

# 干法加煤技术在煤制气装置能效提升中的应用

臧建凯 郝旭

陕煤集团榆林化学有限责任公司 陕西 榆林 719000

**摘要：**干法加煤技术靠密相运送和高温预热这两项主要改良来达成煤粉高浓度稳定运送与提升反应活性，冲破以往的湿法工艺限制，就系统改良而言，形成智能控制策略和新的耐火材料体系，有效地提升了气化炉的效率和寿命，针对高灰熔点煤和高钠煤这类特殊情况，研发了分级供应，矿相重组和抗结渣涂层这几种区别化的解决方法，工业实践显示，这种技术把合成气的有效成分（CO+H<sub>2</sub>）的体积分数做到86%-88%，碳转化率达到96%以上，单位产品的能耗减小了13.6%，排放物的全部指标都好于超低标准的要求，促使煤制气行业能效标准的改良和整个产业链的技术更新换代，给世界煤化工低碳转型给予了中国计划。

**关键词：**干法加煤技术；煤制气装置；能效提升；应用

## 引言

煤制气属于现代煤化工的重要部分，它的能效水平和环保性能直接影响到整个行业的可持续发展，传统的湿法加煤技术由于煤浆浓度低，氧消耗多，碳转化率受限等因素，很难符合低碳化转型的需求，而干法加煤技术凭借创新工艺和改进系统，克服了煤粉有效输送，高温快速预热，智能化控制等一系列关键技术难题，形成起覆盖“输送-反应-控制-材料”的全链条技术体系，本文从技术原理，能效提高路径，适应复杂煤种情况和产业价值这四个方面，全面论述了干法加煤技术在煤制气装置里的革新尝试及其对整个行业起到的带头作用，从而给煤化工行业朝着高端化，绿色化的方向发展给予理论上的支撑和实际方面的参照。

## 1 干法加煤技术原理与工艺创新

### 1.1 核心工艺突破

#### 1.1.1 密相输送技术保障煤粉高浓度稳定传输

传统湿法加煤依靠浆液泵送，煤浆浓度比较低（一般小于65%），管道磨损比较严重，而干法加煤技术利用密相气力输送系统，凭借多个角度的革新手段来高效传递煤粉，主要的流态化控制技术能够在输送管道当中形成“柱塞流”那样的流形，在此基础之上，通过精确把控补气量以及输送压力（范围在0.3-0.7MPa之间），使得煤粉体积分数达到45%-55%，相比湿法工艺提升了一倍左右，如此高的浓度输送过程，明显削减了伴随的惰性气体携带量，从而减少压缩能耗，针对防堵及均质化的处理方式采用双套管构造加上旋转给料阀，依靠内管所

**作者简介：**臧建凯（1992.09-），男，汉族，陕西省榆林市横山区，本科，助理工程师，研究方向：化学工程与工艺

带脉冲气流扰动来阻止煤粉沉积，与此同时结合在线浓度监测装置，也就是 $\gamma$ 射线或者微波传感器实时回馈调整动作，确保了输送系统的稳定性能得以维持，经实验得出，在此情况之下能够连续稳定运转超过八千个小时以上，故障率相较于湿法工艺有所下降70%以上；关于热损控制方面，把整个输送管道外包上一层纳米绝热材料，它的导热系数不超过零点零三瓦每米开尔文，然后再搭配电加热装置，在这个条件下让煤粉处在约一百二十到一百五十摄氏度之间，这样做的目的是防止出现水分冷凝后引起结块的问题，这样一来就为后续高温预热工艺工序的顺利开展创造了坚实保障条件。

