

基于煤质化验的煤炭气化工艺参数优化及经济效益分析

杨月霞（灵石县中煤九鑫焦化有限责任公司，山西 灵石县 031300）

摘要：煤质特性对煤气化工艺的碳转化率、气化效率具有决定性影响。文章系统性分析煤质化验指标与气化工艺参数之间的关系，通过设计实验方案，结合 Aspen plus 软件建模与粒子群算法，优化了煤炭气化工艺参数。结果表明，依据煤质化验数据优化煤气化工艺参数，有效提升了合成气产率，并在原料成本、能耗及运行稳定性方面取得较好的经济效益，为煤化工装置实现降本增效提供了技术路径。

关键词：煤质化验；煤炭气化工艺；参数优化；经济效益

中图分类号：TQ546

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)034-0064-03

Optimization of Coal gasification process parameters and economic benefit Analysis based on coal quality testing

Yang Yuexia (Lingshi County Zhongmei Jiuxin Coking Co., Ltd, Lingshi County Shanxi 031300, China)

Abstract: The characteristics of coal quality have a decisive influence on the carbon conversion rate and gasification efficiency of the coal gasification process. This article systematically analyzes the relationship between coal quality test indicators and gasification process parameters. By designing an experimental scheme and combining Aspen plus software modeling and particle swarm optimization algorithm, the coal gasification process parameters are optimized. The results show that optimizing the coal gasification process parameters based on the coal quality test data has effectively increased the syngas production rate, and achieved good economic benefits in terms of raw material cost, energy consumption and operational stability, providing a technical path for coal chemical plants to achieve cost reduction and efficiency improvement.

Key words: Coal quality testing; Coal gasification process; Parameter optimization; Economic benefits

现有煤炭探测中，低阶煤占比较高（超过 55%），存在水分高、煤化程度低、挥发分高的特点，导致其气化过程碳转化率波动大、能耗高，主要是煤质特性与工艺参数不匹配。煤质化验作为工艺设计的根本依据，以往仅考虑单一参数影响，难以实现装置最佳工况。因此，煤炭气化工艺应立足煤质化验突破单目标局限，做到碳转化率、有效气产率协同优化，推动煤炭清洁转化精细化发展。

1 煤质化验与气化工艺基础

煤炭气化工艺主要是利用水蒸气、氧气、高温等特定环境，将固态煤通过燃烧、气化、热解化学物理反应转化为 H₂、CO 为主的合成气工艺。其工艺选择及操作参数对合成气品质、气化效率具有直接影响^[1]。

1.1 煤质化验指标

1.1.1 煤工业分析指标影响

灰分：煤灰分是指煤外来矿物质与内在矿物质完全燃烧的固态残留物，化学组成包括钾、镁、钙、铁、铝、硅等元素。根据“离子势”可将灰分为酸碱性，酸性包括 Al₂O₃、SiO₂、TiO₂，碱性包括 K₂O、Na₂O、MgO 等，通常碱性组分越多，其熔融温度越低；反之，熔融温度越高。

水分：煤水分是指内在结晶水与外在水分，前者凝聚于煤颗粒毛细孔内难以除去，后者常温下即可去

除^[2]。煤内水分提高，将增加 O/C 原子比，湿润性亲水基团随之增多，使得煤更易成浆。浆料浓度低还会增加蒸发水消耗潜热，降低气化效率与气化强度。

挥发分：煤挥发分是隔绝空气将其加热后，逸出的全部液态与气态产物，由一氧化碳、氢气、碳氢化合物等构成。挥发分高，煤化度低，越有助于气化反应，但是在固定床气化过程中，热解产生的大量气体和焦油，会影响固定床气化效果，需处理焦油。在高温气化床中裂解迅速，将影响初期热平衡与反应进程。

1.1.2 煤元素组成影响

煤质化验中，元素分析能够确定煤基本成分度量，确定煤气化反应时各种有机成分量。具体如下：①碳、氢作为煤有机高分子主要元素，含量高可降低煤耗量；②氧元素以有机态存在，氧含量低时需添加气化剂供氧，精确控制 O/C 比，O/C 比过低则会降低碳转化率，增加残碳值，导致熔渣的黏度上升，堵塞下降管与渣口；③硫元素以有机硫、硫铁矿形式存在，占比在 20%~80% 范围内，属于有害杂质，能够腐蚀设备、使钢铁热脆。在气化工艺中，硫元素将生成一硫化碳与硫化氢，含量过高将影响后期脱硫与煤气净化。

