低温煤干馏工艺影响煤焦油收率的因素及提升策略研究

于明明　胡海龙　王敏敏
新疆广汇煤炭清洁炼化有限责任公司　新疆　哈密　839000

摘　要：低温煤干馏是煤炭资源分质利用的重要工艺，煤焦油作为核心目标产物，其收率水平直接决定工艺的资源利用效益。本文以低温煤干馏工艺为研究对象，系统梳理影响煤焦油收率的各类因素，并提出对应的提升策略，包括原煤分级筛分预脱水的原料预处理方案，干馏热工制度优化，炉内密闭与负压工况管控以及分级冷凝和除雾捕集的回收系统改进。

关键词：低温；煤干馏工艺；影响煤焦油收率的因素；提升策略

引言

煤焦油的生成与回收包含原煤受热裂解、油气析出、管道输送、冷凝捕集多个阶段，每个阶段都存在焦油损耗的可能。原料理化性质波动会改变热解反应基础条件。热工参数设置不当容易引发焦油二次裂解，炉膛密封缺陷带来的微氧化环境会破坏焦油组分。油气捕集系统效率不足会造成轻质焦油逃逸与液滴夹带损失。各类因素相互耦合，进一步增加焦油收率控制难度。

1 影响煤焦油收率的核心因素分析

1.1 煤质原料特性因素

（1）原煤挥发分含量是制约焦油生成能力的关键指标，低温干馏制取焦油的本质，是原煤内部挥发性有机质在受热条件下发生断裂解析的过程。原煤挥发分含量越高，代表内部可裂解生成油气的大分子官能团数量越多，热解过程中能够转化为煤焦油的有效组分就越充足。反之低挥发分原煤的可裂解组分偏少，热解产物以固定碳和低热值煤气为主，焦油生成潜力大幅降低，会直接造成装置焦油收率处于较低水平。（2）原煤粒度与孔隙结构同样会干扰焦油析出效率，粒度过大的原煤颗粒内部导热路径较长，热量难以快速渗透至颗粒中心，容易出现外部热解过度、内部热解不充分的情况[1]。同时致密的孔隙结构会阻碍热解生成的油气向外扩散，部分油气滞留煤体内部发生二次裂解，转化为小分子气体，间接减少焦油产出。粒度均匀、孔隙发育良好的原煤，能够保障热解反应均匀进行，有效降低焦油损耗。（3）原煤中含有的水分和灰分杂质会对焦油收率产生明显负面作用，原煤水分过高会在干馏初期大量汽化，吸收炉膛热量，降低实际热解温度，弱化有机质裂解效果。灰分属于惰性无机杂质，不仅无法参与焦油生成反应，还会附着在煤粒表面，封堵孔隙通道，阻碍油气析出。同时灰分颗粒会催化焦油二次分解反应，加剧有效焦油组分的损耗，最终导致整体煤焦油收率显著下降。

1.2 干馏热工参数因素

干馏终温、升温速率以及恒温保持时间是现场生产中调控难度最大、对焦油收率影响最直接的核心工艺参数，参数的不合理把控会大幅降低有效焦油产出，造成生产损耗。（1）干馏终温是决定煤焦油产率和产物组分的关键温度指标，温度处于合理区间时，煤体内大分子有机质可以充分断裂分解，稳定生成液态焦油组分与气态油气。温度水平过低会造成有机质裂解反应不完全，大量可转化为焦油的官能团未能充分分解，原煤热解不彻底，直接导致焦油产出量偏低。温度超出合理区间后，高温环境会促使已经生成的液态焦油组分发生二次裂解，将重质焦油组分分解为小分子燃气，不仅降低焦油收率，还会改变焦油组分结构，造成轻质组分流失严重。（2）升温速率会直接干预整体热解进程的推进节奏，较为平缓的升温过程能够让煤体内部热量均匀传导，保证有机质官能团循序渐进发生断裂，油气析出过程更加稳定，能够有效提升焦油生成比例。如果升温速度过快，煤体表层会快速完成热解，内部热量传导滞后，造成内外热解程度不一致。瞬时大量析出的油气容易积聚在煤体孔隙内部，引发局部二次反应，造成焦油产物损耗，整体热解稳定性明显下降。（3）恒温保持时间影响焦油最终析出的完整程度，合理的恒温时长可以让热量充分渗透煤体颗粒，保障残余有机质持续完成裂解反应，最大化释放油气产物。恒温时间不足会导致热解反应提前终止，部分未完全裂解的有机质无法转化为焦油。恒温时间过长则会让已生成的焦油长期处于高温环境，持续发生热降解反应，最终造成煤焦油收率出现不同程度的降低。

