,101.
- [2]李叶珺,李燕妮.干粉煤气化装置激冷水系统的优化[J].煤化工,2024,52(1):6-8,16.
- [3]代军.干粉煤气化废水中酚类物质的微生物毒性及其降解途径研究[J].煤化工,2024,52(3):74-77.
- [4]马振明,耿文杰,李赞.干粉煤气化装置蒸汽系统开车调试问题及优化改进[J].中氮肥,2022(6):22-24,47.
- [5]胡瑞,牛田,郭亚波,等.干粉煤气化炉煤量波动和不准影响因素分析及控制解决方法[J].广州化工,2026,54(1):173-175,191.