

# 固定床碎煤加压气化技术在我国的发展历程、 实践应用与发展趋势

杨建荣, 武建军, 高振楠, 杨振华  
国能新疆煤制气有限公司, 新疆 昌吉 831100  
DOI:10.61369/ME.2024100009

**摘 要 :** 煤炭是我国的基础能源和重要战略资源。推进煤炭清洁高效利用, 既是立足我国“富煤、贫油、少气”能源禀赋的现实选择, 也是带动传统能源产业链升级、保障国家能源安全的关键路径, 对支撑社会经济可持续发展具有重大意义<sup>[1-2]</sup>。

煤气化作为煤炭清洁高效利用的核心技术, 是煤基产业链的“龙头”环节, 支撑煤制大宗化学品(合成氨、甲醇、乙二醇、烯烃等)、煤制液体燃料(汽柴油)、煤制天然气(SNG)等重要产业<sup>[3]</sup>。我国《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》提出“实施能源资源安全战略”, 要求“科学做好煤制油气战略基地规划布局和产能储备管控”<sup>[4-5]</sup>。在此背景下, 煤气化技术作为煤制油气过程的核心单元, 其创新突破至关重要。

我国煤气化技术发展历经三个阶段: 一是技术引进期(20世纪50-90年代), 为满足化肥与城市燃气需求, 先后引进Lurgi加压固定床气化技术和德士古水煤浆气化技术。二是自主突破期(21世纪初), 通过国家级科研攻关, 实现大型煤气化技术国产化“零的突破”。三是创新引领期(近年), 在基础研究、工艺开发、装备制造、工程应用及数字化领域全面进步, 完成从技术“跟跑”“并跑”到部分“领跑”的跨越。

本文聚焦适用于煤制天然气的固定床碎煤加压气化技术, 系统梳理其发展脉络, 剖析已投产煤制气项目中气化装置的运行瓶颈与根本成因, 提出针对性优化方案, 并基于低碳化、智能化转型需求, 对该技术的未来发展趋势进行展望。

**关 键 词 :** 煤气化技术; 气化炉处理; 能源; 环保

## The Development History, Practical Application and Development Trend of Fixed-Bed Crushed Coal Pressurized Gasification Technology in China

Yang Jianrong, Wu Jianjun, Gao Zhennan, Yang Zhenhua  
Guoneng Xinjiang Coal-to-Gas Co., LTD., Changji, Xinjiang 831100

**Abstract :** Coal is a fundamental energy source and an important strategic resource in China. Promoting the clean and efficient utilization of coal is not only a realistic choice based on China's energy endowment of "abundant coal, scarce oil and limited gas", but also a key path to drive the upgrading of the traditional energy industry chain and ensure national energy security. It is of great significance for supporting the sustainable development of the social economy<sup>[1-2]</sup>.

Coal gasification, as a core technology for the clean and efficient utilization of coal, is the "leading" link in the coal-based industrial chain, supporting important industries such as coal-to-bulk chemicals (synthetic ammonia, methanol, ethylene glycol, olefins, etc.), coal-to-liquid fuels (gasoline and diesel), and coal-to-natural gas (SNG)<sup>[3]</sup>. China's "Outline of the 14th Five-Year Plan and Long-Range Objectives Through the Year 2035" proposes to "implement the energy and resource security strategy", and requires "scientifically carry out the planning and layout of strategic bases for coal-to-oil and gas and the control of production capacity reserves"<sup>[4-5]</sup>. Against this backdrop, as the core unit of the coal-to-oil and gas process, the innovation and breakthrough of coal gasification technology are of vital importance.

The development of coal gasification technology in China has gone through three stages: The first stage was the technology introduction period (1950s - 1990s), during which Lurgi pressurized fixed-bed gasification technology and Texaco water-coal slurry gasification technology were successively introduced to meet the demands of fertilizers and urban gas. The second period was the independent breakthrough period (early 21st century), during which, through national-level scientific research efforts, a "zero breakthrough" was achieved in the domestic production of large-scale coal gasification technology. The third period is the innovation-driven period (in recent years), during

which comprehensive progress has been made in basic research, process development, equipment manufacturing, engineering application and digitalization, achieving a leap from "following" and "keeping pace" in technology to partially "taking the lead".