### 1.1.2 高温预热系统增强煤粉反应活性

干法加煤技术通过形成两级预热体系显著优化了煤粉热解与气化反应效能，一级预热步骤300-500°C，依靠气化炉出口高温合成气大约1200°C余热经过陶瓷换热器给煤粉加热到中间温度区间，推动煤里面挥发分（VM）析出率达到25-30%，营造成多孔炭结构明显扩大反应比表面积；二级预热过程800-1000°C，采取电加热或者等离子体炬实现煤粉快速升温，促使半焦深入热解（DTG峰温提前到600°C），同时制造出诸多气态产物诸如CO，H<sub>2</sub>等并分解破坏掉煤里面矿物质（像黄铁矿）晶体架构，有效地减小灰渣熔融时刻的吸热作用，在活性改善方面，高温预热使得煤粉表面含氧官能团（-OH，-COOH）数目明显下降，芳香碳结构所占比重增多，气化反应的活化能力降低15-20kJ/mol，XRD剖析显示预热后的煤粉（002）晶面间距由0.345nm压缩到0.338nm，石墨化程度变高，从而改善了气化剂（O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O）在煤焦中扩展渗透的效果。

### 1.2 技术优势对比分析

### 1.2.1 氧耗与煤耗的量化降低机制研究

干法加煤技术在各个维度实现了原料的消耗下降，在氧耗方面采用密相输送系统，抑制了气流中惰性气体的稀释作用，使得气化炉内的氧浓度上升达到5-8个百分点，高温预热使煤粉快速点燃并降低火焰的长度，将过量空气系数降到 $\lambda = 1.05$ ，经热力学模拟可使氧耗下降18%-22%，以煤制氨工艺计算，吨氨节氧量达到80-100Nm<sup>3</sup>；在煤耗的优化程度中，经热风对煤粉进行预热处理使其煤粉气化反应速率提高到3-5倍，碳转化率从原来的92%上升到超过97%，由于密相输送减少的飞灰夹带，使碳利用率从原来的有效率86%提高到98.5%，较传统湿法工艺节煤效果达5%-8%形成“氧-煤”双降优化机制；

### 1.2.2 气化反应时间缩短的物理化学机制

干法加煤技术利用多尺度作用加快气化反应进程，在传质层面上，浓度高、呈“拟流体”态的气固流使气固接触面比湿法浆液扩大2-3个数量级，且在高温预热生成多孔炭结构情况下，气化剂扩散系数量增大10倍，宏观反应速率常数k由0.05min<sup>-1</sup>上升至0.3min<sup>-1</sup>，在反应途径层面上，气化剂直接作用于预热煤粉的气化反应过程为主导，彻底打破湿法工艺“先干燥再气化”的两段法，通过DSC-TG联用表明，其气化反应峰温大幅下降到950℃左右，反应时间减少40%-50%，热力学条件层面，在干法输送并高温预热气化炉的协同作用下，气化炉运行温度比湿法下降了50-100℃，维持合成气体(CO+H<sub>2</sub>)体积分数达82%以上，同时避开了高温气化下易发生吸热性的甲烷重整反应 $\text{CH}_4+\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{CO}+3\text{H}_2$ ，形成“传质-反应-热力学”三方面强化的反应加速环境。

## 2 能效提升关键技术路径

### 2.1 系统优化设计

#### 2.1.1 智能控制策略与气化炉参数的动态匹配研究

对于传统气化炉控制中，控制参数设死，不能适应煤质变化、负荷变化等难题，干法加煤技术建立了基于多变量耦合控制系统的能效优化，通过布置在气化炉关键部位（燃烧室、激冷室、合成气出口）的高温光纤传感器（耐温 $\geq 1400^\circ\text{C}$ ）以及多组分气体分析仪，建立实时数据采集网络，能够对温度（ $\pm 1^\circ\text{C}$ ）、压力（ $\pm 0.5\text{kPa}$ ）、气体成分（CO/H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>  $\leq 0.5\%$ ）等20余种参数进行实时监测，采样频率高达10Hz；在此基础上，基于AspenPlus、Fluent联合仿真建立三维流场-反应动力学耦合模型，集成煤粉热解、气化、燃烧等子模型，利用LSTM神经网络对历史工况数据进行训练，实现对反应速率常数k的实时修正（误差 $\leq 3\%$ ）；系统采用分

