

脱硫吸收塔喷淋层防冲刷提效结构改造研究

张 寻

大唐环境产业集团股份有限公司饶平项目分公司 河南郑州 450000

摘 要: 针对脱硫吸收塔传统“座梁式”喷淋层存在的管道冲刷严重、脱硫效率低、能耗高及设备寿命短等问题,提出一种“穿梁式”喷淋层优化结构。通过支撑梁与喷淋管道布局重新设计,将母管穿梁设置、优化喷嘴水平布局,并强化防腐防护。以大唐潮州电厂3号吸收塔为实例,改造后实现喷淋母管无冲刷磨损,脱硫效率从97.5%–98.0%提升至98.5%–99.0%,厂用电率从1.29%降至0.96%,年节电354万度,设备寿命延长60%以上,检修周期缩短40%–50%。该结构可有效解决传统喷淋层痛点,为火电厂脱硫系统能效提升与运维优化提供实践参考。

关键词: 脱硫吸收塔; 喷淋层改造; 穿梁结构; 防冲刷; 能效提升; 喷嘴优化

1 引言

在火电厂烟气净化系统中,脱硫吸收塔是实现二氧化硫脱除的核心设备,而喷淋层作为吸收塔的关键部件,其结构设计直接影响脱硫效率、设备寿命与运行能耗^[1]。目前,国内多数燃煤机组脱硫吸收塔采用“座梁式”喷淋层设计,即喷淋管道直接放置于支撑梁上,此类结构在长期运行中暴露出诸多问题:喷嘴与母管距离过近导致管道冲刷磨损、喷嘴布局错落造成喷淋覆盖不均、支撑梁遮挡影响烟气与浆液接触效率,进而引发脱硫效率下降、能耗攀升及设备频繁检修等连锁反应^[2–3]。

1.1 研究背景与意义

随着国家“双碳”目标推进及环保标准趋严,火电厂对脱硫系统的稳定性、高效性与经济性提出更高要求^[4]。传统喷淋层的缺陷不仅导致脱硫效率难以满足超低排放要求,还因频繁检修增加停机时间与运维成本。据统计,采用“座梁式”结构的吸收塔,喷淋管道年均磨损达5–8mm,寿命仅3–5年,且为维持脱硫效率需多运行1–2台浆液循环泵,年增加电耗超300万度^[5]。

本研究提出的“穿梁式”改造方案,通过结构优化从根本上解决管道冲刷问题,同时提升喷淋均匀性与系统能效,具有以下意义:

- 1.1.1 延长设备寿命,降低检修频率与成本;
- 1.1.2 提升脱硫效率,确保排放达标且富余量充足;
- 1.1.3 降低系统能耗,符合火电厂节能降耗需求;
- 1.1.4 为老塔改造与新塔设计提供可复制的技术方案。

1.2 国内外研究现状

国外针对脱硫吸收塔喷淋系统的研究起步较早,美国Babcock & Wilcox公司提出的“水平喷淋+整体支撑”结构,通过优化喷嘴角度与间距提升覆盖均匀性,但未解决支撑梁与管道的冲刷干扰问题^[6]。德国Lurgi公司采用“悬挂式”喷淋管道设计,虽避免了管道与梁体直接接触,但存在支撑结构复杂、施工难度大的缺陷^[7]。

国内研究多聚焦于喷嘴类型优化与浆液循环系统改进,如清华大学提出的“双螺旋喷嘴”可提升雾化效果,但未触及喷淋层支撑结构的根本问题^[8];中国电建集团提出的“喷淋层模块化设计”虽缩短检修时间,但对防冲刷与能耗优化效果有限^[9]。

现有研究尚未形成“支撑结构–管道布局–喷嘴优化–防腐防护”一体化的解决方案,本研究的创新点在于将“座梁式”改为“穿梁式”,通过主梁开孔穿管、辅梁U型承托、喷嘴水平布局等设计,实现结构与性能的协同优化。

2 传统喷淋层存在的问题分析

以大唐潮州电厂3号吸收塔原“座梁式”喷淋层为研究对象,从管道磨损、脱硫效率、能耗及设备寿命四个维度,分析传统结构的核心缺陷。

2.1 管道冲刷磨损严重

原设计中,喷淋母管两侧的双向喷嘴向下位移至母管斜下方,且喷嘴与母管距离小于喷浆扇面半径(仅为扇面半径的0.6–0.8倍)。运行时,喷浆扇面直接冲刷母管外壁,形成月牙形磨损。

