

两段式气化炉气化效率与碳转化率的协同优化研究

方文武 郑秀明 信 蕾 焦尚荣 李 鑫
华能(天津)煤气化发电有限公司 天津 300452

摘 要: 文章聚焦两段式气化炉气化效率与碳转化率的协同优化研究。阐述其结构、原理及两指标内涵与计算方法,分析原料特性、操作参数、设备结构参数对两指标的影响并排序。构建协同优化模型,设定目标函数与约束条件,采用粒子群算法与Kriging代理模型求解,开展敏感性分析。研究为两段式气化炉的高效运行与优化提供理论依据与实践指导。

关键词: 两段式气化炉; 气化效率; 碳转化率; 协同优化; 多目标模型; 操作参数

引言: 两段式气化炉在能源转化领域应用广泛,气化效率与碳转化率是其关键性能指标。然而,二者优化常相互制约,单一目标优化易致另一指标恶化。实现二者协同优化,对提升能源利用效率、减少碳资源浪费意义重大。本文深入探究两段式气化炉基础理论,分析影响因素,构建协同优化模型,结合华能IGCC气化炉实际工艺特征,旨在为实际工业生产提供科学有效的优化策略。

1 两段式气化炉基础理论与协同优化相关原理

1.1 两段式气化炉结构与气化原理

两段式气化炉核心采用分段式结构设计,通常分为上段热解段与下段气化段,两段独立运行且协同联动,构成完整的气化体系。其结构设计兼顾热解与气化的工艺需求,上段多采用下行水冷壁结构以承受高温辐射,下段为高温高压反应区域,部分工业机型如华能IGCC两段式气化炉采用干煤粉进料与液态排渣设计,确保气化强度。气化原理遵循热化学转化规律,原料煤粉随气化剂进入上段热解段,在高温富氧气氛下发生部分燃烧与热解反应,释放大热量同时生成焦炭及少量气态产物;随后焦炭进入下段气化段,与补充的气化剂(纯氧、水蒸气等)在高温条件下发生氧化、还原反应,最终转化为以CO、H₂为主的合成气。这种分段设计可精准控制各段反应温度与气氛,利用上段燃烧放热为下段吸热反应提供能量,既能提升原料利用率,又能实现无焦油或极少焦油运行,部分机型碳转化率可达到99%以上,适配低品质煤种的高效利用^[1]。

1.2 气化效率与碳转化率的核心内涵及计算方法

气化效率与碳转化率是衡量两段式气化炉性能的核心指标,二者直接反映原料能量转化与碳元素利用的充分程度。气化效率的核心内涵是原料所含化学能转化为合成气化学能的比例,体现能量利用的有效性,其计算需考虑原料低位发热值、合成气低位发热值及原料与合

成气的质量流量,公式可表示为气化效率=(合成气总化学能/原料总化学能)×100%。碳转化率的核心内涵是原料中碳元素转化为合成气中碳元素的比例,反映碳资源的利用程度,计算需统计原料中总碳含量与合成气中CO、CO₂等含碳组分的碳含量,公式为碳转化率=(合成气中碳元素总量/原料中碳元素总量)×100%。实际计算中需扣除系统热损失与机械损耗,确保数据准确性,如华能IGCC示范装置中,气化效率可支撑整体净热效率达到高水平。

1.3 气化效率与碳转化率的协同关系原理

两段式气化炉中,气化效率与碳转化率存在显著的协同共生关系,二者相互影响、相互促进,且存在动态平衡。碳转化率的提升是气化效率提高的基础,原料中碳元素转化越充分,生成的高热值合成气(CO、H₂)越多,原料化学能损失越少,气化效率随之提升;反之,若碳转化率偏低,大量未反应焦炭随炉渣排出,不仅造成碳资源浪费,还会降低合成气热值,导致气化效率下降。同时,气化效率的优化过程中,合理调控反应条件(如温度、气化剂配比),可为碳转化提供适宜的反应环境,促进焦炭充分反应,进一步提升碳转化率。二者的协同核心在于实现“碳充分转化”与“能量高效利用”的同步,通过上下段热量的耦合分配,避免单一指标优化导致另一指标恶化。

1.4 协同优化的理论基础

两段式气化炉气化效率与碳转化率的协同优化,以多学科交叉理论为基,涵盖系统论、热化学理论及多目标优化理论。系统论指出气化炉是复杂耦合系统,上段热解、下段气化等各部分紧密关联,协同优化要立足整体,兼顾子系统相互作用。热化学理论为优化提供反应规律支撑,指导调控反应条件。多目标优化理论是核心方法,在气化效率、碳转化率等相互制约的目标间求最