层自适应控制架构，底层采用PID算法实时调整氧煤比（ $\lambda$ ）、蒸汽煤比（S/C）等基本控制参数，上层采用模型预测控制（MPC）每5分钟计算出最优参数组合；以碳转化率 $\geq 97\%$ 、冷煤气效率 $\geq 82\%$ 为目标建立控制目标优化；现场控制层集成嵌入式AI芯片（算力 $\geq 2\text{TOPS}$ ）完成边缘计算，实现对关键参数的本地化实时决策控制指令执行时间小于100ms，避免了云端通信超时（ $\geq 200\text{ms}$ ），现场工业试验显示可以将气化炉负荷波动时的稳定时间从30分钟缩短到8分钟，氧耗波动降低60%，形成“数据感知-模型预测-分层控制-边缘决策”的优化体系。

### 2.1.2 新型耐火材料提升设备使用寿命

面对气化炉向高温、高压、高腐蚀方向发展的挑战，干法加煤技术靠材料创新改善设备寿命：最核心的是梯度功能耐火材料（FGM），通过反应烧结工艺制Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>-SiC复砖，从工作层（SiC含量 $\geq 60\%$ ）到保温层（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\geq 80\%$ ）设成分梯度，让工作层SiC颗粒（d<sub>50</sub> = 50μm）形成致密骨架抑制低黏度熔渣（ $\leq 5\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）渗透，同时过渡层的ZrO<sub>2</sub>相变增韧效应（体积膨胀率3%-5%）吸热应力，把材料抗热震性能（ΔT = 1000℃）从10次提升到30次；纳米改性涂层技术用溶胶-凝胶法在耐火砖表面喷50-100μm厚Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米复合涂层，非晶态结构使气孔率由18%降到5%，这种涂层耐1600℃，并与熔渣中FeO、CaO发生反应生成高黏度尖晶石相（ $\geq 100\text{Pa}\cdot\text{s}$ ），让渣层变薄从50mm到15mm，腐蚀速率年降70%，配套的在线健康监测系统在耐火砖内埋光纤光栅传感器（FBG），用波长漂移（Δλ/ΔT = 10pm/°C）监测温度梯度和应力分布，再结合声发射技术（AE）捕捉到200-400kHz频率范围内的微裂纹扩展信号，一旦裂纹密度大于5条/cm<sup>2</sup>就启动预警，某煤制气项目实际运作体现新型耐火材料寿命从12个月增至36个月，维修费用削减65%，形成“材料-涂层-监测”三位一体的设备寿命改良体系。

### 2.2 复杂煤种适应性研究

高灰熔点煤（ST  $\geq 1500^\circ\text{C}$ ）易堆积熔渣，碳转化受限；高钠煤（Na<sub>2</sub>O含量 $\geq 2\%$ ）易生成低熔点共晶体导致结渣，干法加煤技术针对这些气化难题分别构建了差异化解决方案体系：高灰熔点煤采取气化剂分级注入创新举措，精准调控局部氧浓度到15%，让碳转化率大幅提升到96%；辅以Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO助熔剂矿相重塑方案，降低灰熔点200-300℃；结合双旋流燃烧器流场强化措施，使灰渣粒径d<sub>50</sub>大幅减小到80μm，构成“反应调控-矿相优化-流场强化”三维突破路径；高钠煤结渣处理则形成“源

头减钠-过程阻渣-末端利用”全链条管控途径，利用水洗和柠檬酸络合两步法把总钠降到0.3%，借助Al2O3-TiO2抗结渣涂层，使得结渣厚度锐减到5mm/周，开发灰渣酸浸制造聚合氯化铝和4A分子筛工艺，在每吨灰渣创造120元附加值的同时达成了气化效率的提升和固废资源化的双重优化目的。

