

煤质变化对单喷嘴气化炉运行的影响

黄 磊

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司 宁夏 银川 750000

摘 要：单喷嘴气化炉是煤化工生产的核心设备，其运行稳定性与煤质特性密切相关。本文阐述单喷嘴气化炉工作原理及煤质核心影响指标，分析煤质（水分、灰分、挥发分等）变化对气化反应、设备运行、工艺参数及长周期运行的具体影响，指出煤质波动易引发结渣、设备磨损、停车等问题，最后提出煤质预处理、参数调控、设备改进及检测预警等应对措施，为气化炉安全稳定高效运行提供理论支撑与实践参考。

关键词：煤质变化；单喷嘴气化炉；运行影响

引言：随着煤化工产业的快速发展，单喷嘴气化炉因碳转化率高、运行稳定等优势广泛应用，但原料煤质受产地、开采工艺影响易发生波动。煤质作为气化反应的核心原料，其指标变化直接影响气化炉流场、炉温等关键参数，进而引发设备故障、生产中断等问题。当前煤质波动导致气化炉运行隐患频发，因此深入研究煤质变化对其运行的影响，制定科学应对方案，对保障煤化工生产连续性、降低成本具有重要现实意义。

1 单喷嘴干煤粉加压气化炉工作原理及煤质核心影响指标

1.1 单喷嘴气化炉结构与工作机制

（1）单喷嘴顶置式结构特点及流场特性：设备采用炉膛顶部单喷嘴垂直顶置结构，可形成规整的轴向高速射流流场。相较传统多喷嘴水煤浆气化工序，其流场稳定性更好，炉膛有效利用率高，炉内温区分布均匀，结渣风险低。同时设备结构简洁、故障点少，运维难度低，长周期运行稳定性显著更优。（2）气化反应基本原理与关键工艺环节：核心为4.50MPa加压、高温工况下，干煤粉与高压纯氧发生热裂解、部分氧化及气化还原反应，制备高品质粗煤气。核心流程涵盖煤粉研磨干燥、加压密相输送、炉内雾化气化、灰渣熔融分离、粗煤气净化冷却，煤粉输送与雾化效果直接决定气化反应质量。（3）运行核心控制参数：核心控制参数包括4.50MPa恒定操作压力、炉膛温度、氧煤比、煤粉输送浓度。其中炉温与氧煤比的耦合控制最为关键，炉温异常会引发衬里烧损、反应不完全、渣口堵塞等问题，需根据煤质实时动态调控^[1]。

1.2 煤质特性及核心影响指标分类

（1）基础特性指标：水分、灰分升高会降低气化效率、增加能耗与设备磨损；挥发分影响起燃与炉温建立，过高易引发工况波动；固定碳为核心反应碳源，直

接决定有效气产量。（2）热化学特性指标：灰熔点决定炉温安全控制区间，直接影响系统能耗；发热量维系炉内热平衡，热值不足易造成工况失衡；煤质反应活性越高，碳转化率与有效气收率越高。（3）物理特性指标：煤粉粒度需适配工艺标准，粗细失衡会影响反应效果、增加能耗；原煤含水量影响煤粉干燥与输送稳定性；可磨性直接决定制粉精度、能耗与煤粉均匀度。

1.3 煤质指标与单喷嘴干煤粉加压气化炉运行的关联性

（1）煤质指标对气化反应效率的影响关联：低水分、低灰分、高固定碳、高活性煤种，可显著提升碳转化率与有效气产量，降低煤耗与氧耗；高水分、高灰分、低活性煤种会大幅降低气化效率、增加能耗，易诱发结渣、堵管、工况波动等故障。（2）煤质波动与气化炉工艺参数的耦合关系：灰熔点、水分、挥发分等煤质指标波动，会打破炉内热平衡，造成炉温、氧煤比、进料量等核心参数失衡，引发烧嘴压差波动、炉膛超温、气化压力不稳等问题，需动态调整工艺参数适配煤质变化。（3）单喷嘴干煤粉气化炉对煤质的适配要求：该工艺煤质适配范围较广，生产中优先选用低灰、低内水、灰熔点适中、可磨性好、反应活性高的煤种，严控煤质指标波动，保障煤粉制备与输送品质稳定，实现气化炉长周期、高效率低故障运行。

