

煤炭气化工艺参数优化及气化效率提升应用分析

郝 杰

延长石油延安能源化工有限责任公司 陕西 延安 727500

摘 要: 煤炭气化是煤炭清洁高效转化的核心工艺, 针对工业生产中气化效率低、能耗偏高、工况稳定性差等问题, 本文剖析固定床、流化床、气流床主流气化工艺特性, 系统分析煤质、运行、设备三类参数对气化效率的影响及现存参数调控缺陷。依托数值仿真开展多参数耦合协同优化, 制定单项参数优化与协同调控方案。工业应用表明, 该优化策略可显著提升碳转化率与冷煤气效率, 降低能耗与残碳率, 保障气化系统稳定绿色运行。

关键词: 煤炭气化; 工艺参数优化; 气化效率提升; 应用

引言: 在煤炭清洁高效利用的产业背景下, 煤炭气化是煤化工产业的核心基础工艺, 其气化效率与运行稳定性直接决定生产经济性与环保水平。当前工业气化生产普遍存在参数调控单一、多参数协同性差的问题, 易引发气化不充分、能耗过高、工况波动等弊端, 制约工业化高质发展。为解决上述痛点, 本文结合气化反应机理与主流工艺特性, 深挖效率影响因素, 探索科学的参数优化方案, 为工业化提质增效提供实践参考。

1 煤炭气化工工艺基础理论与主流工艺分析

1.1 煤炭气化核心反应机理

(1) 煤炭气化基本化学反应: 核心包含四类关键反应, 氧化反应为煤炭与氧气燃烧放热, 为后续反应提供热量; 还原反应依托碳与二氧化碳、氢气反应生成一氧化碳、甲烷等有效气; 甲烷化反应可提升合成气热值; 水蒸气分解反应生成活性氢、氧基团, 促进煤炭深度气化, 是合成气组分调控的关键反应。(2) 气化反应热力学与动力学特性: 热力学层面, 温度升高可推动吸热反应正向进行, 压力提升利于缩体反应平衡, 改变合成气组分占比; 动力学层面, 温度、压力升高可加快分子扩散与反应速率, 缩短气化反应周期, 同时压力过高会抑制部分分解反应, 需匹配工况平衡调控。(3) 气化效率评价指标: 核心指标涵盖碳转化率, 反映煤炭有效利用程度; 冷煤气效率, 体现能量转化核心水平; 合成气有效组分占比, 决定燃气工业可用性; 灰渣残碳率, 直接表征燃料浪费情况; 能耗指标, 衡量工艺整体节能与经济性。

1.2 主流煤炭气化工工艺类型及特性

(1) 固定床气化工工艺: 依托固定层煤炭堆积气化, 设备结构简单、运维成本低, 常压运行、操作便捷, 适配块状原煤。短板为气化效率偏低、原料利用率差, 合成气杂质含量高, 难以适配大规模工业化生产。(2) 流化

床气化工工艺: 物料呈流态化充分接触反应, 温度均匀、传质效率高, 适配粉煤原料。但工况参数调控区间有限, 煤种适应性较弱, 高灰、高挥发分煤种易出现结渣问题, 工业应用场景受限。(3) 气流床气化工工艺: 采用高温高压工况, 煤粉与气化剂高速混合反应, 气化彻底、合成气纯净、有效组分占比高。但工况严苛, 温度、压力及配比参数调控难度大, 设备耐高温高压损耗高, 运维技术门槛较高^[1]。

1.3 气化工工艺关键参数界定

(1) 原料参数: 煤种挥发分决定气化反应活性, 灰熔点影响炉内结渣状态, 粒度、含水率、灰分含量直接影响物料传热传质效率, 粒度不均、含水率过高会显著降低气化效率。(2) 运行参数: 气化温度、压力决定反应深度与速率, 汽氧比、氧煤比调控反应放热与合成气组分, 物料停留时间直接影响煤炭气化完全程度, 是工况核心调控指标。(3) 设备参数: 气化炉高径比影响物料停留时长, 烧嘴结构决定气化剂混合均匀度, 布风方式把控炉内温度场、流场分布, 直接影响气化反应稳定性与效率。

2 煤炭气化效率影响因素及参数缺陷分析

2.1 煤质参数对气化效率的影响

(1) 煤质理化特性影响: 煤质理化指标的稳定性是保障气化反应高效进行的基础。煤中挥发分含量过低, 煤炭反应活性不足, 炉内气化起始反应滞后, 碳颗粒难以充分裂解气化; 挥发分过高则会造热解速度过快, 大量可燃组分瞬时析出, 易出现局部缺氧燃烧, 造成组分浪费。灰分含量过高会覆盖煤炭颗粒表面, 阻碍气化剂与煤料接触, 抑制传质传热过程, 同时增加炉内废渣处理负荷。灰熔点异常会引发炉内结渣、挂壁问题, 破坏炉内反应环境稳定性, 最终导致气化反应不充分、有效气产出效率下降^[2]。(2) 原料预处理缺陷: 煤炭预处