1.3 炉内气氛与压力工况因素

（1）炉内空气残留形成的微氧化环境，会对煤焦油

产物产生持续性的损耗作用。正常干馏工艺需要保持炉膛惰性氛围，保证有机质在无氧环境下完成热解析出。如果炉膛密闭性存在缺陷，设备缝隙、进料出料装置会渗入少量外界空气，让炉膛内部形成微弱的氧化环境。热解产生的气态焦油组分化学性质较为活跃，遇到氧气后会发生温和的氧化反应。部分重质焦油组分被氧化分解为气态小分子物质，原本可以冷凝回收的液态焦油资源直接消耗流失。长期处于微氧化环境中，不仅会大幅降低焦油产出比例，还会改变焦油组分结构，增加轻质组分损耗，降低成品焦油的整体产量与品质。（2）炉膛负压的稳定状态是保障油气顺利析出与导出的重要前提，负压波动会直接打乱油气传输节奏，影响焦油回收效率。稳定的负压环境可以持续引导热解生成的油气从煤粒孔隙中平稳析出，快速输送至后续冷凝回收单元[2]。当炉膛负压数值偏低时，油气排出动力不足，大量油气会滞留于炉膛内部与煤料层间隙。滞留的油气会持续接触高温环境，发生二次裂解与热降解反应，转化为不可冷凝的燃气，造成焦油资源严重损耗。（3）若炉膛负压突然偏高，会造成炉内气流速度急剧加快，部分尚未完成成型转化的轻质焦油组分来不及冷凝，就被快速带出反应系统。过快的气流还会裹挟细小煤尘进入油气管道，造成油气杂质含量升高，进一步干扰后续冷凝分离效果。负压的频繁波动会让油气析出状态始终处于不稳定状态，持续扩大焦油损耗，最终导致装置整体煤焦油收率长期处于偏低且不稳定的状态。

2 提升低温煤干馏煤焦油收率的优化策略

2.1 原料预处理优化策略

（1）原煤分级筛分与粒度配比优化是原料预处理的核心环节。原始开采原煤颗粒大小参差不齐，粗细颗粒混杂入炉会造成炉内导热不均、热解进度失衡。超大颗粒原煤导热效率差，热量难以穿透颗粒核心，容易出现表层过度热解、内部热解不完全的问题，大量有机质无法转化为焦油产物。细小煤粉堆积过密会堵塞炉内透气间隙，阻碍热解油气向外扩散，引发油气二次裂解损耗。通过分级筛分处理，可以剔除超标大块煤料与超细煤粉，筛选出适配干馏炉运行的合格粒度煤料。合理配比不同粒径原煤的入炉比例，能够优化炉内料层结构，保障料层透气性均匀，让热量均匀渗透每一处煤料，保证热解反应充分且同步进行，大幅减少因粒度不均造成的焦油损耗。（2）原煤预脱水提质、削减杂质干扰是提升热解效率的重要辅助手段[3]。原煤自带的表面水与内在水分会在干馏升温阶段大量汽化，持续吸收炉膛内部热量，造成炉内有效热解温度下降，弱化有机质裂解反应活性，阻碍焦油组分的生成。同时水分汽化产生的水汽会改变炉内气氛，影响油气稳定析出。原煤中混杂的灰分、泥土等惰性杂质，不仅不参与热解生成反应，还会附着在煤粒表面封堵孔隙，阻碍油气扩散，同时催化焦油二次分解反应。通过系统化预脱水工艺，可以大幅降低入炉原煤含水率，减少汽化吸热带来的热能损耗，保证炉内热工环境稳定。配套除杂预处理工序可以有效去除原煤表面附着的杂质，减少惰性组分对热解反应的干扰。规范化的原料预处理体系，能够从源头稳定入炉煤质，最大化释放原煤焦油生成潜力，切实提升低温干馏工艺的煤焦油回收产量。

2.2 干馏热工制度优化策略

（1）确定最优干馏终温区间是抑制焦油二次裂解、保障产率的关键举措。干馏终温直接决定煤体有机质的裂解深度，温度过低会导致大分子有机质断裂不完全，大量挥发组分无法有效析出，造成焦油生成量不足。温度过高会打破低温干馏的反应平衡，已经生成的液态重质焦油组分稳定性下降，极易发生深度裂解。原本可回收的焦油会分解为小分子永久性气体，造成不可逆的产率损失。通过精准锁定适配煤质特性的最佳终温区间，既能保证煤中有效挥发组分充分解析，又可以从根本上抑制高温二次裂解反应，守住焦油产出的最优工况条件。（2）调整梯度升温制度可以稳步强化挥发分的析出效果，改善传统瞬时升温带来的热解缺陷。传统快速升温模式容易造成煤料表层温度快速升高，内部升温滞后，出现煤料内外热解程度不一致的现象。表层过度热解产生的油气会快速堆积在孔隙通道，阻碍内部挥发分的向外扩散。采用梯度升温模式能够让炉温平稳逐级上升，保证热量循序渐进渗透至煤料颗粒内部。煤体有机质官能团可以有序发生断裂解析，挥发分释放节奏更加均匀稳定，有效避免局部热解失衡和油气滞留问题，大幅提升整体挥发分的析出完整度。（3）优化恒温停留时间能够进一步完善热解反应体系，全面提升原煤热解转化率。短暂的恒温阶段可以为热解反应提供稳定的反应环境，让未完全分解的有机质持续完成裂解反应，充分释放残余挥发组分。停留时间不足会导致热解反应中途终止，部分可利用组分无法转化为焦油产物。停留时间过长会让油气长期处于高温环境，增加热降解损耗。合理匹配煤质特性设定恒温时长，能够在保证热解充分性的同时减少产物损耗，持续提升低温干馏工艺的焦油转化效率与整体收率。