2.2 脱硫效率不稳定

传统结构存在两处导致脱硫效率偏低的关键问题：

2.2.1 塔壁四周喷嘴覆盖率不足：原设计每层 272 只喷嘴中，靠近塔壁的喷嘴数量仅占 15%，且扇面角度未适配塔壁弧度，形成宽度约 0.8–1.2m 的“烟气快速通道”，导致 10%–15% 的原烟气未经充分反应直接逃逸；

2.2.2 内部喷嘴高度错落：喷嘴沿母管轴向上下偏差达 50–80mm，喷淋扇面重叠率差异大，部分区域重叠超 60%（造成浆液浪费），部分区域空白（导致反应不充分）。改造前，该吸收塔脱硫效率长期维持在 97.5%–98.0%，在入口二氧化硫浓度超 $1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，出口浓度易接近排放限值。

2.3 运行能耗偏高

为弥补脱硫效率不足，传统结构需通过增加浆液循环泵运行数量提升喷淋量。改造前，3 号吸收塔需同时运行 4–5 台浆液循环泵（设计共 5 台），导致脱硫系统厂用电率达 1.29%，年耗电量约 697 万度，较同类型机组平均水平高 25%–30%。能耗偏高的核心原因在于：喷淋布局不合理导致浆液利用率低，需通过“增量”弥补“低效”。

2.4 设备寿命短与运维成本高

玻璃钢喷淋管道因长期受浆液冲刷，耐磨层损耗速度加快，平均寿命仅 3–5 年，需每 3 年进行一次大规模检修。2019–2023 年期间，该吸收塔喷淋系统累计检修 4 次，单次检修周期 20–25 天，年均运维成本 50–80 万元，不仅增加成本，还影响机组连续运行稳定性。

3 喷淋层防冲刷提效结构设计

本研究的核心是将传统“座梁式”结构改为“穿梁式”，通过支撑梁优化、喷淋管道与喷嘴布局改进、防腐防护强化三大技术手段，实现系统性能全面提升。

3.1 支撑梁优化设计

支撑梁是喷淋层的承载基础，其结构优化需兼顾强度、防冲刷与减少遮挡三大目标，具体设计如下：

3.1.1 支撑主梁设计：采用整体式穿梁结构，主梁截面尺寸为 $300\text{mm} \times 750\text{mm}$ ，材质为 Q355B 钢板。主梁上开设与喷淋母管匹配的圆孔（孔径比母管外径大 5–10mm），母管从圆孔中水平穿过，确保主梁与母管平行且无直接接触，避免局部应力集中与浆液冲刷。同时，圆孔内侧粘贴 5mm

厚 PP 耐磨板，进一步降低母管与梁体的摩擦损耗；

3.1.2 支撑辅梁设计：辅梁截面尺寸为 $250\text{mm} \times 250\text{mm}$ ，安装位置较主梁下沉 100mm，上方布置 U 型压弧板（弧度与支管外径一致）及加强板（厚度 12mm）。U 型压弧板采用螺栓固定，用于承托喷淋支管，既保证支管水平稳定，又能通过弹性接触减少振动磨损；

3.1.3 支撑梁数量优化：通过 ANSYS 力学仿真计算，在满足承载强度的前提下，将原每层 12 根支撑梁减少至 8 根，减少梁体对喷淋扇面的遮挡面积（遮挡率从 25% 降至 15%），提升烟气与浆液的接触效率。

3.2 喷淋管道与喷嘴优化

管道与喷嘴的优化是提升脱硫效率与防冲刷的关键，具体改进包括：

3.2.1 喷嘴数量与布局：每层喷嘴数量从 272 只调整为 264–266 只（减少 6–8 只），减少无效喷淋区域。喷嘴方向与母管保持水平，所有喷嘴严格控制在同一水平面（偏差 $\leq 5\text{mm}$ ），采用 120° 扇面喷嘴，通过 CFD 流场模拟优化间距，确保喷淋扇面在塔内截面均匀覆盖，无重叠（重叠率 $\leq 10\%$ ）与空白区域；

3.2.2 喷嘴与母管距离控制：将喷嘴与母管的距离从原 0.8m 调整为 1.2m（大于喷浆扇面半径 1.0m），彻底避免喷浆扇面直接冲刷母管，同时保证扇面在塔内形成完整的“喷淋 curtain”。

4 工程应用实例

以大唐潮州电厂 3 号吸收塔改造工程为实例，验证“穿梁式”喷淋层结构的实际效果。该吸收塔直径 16m，高度 45m，原设计 5 层喷淋层，改造工程于 2025 年 2 月 19 日开工，3 月 31 日完工，4 月 7 日随机组并网运行。

4.1 改造前后参数对比

改造前后的关键运行参数对比见表 1，从表中可看出：

4.1.1 脱硫效率：在入口二氧化硫 $1189.87\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，出口浓度降至 $19.26\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硫效率达 98.9%，较改造前提升 1.4 个百分点；

