

# 半干法脱硫与湿法脱硫工艺选择比较

周永华 徐艇 吴欣

浙江宣成环保设备有限公司 浙江 衢州 324400

**摘要:** 本文围绕半干法与湿法脱硫工艺,从基础理论、技术性能、经济成本、环保效益及工程应用等维度展开对比,分析两种工艺的核心原理、关键参数与设备差异,结合选型影响因素及典型案例,明确各自适配场景。研究表明,湿法适配高含硫烟气、大型机组及严苛环保要求,半干法更适用于中低含硫烟气、中小型机组及场地受限场景,最终构建选型决策流程,为企业科学选择脱硫工艺、实现环保与经济统一提供实操参考。

**关键词:** 半干法脱硫;湿法脱硫;工艺选择比较

引言:随着大气污染防治力度不断加大,烟气脱硫成为企业达标排放的核心环节,半干法与湿法脱硫是当前应用最广泛的两种工艺。二者在脱硫效率、成本投入、环保效益及工程适配性上存在显著差异,选型合理性直接影响企业运行成本、环保达标质量及长期发展。为解决企业工艺选择困惑,本文系统对比两种工艺的核心特性,结合实际应用场景梳理选型要点,为不同工况下的工艺选择提供科学依据,助力企业实现绿色高效生产。

## 1 半干法与湿法脱硫工艺基础理论

### 1.1 半干法脱硫工艺核心原理与流程

(1) 核心原理:以石灰或石灰石为吸收剂,配制成一定浓度的浆液,与含SO<sub>2</sub>的烟气接触时,发生酸碱中和反应,生成亚硫酸钙、硫酸钙等产物。反应过程中,烟气余热使浆液中的水分快速蒸发,最终形成干态粉末状产物,无需额外脱水处理,兼顾脱硫效率与节水需求。

(2) 工艺流程:先对烟气进行预处理,去除粉尘、杂质并调节温度,满足反应条件;随后通过喷嘴将吸收剂浆液喷入反应塔,与烟气充分混合接触;在塔内完成脱硫反应与水分蒸发,之后经布袋除尘器去除干态产物与残留粉尘,最后通过循环风机排出净化后烟气,同时收集脱硫产物。

### 1.2 湿法脱硫工艺核心原理与流程

(1) 核心原理:采用石灰石-石膏等碱性浆液作为吸收剂,SO<sub>2</sub>与浆液发生气-液两相反应,生成亚硫酸钙,再向浆液中通入氧化空气,将亚硫酸钙氧化为硫酸钙,硫酸钙经结晶形成石膏,实现SO<sub>2</sub>的固化去除,脱硫效率高且产物可回收利用。(2) 工艺流程:烟气先经预处理去除杂质,进入吸收塔后,与塔顶喷淋的吸收剂浆液逆流接触,完成SO<sub>2</sub>吸收;吸收后的浆液进入氧化池,通入氧化空气进行氧化反应;随后通过石膏脱水装置分离石膏与浆液,脱水后的石膏回收利用,产生的废水经处理达

标后排放<sup>[1]</sup>。

### 1.3 两种工艺的关键技术参数

(1) 半干法关键参数:反应温度直接影响水分蒸发速度与反应效率,需控制在合适范围;钙硫比决定脱硫效果,过高增加成本、过低影响效率;吸收剂利用率与雾化效果相关,雾化越均匀,利用率越高,可降低吸收剂消耗。(2) 湿法关键参数:液气比影响SO<sub>2</sub>吸收效果,需根据烟气量合理调节;浆液pH值控制在适宜区间,保障反应稳定性;氧化空气量需满足亚硫酸钙氧化需求,直接影响石膏生成质量;脱硫效率是核心指标,需通过参数优化维持在较高水平。