理工艺不达标是工业气化效率偏低的常见诱因。原煤破碎粒度不均,会造成炉内物料粒径层级差异过大,小颗粒物料反应过快被快速消耗,大颗粒煤料停留反应不足,出现残碳超标问题,引发炉内反应失衡。煤炭干燥处理不达标、原料含水率过高,入炉后需消耗大量气化热量用于水分蒸发,大幅提升系统能耗,同时会降低炉内实际反应温度,弱化气化反应效果,进一步降低整体气化效率。

2.2 运行工艺参数对气化效率的影响

(1) 温压参数影响: 气化温度与压力是调控气化反应的核心工况参数。气化温度过低,煤炭还原、水蒸气分解等吸热反应难以充分开展,碳转化率下降,物料反应不完全;温度过高虽可加快反应速率,但会大幅增加无效热损耗与系统能耗,同时加剧设备高温损耗。气化压力频繁波动,会打破炉内反应平衡,破坏合成气生成稳定性,影响合成气产率及有效组分占比,导致气化工况失衡。(2) 气化剂配比影响: 汽氧比、氧煤比的精准匹配是高效气化的关键。氧煤比过低,炉内供氧不足,煤炭气化、燃烧反应不彻底,灰渣残碳率升高;氧煤比过高会过度氧化可燃组分,造成有效气损耗。汽氧比失衡会破坏炉内还原氛围,配比过高会降低炉温、抑制气化反应,配比过低则水蒸气分解不充分,无法有效调控合成气组分,最终降低有效气占比,恶化气化品质。(3) 停留时间影响: 物料炉内停留时间直接决定气化反应完全程度。停留时间过短,煤料未完成热解、气化便排出,碳素反应不充分,原料利用率与气化效率降低。停留时间过长,已气化物料占用炉内空间,无法提升产气效果,还会持续消耗炉内热量与气化剂,造成能源浪费,降低系统整体运行经济性^[3]。

2.3 设备与工况耦合缺陷分析

(1) 气化炉结构适配性不足: 气化炉高径比、烧嘴及布风结构设计不合理,易导致炉内气流流场分布紊乱、物料分布不均,煤粉与气化剂无法充分混合接触。局部区域物料堆积、气化剂分布稀疏,出现反应盲区,大幅降低传质传热效率,使得部分煤料无法充分气化,直接拉低整体气化反应效率与碳利用率。(2) 参数协同调控缺失: 当前工业气化运行多以单一参数优化为主,缺乏多参数耦合协同调控机制。温度、压力、气化剂配比、停留时间等参数独立调控、互不匹配,单一参数优化的优势被其他参数缺陷抵消,无法形成最优气化工况,导致气化系统整体运行效率偏低,难以实现高效、稳定产气。(3) 工业运行工况波动: 工业生产中气化炉负荷频繁波动、运行稳定性差,会持续破坏炉内反应平衡。同时,长期运

行易出现设备积灰、炉内结渣、烧嘴堵塞等问题,阻碍物料反应与热量传递,造成炉内工况持续劣化,引发气化效率逐步衰减,影响气化系统长期稳定运行。

3 煤炭气化工艺参数优化策略及应用效果分析

3.1 工艺参数优化总体思路与原则

(1) 优化思路: 本次煤炭气化工艺参数优化以解决传统气化工况参数匹配不合理、效率偏低、能耗偏高等问题为核心目标,聚焦碳转化率、冷煤气效率两大核心评价指标,摒弃传统单一参数调整的优化模式。通过统筹原料参数、运行参数、设备适配参数的相互作用关系,开展多参数协同耦合优化,平衡炉内气化反应速率与反应完全度。在提升合成气品质与原料利用率的基础上,兼顾系统运行稳定性、节能性与经济性,解决工况波动、能耗浪费、残碳超标等工业痛点,形成适配工业化连续生产的优质气化调控方案。(2) 优化原则: 一是适配煤种特性原则,结合原煤挥发分、灰熔点、灰分、含水率等理化指标差异化制定参数标准,避免参数与煤种不匹配引发的气化缺陷。二是贴合工业工况原则,优化方案立足实际生产条件,规避理论化、理想化参数,保障方案可落地、可适配工业化连续运行。三是兼顾效率与环保原则,在提升气化效率、降低能耗的同时,控制副产物与污染物排放,契合绿色生产要求。四是设备安全稳定原则,所有优化参数均控制在气化炉、烧嘴等设备耐受范围内,规避高温高压过载、结渣堵炉等设备故障风险。

