

热解炉富氧干馏运行优化及荒煤气提质实践

上官国青 张成杰

新疆广汇煤炭清洁炼化有限责任公司 新疆 哈密 839000

摘要: 热解炉富氧干馏通过以富氧空气或纯氧替代传统空气助燃,可显著提升火焰温度,强化干馏反应动力学条件,提高煤气有效成分含量,降低氮气占比,提升煤气热值。结合冷煤气配气调控,可稳定干馏段热环境。荒煤气提质方面,采用物理提质与化学提质结合,可高效回收焦油,提升煤气热值,优化组分。相关技术已实现工业化应用,显著提升能效与环保效益,推动煤化工产业低碳转型升级。

关键词: 热解炉;富氧干馏;运行优化;荒煤气提质实践

引言:在煤炭清洁高效利用的迫切需求下,传统热解工艺因空气助燃导致火焰温度低、反应效率不高、煤气热值低且氮气含量高,已难以满足现代煤化工产业升级需求。富氧干馏技术通过以富氧空气或纯氧替代传统空气助燃,可有效提升干馏反应温度与效率,优化煤气组分,提升其热值与利用价值。与此同时,荒煤气提质技术作为关键配套环节,对实现煤炭资源全组分高效利用、推动煤化工产业绿色低碳转型具有重要意义。

1 富氧干馏技术原理与理论基础

1.1 富氧燃烧技术原理

(1) 传统干馏工艺采用空气助燃,空气中大量氮气会稀释可燃组分并带走热量,导致火焰温度偏低、反应速率缓慢。富氧燃烧技术核心是用纯氧或富氧空气替代常规空气,大幅降低氮气占比,减少惰性气体的稀释与散热作用,可显著提升火焰温度,强化干馏反应的动力学条件,加快物料转化速率,提升单位时间内的产品产出效率。(2) 干馏段稳定的热环境是保障产品质量的关键,需严格维持750°C左右的热平衡状态。通过冷煤气配气调控是核心手段,利用低温冷煤气与燃烧产生的高温循环气混合,精准调节循环气温度,确保干馏段温度稳定在设定区间,避免因温度波动导致焦油裂解不完全或物料过度反应等问题。

1.2 煤气成分调控机制

(1) 富氧比(氧气体积分数)是调控煤气成分的核心参数。随着富氧比升高,氧气供应更充足,促进物料的氧化与还原反应更充分,使得煤气中氢气、甲烷、一氧化碳等可燃组分的含量显著增加;同时,因助燃气体中氮气占比降低,煤气中氮含量大幅下降,有效提升了煤气的热值与利用价值。(2) 从热力学角度分析,富氧环境会改变甲烷重整反应与水煤气变换反应的平衡状态。富氧条件下,甲烷重整反应更易向生成氢气和一氧化碳

的方向进行;而水煤气变换反应的平衡则随氧含量变化动态调整,通过调控富氧比可优化两大反应的平衡关系,实现目标煤气组分的定向调控^[1]。

1.3 系统能效优化模型

(1) 基于物料守恒与能量守恒定律,建立系统的物料平衡与热平衡方程。通过方程可精准计算不同富氧比下原料消耗、产品产出的物料流向,以及燃料燃烧放热、物料升温吸热、设备散热等能量输入输出数据,量化不同工况下的系统能效,为富氧比的优化选择提供数据支撑。(2) 结合计算流体力学(CFD)模拟技术,对炉内流场与温度场分布进行可视化分析,可清晰识别炉内温度分布不均、局部气流滞留等问题。基于模拟结果,优化烧嘴的结构参数(如喷射角度、孔径大小)与气体流速,改善炉内气流组织,使温度场分布更均匀,提升热量利用率,进一步优化系统整体能效。

2 热解炉富氧干馏运行优化实践

2.1 半工业试验设计

(1) 为精准复刻工业级热解炉运行工况,试验采用处理量1t/h的低温干馏半工业模拟装置。该装置核心配置为氧气/空气双通道独立调节系统,可通过智能流量控制器实现两种气体的精准配比,进而实现富氧比的连续可调,适配不同试验工况需求。同时,装置搭载了多点温度监测、压力传感及在线气体分析模块,能实时采集炉内温度分布、系统压力及产物组分数据,为试验数据的精准性与可靠性提供硬件支撑,保障试验结果对工业化应用的指导价值。(2) 试验原料选定陕北侏罗纪煤,该煤种是我国西北煤炭热解产业的主流原料,其煤质特性稳定:固定碳含量63.8%、挥发分31.6%、灰分4.4%,属于低灰、中高挥发分优质烟煤,具备良好的干馏反应活性。选用该原料开展试验,既能贴合区域产业实际原料供给情况,也能通过其典型煤质特性,全面验证富氧

