

钢铁厂烧结烟气超低排放技术优化

冯英英

河北晶森中恒绿色科技有限公司 河北 石家庄 050000

摘要: 钢铁厂烧结烟气超低排放技术优化聚焦源头控制、过程减排与末端治理协同。采用低硫低氮原料及燃料替代技术,从源头减少污染物生成;通过烟气循环利用及智能温控优化烧结工艺参数,降低过程排放。末端治理环节,集成循环流化床半干法脱硫、中低温SCR脱硝、湿式电除尘及二噁英催化降解技术,结合活性炭吸附-再生工艺与臭氧氧化协同脱除技术,实现多污染物高效协同治理。技术升级显著降低SO₂、NO_x及颗粒物排放浓度,满足超低排放标准,推动钢铁行业绿色转型。

关键词: 钢铁厂; 烧结烟气; 超低排放; 技术优化

引言: 钢铁行业烧结工序是大气污染物排放的重点环节,其烟气中颗粒物、硫氧化物、氮氧化物及二噁英等污染物排放量大,对环境的影响显著。随着国家超低排放政策持续收紧,传统治理技术面临效率瓶颈与成本压力。如何通过技术创新实现烧结烟气多污染物深度净化与资源化利用,成为推动钢铁行业绿色低碳转型的关键。本文聚焦烧结烟气污染特性,从源头控制、工艺优化、末端治理及协同控制等方面提出技术优化策略,助力钢铁企业达标排放与可持续发展。

1 钢铁厂烧结烟气污染特性与排放标准分析

1.1 烧结烟气成分与生成机理

(1) 颗粒物(PM)来源及粒径分布: 主要源于烧结原料含有的粉尘、燃料燃烧残渣及物料碰撞破碎产生的颗粒。粒径分布呈“双峰型”,PM₁₀占比约60%-80%,其中PM_{2.5}占PM₁₀的30%-50%,细颗粒因吸附重金属和二噁英,环境危害更大。(2) 气态污染物产生规律: SO₂主要来自原料中硫化物燃烧,浓度随原料硫含量波动,通常为800-3000mg/m³; NO_x以热力型和燃料型为主,烧结温度1200-1400℃时生成量最高; CO源于燃料不完全燃烧,在烧结机边缘区域浓度可达5000mg/m³以上; VOCs多为苯系物,由原料中有机杂质分解产生,浓度虽低但毒性强。(3) 二噁英与重金属的低温催化生成风险: 在200-400℃低温区间,烟气中的氯苯类物质易在飞灰中重金属(Cu、Fe等)催化下生成二噁英; Pb、Hg等重金属在烧结过程中挥发,随烟气冷却凝结于细颗粒表面,形成二次污染风险^[1]。

1.2 超低排放标准解读

(1) 国家《钢铁行业超低排放改造工作方案》核心指标: 颗粒物排放浓度 ≤ 10mg/m³, SO₂ ≤ 35mg/m³, NO_x ≤ 50mg/m³, 二噁英排放浓度参照GB18484-2020执

行,需满足“低于0.1ngTEQ/m³”要求。(2) 地方差异化标准对比: 河北省要求更严,颗粒物 ≤ 5mg/m³, SO₂ ≤ 20mg/m³; 江苏省对NO_x额外增设“烧结机头烟气脱硝效率 ≥ 70%”的要求,部分地区还要求对VOCs进行专项治理,排放浓度 ≤ 60mg/m³。

1.3 技术瓶颈分析

(1) 传统工艺效率上限: 石灰石-石膏法脱硫效率通常在95%-98%,当入口SO₂浓度低于500mg/m³时,难以稳定达到超低标准; 除尘方面,电除尘器对PM_{2.5}捕集效率不足70%,需依赖布袋除尘,但运行阻力大、维护成本高。(2) 低温脱硝催化剂活性不足: 烧结烟气温度多为120-200℃,现有催化剂在该区间活性衰减快,脱硝效率仅60%-75%,且易受SO₂中毒影响,使用寿命缩短至1-2年。(3) 副产物资源化利用技术缺失: 脱硫石膏含氯离子和重金属,现有工艺难以提纯,多堆存处置; 除尘灰中锌、铅等有色金属回收技术不成熟,回收成本高于市场价值,导致资源浪费与二次污染。

2 钢铁厂烧结烟气超低排放关键技术优化策略

2.1 源头控制技术

(1) 原料结构优化(低硫矿、低氮燃料替代): 优先选用硫含量低于0.3%的低硫铁矿,搭配高品位铁精矿(TFe ≥ 65%),可使原料总硫含量降低40%-60%,从源头减少SO₂生成量。燃料方面,用低氮焦粉(氮含量 ≤ 0.5%)或生物质燃料(如秸秆压块)替代传统高氮煤粉,可减少燃料型NO_x排放30%以上,同时降低烧结过程中VOCs的释放量,兼顾环保与成本控制。(2) 烧结工艺参数调控(烧结温度、风量控制): 通过智能温控系统将烧结温度稳定在1150-1250℃,避免超高温导致热力型NO_x激增,较传统温度区间(1200-1400℃)可减少NO_x生成25%。风量控制采用“分段变频”模式,烧结机前