2 煤质变化对单喷嘴干煤粉加压气化炉运行的具体影响

2.1 煤质变化对气化反应过程的影响

（1）水分、灰分变化对炉内温度场分布的影响：原煤水分升高会加大制粉干燥负荷，使煤粉含水超标，入炉后升温汽化吸热，造成炉膛降温、温度场紊乱，形成低温区，引发灰渣黏壁结渣。灰分升高会消耗炉内热量用于自身加热熔融，降低有效反应温度，同时干扰炉内流场，破坏温度场均匀性，削弱气化反应稳定性。（2）

挥发分、固定碳变化对气化反应速率的影响：挥发分升高可加快煤粉热解起火，提升初期反应速率，但过高易局部超温侵蚀衬里；过低则炉温建立慢、反应滞后，增加系统能耗。固定碳为气化核心组分，含量升高可提升产气潜力，占比过高会导致碳反应不彻底、转化率下降；过低则有效气产量骤减，降低生产运行效率^[2]。

（3）煤质反应活性对碳转化率及有效气产率的影响：煤质活性越强，炉内还原反应越充分，碳转化率和有效气产率越高，可减少原料消耗。活性较差时，反应不完全，残碳随灰渣排出，既浪费煤炭资源、降低碳转化率，又导致有效气供给不足，无法满足后续合成工序生产需求。

2.2 煤质变化对气化炉设备运行的影响

（1）灰熔点变化对炉膛结渣、排渣系统的影响：灰熔点偏低时，灰渣提前熔融黏附炉壁与耐火衬里形成结渣，渣层增厚会压缩炉膛容积、堵塞渣口，导致排渣不畅、工况恶化，严重时引发停车。灰熔点偏高时，需提温保障排渣，超温工况会加速耐火设备老化损毁，缩短设备寿命，同时增加氧耗、电耗，提升运行成本。（2）煤质粒度与硬度对烧嘴磨损及雾化效果的影响：原煤硬度高、煤粉粒度过粗，会持续冲刷磨损烧嘴，造成喷头变形、雾化通道偏移，导致煤粉与氧气混合不均，引发不完全燃烧、炉膛结渣等问题。煤粉粒度过细则会增加制粉能耗，且超细煤粉易积灰架桥，造成输送堵塞、雾化失效，影响系统稳定。（3）灰分组成变化对激冷系统堵塞及设备腐蚀的影响：灰分酸性氧化物占比过高，会生成腐蚀性介质，加剧激冷、洗涤设备的冷热腐蚀，缩短设备检修周期。灰分细颗粒、易结垢组分偏多，会随粗煤气沉积结垢，堵塞激冷环、降低激冷效果，引发炉温异常升高，诱发设备故障^[3]。

2.3 煤质变化对气化炉工艺参数的影响

（1）煤质波动对氧煤比、汽煤比调控的影响：固定碳、挥发分及煤质活性升高，需适度提高氧煤比，保障煤粉充分气化；灰分、水分升高导致煤质劣化时，需降低氧煤比，规避炉温波动、结渣及设备超温风险。汽煤比需随煤质活性动态调整，活性差时提高汽煤比可强化还原反应、提升碳转化率；活性较好时，过高汽煤比会吸热降温，抑制气化反应、降低运行效率。（2）煤质变化对气化炉压力、液位稳定性的影响：原煤水分、粒度波动会造成煤粉进料不稳定，炉内反应速率失衡，引发系统压力波动，存在安全隐患且降低产气效率。同时，煤质波动诱发的结渣、堵渣问题，会破坏激冷室气液平衡，造成液位大幅波动，进而引发合成气带水、设备超

