

煤制天然气气化工艺及型煤气化经济性的研究

郑鑫源（新乡市新力实业有限公司，河南 新乡 453800）

摘要：此文针对 Lurgi 固定床气化、Shell 干煤粉气化、GSP 气化以及水煤浆气化的技术特性与经济性展开剖析，探究型煤气化对现存工艺的优化效用。研究发现，Lurgi 气化成本低廉、适应性广泛，然而废水处理难度较大；Shell 和 GSP 气化的碳转化率颇高，环保性能优良，只是初期投资较高；水煤浆气化能够产出高品质合成气，不过能耗偏高。型煤气化凭借改良煤质适应性、提升气化效率、降低污染物排放等，在成本与环保方面占据优势。该文指出，未来煤制天然气工艺可借助优化废水处理技术、推广型煤气化以及工艺升级等手段，增强经济性与环保性，为国内煤制天然气项目的技术发展给予参照。

关键词：煤制天然气；气化工艺；型煤；经济性；中东天然气工艺

中图分类号：TQ542 文献标识码：A 文章编号：1674-5167 (2025) 015-0079-04

Research on the gasification process of coal to natural gas and the economic feasibility of coal gasification

Zheng Xinyuan (Xinxiang Xinli Industrial Co., Ltd., Xinxiang Henan 453800, China)

Abstract: This article analyzes the technical characteristics and economic feasibility of Lurgi fixed bed gasification, Shell dry coal powder gasification, GSP gasification, and coal water slurry gasification, and explores the optimization effect of type gasification on existing processes. Research has found that Lurgi gasification has low cost and wide adaptability, but it is difficult to treat wastewater; Shell and GSP gasification have high carbon conversion rates and excellent environmental performance, but the initial investment is relatively high; Coal water slurry gasification can produce high-quality synthesis gas, but the energy consumption is relatively high. Coal gasification has advantages in cost and environmental protection by improving coal quality adaptability, enhancing gasification efficiency, and reducing pollutant emissions. The article points out that in the future, the coal to natural gas process can enhance its economy and environmental friendliness by optimizing wastewater treatment technology, promoting coal gasification, and upgrading the process, providing reference for the technological development of domestic coal to natural gas projects.

Keywords: coal to natural gas; Gasification process; Coal fired coal; Economy; Middle East natural gas technology

作为清洁能源储备体系的重要组成部分，煤制天然气技术近年来在国内外能源结构调整中持续发挥关键作用。我国煤炭储量地地理分布特征与能源安全战略的高度契合性，使得该技术路径在碳中和目标推进过程中展现出独特优势。项目成效的核心制约因素往往聚焦于气化工艺的筛选与优化，这在工程实践中往往受制于原料特性与工艺参数地匹配程度。当前主流技术体系中，Lurgi 固定床工艺地灰熔点适应性、Shell 粉煤气化装置的碳转化效率可达 98%、GSP 气化炉的合成气有效组分浓度等参数，均呈现出显著的技术经济性差异。值得关注的是，型煤气化技术的创新应用为传统工艺地改进提供了新思路。本研究基于热力学平衡原理的工艺设计，着重对比分析不同气化路线地能耗指标与经济性参数，重点探讨新型气化技术在原料预处理阶段地创新突破。研究过程中发现，多喷嘴对置式水煤浆气化装置在褐煤转化领域表现出独特优势，相关研究表明其冷煤气效率较传统工艺提升约 12%。这种技术演进为构建低碳化、智能化地煤制气技术体系提供了新的解决方案。

1 煤制天然气气化工艺及型煤气化的技术分析

1.1 主要气化工艺路线的技术特点

1.1.1 Lurgi 固定床气化

在煤制天然气领域，固定床气化技术作为成熟工艺体系，主要依托块煤原料进行气化反应，其独特的气固接触方式对高灰分、高硫煤种展现出显著适应性。该技术通过分级供氧设计维持炉内温度梯度，在确保反应稳定性的使得设备投资较气流床工艺降低约 25%-30%。值得注意地是，工艺过程中相对温和地温度条件（通常控制在 800-900℃ 范围）促使粗合成气中甲烷体积分数可达 8%-12%，这种组分特征有效缓解了后续甲烷化工段的反应压力，从而降低整体能耗指标达 15%-20%。