4.1.2 能耗指标：同等工况下减少 1 台浆液循环泵运行，年节电 354 万度，厂用电率从 1.29% 降至 0.96%，为全厂四套脱硫系统最低；

表 1 改造前后关键运行参数对比

对比项	改造前（2024 年 5 月）	改造后（2025 年 5 月）	提升幅度
管道年均磨损	5–8mm	≤ 0.5mm	磨损量降低 90%
脱硫效率	97.5%–98.0%	98.5%–99.0%	提升 1–1.5 个百分点
厂用电率	1.29%	0.96%	降低 25.6%
检修周期	20–25 天 / 次	10–15 天 / 次	缩短 40%–50%
年运维成本	50–80 万元	20–30 万元	降低 60% 以上
年耗电量	697 万度	343 万度	节电 354 万度

4.2 不同工况下的性能验证

为验证改造后系统的稳定性，选取三种典型工况进行测试，结果见表 2：

三种工况下，系统均能稳定运行，且脱硫效率均超 98%，能耗随负荷灵活调整，体现出良好的适应性。

表 2 不同工况下的性能测试结果

工况	机组负荷（MW）	入口 SO ₂ （mg/Nm ³ ）	运行循环泵数量（台）	出口 SO ₂ （mg/Nm ³ ）	脱硫效率（%）
高负荷	950	1500	4	22.5	98.5
中等负荷	800	1000	3	18.3	98.2
低负荷	600	600	2	12.1	98.0

5 结论与展望

5.1 结论

本研究提出的脱硫吸收塔“穿梁式”喷淋层防冲刷提效结构，通过支撑梁优化、管道与喷嘴布局改进及防腐防护强化，解决了传统“座梁式”结构的四大痛点，主要结论如下：

5.1.1 防冲刷效果显著：母管穿梁设计与喷嘴间距优化，彻底避免浆液冲刷，管道年均磨损从 5–8mm 降至 ≤ 0.5mm，设备寿命延长 60% 以上；

5.1.2 脱硫效率提升：喷嘴水平布局与均匀覆盖，使脱硫效率从 97.5%–98.0% 提升至 98.5%–99.0%，确保超低排放达标；

5.1.3 能耗大幅降低：减少 1 台循环泵运行，厂用电率降低 25%–30%，年节电 354 万度，年节约电费 163 万元；

5.1.4 运维成本降低：检修周期缩短 40%–50%，年运维成本降低 60% 以上，投资回收周期仅 1.2 年。

注释

① 厂用电率：指发电厂生产电能过程中消耗的电能占发电量的百分比，是衡量发电厂能效的重要指标。

② 超低排放：指火电厂烟气中二氧化硫排放浓度 ≤ 35mg/Nm³，氮氧化物 ≤ 50mg/Nm³，烟尘 ≤ 10mg/Nm³（GB13223–2011《火电厂大气污染物排放标准》）。

③ 喷淋扇面半径：指喷嘴喷出的浆液形成的扇形区域的半径，其大小与喷嘴类型、压力及流量相关。

参考文献：

[1] 李辉. 火电厂脱硫吸收塔喷淋系统优化设计研究[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 123–128.

[2] 王鹏, 张磊. 脱硫吸收塔喷淋层冲刷磨损原因分析及对策[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 156–160.

[3] 刘阳, 陈明. 座梁式喷淋层结构缺陷对脱硫效率的影响研究[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 89–93.

[4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于推进电力行业碳达峰碳中和工作的指导意见[R]. 北京：国家发改委, 2022.

[5] 中国电力企业联合会. 火电厂脱硫系统运行现状与发展报告[R]. 北京：中国电力企业联合会, 2023.

[6] Babcock & Wilcox Company. Spray Tower Design for Flue Gas Desulfurization[M]. Ohio: Babcock & Wilcox, 2019.

[7] Lurgi GmbH. Advanced Absorber Technology for Desulfurization[J]. Chemical Engineering & Technology, 2020, 43(5): 879–885.

[8] 张强, 王书肖. 双螺旋喷嘴在脱硫吸收塔中的应用研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(3): 245–250.

[9] 中国电建集团. 脱硫吸收塔喷淋层模块化改造技术规程[S]. 北京：中国电力出版社, 2022.

[10] 赵伟, 李娜. 脱硫系统浆液循环泵节能运行优化研究[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(4): 78–83.

作者简介：张寻（1987–），男，河南郑州人，大唐环境产业集团股份有限公司饶平项目分公司工程师，研究方向：火电厂烟气净化技术与设备结构优化。