温等工况异常问题。（3）煤质特性对合成气组分及净化系统的影响：挥发分与固定碳比例波动会打破气化反应平衡，导致合成气组分不稳定，增加后续工序调控难度、影响产品品质。原煤硫、氮等杂质含量升高，会增加合成气有害杂质，加剧净化设备腐蚀堵塞，大幅提升脱硫脱氮药剂消耗与运行成本。

2.4 煤质变化对气化炉长周期运行的影响

（1）煤质波动导致的气化炉停车风险分析：灰熔点骤降、水分灰分突增等大幅煤质波动，会快速引发炉膛结渣、渣口堵塞、烧嘴雾化失效、煤粉堵管等故障，调控不及时会造成工况失控，引发非计划停车，破坏生产连续性，且炉温、压力骤变会大幅提升高温高压设备运行安全风险。（2）煤质变化对设备维护周期及成本的影响：长期使用高灰分、高硬度、高腐蚀性煤种，会加速烧嘴、耐火衬里、激冷环等核心设备磨损、腐蚀与老化，缩短检修更换周期，增加备件与维修成本。同时，煤质波动引发的故障与非计划停车，会额外增加运维人力、物力投入，进一步推高生产成本^[4]。（3）煤质不稳定对气化系统整体运行可靠性的影响：气化系统各工序耦合联动性极强，煤质不稳定会引发制粉、气化、净化全流程工况波动，不仅影响气化炉本体稳定运行，还会传导至后续合成、精制工序，造成整套装置故障频发、生产效率下降，严重制约设备长周期满负荷稳定运行。

3 煤质变化的应对措施及优化方案

3.1 煤质预处理与均化技术优化

（1）原煤洗选、破碎及筛分工艺改进：优化原煤洗选工艺，采用重介洗选与浮选联合工艺，高效脱除原煤灰分、硫分及杂质，从源头减小煤质波动，适配干粉煤气化工艺要求。升级破碎、筛分设备，采用分级破碎、精准筛分工艺，严格把控入炉原煤粒度，搭配高频振动筛分装置剔除杂物与不合格煤块，稳定制粉原料品质，保证煤粉粒度均匀。（2）配煤均化技术及优化配比方案：搭建多煤种掺配、储煤均化体系，结合不同煤种灰熔点、灰分、水分、反应活性等核心指标，制定适配单喷嘴干粉煤气化工艺的配煤方案。通过多煤种均匀掺配弥补单一煤质缺陷，稳定入炉煤质。依托智能在线配煤系统，实时监测煤质数据，动态调整配煤比例，适配4.50MPa加压机化工况，兼顾运行稳定性与经济性。（3）煤质预处理过程的质量控制要点：在洗选、破碎筛分、储煤均化、制粉干燥等关键工序设置检测点位，实时监测煤质核心指标，异常时及时调参。规范设备标准化操作流程，定期检修维护，避免设备问题影响预处理效果。建立全流程质量台账，实现煤质管控全程可追溯。

3.2 气化炉运行参数自适应调控策略

(1) 基于煤质变化的氧煤比动态调控方法: 构建煤质指标与氧煤比智能耦合调控模型, 实时采集煤粉水分、固定碳、灰分等数据, 精准匹配最优氧煤比。煤质优良、反应活性高时, 适度提高氧煤比, 提升产气效率; 煤质劣化时, 及时降低氧煤比, 规避炉温异常、结渣、设备烧损等风险, 实现参数与煤质精准适配。(2) 炉温、压力等核心参数的自适应调整方案: 依托炉膛红外在线监测系统, 结合煤质灰熔点、反应活性数据, 自动调节煤粉输送量、供氧量及冷却水量, 将炉温稳定在最优气化区间。针对4.50MPa系统压力波动, 通过调控放空阀开度、稳定煤粉输送浓度, 实现压力平稳自适应调控, 保障全工况稳定运行。(3) 多模型切换控制在煤质波动中的应用: 搭建适配优质煤、劣质煤、煤质大幅波动等场景的专属控制模型。煤质指标大幅偏移时, 系统可自动识别工况、快速切换模型, 同步调整氧煤比、炉温、压力等核心参数, 缩短人工调控响应时间, 削弱煤质波动对气化系统的运行影响^[5]。