This article focuses on the fixed-bed crushed coal pressurized gasification technology applicable to coal-to-natural gas, systematically sorts out its development context, analyzes the operational bottlenecks and fundamental causes of gasification units in the already put into operation coal-to-natural gas projects, proposes targeted optimization plans, and based on the demands of low-carbon and intelligent transformation, looks forward to the future development trends of this technology.

**Keywords :** coal gasification technology; gasifier treatment; energy; environmental protection

## 一、国外煤气化技术研发历程

### (一) 国外主流煤气化技术发展历程

现代煤气化技术起源可追溯到18世纪末。1792年苏格兰工程师默多克(Murdoch)干馏烟煤制照明煤气,1816年美国巴尔的摩建成首个规模化干馏煤气厂。需注意,此干馏属低温热解(Pyrolysis),与现代煤气化(Gasification)有本质区别。现代煤气化雏形始于19世纪中叶固定床技术。1857年德国西门子建造首台工业化煤气发生炉,标志第一次重大突破。1882年首台常压固定床空气间歇气化炉工业化,1913年后美国UGI公司完善形成UGI炉。

气流床兴起代表第四次突破。研究始于30年代美国德士古(Texaco)。1952年K-T(Koppers-Totzek)常压气流床炉工业化。二战后,德士古成功开发渣油气化技术(1952),并移植该技术于70年代初开发出水煤浆加压气化技术(Texaco)。

70年代第一次石油危机强力催化发展,壳牌(Shell)、德士古等投入巨资。德士古水煤浆加压气化与壳牌粉煤加压气化(SCGP)技术在此期间完成关键工业示范,为后续大型化应用奠定基础。

### (二) 固定床碎煤加压气化技术发展历程

固定床气化(亦称移动床气化)以6-50mm颗粒煤为原料。煤由顶部加入,在重力作用下缓慢下移,气化剂(蒸汽/氧气)从炉底鼓入,逆向通过煤层反应。因床层高度相对稳定且固体颗粒呈缓慢移动状态,该技术兼具"固定床"(Fixed-bed)与"移动床"(Moving-bed)双重特征,按排渣方式分固态排渣(非熔渣)和液态排渣(熔渣)技术<sup>[6]</sup>。

德国鲁奇(Lurgi)公司是该技术的核心推动者。1927年其关键专利奠定了加压固态排渣工艺(经典鲁奇工艺)基础。1931年突破性开发出加压氧气鼓风机气化工艺,大幅提升效率。1936年实现重大跨越,首台商业化加压固定床气化炉在南非萨索尔堡成功投运(通称鲁奇炉),标志着该技术正式进入大规模工业应用。

鲁奇炉历经持续迭代升级:第一代(1930s-40s),基础炉型,确立工艺;

第二代(1950s-60s),优化设计,提升性能;第三代(Mark-IV/V,1969起),重大突破。炉内径达3.8米,采用无耐火砖双层水冷壁及转动分布器/搅拌器,有效处理黏结煤。单炉产能跃升至5~5.5万m<sup>3</sup>/h粗煤气,满足大型工厂需求并拓宽煤种适应性。第四代(Mark+),在第三代基础上进一步优化。鲁奇同时开发了配套的高效煤气净化与酚氨废水处理工艺,应对环保挑战。2007年,鲁奇公司被法国液化空气集团(Air Liquide)收购。

## 二、固定床碎煤加压气化技术应用于煤制气项目现状分析

### (一) 国内煤制天然气示范项目建设及运行情况

2006年后,国内天然气供需矛盾日益突出,我国产业界受美国大平原煤制天然气工厂启发,筹划建设煤制天然气装置。2012年,国家能源局将煤制天然气产量首次列入《天然气发展“十二五”规划》中,煤制气项目也成为我国煤炭洁净高效利用的重要方向。2013-2017年,我国先后有四个煤制气项目建成投运,总产能达到74.55亿立方/年,四个示范项目为煤制气产业积累了宝贵的建设与运行经验。正在生产运行的产业化项目总体情况如表1所示。