1.2 气化工艺参数

气化工艺中，不同气化温度、操作压力、氧煤比、蒸汽煤比、原料粒度均会影响工艺效果。例如，气化

温度影响化学平衡、反应速率等，需根据煤反应活性与灰熔点进行设计；操作压力适当提高可增加反应速率与反应器容积负荷，有助于后续气体压缩合成，但对设备密封与材质要求较高。

1.3 煤质化验与气化工艺参数关系

由于煤种煤质各有不同，需采取不同气化工艺参数。例如，高灰熔点煤使用高气化温度，对应高氧煤比；高水分煤应强化干燥工艺，提高气化温度，以补偿蒸发潜热；高灰分煤应根据排渣量与热效率损失情况，适当调整排渣模式与炉型。

2 基于煤质化验的煤炭气化工艺参数优化实证分析

2.1 实验设计

煤气化过程首先经历煤的热解，释放出高反应性的挥发分，生成焦炭；随后，通过气体与焦炭的非均相反应以及气体组分间的均相反应，完成整个气化过程。以 44.43% 固定碳、39.02% 挥发性物质、1.3% 水分、15.25% 灰分的煤样为例，各元素含量为 58.58%C、4.25%H、1.26%N、19.89%O、0.77%S、热值 23.23MJ/kg。选用流化床汽化炉实验装置，外部配置旋流器与冷凝器，以大气为输入空气，利用高精度转子流量计控制气化剂，如图 1 所示。

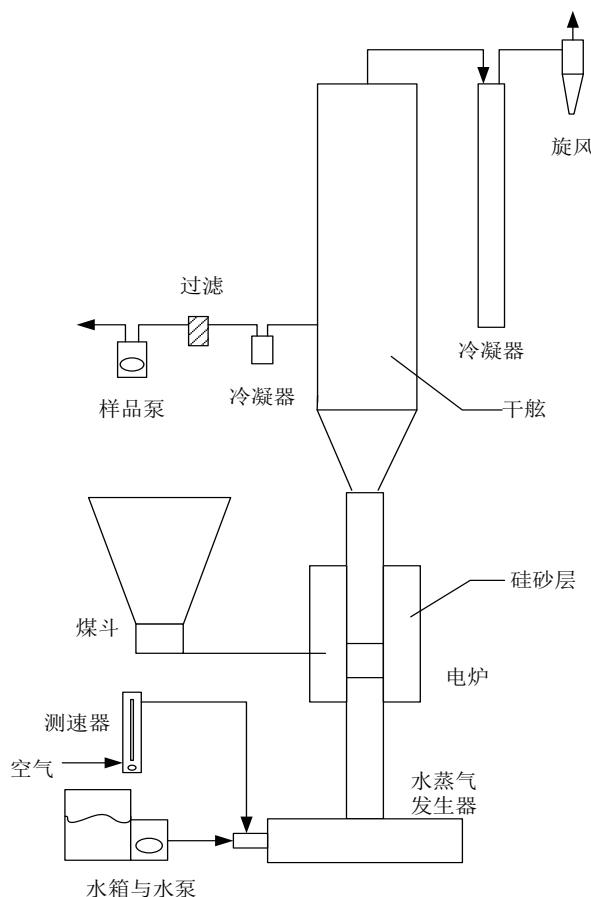


图 1 煤气化工艺实验装置示意图

该实验考虑操作、测量便利性，选择 3 个操作变量，即蒸汽与氧气质量比、操作压力、煤流量。在不同试验方案中，考虑流化气速易受合成气化剂流量影响，即表观气速超过 4 倍最小流化床速度，应减少停留时间，避免对流体动力学造成影响。以此恒定氧气 - 煤质量比控制为 0.75，分析不同试验方案的碳转化率、CO₂、H₂、CO、气化效率参数及合成气质量。以中心复合设计方式，设计多水平、多因素试验方案，考察各变量对转化率、CO₂、H₂、CO、气化效率参数及合成气质量的影响^[3]。