### 1.4 两种工艺的核心设备对比

(1) 半干法核心设备:反应塔是反应核心,提供烟气与吸收剂接触空间;喷嘴系统负责将浆液雾化,保证混合均匀;布袋除尘器用于分离干态产物与粉尘;循环风机为烟气流通提供动力,保障工艺连续运行。(2) 湿法核心设备:吸收塔是喷淋反应的关键,内部设有喷淋层与除雾器;浆液循环泵将吸收剂浆液循环输送至喷淋层,维持反应持续进行;氧化风机提供氧化反应所需空气;石膏脱水装置实现石膏与浆液的分离,保障石膏回收质量。

## 2 半干法与湿法脱硫工艺多维度选择对比

### 2.1 技术性能对比

(1) 脱硫效率:湿法脱硫效率可达95%以上,部分优化工艺可提升至98%,核心优势在于气液接触充分,吸收反应更彻底,影响因素主要包括液气比、浆液pH值及氧化反应效果;半干法脱硫效率为85%-92%,略低于湿法,受反应温度、钙硫比及雾化效果影响较大,当烟气中SO<sub>2</sub>浓度波动较大时,效率稳定性不如湿法,但可满足常规环保排放要求。(2) 煤种与烟气适配性:湿法适配性更强,可处理高、中、低含硫量烟气,无论是高硫煤

(含硫量 > 3%) 还是低硫煤, 均能稳定达到排放标准, 对烟气中粉尘、重金属等杂质的耐受性较好; 半干法更适用于中低含硫量烟气 (含硫量 < 2%), 处理高硫烟气时需大幅提高钙硫比, 增加运行成本, 且对烟气温度、湿度的要求更严格, 适配范围相对较窄<sup>[2]</sup>。(3) 系统稳定性: 湿法系统结构复杂, 涉及浆液循环、氧化、脱水等多个环节, 运行可靠性较强, 但负荷调节响应速度较慢, 故障点较多, 故障处理难度较大, 需专业运维人员操作; 半干法系统结构相对简单, 无复杂浆液循环系统, 负荷调节灵活, 启停方便, 故障发生率较低, 故障处理流程简便, 日常运行稳定性更易保障。

## 2.2 经济成本对比

(1) 初期投资: 湿法初期投资较高, 主要因吸收塔、浆液循环系统、氧化装置及废水处理设备购置和工程建设成本高, 受处理规模、脱硫效率要求影响较大, 规模越大、效率要求越高, 投资差距越明显; 半干法初期投资较低, 核心设备仅包括反应塔、喷嘴系统及布袋除尘器, 工程建设流程简单, 设备购置成本低, 适合中小型机组或改造项目。(2) 运行成本: 湿法运行成本偏高, 吸收剂 (石灰石) 消耗量大, 且需消耗大量电能用于浆液循环、氧化风机运行, 同时水耗较高, 加之废水处理需额外投入药剂和能耗, 运维工作量大, 运维费用较高; 半干法运行成本较低, 吸收剂利用率较高, 无需大量水资源, 能耗仅集中在风机和雾化系统, 运维流程简单, 运维费用远低于湿法。(3) 投资回报周期: 湿法投资回报周期较长, 通常为5-8年, 主要因初期投资高、运行成本高, 虽副产品石膏可回收利用带来一定收益, 但整体回收效率较低; 半干法投资回报周期较短, 通常为3-5年, 初期投资低、运行成本省, 且干态产物可作为建筑辅料回收, 进一步缩短回报周期, 适合对投资回报速度有要求的项目<sup>[3]</sup>。

## 2.3 环保效益对比

(1) 污染物排放: 湿法SO<sub>2</sub>排放浓度可控制在极低水平, 轻松满足国家环保标准, 但其会产生大量脱硫废水, 废水中含有重金属、氯离子等污染物, 处理难度大、成本高, 若处理不当易造成二次污染; 半干法几乎不产生废水, SO<sub>2</sub>排放可满足常规标准, 粉尘排放经布袋除尘器处理后达标, 污染物处理难度低, 对水环境影响较小。(2) 副产品处理: 半干法产生的干态产物主要为亚硫酸钙、硫酸钙混合物, 可作为道路基层、水泥辅料回收利用, 回收价值较低, 但处理简单, 二次污染风险小; 湿法产生的石膏纯度较高, 可用于建筑、建材等领域, 回收利用价值高, 但石膏储存、运输需额外投入,