此外,大唐国际辽宁阜新煤制天然气项目(一期)于2011年7月开工建设,2014年因故停建,2018年月又恢复施工,目前已进入收尾阶段。

表1 正在运行的煤制天然气项目

项目简称	大唐克旗	新疆庆华	内蒙汇能	伊犁新天
业主单位	内蒙古大唐国际克什克腾煤制天然气有限责任公司	新疆庆华能源集团有限公司	内蒙古汇能煤化工有限公司	伊犁新天煤化工有限责任公司
项目位置	赤峰	伊犁	鄂尔多斯	伊犁
规划产能(亿m <sup>3</sup> /年)	40	55	20	20
投产产能(亿m <sup>3</sup> /年)	26.7	13.75	20	14.2
投产时间	2013.12.18	2013.12.30	2014.11.17	2017.3.19

### (二) 煤制气项目中固定床碎煤加压气化技术应用情况

由于固定床碎煤加压气化技术具有能量转换效率高、粗煤气中甲烷组分高等优点,因此特别适合煤制天然气项目。但早期固定床碎煤加压气化在工程放大和工业示范过程中,也出现了技术、设备问题,影响装置的长周期、满负荷运行<sup>[7]</sup>。

#### 1. 气化炉夹套腐蚀

煤中的微量元素如碱金属和卤族元素,导致气化炉内夹套炉篦上方灰分区域及燃烧区域发生“卤化-氧化腐蚀加剧下的高温磨蚀腐蚀”。用Inconel625镍基合金对气化炉夹套内壁进行机械自动化堆焊防腐后,这个问题得到彻底解决。

#### 2. 废水处理难度大成本高

固定床碎煤加压气化技术反应温度在1150℃以下,对于部分

灰熔点低的煤种，需要通入更多蒸汽以抑制反应温度，由于炉内温度低，蒸汽在炉内分解率低，因此造成气化过程产生的废水量大，下游需要配置较大规模的废水处理系统。此外，由于气化温度低，废水中含油、酚、氨及难降解有机物含量高、氨氮高和色度高，可生化性差，处理难度极大。通过采取酚氨回收、高级氧化、膜浓缩、蒸发结晶等手段，煤制气项目基本实现废水零排放和有效回用，但水处理成本较高，工艺处理技术存在优化空间<sup>[8]</sup>。

### 3. 进出料关键设备易损坏

固定床碎煤加压气化炉常规设计采用的煤锁斗和灰锁斗进料、排料阀，均采用内置式锥心阀结构，在气化炉运行过程中阀门内漏频繁，容易造成气化炉非计划停车，影响装置运行。在使用过程中由于阀门零部件之间产生间隙，需专业人员对阀门进行维护、调校，如调校失误，则会加速阀门损坏，阀门维护难度高；阀门零部件均在罐体内部，检修时涉及有限空间作业，检修难度大，检修容易发生机械伤害等事故，检修过程安全管控要求高。目前已投产同类项目内置式煤锁阀灰锁阀使用效果均不理想，是制约气化炉长周期运行的关键点之一。

## 三、固定床碎煤加压气化技术发展趋势分析

### （一）通过过程强化进一步提高单炉处理能力，提高甲烷产率

固定床非熔渣气化现有 SD3800-3.0、SD3800-4.0 炉型投入工业化运行，其中 SD3800-3.0 已运行 60 余台，SD3800-4.0 已运行 100 余台，主要应用于新疆、内蒙、山西等地煤制天然气、煤制甲醇、煤制合成氨等项目。应用地域广、行业多，煤种适应性强，技术成熟可靠<sup>[9]</sup>。在上述炉型的基础上，赛鼎公司完成了 SD5000-6.0 炉型的技术研发工作、项目详细工程设计及气化炉制造受限于建设工厂原因，项目暂缓。可将 SD5000-4.5 原煤处理量 1500 吨/d 作为技术装备升级示范炉型，但多喷嘴对置式水煤浆气化炉单炉最大处理规模已经达到 4000 吨/d，二者差距较大。煤制气单体项目需要从 20 亿立方米/年向更大规模扩展，对气化炉处理能力提出更高要求。

### （二）优化工艺流程，提升全系统效率，同时降低装置投资

原料煤加压输送系统是投资与能耗的主要来源，其优化是行业难点。亟需开发新型低能耗输送方式是工程界热点问题，当前缺乏系统性工程试验。过去行业高速发展导致对全流程深度整合投入不足，工艺流程缺乏变革。需结合下游单元（变换、净化、合成）需求，重构气化及衔接流程，通过设备精简、压降优化、

