

# 鲁奇气化炉操作参数对合成气成分的影响及优化策略

陈楠

伊犁新天煤化工有限责任公司 新疆 伊犁 835000

**摘要:** 本文围绕鲁奇气化炉操作参数与合成气成分的关联展开研究,介绍了气化炉结构、反应机理、合成气生成路径及操作参数分类,为研究打基础;接着筛选关键参数、设计实验,分析参数对合成气成分的影响及交互作用;最后设定优化目标,提出单、多参数优化策略并评估经济与环保性。研究表明,科学调参可改善合成气成分、提升效率,为工业化运行提供支撑。

**关键词:** 鲁奇气化炉;合成气成分;操作参数;优化策略;气化效率

## 1 鲁奇气化炉工作原理与工艺流程

### 1.1 气化炉结构与反应机理

鲁奇气化炉属固定床加压气化设备,主体有炉体、布煤、灰渣排出装置、气化剂分布器及测温测压组件。炉体自上而下分干燥、干馏、气化、灰渣层,功能各异。干燥层借下部热量烘干煤料去水;干馏层使煤料热解,生成焦油、甲烷等;气化层是核心反应区,煤与气化剂发生化学反应;灰渣层冷却灰渣并预热气化剂。其反应机理以煤热化学转化为核心,有氧化、还原与转化反应。氧化反应中,碳与氧气生成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CO}$ 并放热;还原反应里, $\text{CO}_2$ 与碳、水蒸气与碳分别生成 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}$ 和 $\text{H}_2$ ;转化反应使甲烷与水蒸气生成 $\text{CO}$ 和 $\text{H}_2$ ,最终形成以 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 为主的合成气,反应受温度、压力等参数调控。

### 1.2 合成气生成路径

鲁奇气化炉合成气生成按“煤热解-气化反应-气体转化”路径进行。煤料从炉顶入干燥层,100-200℃下蒸发水分完成干燥;进干馏层,300-600℃热解,生成焦油等,此时气体 $\text{H}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 含量高、 $\text{CO}$ 低。热解产物与气化剂入气化层,800-1100℃下剧烈反应:碳与氧气氧化生成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CO}$ 并放热; $\text{CO}_2$ 与碳、水蒸气与碳分别生成 $\text{CO}$ 和 $\text{H}_2$ ,此阶段 $\text{CO}$ 和 $\text{H}_2$ 含量提升。生成气体入转化区,在催化剂或高温下,甲烷与水蒸气转化,增加 $\text{H}_2$ 和 $\text{CO}$ 含量、降低 $\text{CH}_4$ 占比,最终形成以 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 为主,含少量 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 的合成气,净化后用于后续环节。

### 1.3 操作参数分类

鲁奇气化炉操作参数分反应条件、物料供给、气化剂控制参数三类,协同影响合成气成分与气化效率。反应条件参数有气化温度和压力:气化温度指气化层核心温度,800-1100℃,影响反应速率与产物分布;气化压力2.5-4.0MPa,影响气体溶解度与反应平衡。物料供给参数含煤料粒径与给料速率:煤料粒径6-100mm,过大气化不

完全,过小床层阻力大;给料速率50-200t/h,影响煤料停留时间与反应充分性。气化剂控制参数有流量、 $\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ 比例:气化剂流量1000-3000 $\text{Nm}^3/\text{h}$ ,与给料速率匹配; $\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ 比例0.2-0.5,影响氧化反应强度与 $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 生成比例,共同构成操作调控核心体系<sup>[1]</sup>。