干馏技术对主流干馏煤种的适配性与工艺适配潜力^[2]。(3) 试验参数设计围绕核心影响因素构建多变量调控体系: 富氧比覆盖21% (常规空气助燃基准工况) 至100% (纯氧助燃极限工况) 的全区间, 重点探究富氧比梯度变化对工艺效果的影响; 循环煤气流量调控范围设定为500~1000m³/h, 匹配不同富氧比下的热平衡需求; 干馏温度严格控制在750±10°C的核心区间, 通过闭环温控系统保障温度稳定性。通过多参数交叉试验, 系统探究各参数耦合作用机制, 明确最优工艺参数组合。

2.2 试验结果分析

(1) 煤气成分随富氧比提升呈现显著优化趋势, 当富氧比提升至100% (纯氧助燃工况) 时, 煤气组分实现质的飞跃: 氢气含量高达40.49%, 甲烷含量达14.65%, 可燃组分总占比大幅提升; 同时, 因助燃气体中氮气引入量锐减, 氮含量降至5.85%, 较空气助燃工况降低60%以上。组分优化直接推动煤气热值提升至14.18MJ/m³, 达到优质工业燃气标准, 为后续煤气高附加值利用奠定核心基础。(2) 系统运行稳定性表现优异, 得益于双通道配气调节系统与精准温控技术的协同作用, 炉内温度场分布均匀, 波动幅度严格控制在±5°C以内, 有效规避了局部过热导致的焦油裂解不完全或局部温度不足引发的物料转化不充分等问题; 富氧比调节响应速度快, 响应时间≤30秒, 可快速适配原料煤质波动等工况变化, 保障工艺连续稳定运行, 为工业化长周期运行提供关键技术支撑。(3) 能效与环保效益实现双重突破, 对比传统空气助燃工艺, 富氧干馏工况下单位产品能耗降低18%, 主要源于氮气散热损失减少与反应效率提升的协同作用; 同时, 氮含量降低大幅减少了燃烧过程中热力型氮氧化物生成, 配合反应效率提升, 二氧化碳排放较传统工艺减少22%, 实现了节能降耗与污染物减排的同步推进, 契合绿色煤化工产业发展导向^[3]。

2.3 工业化应用验证

(1) 选取陕西精益化工60万吨/年原煤热解装置作为工业化验证标杆案例, 该装置基于半工业试验成果, 创新性采用“纯氧+二氧化碳”富氧体系, 替代传统空气助燃模式。通过将煤化工尾气中的二氧化碳回收提纯后作为载气循环利用, 既降低了纯氧消耗量, 又优化了炉内反应氛围, 同时配套优化炉体结构与配气系统, 实现了半工业试验成果的高效工业化放大应用。(2) 工业化应用取得显著成果: 装置产出的荒煤气中有效气 (氢气+甲烷+一氧化碳) 成分占比稳定在75%~80%, 各项指标完全满足煤化工合成气原料标准, 可直接用于甲醇、乙二醇等高端化工产品合成; 装置成功实现长周期稳定运行,

连续运行时间超过5000小时, 运行负荷稳定在设计值的95%以上, 充分验证了富氧干馏技术的工业化可行性、可靠性与经济性, 为该技术在全国煤炭热解产业的大规模推广应用提供了关键实践范例。

3 荒煤气提质技术与综合利用路径

3.1 提质技术路线

(1) 物理提质以高效分离回收焦油、净化煤气为核心目标, 采用“低温冷凝+电捕焦油器”协同工艺。具体实施中, 先将荒煤气导入低温冷凝系统, 通过间接换热将煤气温度降至焦油露点以下, 使气态焦油快速冷凝为液态油滴, 实现气液初步分离; 随后将含微量焦油雾滴的煤气引入电捕焦油器, 利用高压静电场产生的库仑力, 精准捕捉细小焦油颗粒, 大幅提升分离效率。该工艺优化后, 焦油收率可稳定提升至8.5%, 较传统单一冷凝工艺提升30%以上, 同时有效减少焦油对后续管路及设备的堵塞、腐蚀, 为煤气深度处理创造良好条件, 且具有能耗低、操作维护简便的优势。(2) 化学提质聚焦煤气热值提升与组分优化, 核心技术为催化甲烷化反应。在镍基等专用催化剂作用下, 荒煤气中的一氧化碳与氢气在适宜的温度 (250~400°C)、压力 (2.0~3.0MPa) 条件下发生甲烷化反应, 生成高热值的甲烷 (CH₄), 同时伴随微量水的生成。通过优化催化剂活性、反应温度压力及气体空速等参数, 可实现一氧化碳高效转化, 最终将煤气热值提升至20MJ/m³以上, 达到天然气级热值标准。该技术不仅能提升煤气的能源价值, 还可优化煤气组分, 降低后续利用过程中有害组分的影响, 为煤气的高附加值应用提供核心支撑^[4]。