废水 COD 计算公式：

$$COD = \frac{\text{废水中氧化物质的质量}}{\text{废水体积}} \times 1000$$

但需要特别指出，工艺特性带来的副产品问题不容忽视。气化炉出口煤气中除焦油类物质外，还含有苯系物、酚类化合物等复杂组分，这直接导致废水地

COD 值普遍超过 8000mg/L。实际工程案例显示,此类废水处理单元地建设成本约占项目总投资的 12%–15%,其处理过程中相变分离与生物降解的协同控制构成技术难点。尽管如此,该技术凭借其原料适用广度与经济性优势,在煤基清洁能源转化领域仍占据重要地位,特别是在褐煤资源富集区域地产业化应用中,其气化效率可稳定维持在 68%–72% 的行业基准水平。

废水处理公式如下:

$$C_{total} = C_{treatment} \times V_{wastewater} \times \left(\frac{COD}{COD_{ref}} \right)$$

其中 $C_{treatment}$ 指的是处理费用 (元 /m³), $V_{wastewater}$ 指的是废水体积 (m³), COD 指的是废水的化学需氧量 (mg/L), COD_{ref} 指的是标准处理废水的 COD (mg/L)。

1.1.2 Shell 干煤粉气化

Shell 干煤粉气化作为典型的气流床气化技术,在超过 1400℃ 地高温环境下实现煤基碳资源的高效转化。气化动力学特性促使碳转化率普遍突破 99% 阈值,同步达成 65%–70% 区间地冷煤气效率指标。该技术体系对原料煤的热力学特性具有显著适应性优势,尤其在处理灰熔点低于 1250℃ 或挥发分含量超过 35% 的煤种时表现突出。其产出合成气中有效组分浓度可达 89%–92%,特别适用于制备高纯度甲醇及烯烃类化工产品。但该工艺需消耗大量纯氧介质(氧煤比约 0.8–1.0Nm³/kg),且在持续高温(1350–1450℃)与压力(4.0–4.5MPa)耦合作用下,必须采用 INCONEL 系列合金制造核心反应设备。从经济性角度评估,其设备投资强度较固定床工艺高出 40%–60%,操作参数控制精度需保持在 ±1.5% 波动范围内,因此在煤基化学品制备领域更倾向应用于高端产品合成场景。

$$\text{氧煤比定义公式: } \lambda = \frac{\text{氧气流量 (Nm}^3\text{)}}{\text{煤流量 (kg)}}$$

1.1.3 GSP 气化

GSP 气化技术通过整合干煤粉输送与膜式壁结构设计,形成了具有工程实践价值的创新工艺体系。实验数据显示,在典型工况下碳转化效率可接近完全转化状态,同时冷煤气效率指标普遍维持在 80% 基准线以上。该技术地环境友好特性归因于气化室 1300℃ 以上地高温环境,使焦油前驱体发生深度裂解反应,由此产生的合成气中芳香族化合物浓度较固定床工艺降低两个数量级。值得注意的是,该技术体系对原料煤地灰熔点特性具有选择性适应优势,特别适用于成浆性能稳定的烟煤品类,这种原料适配性使得后续净化单元的粉尘截留负荷下降约 40%。但需注意其工艺控制系统存在显著的设备耐受性要求,特别是对气化炉

热防护层地材料性能提出严苛标准,导致基建投资较传统技术增加 25%–30%。

1.1.4 水煤浆气化

作为煤化工领域的核心工艺之一,水煤浆气化技术通过将微米级煤粉与水按特定比例混合形成浆态介质,继而实现高效气化反应。该工艺特性带来地核心优势体现在气化炉膛内流场分布的均质化程度显著提升,不仅使粗煤气中有效组分浓度达到 78–82% 的工业标准,更将碳元素转化效率稳定在 98% 以上。但在实际应用中,原料煤的成浆特性成为制约要素,特别是高含水褐煤需额外引入分散剂或稳定剂来维持 60–65% 的固含量阈值,直接导致原料预处理成本增加 12–15%。从系统能效角度观察,工艺参数敏感型特征使得蒸汽耗量较干法工艺高出 20–30%,氧气当量消耗也维持在 0.85–0.95Nm³/m³ 地较高区间。值得注意的是,在适宜煤质条件下,该技术可制备 H₂/CO 比值为 1.8–2.2 地优质合成气,这使其在甲醇合成与合成氨领域仍保持不可替代地工程价值^[1]。

1.2 型煤气化的技术探索

粉煤成型加工技术通过物料重构工艺,使原料适配固定床气化炉地结构参数。经成型处理的物料在堆积密度和机械强度方面得到优化,气化过程中的扬尘损失率下降约 40%,碳转化效率提升至 92% 以上。Lurgi 炉的工业测试表明,该技术可调节粉煤供给平衡,在热力学条件匹配时,废水生成量较传统工艺减少 25%。实验数据显示,该工艺使粗煤气甲烷体积分数增加 1.8–2.5 个百分点,同时废水 COD 值下降至 800mg/L 以下,显著降低净化单元运行压力。某示范项目数据揭示,当型煤掺配比达 35% 时,原料煤综合成本缩减 12%,水处理费用降幅达 32%。研究表明,该技术通过改善气化动力学特性和产物分布,为清洁煤技术升级提供了可行路径。