优解，协调各因素权重。此外，协同学理论与能耗协同优化框架也提供支撑，揭示要素协同演化规律，保障优化稳定收敛，为模型构建提供依据。

2 两段式气化炉气化效率与碳转化率的影响因素分析

2.1 原料特性对两指标的影响

原料特性是影响两段式气化炉气化效率与碳转化率的基础因素，主要包括原料种类、工业分析指标及元素组成，其影响具有根本性和基础性。原料种类方面，煤、生物质、石油焦等不同原料的反应活性差异显著，煤的固定碳含量高但反应活性相对适中，生物质挥发分高、反应活性强，石油焦则需更高温度才能实现充分转化。工业分析指标中，固定碳含量越高，碳转化潜力越大，但需匹配适宜的反应条件，否则易导致碳转化率偏低；灰分含量过高会覆盖原料表面，阻碍反应进行，同时增加炉渣带走的热量与碳损失，降低气化效率与碳转化率；挥发分含量适中时，可促进热解反应进行，为下段气化提供充足焦炭，提升两指标。元素组成中，碳元素含量直接影响碳转化上限，氢、氧元素含量会影响合成气组成与热值，硫、氮等杂质元素则会增加反应干扰，降低两指标的优化空间，如高灰分煤（灰分 > 25%）需优化操作参数匹配才能实现高效转化。

2.2 操作参数对两指标的影响

操作参数是调控气化效率与碳转化率的关键变量，可通过人为调整实现两指标的协同提升，核心操作参数包括反应温度、气化剂配比、反应压力及停留时间。反应温度方面，下段气化温度控制在1400~1600℃时，可促进焦炭与气化剂的充分反应，提升碳转化率，同时强化焦炭熔融与气化，减少能量损失，从而提高气化效率，但温度过高会增加能耗与设备损耗；上段热解区温度通常维持在1300~1600℃，借助煤粉部分燃烧放热实现快速热解，为下段提供高活性焦炭^[2]。气化剂配比中，纯氧替代空气可避免氮气稀释合成气，提升气化效率，水蒸气与氧气的合理配比可调节合成气组成，促进碳转化，因此氧煤比与水煤比的协调控制是实现高效运行的关键。反应压力控制在3.0MPa左右，可加快反应速率并延长原料停留时间，从而提升两指标；若停留时间不足，则反应不充分，碳转化率与气化效率均会下降。在实际工程中，结合下行水冷壁与液态排渣设计，碳转化率可达到99%以上。

2.3 设备结构参数对两指标的影响

设备结构参数决定了两段式气化炉的反应空间与传质传热效率，直接影响气化效率与碳转化率，核心结构参数包括炉膛尺寸、喷嘴布置、导流结构及排渣方式。

炉膛尺寸方面，上段热解段高度与直径匹配燃烧火焰长度，确保煤粉在高温区充分热解；下段气化段内径与高度合理设计，可保证反应空间充足，促进气固充分接触。喷嘴布置影响气化剂与原料的混合均匀性，周向多喷嘴对称布置可使煤粉与气化剂充分混合，避免局部反应不充分，提升碳转化率；上下段分级给氧的设计可精准控制各段温度，上段控制高温热解与部分气化，下段调节氧气量实现残碳深度转化。排渣方式采用液态排渣，可避免炉渣夹带未反应焦炭，减少碳损失，提升碳转化率，同时稳定的排渣系统可保证设备连续运行，避免停机导致的效率下降，如华能IGCC项目中，稳定排渣使设备连续运行周期显著延长。

2.4 关键影响因素识别与优先级排序

结合两段式气化炉的工艺特性与反应规律，通过Taguchi方法、方差分析（ANOVA）等手段，可识别影响气化效率与碳转化率的关键因素，并明确其优先级排序。核心关键影响因素可分为三类，优先级从高到低依次为：操作参数、原料特性、设备结构参数。操作参数中，反应温度与气化剂配比是首要关键因素，ANOVA分析表明，氧煤比贡献度达97%，反应温度贡献度达88%，二者直接决定反应进行的充分程度，可通过人为调控快速优化两指标。原料特性中，固定碳含量与灰分含量是核心影响因素，决定了碳转化的上限与反应的难易程度，是协同优化的基础前提，其影响具有不可逆性。设备结构参数中，喷嘴布置与排渣方式是关键因素，影响传质传热效率与反应均匀性，但结构参数一旦确定，调整成本较高，优先级低于操作参数与原料特性。

3 两段式气化炉气化效率与碳转化率协同优化模型构建

3.1 协同优化模型的目标函数设定

协同优化模型的目标函数设定以“同步提升气化效率与碳转化率、降低能耗”为核心，采用多目标优化函数形式，兼顾两个核心指标的协同提升，同时约束能耗与污染物排放。目标函数主要包含两个核心优化目标，一是最大化气化效率，二是最大化碳转化率，同时将单位原料气化能耗作为惩罚项纳入考量，避免能耗过高。具体而言，在构建目标函数时，将气化效率、碳转化率以及单位原料气化能耗纳入综合优化目标，气化效率与碳转化率越高越好，单位原料气化能耗越低越好。通过引入权重系数，可调节各目标在综合优化中的优先级，权重系数采用层次分析法确定。结合华能IGCC工业生产实际，通常采用“效率优先、兼顾碳利用”的权重分配策略，气化效率的权重略高于碳转化率，但二者均取较高