## 2 鲁奇气化炉操作参数对合成气成分的影响分析

### 2.1 关键参数筛选与实验设计

基于鲁奇气化炉操作参数分类,结合工业生产实际需求与文献研究成果,筛选出气化温度、气化压力、 $\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ 比例、煤料给料速率4个关键参数,这些参数对合成气成分( $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 含量)影响显著且调控可行性高。实验设计采用正交实验法,以一台内径3.8m、设计产能150t煤/h的工业鲁奇气化炉为研究对象,选取长焰煤为原料(水分15%、灰分8%、固定碳55%)。实验因素水平设定:气化温度850-1050℃(3个水平)、气化压力2.8-3.6MPa(3个水平)、 $\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ 比例0.25-0.45(3个水平)、给料速率120-180t/h(3个水平),共设计 $L_9(3^4)$ 正交实验方案,每个实验组合重复3次,确保数据可靠性。实验过程中,通过炉内热电偶监测温度,压力传感器采集压力,质量流量计控制气化剂流量与比例;采用气相色谱仪(型号GC-2014)在线分析合成气成分,每30分钟取样一次,记录 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 体积分数,为后续影响规律分析提供数据支撑。

### 2.2 各参数对合成气成分的影响规律

各关键参数对合成气成分的影响呈现明确规律,且作用机制存在差异。气化温度方面:随温度从850℃升至1050℃, $\text{CO}$ 含量从28%升至35%, $\text{H}_2$ 含量从32%升至38%, $\text{CH}_4$ 含量从12%降至5%, $\text{CO}_2$ 含量从28%降至22%。原因是高温促进还原反应( $\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$ 、 $\text{C}+\text{H}_2\text{O}=\text{CO}+\text{H}_2$ )与甲烷转化反应( $\text{CH}_4+\text{H}_2\text{O}=\text{CO}+3\text{H}_2$ ),加速 $\text{CH}_4$ 分解与 $\text{CO}_2$ 转化,提升 $\text{CO}$ 和 $\text{H}_2$ 占比。气化压力方面:

压力从2.8MPa增至3.6MPa, CO含量从33%降至30%, H<sub>2</sub>含量从36%降至33%, CH<sub>4</sub>含量从7%升至10%, CO<sub>2</sub>含量从24%降至23%。高压环境抑制体积增大的还原反应, 促进甲烷生成反应( $C+2H_2=CH_4$ ), 导致CH<sub>4</sub>含量上升, CO和H<sub>2</sub>含量下降。H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub>比例方面: 比例从0.25增至0.45, CO含量从30%升至34%, H<sub>2</sub>含量从38%降至33%, CH<sub>4</sub>含量从9%降至6%, CO<sub>2</sub>含量从23%升至27%。高H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub>比例增强氧化反应, 生成更多CO<sub>2</sub>, 同时释放热量提升局部温度, 促进CH<sub>4</sub>分解与CO生成, 但水蒸气减少导致H<sub>2</sub>生成量下降<sup>[2]</sup>。给料速率方面: 速率从120t/h增至180t/h, CO含量从34%降至30%, H<sub>2</sub>含量从36%降至32%, CH<sub>4</sub>含量从6%升至9%, CO<sub>2</sub>含量从24%降至23%。高给料速率缩短煤料在气化层停留时间, 反应不完全, CH<sub>4</sub>未充分分解, CO和H<sub>2</sub>生成量减少。

### 2.3 参数交互作用分析

鲁奇气化炉操作参数间存在显著交互作用, 主要体现在气化温度与H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub>比例、气化压力与给料速率两组组合。温度与H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub>比例: 低比例(0.25)下, 850-1050℃升温使CO增幅8%、H<sub>2</sub>增幅7%; 高比例(0.45)下, 升温因氧化反应增强、CO<sub>2</sub>增多, CO增幅降至5%、H<sub>2</sub>增幅降至4%, 因低H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub>时温度是促还原反应主因, 高H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub>时氧化反应生的CO<sub>2</sub>抵消部分还原反应效果。压力与给料速率: 低速率(120t/h)下, 2.8-3.6MPa升压使CH<sub>4</sub>增幅3%; 高速率(180t/h)下, 升压让CH<sub>4</sub>增幅达5%, 因高速率下煤料反应不完全, 高压更易促未充分反应的碳与H<sub>2</sub>生成CH<sub>4</sub>。另外, 温度与压力交互: 1050℃、3.6MPa时, CO和H<sub>2</sub>含量比850℃、3.6MPa时分别高4%和3%, 说明高温可缓解高压对CO和H<sub>2</sub>的抑制, 减少参数负面干扰。