3.2 高附加值利用方向

(1) 作为优质化工原料气, 提质后的荒煤气可高效替代传统天然气路线, 用于合成氨、甲醇、高纯度氢气等关键化工产品。其中, 煤气中的氢气与氮气按比例混合后, 经催化合成可制备工业级合成氨, 满足农业化肥、工业制冷等领域需求; 氢气与一氧化碳的混合组分 (合成气) 是甲醇合成的核心原料, 相较于天然气重整制合成气路线, 可降低对进口天然气的依赖, 提升化工产业原料供应的自主性与安全性; 此外, 通过变压吸附 (PSA) 技术可从提质煤气中分离提纯纯度≥99.9%的高纯度氢气, 用于燃料电池、精细化工加氢、电子工业等高端领域, 进一步提升资源利用价值。(2) 转化为清洁能源实现绿色替代, 提质后的荒煤气经深度净化处理 (脱硫、脱硝、脱尘), 去除硫氧化物、氮氧化物、颗粒物等有害杂质, 使其达到《城镇燃气设计规范》及工业燃料气排放标准。净化后的煤气可接入城市燃气管网, 用于居民

生活供暖、烹饪等民生领域，或作为工业锅炉、窑炉的替代燃料，替代传统煤炭直接燃烧。这一利用路径不仅能提升燃烧效率，降低能源消耗，还可大幅减少二氧化硫、颗粒物、氮氧化物等污染物排放，助力城乡能源结构优化与工业领域节能减排转型，契合“双碳”发展目标。

3.3 二氧化碳资源化利用

(1) 构建二氧化碳循环利用闭环，将煤化工生产全流程（含干馏、提质等环节）产生的尾气进行收集、提纯，得到高纯度二氧化碳后，作为载气循环至热解炉干馏段，替代部分纯氧参与干馏反应。二氧化碳的惰性特质可优化炉内反应氛围，抑制物料过度氧化，提升干馏产品品质；同时，大幅降低干馏过程中纯氧的消耗量，经测算可降低制氧成本25%以上，显著提升项目经济性，实现资源高效循环与成本控制的双重目标。(2) 结合碳捕集、利用与封存（CCUS）技术，实现二氧化碳资源化与减排一体化发展。通过胺液吸收、膜分离等高效碳捕集技术，收集煤化工过程中未循环利用的二氧化碳；除用于干馏炉载气外，还可拓展至多个高附加值利用领域，如用于石油开采中的驱油增采、矿物碳化固碳、制备碳酸二甲酯等绿色化工产品，或通过地质封存（如注入枯竭油气藏、深部盐水层）实现永久性减排。这一路径既能有效降低煤化工产业的碳排放强度，缓解环境压力，又能挖掘二氧化碳的经济价值，推动煤化工产业向低碳、绿色、可持续方向升级。

4 富氧干馏及荒煤气综合利用技术经济性与环境效益分析

4.1 经济性评估

(1) 成本与收益对比显示技术经济优势显著。富氧干馏技术因纯氧制备、系统调控等环节增加了运行成本，单位产品成本较传统空气助燃技术提升12%；但得益于煤气组分优化及高附加值产品回收效率提升，焦油、优质煤气等产品的综合收益同步提升30%，收益增幅远超成本增幅，实现了成本与收益的正向平衡。(2) 投资回报表现良好，具备规模化推广可行性。以60万吨/年原煤热解装

置为例，项目总投资经测算的投资回收期约为4.2年，处于煤化工行业中等偏优水平；同时，项目内部收益率（IRR）达18.5%，高于行业平均基准收益率，展现出较强的盈利能力和抗风险能力，对投资者具备较强吸引力。

4.2 环境效益

(1) 污染物减排效果突出，助力低碳发展。在兰炭生产场景中，采用富氧干馏技术每吨产品可减少二氧化碳排放0.3吨，大幅降低碳排放强度；同时，富氧环境减少了氮气参与反应，氮氧化物排放较传统技术降低40%，有效缓解了大气污染压力，契合“双碳”目标要求。(2) 显著节约水资源，提升产业绿色属性。通过干熄焦工艺替代传统水浸熄焦工艺，单吨产品可节约水资源3吨。在水资源短缺的西北煤炭产区，这一技术改进大幅降低了产业对水资源的依赖，减少了工业废水排放，进一步提升了煤化工产业的绿色可持续发展能力。

结束语

热解炉富氧干馏运行优化与荒煤气提质实践，显著提升了干馏效率与煤气品质，实现了能源的高效利用与污染物减排。通过精准调控富氧比、优化炉内热环境，不仅提高了产品产出率，还降低了能耗与碳排放。荒煤气提质技术则进一步挖掘了煤气价值，拓展了其高附加值利用途径。未来，随着技术的持续创新与工业化应用的深化，该技术将为煤化工产业的绿色低碳转型提供更强有力的支撑。

参考文献

- [1] 李建国,张昆仑.优化服务提质效增强电力获得感[J].农电管理,2023,(04):11-12.
- [2] 马静.精准赋能提质效网格推进巧“解锁”[J].福建市场监督管理,2022,(11):34-36.
- [3] 何志明,刘安.某焦化厂上升管余热环保改造研究[J].山西冶金,2022,45(03):165-166.
- [4] 张学梅,马青华,郝静远,李东.制备低阶煤干馏动力学样品的探讨[J].陕西煤炭,2021,40(05):31-35.