3.3 设备结构改进与防护措施

(1) 烧嘴、激冷环等关键部件的结构优化: 优化单喷嘴工艺烧嘴, 采用新型耐磨耐高温合金材质, 延长设备使用寿命; 改进煤粉雾化通道, 提升雾化均匀性, 增强设备对不同品质煤粉的适配能力。升级激冷环结构, 扩大冷却水流通截面、优化流道, 减少灰渣沉积, 解决激冷环堵塞问题。(2) 炉膛结渣、设备磨损的防控技术: 炉膛内壁喷涂防黏渣耐高温复合涂层, 降低灰渣附着力, 从源头减少结渣。建立常态化清渣制度, 定期通过高压水射流、机械清渣方式清理积渣。在烧嘴、输煤管道等易磨损部位加装耐磨衬板, 优化煤粉输送流速, 减轻设备冲刷磨损。(3) 煤质适应性提升的设备改造方案: 升级制粉干燥设备与控制系统, 提升对不同煤种可磨性、含水量的适配能力, 稳定煤粉品质。改造智能可控排渣系统, 适配不同灰熔点煤种的排渣需求, 杜绝堵渣故障。优化炉膛结构, 拓宽炉温调节区间, 提升气化炉对煤质波动的耐受与适配能力。

3.4 煤质检测与预警系统构建

(1) 煤质指标实时检测技术与设备选型: 配置高精度在线煤质分析仪, 秒级检测煤粉水分、灰分、挥发分、灰熔点等核心指标, 数据实时上传中控系统。配套离线检测设备开展人工复核, 修正在线检测误差, 保障煤质数据精准可靠。(2) 煤质波动预警模型的建立与应用: 依托装置运行大数据与煤质波动数据库, 搭建智能预警模型, 设置各项煤质指标安全预警阈值。当煤质指标偏离标准范围时, 系统自动声光预警, 提示运维人员提前干预, 及时调整配煤方案与工艺参数。(3) 预警系统与运行调控的联动机制: 建立煤质预警与气化炉调控的闭环联动体系, 识别煤质波动预警后, 自动触发对应调控方案, 精准调整煤粉输送、氧煤比、炉温等核心参数, 实现煤质波动提前预判、主动防控, 有效规避工况异常与设备故障。

结束语

煤质变化对单喷嘴气化炉运行的影响贯穿反应全过程, 涉及气化效率、设备寿命、生产安全等多个方面, 煤质波动是制约气化炉长周期稳定运行的关键因素。通过优化煤质预处理工艺、构建参数自适应调控体系、改进设备结构及完善检测预警机制, 可有效缓解煤质变化带来的不利影响。未来需持续优化应对策略, 提升气化炉对煤质波动的适配能力, 推动煤化工产业高质量、可持续发展。

参考文献

- [1]李海朋,高杨,高静,等.快速切换盲板在煤制氢装置中的结构设计和应用研究[J].阀门,2025,21(3):63-66.
- [2]周必茂,许世森.烧嘴偏转角度对气化炉渣层分布特性的影响[J].化工学报,2023,74(5):193-196.
- [3]黄成龙.粉煤气化炉渣口尺寸对气化性能的影响[J].化肥设计,2022,60(6):40-43.
- [4]耿恒辉.入炉煤质对航天炉运行影响的探讨[J].氮肥与合成气,2024,52(11):205-207.
- [5]刘臻,管清亮.干煤粉气化炉煤粉输送问题分析及解决方案探讨[J].煤炭工程,2023,49(10):109-112.