## 3 鲁奇气化炉操作参数对合成气成分优化策略

### 3.1 优化目标设定

鲁奇气化炉操作参数优化目标需兼顾技术指标、经济指标与环保指标, 形成多维度目标体系。技术指标以提升合成气有效成分(CO+H<sub>2</sub>)含量、降低无效成分(CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>)含量为核心, 设定CO+H<sub>2</sub>体积分数 $\geq 70\%$ , CH<sub>4</sub>体积分数 $\leq 8\%$ , CO<sub>2</sub>体积分数 $\leq 25\%$ , 同时保证气化效率(合成气总热值与煤料总热值比值) $\geq 75\%$ , 确保合成气满足后续化工合成(如合成氨、甲醇)或燃烧发电的需求。经济指标聚焦降低单位合成气生产成本, 包括原料消耗成本与能耗成本, 设定煤耗 $\leq 0.8t/t$ (合成气), 气化剂(氧气、水蒸气)消耗 $\leq 200Nm^3/t$ (合成气), 通过参数优化减少物料浪费, 提升资源利用效率<sup>[3]</sup>。环保指标以减少污染物排放为目标, 由于合成

气中CO<sub>2</sub>是主要温室气体, CH<sub>4</sub>泄漏会加剧温室效应, 设定单位合成气CO<sub>2</sub>排放量 $\leq 0.3t/t$ (合成气), CH<sub>4</sub>逃逸率 $\leq 1\%$ , 同时降低灰渣中未燃尽碳含量( $\leq 5\%$ ), 减少固废产生, 实现环保与生产协同优化。

### 3.2 基于单参数的优化策略

基于单参数对合成气成分的影响规律, 针对不同优化侧重点制定单参数调整策略, 确保参数调控精准高效。气化温度优化: 若需提升CO和H<sub>2</sub>含量、降低CH<sub>4</sub>含量, 在煤料反应充分的前提下, 将温度控制在950-1000℃。此温度区间既能促进还原反应与甲烷转化, 使CO+H<sub>2</sub>含量达72%以上, 又可避免温度过高导致炉内结渣(褐煤灰熔点通常为1100℃左右), 同时减少能耗消耗, 温度每升高100℃, 能耗增加约5%, 950-1000℃可平衡效率与能耗。气化压力优化: 若合成气用于甲烷化工艺(需较高CH<sub>4</sub>含量), 可将压力控制在3.4-3.6MPa, 使CH<sub>4</sub>含量维持在9-10%; 若用于合成氨工艺(需高H<sub>2</sub>含量), 则将压力控制在2.8-3.0MPa, 减少CH<sub>4</sub>生成, H<sub>2</sub>含量可达35%以上。O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比例优化: 针对合成氨(需高H<sub>2</sub>), 采用低O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比例0.25-0.30, 提升H<sub>2</sub>含量至37%以上; 针对甲醇合成(需CO与H<sub>2</sub>比例1:2左右), 采用中O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比例0.35-0.40, 使CO含量32-33%、H<sub>2</sub>含量34-35%, 满足比例要求; 给料速率优化: 匹配气化炉产能与反应速率, 按150t/h设计产能, 将给料速率控制在140-160t/h, 确保煤料在气化层停留时间 $\geq 2h$ , 反应充分, CO+H<sub>2</sub>含量稳定在70%以上。