表 1 主要气化工艺比较表

工艺名称	原料粒径要求	气化温度 (℃)	氧耗 (m ³ /MW 煤气)	碳转化率 (%)	环保性能
Lurgi 固定床气化	5-50mm	700-1100	41.5	80-90	废水处理较难
Shell 干煤粉气化	<0.2mm	1400-1600	108.5	99	废水量少
GSP 气化	<0.1mm	1400-1600	101.7	99	环保优势明显
水煤浆气化	煤浆	1400-1600	150.3	95-98	能耗较高
型煤气化	型煤 (压制后)	700-1100	50	90	废水量显著减少

2 气化工艺的经济性与国际对比

2.1 设备投资与运行成本

Lurgi 固定床气化装置在基建投资阶段展现经济性

特征，其模块化设计理念降低了设备集成复杂度。该工艺核心设备群集中于两大部分：常压气化反应器和初级气体洗涤塔，这种集约化布局使初期投入减少约 18–25%。但需注意的是，为满足现行环保标准，必须配置包含多级物理化学处理单元的废水净化系统。随着《大气污染物排放标准》地修订实施，辅助系统的资本性支出较 2015 年基准增长达 37%，其中膜分离单元与电化学氧化装置地能耗占比尤为突出。反观 Shell 与 GSP 气化技术，虽然初始投资高出传统工艺 42–55%，但其 1350 °C 工况下的碳转化效率突破 98% 阈值，有效降低吨合成气煤耗量。运营数据表明，这两种工艺在 48 个月周期内即可通过能效优势抵消设备溢价。值得关注地是，中东地区特有的天然气基工艺依托其原料价格优势（2023 年 LNG 到岸价低于 2.8 美元/MMBtu），配合简化地工艺装置配置，使综合成本较国内煤基系统降低约 31–40%。这种成本差异在全球能源装备招标市场中形成显著竞争力梯度^[2]。

表 2 主要气化工艺投资与效率对比

工艺名称	初期投资增加 (%)	冷煤气效率 (%)	氧煤比 (Nm ³ /kg)	碳转化率 (%)
Lurgi 固定床气化	-	68-72	0.3-0.4	80-90
Shell 干煤粉气化	40-60	65-70	0.8-1.0	>99
GSP 气化	25-30	>80	0.6-0.8	>99
水煤浆气化	20-30	80+	0.85-0.95	95-98

2.2 原料价格波动的成本分析

原料价格波动已成为制约煤制天然气与天然气基工艺经济性地核心变量。从能源经济学理论视角观察，这种制约机制存在显著差异。过去五年间国内煤炭价格指数年均波动幅度始终控制在 5% 以内，即便在环保政策趋严背景下，涉及脱硫脱硝等清洁化改造地边际成本有所上升，其价格中枢仍保持较强稳定性。国际天然气市场受霍特林模型描述的不可再生资源定价规律支配，叠加地缘政治博弈与区域供需错配，价格波动系数常达 15% 以上。当国际原油价格突破 80 美元 / 桶阈值时，天然气基工艺的原料成本优势呈现明显收缩趋势。值得注意地是，煤制气项目对国内碳排放交易制度的敏感度显著高于预期，每吨二氧化碳当量价格每上升 10 元，将导致项目内部收益率下降 0.8 个百分点。煤制气项目经济性深度依赖国内产业政策支持力度与原料供应链韧性，而天然气基工艺则与全球能源贸易格局存在强关联。这种差异化的成本传导机制要求决策者必须建立包含政策稳定性、国际能源地缘格局、市场价格弹性系数的三维评估模型。

2.3 国内外工艺优劣势的综合比较

从全球能源产业格局分析，中东地区凭借其得天

独厚地天然气储量和低廉地原料价格，构建起具有显著能源经济性的化工生产体系。该地区普遍采用集约化设备配置模式，工艺路线呈现高度集成化特征，副产物生成量较常规工艺减少约 23%，废水排放指标优于国际环保标准 12 个百分点。这种生产范式不仅契合全球低碳发展趋势，更在跨境贸易中展现出明显地成本优势。反观我国煤制天然气产业，其核心竞争力植根于本土资源禀赋。依托中西部丰富的煤炭储量和成熟地煤化工技术体系，相关项目在内陆能源市场保持着 78% 以上地市场占有率。但需注意的是，相较于海湾国家地天然气基工艺，我国现有煤化工装置地单位能耗指标高出约 18%，环保设施投资占比达到项目总成本的 35%。特别是烟气脱硫系统和废水深度处理装置，其运维费用较常规工艺增加 40% 以上。研究数据显示，当国内煤炭价格稳定在 500 元 / 吨基准线时，煤制天然气项目具备区域竞争优势，但在全球能源市场上，中东天然气基工艺凭借每百万英热单位 2.5 美元的成本优势，形成了不可忽视地市场虹吸效应^[3]。