2.2 模型构建与验证

根据煤气化特征，利用 Aspen plus 软件建立包含热解、燃烧、气化及分解等关键步骤的模拟模型。根据中心复合设计，开展仿真试验 6 次，结果见表 1。

表 1 3 个操作变量影响合成气质量

序号	压力 /bar	煤流量 / (g/s)	蒸汽 / 氧气 (质量比)	摩尔分数百分比			碳转化率 / %	气化效率 / %	H ₂ / CO
				CO	H ₂	CO ₂			
1	10	0.063	0.5	0.1427	0.1149	0.1306	91.57	56.50	0.81
2	10	0.036	1	0.1215	0.1512	0.1491	93.61	61.17	1.23
3	30	0.0495	0.5	0.1448	0.1172	0.1300	93.79	63.92	0.81
4	30	0.036	0.75	0.1322	0.1352	0.1393	95.68	61.37	1.01
5	50	0.063	1	0.1119	0.1419	0.1557	94.33	58.98	1.27
6	50	0.036	1	0.1243	0.1502	0.1487	96.41	62.94	1.19

利用 Kriging 法建立煤气化模型，根据中心抽样设计法确定初始样本，将其输入 Aspen plus 获得实验值。之后，将仿真实验值输入 JMP 内，利用自带建模法建模，省去繁琐代码。合成气有效气体以 H₂、CO 为主，其余气体含 CO₂ 量高。考虑气化效率、碳转化率对合成气质量影响较大，重点针对 H₂、CO、CO₂ 及效率指标，按照表 1 数据，构建 Kriging 模型。并验证模型质量，查看其精度是否满足要求，实验数据如表 2。模型验证结果表明，预测值与仿真实验值最大误差为 3.02%，低于 5%，满足精度要求。

表 2 预测与实际值比较

CO 值		CO ₂ 值		H ₂ 值		气化效率 / %		碳转化率 / %	
预测	实际	预测	实际	预测	实际	预测	实际	预测	实际
0.129	0.128	0.143	0.143	0.132	0.136	58.45	57.66	92.75	92.81
0.136	0.135	0.143	0.143	0.137	0.137	60.43	62.72	94.96	96.49
0.129	0.129	0.142	0.142	0.132	0.131	58.08	59.96	92.37	94.45
0.136	0.131	0.142	0.142	0.137	0.131	60.02	62.00	92.83	95.85

2.3 优化模型构建

煤气化目标以获得有效气体为主, H_2 、CO 均是有效合成气成分, 属于多目标优化, 应构建多目标优化模型。基于粒子群优化算法 (PSO, Particle Swarm Optimization), 假设 D 维搜索空间 n 个粒子构成 1 个种群, 各粒子 i ($i=1, 2, \dots, n$) 看作搜索空间 1 点, 由 2 个向量 (速度向量、位置向量) 代表其运动状态, 以群体极值、个体极值更新粒子速度、位置, 不断迭代, 完成参数优化。具体步骤如下: ① 初始化粒子速度、位置信息, 设置相对参数; ② 基于目标函数, 确定全部粒子适应度; ③ 对比适应度大小, 明确个体全局最优与个体最优, 持续更新粒子位置、速度; ④ 判断迭代次数与最小误差是否满足终止条件, 满足则停止搜索。

3 工艺参数优化建议

3.1 动态调控操作参数

煤质化验中, 不同煤样灰熔点不同, 为保证排渣顺利, 减少能耗, 需优化温度区间, 如果煤质产生波动, 如灰熔点、灰分变化, 则动态调整设定温度点。而压力选择中, 需在设备允许范围内, 提高压力至最高值, 提高容积效率与反应速率, 减少后续压缩能耗。

3.2 基于煤质特性调整工艺

不同煤质特性下, 应适应性调整工艺。例如, 高灰熔点、高灰分煤, 保证排渣基础上, 提高气化温度, 实现充分碳转化; 增加氧煤比, 补偿高灰分反应活性与热损失。高水分煤应加强原料预处理, 减少煤入炉水分, 降低蒸发潜热消耗, 无法充分干燥, 增加氧煤比, 或减少蒸汽煤比, 维持炉温^[4]。