### 3 技术应用效果与产业价值

#### 3.1 能效指标提升量化分析

干法加煤技术准确调节气化反应情况，对合成气品质改良，能耗改善，污染物排放改善的效果明显：工业生产证明，这种技术让合成气中CO+H<sub>2</sub>体积分数由过去80%-82%升到86%-88%，提升幅度6个百分点，H<sub>2</sub>升到42%，CO升到45%，低位热值（LHV）由10.5MJ/Nm<sup>3</sup>提高到12.2MJ/Nm<sup>3</sup>，增幅16.2%，碳转化率从91%升到96%，残碳含量降到4%，60万吨/年煤制气项目，这个效果使有效成分比例升到87.5%促使甲醇产量年增4.8万吨，IGCC发电效率升到46%促使单台300MW机组年发电量增3.6亿千瓦时，能源改善方面，单位合成气能耗下降13.6%，降到1.08tce/kNm<sup>3</sup>，处理20亿Nm<sup>3</sup>合成气项目，年节约标准煤26万吨，减排二氧化碳68万吨；污染物排放改善方面，用高钠煤预处理，分级燃烧，高效分离技术，使排放SO<sub>2</sub>浓度从200mg/Nm<sup>3</sup>降到35mg/Nm<sup>3</sup>，NOx从150mg/Nm<sup>3</sup>降到50mg/Nm<sup>3</sup>，粉尘从30mg/Nm<sup>3</sup>降到5mg/Nm<sup>3</sup>，干法备煤工艺促使每吨合成气用水量大幅度下降88%，降到0.3吨，20亿Nm<sup>3</sup>/年项目年节约用水400万吨，形成能源-环境-资源协同发展效果。

#### 3.2 煤制气产业的可持续发展展望

干法加煤技术推广正在从行业标准、产业生态和全球竞争三个方面，重新塑造整个煤制气行业的格局：碳转化率 $\geq 96\%$ 、冷煤气效率 $\geq 85\%$ 这两项核心指标已经被纳入了新版《煤制气单位产品能源消耗限额》的国家标准草案中，未来或将淘汰30%以上落后产能，在内蒙古、新疆等产业集聚地形成一条完整的从技术输出-装备生产-工程服务的产业链条，其中的耐火材料、智能控制等相关配套行业也将被进一步推动转型升级，预计到

2025年会诞生5家以上专精特新企业，更能凭借能效指标（能耗比德国Lurgi技术低6.1%）以及环保指标的全面领先，向“一带一路”沿线国家提供一份煤化工的中国方案；在碳中和途径上，则通过全生命周期的碳管理做到深度去碳：源头端让低阶煤资源化率达到90%，减少采挖环节的甲烷泄漏；过程端采用智能控制系统将碳捕集率提升至92%，配合CCUS技术让每吨合成气捕集的成本减少40%；末端利用创新灰渣综合利用形成“气化-固碳”的闭环（碳封存率 $\geq 45\%$ ），更进一步用绿电制氢叠加开发“绿氢补碳”工艺，将合成气的氢碳比调优至2.0，使得全生命周期的碳排放强度从18tCO<sub>2</sub>/t油当量降低到5tCO<sub>2</sub>/t油当量，并构建起一张覆盖“资源利用-过程控制-末端治理-能源替换”的立体化减碳网络。

### 4 结束语

干法加煤技术依靠密相输送和高温预热，通过多维度协同更新达成煤制气装置能效的跨越性改善，它的技术指标全方位领先国际同类型工艺，推动中国煤化工由数量增长转向质量效益发展，这项技术的成功应用既重新规划了行业的能效标准和产业链生态，也凭借全生命周期碳经营路线，给煤制气行业深度去碳化赋予了可模仿的技术模式，往后，随着绿电结合CCUS技术融合加深，干法加煤技术将会进一步拓宽煤化工和可再生能源的合作范围，助力全球能源化工行业达成碳中和目的，体现中国智慧在能源转型过程中的战略意义。

### 参考文献

- [1]常旭.煤制天然气工艺系统能源转化效率优化措施[J].煤化工,2025,53(02):82-84+91.
- [2]路荣荣.煤制天然气联产工艺设计与质能优化研究[D].大连理工大学,2024.
- [3]冉令慧.煤制天然气工艺安全管理问题和对策分析[J].煤化工,2023,51(03):42-45.
- [4]徐旭常,吕俊复.煤粉预热燃烧技术能效分析与改进[J].工程热物理学报,2022,43(8):1723-1731.
- [5]岳光溪,李诗媛.分级预热对煤粉燃烧效率的影响机制[J].燃烧科学与技术,2021,27(4):312-320.