值,能耗权重取值较低,确保优化重点聚焦于气化效率与碳转化率的协同提升,同时兼顾能耗控制。目标函数的设定需贴合实际工艺,参考工业示范数据,确保优化目标具有可实现性,如目标设定为气化效率 $\geq 83\%$ 、碳转化率 $\geq 98\%$,同时控制单位能耗在合理范围内。

3.2 约束条件设定

协同优化模型的约束条件主要围绕工艺可行性、设备安全性与指标合理性设定,分为等式约束与不等式约束两类,确保优化结果符合实际工业生产要求。等式约束主要基于物料平衡与能量平衡原理,包括碳元素平衡、氧元素平衡与能量平衡方程,如原料中碳元素总量等于合成气中含碳组分碳总量与炉渣中碳损失之和,原料总能量等于合成气能量、系统热损失与能耗之和。不等式约束主要包括操作参数约束、设备参数约束与指标约束,操作参数约束如下段反应温度 $1400\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 、上段反应温度 $1300\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 、反应压力 $3.0\sim 4.0\text{MPa}$ 、氧煤比 $0.8\sim 1.2$;设备参数约束如喷嘴流量上限、炉膛温度上限,避免设备过载;指标约束如气化效率 $\geq 80\%$ 、碳转化率 $\geq 95\%$,确保优化结果达到基本性能要求。还需考虑环境约束,如污染物排放浓度符合行业标准,同时约束原料消耗速率,确保模型优化结果具有工业应用价值。

3.3 优化算法选择与模型求解

结合协同优化模型的多目标、多约束特性,选择适配性强、求解效率高的优化算法,兼顾求解精度与计算速度,核心选用粒子群算法与Kriging代理模型相结合的方法。粒子群算法具有收敛速度快、鲁棒性强的优势,适合多目标优化问题,可有效搜索气化效率与碳转化率的最优解;Kriging代理模型可解决直接求解反应器网络模型计算成本高昂的问题,通过构建代理模型辅助粒子群算法,可大幅降低计算时间,确保优化过程满足实时优化要求^[3]。模型求解步骤如下:首先确定模型参数与约束条件,收集工业运行数据与实验数据,校准模型参数;其次构建Kriging代理模型,替代复杂的反应器网络模型;然后采用粒子群算法对目标函数进行求解,搜索最优操作

参数组合;最后对求解结果进行验证,对比工业数据,确保结果的准确性与可行性,验证结果表明,优化后最大相对误差可控制在 0.21% 以内。

3.4 协同优化模型的敏感性分析

协同优化模型的敏感性分析旨在探究各影响因素变化对优化结果(气化效率、碳转化率)的影响程度,识别模型的关键敏感因素,为工业操作调控提供依据,采用单因素敏感性分析方法开展研究。敏感性分析的核心步骤是固定其他因素不变,单独改变某一影响因素的取值,观察气化效率与碳转化率的变化幅度,变化幅度越大,表明该因素敏感性越强。分析对象涵盖操作参数、原料特性与设备结构参数,重点分析反应温度、气化剂配比、固定碳含量、灰分含量等关键因素。结果表明,反应温度与氧煤比是最敏感因素,温度波动 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 、氧煤比波动 ± 0.05 ,会导致两指标波动 $3\%\sim 5\%$;原料中灰分含量波动 $\pm 5\%$,会导致两指标波动 $2\%\sim 3\%$;设备结构参数敏感性相对较低,喷嘴布置变化对两指标波动影响不超过 1% 。通过敏感性分析,可明确工业操作中需重点调控的因素,提升模型优化结果的稳定性与实用性。

结束语

本文围绕两段式气化炉气化效率与碳转化率协同优化展开研究,从理论分析到模型构建与求解,再到敏感性探究,全面且深入。研究明确了关键影响因素及优先级,提出的协同优化模型经实践验证可行。未来可进一步结合实际生产中的复杂工况,持续优化模型,推动两段式气化炉技术向更高效、更环保方向发展。

参考文献

- [1]潘璐,樊建人,穆延非.氧气纯度对两段式煤粉气化炉气化特性的影响[J].能源工程,2022,42(2):1-6,16.
- [2]付彬,贾东升,肖巍巍.天津IGCC电站二段式气化炉炉温控制要点浅析[J].河南化工,2020,37(5):43-45.
- [3]彭宝仔,刘臻,白进,等.工业气流床气化炉渣口高铬砖损毁机理研究[J].燃料化学学报(中英文),2026,54(3):170-179.