若堆放不当易造成土壤、水体污染, 二次污染风险高于半干法。(3) 能耗与碳排放: 湿法能耗较高, 浆液循环泵、氧化风机等设备耗电量大, 间接导致碳排放增加; 半干法能耗较低, 仅风机和雾化系统消耗电能, 碳排放水平远低于湿法, 更符合低碳环保发展需求, 尤其适合环保低碳要求较高的区域。

## 2.4 工程应用难度对比

(1) 占地面积: 湿法系统设备繁多, 需单独设置吸收塔、氧化池、石膏脱水车间及废水处理区域, 占地面积较大, 适合场地充足的新建厂区; 半干法设备布局紧凑, 无需单独设置废水处理和石膏脱水区域, 占地面积仅为湿法的1/3-1/2, 适合场地狭小的老厂区改造或中小型机组。(2) 施工周期: 湿法施工周期较长, 通常为6-10个月, 涉及设备安装、管道铺设、浆液系统调试等多个环节, 施工复杂度高; 半干法施工周期较短, 仅需3-6个月, 核心设备安装简便, 调试流程简单, 可快速完成工程建设并投入运行, 减少工期成本<sup>[4]</sup>。(3) 设备腐蚀与维护: 湿法系统长期处于气液接触环境, 吸收塔、管道等设备易受酸性浆液腐蚀, 需定期进行防腐处理, 日常维护工作量大、难度高, 维护成本高; 半干法系统以干态反应为主, 设备腐蚀风险低, 仅需定期检查喷嘴、除尘器等设备, 维护工作量小、难度低, 可降低维护成本和停机时间。

## 3 半干法与湿法脱硫工艺选型影响因素及案例分析

### 3.1 工艺选型核心影响因素

(1) 烟气参数: 烟气含硫量是选型的核心决定性参数, 高含硫量 (> 2%) 烟气优先选用湿法, 可保障脱硫效率达标且经济性更优; 低中含硫量 (< 2%) 烟气可选用半干法, 降低投资和运行成本。烟气流量决定设备规模, 大型机组 (流量 > 100000m<sup>3</sup>/h) 湿法适配性更强, 中小型机组半干法更灵活; 烟气温度需匹配工艺要求, 湿法对温度适应性广, 半干法需控制烟气温度在合理范围以保障水分蒸发和反应效果。(2) 企业自身条件: 场地规模直接限制工艺选择, 场地狭小的老厂区或中小型企业优先选用半干法, 其占地面积仅为湿法的1/3-1/2; 资金预算充足、追求长期稳定运行的企业可选用湿法, 初期投资虽高但运行稳定, 预算有限的企业可选择半干法降低初期投入。运维能力强、具备专业运维团队的企业可选用湿法, 运维流程复杂但技术成熟; 运维能力较弱的企业适合半干法, 其系统简单、维护便捷。水资源短缺地区优先选用半干法, 湿法水耗较高, 需充足水源支撑<sup>[5]</sup>。(3) 环保政策: 国家及地方SO<sub>2</sub>排放标准直接决定工艺选型, 排放标准严格 (如排放浓度 < 35mg/m<sup>3</sup>) 的区

域, 优先选用湿法以确保达标; 排放标准宽松的区域, 可根据企业条件选用半干法。排污许可及环评要求也需重点考虑, 环评要求高、需配套废水零排放的项目, 半干法更具优势, 湿法需额外配套废水处理系统以满足环评要求。