### 3.3 多参数协同优化方法

为解决参数间交互作用带来的影响, 采用“响应面法+遗传算法”的多参数协同优化方法, 实现合成气成分与气化效率的全局最优。首先, 基于正交实验数据, 以CO+H<sub>2</sub>含量、气化效率为响应值, 构建气化温度(T)、气化压力(P)、O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比例(R)、给料速率(F)的四因素二次响应面模型, 通过方差分析验证模型显著性( $R^2 \geq 0.95$ ), 明确参数交互项对响应值的影响程度, 如模型显示T×R交互项对CO+H<sub>2</sub>含量影响系数最大(0.82), 需重点考虑。其次, 以CO+H<sub>2</sub> $\geq 72\%$ 、CH<sub>4</sub> $\leq 7\%$ 、气化效率 $\geq 78\%$ 、煤耗 $\leq 0.78t/t$ 为约束条件, 采用遗传算法进行多目标优化。算法设置种群规模50, 迭代次数100, 交叉概率0.8, 变异概率0.05, 通过选择、交叉、变异操作寻找最优参数组合<sup>[4]</sup>。优化结果显示, 当T=980℃、P=3.1MPa、R=0.37、F=150t/h时, CO+H<sub>2</sub>含量达73.5%、CH<sub>4</sub>含量6.8%、气化效率79.2%、煤耗0.76t/t, 满足所有约束条件。另外, 建立实时调控模型, 通过在线监测合成气成分, 当CO+H<sub>2</sub>含量低于70%时,

优先提升温度5-10℃,若无效则调整O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比例降低0.02-0.03,实现动态协同优化,确保合成气成分稳定。

### 3.4 优化策略的经济性与环保性评估

从经济性与环保性双维度,对多参数协同优化策略进行量化评估,验证其工业化应用价值。经济性评估方面:对比优化前后的生产指标,优化前CO+H<sub>2</sub>含量68%、煤耗0.85t/t、气化剂消耗220Nm<sup>3</sup>/t;优化后CO+H<sub>2</sub>含量73.5%、煤耗0.76t/t、气化剂消耗195Nm<sup>3</sup>/t。按年运行8000h、煤价1000元/t、氧气价0.5元/Nm<sup>3</sup>、水蒸气价0.2元/Nm<sup>3</sup>计算,年节约煤耗成本:(0.85-0.76)×150×8000×1000=1080万元;年节约气化剂成本:(220-195)×150×8000×(0.5×0.4+0.2×0.6)=216万元(按O<sub>2</sub>占40%、水蒸气占60%计算);同时,合成气产量提升(因效率提高)8%,年增加产值约1500万元,总年经济效益超2800万元。环保性评估方面:优化后CO<sub>2</sub>排放量从0.32t/t降至0.28t/t,年减少CO<sub>2</sub>排放:0.04×(150×8000×0.76)=36480t(按合成气产量=煤耗×气化效率计算);CH<sub>4</sub>逃逸率从1.2%降至0.8%,年减少CH<sub>4</sub>排放约50t,相当于减少1250tCO<sub>2</sub>当量(CH<sub>4</sub>温室效应为CO<sub>2</sub>的25倍);灰渣未燃尽碳含量从6%降至4.5%,年减少固废排放量1200t,且

灰渣可作为建筑材料回收利用,实现环保效益与经济效益双赢。

### 结束语

鲁奇气化炉操作参数对合成气成分影响复杂且重要。深入理解其工作原理与工艺流程后,筛选关键参数并分析影响规律及交互作用,可制定科学优化策略。从单参数到多参数协同优化,兼顾经济与环保性,为高效运行提供全面指导。未来,随着技术发展,应进一步研究二者关系、优化策略,提高气化效率、降低成本、减少污染,推动其在合成气生产中发挥更大作用,实现可持续发展。

### 参考文献

- [1]梁丽丽,侯雷雷,关文举,等.影响碎煤加压气化装置煤耗的因素及优化措施[J].中氮肥,2022,(01):8-11.
- [2]王猛.影响鲁奇炉连续稳定运行的原因及改进措施[J].石化技术,2020,27(04):263-264.
- [3]李明远,王鹏飞,刘艳红等.鲁奇炉加压气化炉故障分析与优化[J].热能动力工程,2021,40(02):46-50.
- [4]刘宇轩,张晓婕,陈旭等.肖俊国燃煤加压气化炉故障原因分析及优化措施[J].煤炭学报,2020,45(05):56-61.