3.2 关键工艺参数单项优化方案

(1) 温压参数优化: 针对不同煤种与气化炉型的反应特性,精准界定最优气化温度与压力区间。针对低活性煤种,适度提升气化温度,保障吸热反应充分进行,解决反应不完全、残碳率过高问题;针对高活性煤种,严控温度上限,避免无效能耗激增与设备高温损耗。同时根据固定床、流化床、气流床不同炉型的结构特性,匹配梯度化运行压力,稳定炉内反应平衡,规避压力波动引发的合成气产率不稳定、工况失衡等问题,夯实气化高效反应基础。(2) 气化剂配比优化: 以提升有效气产率为目标,精准调控核心气化剂配比参数。结合入炉煤质特性动态调整氧煤比,保证炉内供氧充足且不过量,既杜绝供氧不足导致的气化不彻底问题,又避免过度氧化消耗有效组分。科学优化汽氧比,合理调控炉内还原氛围,提升水蒸气分解效率,增加氢气、一氧化碳等有效组分占比,同时依托水蒸气的调温、抑渣作用,改善炉内反应环境,进一步提升合成气整体品质^[4]。(3) 原料参数优化: 建立标准化煤炭预处理工艺体系,弥补传统原料处理的工艺缺陷。严格规范原煤破碎工序,统一入炉

煤炭粒度标准,杜绝粒径不均造成的反应差异,保证煤料与气化剂均匀接触。严控煤炭干燥工艺指标,降低入炉原料含水率,减少炉内水分蒸发的无效热损耗,稳定炉内反应温度。通过标准化原料预处理,让煤质参数稳定适配气化运行工况,从源头降低气化失衡概率,提升整体气化稳定性。

3.3 多参数耦合协同优化设计

(1) 多参数耦合仿真建模:依托专业数值模拟软件,结合气化炉实际结构、煤质特性与运行工况,构建高精度炉内多相流反应仿真模型。模型全面覆盖煤料热解、氧化、还原、甲烷化等全过程反应,精准模拟温度、压力、气化剂配比、物料停留时间等参数的相互耦合作用机制,量化各参数交互对气化效率、合成气组分、炉内流场的影响,为耦合优化提供数据支撑与理论依据。(2) 耦合优化方案制定:基于仿真数据与参数交互规律,整合温压参数、气化剂配比、物料停留时间等核心指标,构建系统化最优参数组合体系。打破单一参数优化的局限性,明确各参数的匹配阈值与联动调控逻辑,实现高温、适配压力、合理汽氧煤比、适宜停留时间的协同匹配,让各参数相互增益、互补短板,形成适配不同煤种、不同炉型的一体化耦合优化方案。(3) 优化方案可行性验证:通过仿真对比试验,量化分析单一参数优化与多参数耦合优化的效果差异。单一参数优化仅能局部改善气化指标,存在优化上限高、综合提升效果有限的问题;而耦合优化可全方位优化炉内反应环境,同步提升碳利用率与产气品质,解决单一优化无法规避的工况矛盾,验证多参数耦合优化的科学性与技术可行性,为工业落地提供理论支撑^[5]。

3.4 优化工艺工业应用效果分析

(1) 气化效率指标提升效果:工业应用数据表明,参数优化后气化系统核心指标显著改善,煤炭碳转化率大幅提升,有效减少未反应碳素浪费;冷煤气效率明显提高,煤炭化学能转化利用率显著增强。同时灰渣残碳率大幅下降,合成气中一氧化碳、氢气等有效组分占比

稳步提升,彻底解决了传统工艺气化不充分、产气品质差的问题,整体气化生产水平显著升级。(2) 能耗与经济效益分析:工艺耦合优化后,炉内无效热损耗大幅降低,系统综合能耗显著下降,有效节约生产能耗成本。稳定的反应工况减少了原料浪费,煤炭利用率提升直接降低原煤消耗成本,同时气化炉有效产能得到释放,单位时间合成气产量提升。综合来看,优化后设备运行成本降低、产能提升,为企业带来持续的生产成本优势与经济效益。(3) 运行稳定性与环保效果:参数协同优化后,炉内温度场、流场分布均匀,物料反应状态稳定,设备结渣、积灰、烧嘴堵塞等故障频次大幅降低,设备连续运行周期显著延长,工况波动问题得到有效改善。同时气化反应更充分,不完全燃烧产生的有害副产物大幅减少,固废残碳排放量降低,整体生产过程的环保性、稳定性显著提升,实现高效、节能、绿色、稳定的气化生产目标。

结束语

本文系统性完成煤炭气化工艺参数缺陷分析与优化体系构建,通过单项参数精准调控与多参数耦合协同优化,有效解决了传统气化工艺效率低、能耗高、工况不稳等核心问题。优化方案可全面提升碳转化率与合成气品质,降低生产能耗与设备故障频次,兼具经济性、稳定性与环保性。研究成果可为各类气化炉型的工业化参数调控提供技术借鉴,助力煤炭气化工艺绿色高效升级。

参考文献

- [1]孟晓光.煤气化技术发展趋势[J].煤炭加工与综合利用,2023,7(4):52-56.
- [2]马玉霞.大型煤气化技术在我国的应用现状及发展趋势[J].氮肥与合成气,2022,47(30):101-103.
- [3]王凯.煤炭气化发展及应用中的热点问题研究[J].化工设计通讯,2024,44(10):173-177.
- [4]赵枢娟.煤炭清洁利用发展模式与科技需求[J].能源与节能,2025,10(90):93-96.
- [5]原小静.现代煤气化技术及其煤种的适应性分析[J].山西化工,2022,31(3):135-138.