4 经济效益分析

煤气化作为煤化工的关键环节, 生产工艺参数的优化不仅影响合成气产率与气化效率, 更直接关系到装置运行的经济性。因此, 本文依照煤质化验数据, 通过优化气化工艺参数, 实现了碳转化率与有效气产率的协同提升, 进而带来了显著的经济效益。

第一, 合成气产率的提升一定程度上增加了产品的价值。通过优化蒸汽与氧的质量比、操作压力与煤流量等关键参数, 使得合成气中的 H_2 与 CO 的摩尔分数显著提高。以合成气的装置每年生产 10 万 t 为例, 若 H_2 与 CO 比值提高 0.1, 可提升下游甲醇或费托合成等工艺的原料适配性, 这样预计年增产值约 300–500 万元。此外, 碳转化率由 91% 提升至 96% 以上, 相应的原料煤的利用率也得以提升, 残碳率下降, 降低了原料成本与固废处理费用。

第二, 煤炭气化工艺参数优化后, 相应的工艺能耗与运行成本降低。通过将高水分煤在入炉前进行干燥预处理, 可减少蒸发潜热消耗, 降低氧耗与蒸汽用

量, 预计每吨煤节约热能约 0.5–0.8GJ。同时, 提高操作压力至设备允许上限, 可增强反应速率并减少后续气体压缩能耗, 这样综合能耗下降约 5%–8%。以某中型气化装置为例, 年耗煤量约 50 万 t, 优化后年节约标准煤约 2 万 t, 折合成本约 600 万元。

第三, 优化后的设备运行的稳定性与工作寿命提升带来间接经济效益。通过合理调整生产工艺的温度与氧煤比来适应不同灰熔点与灰分煤种, 能有效降低接渣或堵管等故障引发的停机率, 进而提高装置运转率。假如, 每年设备停机率时间减少 3–5 天, 可以提升年产能 2%–3%, 同时还能降低设备的维修与零件更换成本。

第四, 通过优化生产工艺参数后, 装置能够适应的煤种增多, 这样增强了企业对原料的选择灵活性。通过对煤质化验与工艺参数的匹配, 企业可以科学采购一些中低阶廉价煤种, 通过对工艺参数与配煤的调整实现高效气化, 这样可以降低约 10%–15% 的原料成本, 提高企业经济效益。

综上所述, 基于煤质化验的工艺参数优化不仅在技术上提升了气化效率, 更在经济效益上实现了降本、增效、提质的多重目标, 为煤化工企业实现清洁高效转化提供了可行的技术路径与经济支撑^[5]。

5 结论

本研究通过分析煤质特性优化气化工艺, 系统性解决气化装置中“参数–煤质”不匹配问题。根据实证结果表明: 煤质化验能够开展煤质工业分析与煤元素组成, 结合气化工艺参数, 确定煤种煤质各有不同, 需采取不同气化工艺参数。针对不同煤质, 可通过动态调控操作参数、立足煤质特性调整工艺的方式, 以科学配煤提高气化经济性。

参考文献:

- [1] 汪凌霞, 周泽, 金黎黎, 等. 贵州贫煤煤炭地下气化工艺参数研究 [J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(10):6-10.
- [2] 严巍, 王潇, 王军委, 等. 基于统计过程控制的干粉气化炉新煤种试烧效果分析 [J]. 煤炭工程, 2023, 55(12):173-177.
- [3] 周卫博. 太原煤气化东河煤矿煤岩煤质特征综合研究 [J]. 地下水, 2022, 44(05):149-151.
- [4] 高智武, 李亚民, 张姣姣. 煤制气技术现状及工艺探究 [J]. 技术与市场, 2021, 28(09):127+129.
- [5] 徐国琼, 李裕岳. 煤的固定床气化技术研究与发展趋势 [J]. 广州化工, 2025, 53(07):8-10.

作者简介:

杨月霞 (1983-), 女, 山西灵石县人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 煤质化验。