2.3 炉内运行工况优化策略

（1）严控炉内密闭性、彻底消除微氧化损耗，是提

升焦油产量的基础优化手段。低温干馏的热解析油过程需要在无氧密闭的惰性环境中开展，氧气的侵入会直接破坏焦油产物的稳定性。生产过程中炉体接缝、进料出料端口、检修孔洞以及管路衔接位置，都会存在细微缝隙[4]。设备长期运行出现的密封老化、贴合不严等问题，会让外界空气持续微量渗入炉膛，形成持续性微氧化环境。热解产生的气态焦油组分极易与氧气发生氧化反应，造成重质焦油组分分解破坏，转化为无法冷凝回收的气态杂质。（2）稳定炉膛负压参数，可以构建平稳的油气析出与输送环境，规避气流波动造成的焦油流失。炉膛负压为热解油气的向外导出提供稳定动力，负压参数的平稳性直接决定油气析出速率与停留时长。生产负荷调整、管路堵塞、设备工况波动都会造成负压数值频繁起伏。负压偏低时，油气导出动力不足，大量油气滞留炉内高温区域，长时间受热发生二次裂解，造成焦油大幅损耗。负压过高时，炉内气流流速过快，轻质焦油组分来不及完成冷凝收集便被快速带出系统，同时高速气流会裹挟粉尘杂质，降低焦油品质与回收效率。通过搭建常态化参数监控机制，实时微调引风设备运行状态，根据干馏负荷动态校准负压参数，能够始终维持炉膛负压处于稳定合理区间。

2.4 焦油冷凝回收系统优化策略

热解油气中含有重质焦油与轻质焦油组分，不同组分的冷凝条件存在明显差异，系统运行参数设置不合理会造成部分焦油无法有效捕集，带来不可逆的产物损失。对冷凝回收系统进行整体优化，能够降低油气输送与冷凝环节的焦油损耗，提升整体焦油收率。（1）分级冷凝制度优化可以有效减少轻质焦油逃逸，单一温度的冷凝模式很难兼顾不同沸点焦油组分的回收需求，重质组分快速凝结而轻质组分难以被捕捉，随尾气离开系统。分级冷凝按照组分沸点差异设置多段冷却温度，逐步降低油气温度，依次完成重质焦油和轻质焦油的冷凝分离。该模式可以充分适配油气组分的冷凝特性，缩小轻质焦油的逃逸比例，提升全组分焦油的回收水平。（2）强化油气除雾捕集效果能够降低油气夹带带来的焦油损耗，冷凝后的油气内部会悬浮大量微小焦油液滴，常规设备难以捕捉这类细微雾滴，会随气流进入后续管路[5]。增设并维护高效除雾构件，定期清理附着的焦油沉积物，保持除雾单元的流通性能，能够拦截悬浮的微小液滴，减少雾滴随尾气流失，降低夹带损耗。（3）优化油气输送流速可以缓解焦油在管路内壁附着残留，油气流速过低时，焦油液滴容易沉降附着在管壁，长时间累积形成油垢，减少最终收集量。流速过高又会增大设备阻力，加剧雾滴夹带问题。通过调整管路配置与引风参数，维持油气输送流速在合理区间，减少焦油在输送管道内的附着沉积，让更多焦油组分顺利进入冷凝分离单元，持续提升焦油回收效率。

结束语

综上所述，低温煤干馏体系多参数耦合特征明显，原料条件变化会改变最优工艺参数区间。后续研究可针对不同煤种开展参数匹配试验，建立煤质与工艺参数之间的关联模型，进一步提升工艺调控的精准程度。本次研究总结的影响规律与优化策略，可以为低温煤干馏装置工艺调试、运行优化提供参考，助力煤炭分质利用产业提质增效。

参考文献

[1]赖文良.中低温煤焦油加氢工艺条件研究与技术创新[J].山东化工,2026,55(2):17-19+23.

[2]高万霞.提高SJ-Ⅳ型低温干馏炉页岩油回收率的技术实践[J].石油化工建设,2025,47(6):181-183.

[3]吴雷,王嘉伟,杨茸茸,等.高温煤焦油-焦油渣复合黏结剂制备高收率优质净水用煤质柱状活性炭的研究[J].煤炭转化,2025,48(6):27-40.

[4]李慧杰,王雄,刘文乡.悬浮床加氢技术在煤焦油加工中的应用及优化策略[J].山东化工,2026,55(8):61-63+67.

[5]闫宏艳,王天星,马小评,等.我国煤焦油加氢技术研究现状及展望[J].云南化工,2026,53(7):21-23+89.