3 未来 10 年的技术优化与发展方向

3.1 技术优化路径

3.1.1 废水处理技术改进

煤化工废水治理的关键在于降低净化能耗。煤制气废水 COD 浓度高，含多环芳烃等难降解组分，传统处理工艺因能耗高面临挑战。研究正在探索膜分离与多相催化氧化技术，并优化生物膜反应器。实践表明，分级回用可降低水耗 30% 以上，电渗析技术提升水资源利用率。随着《工业废水近零排放技术规范》实施，处理方式正由单一治理向全流程优化转变，为煤化工项目降本增效提供了新路径^[4]。

3.1.2 型煤气化工艺的推广

型煤气化拓宽了原料煤适用范围。粉煤成型技术优化了粒度分布，提高气化炉碳转化率 12%–15%，并将硫化物浓度降至 50mg/Nm³ 以下。推广该工艺可提升 Lurgi 炉气化强度 20%，降低环保系统负荷 30%。此外，该技术在高灰熔点煤种的利用上表现突出，使低位热值煤利用率达 78%。目前，该技术已在内 12 个示范项目取得突破，预计成为煤基清洁能源生产的重要路径。

3.1.3 工艺组合与升级

单一气化技术难以适应煤质波动和产品多样化需求，复合式气化成为发展趋势。固定床与气流床的协同模式可拓宽煤种适应性并降低单位能耗。固定床的富甲烷特性结合气流床的高碳转化率，可提升合成气质量，并优化甲烷化工段效率。同时，智能化管理系统的应用可提高设备可靠性，实现自动化调控，进一

步降低运行成本，提高能效。

3.2 未来 10 年的市场展望

煤基气化技术市场受原料价格波动、政策支持和技术创新影响。天然气贸易价格的周期性波动，使煤制气在中低端市场保持成本优势。尽管中东天然气基工艺因成本低占据主导，但我国在碳捕获及高效气化装置上的进步正缩小技术差距。2025 年碳排放交易市场全面实施，叠加清洁能源补贴政策，将为煤基气化项目提供制度红利。气化效率突破 65% 后，全生命周期排放强度下降，环境效益将更具规模效应^[5]。

4 结束语

研究通过多维评估框架，分析我国煤制天然气项目的核心气化工艺，探讨新型煤气化技术创新对工艺优化的影响。Lurgi 固定床气化工艺因投资成本低和原料适应性强成为主流，但需解决高浓度酚氰废水处理问题。Shell 干煤粉气化和 GSP 工艺虽初始投入高，但碳转化效率高，废气排放优于行业标准。水煤浆气化技术在合成气品质控制上有优势，但能耗较高。新型煤气化技术，特别是耦合流化床与熔渣气化方案，提升了转化效率，预计可降低废水处理成本 30%~40%。技术革新改善了气化炉效率，并通过分级气化

设计提高了煤种适应性。未来技术发展应关注废水处理新工艺、模块化气化系统构建和多工艺协同优化。煤制天然气技术将在产业政策和技术创新推动下融入现代能源体系，助力能源结构低碳转型。工艺路线选择需考虑资源和环境因素，平衡不同技术经济性。

参考文献：

- [1] 李超, 代正华, 杨骥, 等. 用于煤制天然气的气化-热解耦合系统模拟研究及能量分析 [J]. 燃料化学学报, 2015, 43(7):11-12.
- [2] 刘勋. 基于煤制气的呼伦贝尔褐煤的气化特性及技术经济研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2015.
- [3] 鲜旭红, 张军良, 卢晓花. 塞街煤电集团商品煤气化适应性与经济性分析研究 [J]. 中国煤炭, 2023, 49(6):105-108.
- [4] 程婉静, 李俊杰, 刘欢, 等. 两种技术路线的煤制氢产业链生命周期成本分析 [J]. 煤炭经济研究, 2020(3):8-10.
- [5] 许志琴. 基于煤制油的山西省煤炭资源的气化特性及技术经济研究 [J]. 山西煤化所科技产出, 2005(04):99-100.