热集成降低总投资与运行能耗，提升系统经济性。

### （三）开发新型环保技术，优化零排放工艺，降低水处理成本

固定床气化产生的含酚、氨、焦油及复杂有机物的废水（酚氨废水）处理难度大、成本高，是制约该技术推广的世界性难题。同时，煤中有害元素（S、N、Cl、Hg、As、Cr、Pb 等）在气化过程中的迁移转化，导致合成气污染、设备腐蚀（尤其氯离子）以及灰渣和废水中重金属积累的环境风险，硫、氮迁移控制技术相对成熟，氯及微量重金属迁移机理研究取得进展，但亟需转化为高效、经济的工程化脱除与稳定化技术<sup>[10]</sup>。在大型工业项目中集成示范新型组合水处理工艺，实现废水近零排放或资源化零排放，最大程度回收水资源并显著降低处理成本，重点在于开发高效、低成本的酚氨回收及深度处理技术，这是该技术可持续发展的关键。

## 四、总结与展望

据不完全统计，国内外煤气化技术上百种，但实现工业化应用的煤气化技术仅有 30 余种，固定床碎煤加压气化技术在煤气化领域中占据重要地位。尽管固定床碎煤加压气化技术起源于德国，但已在我国历经了六十余年的发展，通过我国科技研发、工程设计和产业人员的持续技术创新和改进优化，该技术已在提高甲烷产率、降低能耗和改善煤种适应性方面取得了显著成效。

由于固定床碎煤加压气化技术具有气化效率高、甲烷产率较高、煤种适应性宽、整体投资适中等特点，适用于以较高灰分（≥30%）和较高水分（20%~30%）的褐煤、次烟煤、贫煤和无烟煤为原料，生产合成天然气的煤制气项目。在我国建设大型煤制气进程中，固定床碎煤加压气化技术有着广阔的市场空间。与此同时，该气化技术在应用过程中，仍需要优化系统设计，改进关键设备，降低能耗和碳排放，不断提升环保水平。

随着全球能源格局深刻变革，我国“四个革命、一个合作”能源安全新战略深入实施，以及“双碳”目标的加速推进与生态环境保护标准持续提升，煤气化技术作为煤炭清洁高效利用的重要途径，正面临新的机遇与挑战。装置大型化、系统集成化、运行智能化、过程低碳化与环境友好化，已成为煤气化技术发展的核心共识与必然趋势。我们必须坚定不移地推动煤气化技术向绿色环保、清洁高效的方向持续迭代升级，抓住能源转型的历史性机遇，在保障国家能源安全和推动能源结构绿色低碳转型中发挥更为关键的支撑作用。

## 参考文献

- [1] 谢克昌. 煤利用技术研发现状与发展趋势 [J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(S): 8-17.
- [2] 谢克昌. 科学认识煤化工大力推进煤的清洁高效利用 [J]. 能源与节能, 2011(2): 1-2.
- [3] 王辅臣, 于广锁, 龚欣, 等. 大型煤气化技术的研究与发展 [J]. 化工进展, 2009, 28(2): 173-180.
- [4] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于印发《“十四五”扩大内需战略实施方案》的通知 [EB/OL]. [2022-12-15]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202212/t20221215\\_1343551.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202212/t20221215_1343551.html).
- [5] 中共中央、国务院. 中共中央、国务院关于印发《扩大内需战略规划纲要（2022-2035）》的通知 [EB/OL]. [2022-12-14]. [https://www.gov.cn/zhengce/2022-12/14/content\\_5732067.html](https://www.gov.cn/zhengce/2022-12/14/content_5732067.html).
- [6] 谢克昌. 中国煤化工技术的发展和未来 // 第三届中国国际煤化工及煤转化高新技术研讨会. 西安: 《应用化工》编辑部, 2006.
- [7] 王基铭. 中国现代煤化工产业现状与展望 [J]. 当代石油石化, 2012(8): 1-6.
- [8] 李志坚. 现代煤化工进展及发展关注重点 [J]. 化学工业, 2013, 31(6): 9-14.
- [9] 杜锦华, 安星悦. 我国新型煤化工发展思路探讨 [J]. 化学工业, 2013, 31(1): 19-21.
- [10] 王辅臣. 我国现代煤化工发展及展望 // 中国化工学会石油化工学术年会. 南京: [S.N.], 2014.