### 3.2 典型应用案例分析

(1) 半干法应用案例: 某中型热电厂, 烟气含硫量1.2%、流量50000m<sup>3</sup>/h, 场地狭小且水资源紧张, 选用半干法脱硫工艺。工程投用后, 脱硫效率稳定在88%-90%, 满足地方环保标准, 初期投资较湿法节省30%, 运行水耗几乎为零, 运维工作量小, 适配企业运维能力。某水泥厂, 烟气含硫量0.8%, 选用半干法脱硫, 利用水泥生产余热促进水分蒸发, 干态产物可作为水泥辅料回收, 实现资源循环, 运行成本低且符合水泥行业环保要求。(2) 湿法应用案例: 某大型火电厂, 机组容量600MW, 烟气含硫量3.5%、流量120000m<sup>3</sup>/h, 环保标准要求SO<sub>2</sub>排放浓度 < 35mg/m<sup>3</sup>, 选用石灰石-石膏湿法脱硫工艺。工程配套完整的浆液循环、氧化及石膏脱水系统, 投用后脱硫效率稳定在98%以上, 达标排放, 产生的高纯度石膏用于建筑行业, 实现副产品回收, 虽初期投资和运行成本较高, 但满足大型机组长期稳定运行需求, 符合严苛环保政策。

### 3.3 案例对比与选型启示

(1) 案例中两种工艺的适配性分析: 半干法案例适配中低含硫量、中小型机组、场地狭小及水资源短缺的企业, 核心优势是投资省、运维简、节水; 湿法案例适配高含硫量、大型机组、环保标准严苛及资金充足的企业, 核心优势是脱硫效率高、运行稳定、副产品价值高。总结选型关键经验: 需结合烟气含硫量定工艺类型, 结合企业场地、资金、运维能力定工艺规格, 结合环保政策定达标标准。(2) 不同工况下工艺选型的误区及规避建议: 常见误区一是盲目追求高脱硫效率, 中小型低硫烟气项目选用湿法, 增加投资和运行成本, 规避建议是根据烟气含硫量匹配效率需求; 二是忽视场地和水资源, 水资源短缺地区选用湿法, 导致运行成本飙升, 规避建议是优先结合企业自身资源条件选型; 三是

忽视运维能力, 运维薄弱企业选用湿法, 导致故障频发, 规避建议是结合运维团队实力选择工艺。

### 3.4 选型决策流程构建

(1) 建立选型指标体系, 明确各指标权重: 核心指标包括烟气含硫量(权重30%)、环保标准(权重25%)、资金预算(权重20%)、场地规模(权重15%)、运维能力(权重10%), 确保指标覆盖烟气、企业、政策三大核心维度, 权重分配贴合实际选型优先级, 为选型提供量化依据。(2) 构建简易选型决策模型, 为企业提供实操指南: 第一步, 检测烟气含硫量、流量等核心参数, 明确环保达标要求; 第二步, 评估企业场地、资金、运维及水资源条件; 第三步, 对照指标体系打分, 总分 ≥ 80分优先选湿法, 60-79分可选半干法, < 60分需优化企业条件后再选型; 第四步, 结合案例经验, 最终确定工艺类型, 确保选型科学、适配、经济。

### 结束语

综上, 半干法与湿法脱硫工艺无绝对优劣, 核心在于与企业实际工况适配。湿法以高脱硫效率、强适配性满足高要求场景, 半干法凭借低成本、小占地、节水低碳的优势适配中小型项目。企业选型需立足烟气参数、自身条件及环保政策, 规避选型误区, 结合本文构建的决策流程科学判断。未来可结合技术升级, 进一步优化两种工艺的经济性与环保性, 推动烟气脱硫技术向高效、低碳、节能方向持续发展。

### 参考文献

- [1]葛介龙,张佩芳.几种半干法脱硫工艺机理探讨[J].电力环境保护,2023,11(1):95-97.
- [2]张国鑫.半干法脱硫工艺的影响因素分析[J].电力环境保护,2022,8(2):112-114.
- [3]林金柱.三钢2~#烧结机烟气脱硫系统及运行状况[J].烧结球团,2021,8(5):99-103.
- [4]冯世昌.焦炉烟气循环流化床半干法脱硫技术应用及优缺点分析[J].化工管理,2024,22(5):187-188.
- [5]张奎.玻璃窑烟气治理两种常用半干法脱硫除尘工艺技术经济性比较分析[J].玻璃,2022,46(1):49-53.