段(点火-高温区)保持风量12000-15000m³/h,后段(冷却区)降至8000-10000m³/h,既保证烧结矿质量,又减少燃料不完全燃烧产生的CO和VOCs,使CO浓度控制在1500mg/m³以下^[2]。

2.2 末端治理技术升级

2.2.1 脱硫技术优化

(1)循环流化床半干法脱硫(CFB-FGD)效率提升:通过优化吸收塔内流场设计,增设多层导流板与雾化喷嘴,使脱硫剂(消石灰)与烟气接触面积增加30%;同时控制塔内温度在70-80℃,保证脱硫反应效率,将脱硫效率从传统的95%提升至98%以上,出口SO₂浓度稳定低于20mg/m³,且副产物脱硫灰含水率低于5%,便于后续处置。(2)双碱法脱硫的钠钙比优化:调整吸收液中Na⁺与Ca²⁺的摩尔比至1:3-1:4,既保留钠碱法“反应速度快、不易结垢”的优势,又通过钙碱补充降低运行成本。优化后脱硫效率可达97%,钠碱消耗量减少25%,避免传统高钠比(1:1-1:2)导致的碱液浪费与后续废水处理压力。

2.2.2 脱硝技术优化

(1)中低温SCR催化剂研发(如Mn-Ce基催化剂):针对烧结烟气120-200℃的低温特性,研发Mn-Ce-Ti复合氧化物催化剂,通过掺杂La元素提升抗硫性,在180℃时脱硝效率可达85%,且SO₂中毒后经热空气再生,活性恢复率超过90%,使用寿命延长至3-4年,解决传统V₂O₅-WO₃/TiO₂催化剂低温活性不足的问题。(2)SNCR-SCR联合脱硝工艺参数优化:在烧结机头烟道前段(800-1000℃)喷入氨水(SNCR段),还原剂喷射量控制在理论需求量的1.2倍,初步脱除40%-50%的NO_x;后段串联中低温SCR反应器,控制烟气流速1.5-2m/s、催化剂床层温度180-220℃,总脱硝效率可达80%以上,出口NO_x浓度稳定低于35mg/m³,较单一SCR工艺减少催化剂用量30%^[3]。

2.2.3 除尘技术优化

(1)湿式电除尘器(WESP)与布袋除尘的协同布局:采用“布袋除尘+湿式电除尘”串联工艺,布袋除尘器先捕集80%以上的颗粒物(尤其是PM₁₀),出口浓度降至15-20mg/m³;后续WESP通过极线放电使细颗粒(PM_{2.5})荷电,再由喷淋水捕集,总除尘效率提升至99.99%,出口颗粒物浓度≤5mg/m³,同时去除部分SO₃和重金属,实现“一设备多效”。(2)超细纤维滤料在布袋除尘中的应用:选用PTFE/玻璃纤维复合超细滤料,纤维直径降至1-3μm,孔隙率保持85%以上,对PM_{2.5}的捕集效率可达99.5%,较传统滤料提升15%-20%;同时滤

料表面进行PTFE涂层处理,降低粉尘黏附性,清灰周期延长至4-6小时,运行阻力稳定在800-1200Pa,减少风机能耗10%。

2.2.4 二噁英控制技术

(1)急冷塔+活性炭喷射的联合脱除:在烧结烟气冷却段设置急冷塔,将烟气温度从300-400℃快速降至200℃以下(降温速率>50℃/s),抑制二噁英二次生成;后续烟道喷射活性炭(用量20-30mg/m³),搭配高效布袋除尘器捕集吸附二噁英的活性炭颗粒,总去除效率可达90%以上,出口二噁英浓度≤0.05ngTEQ/m³,满足最严地方标准。(2)催化氧化法降解二噁英:研发V₂O₅-MoO₃/TiO₂催化氧化催化剂,在250-300℃条件下,将二噁英分解为CO₂、H₂O和HCl,降解效率可达95%;催化剂与SCR脱硝催化剂分层布置于同一反应器,实现“脱硝+二噁英降解”一体化,减少设备占地面积,降低投资成本20%。

2.3 多污染物协同控制技术

(1)活性炭吸附-再生一体化工艺优化(减少活性炭消耗量):采用移动床活性炭吸附装置,吸附饱和的活性炭进入再生炉(400-450℃惰性气体氛围),解析出的SO₂、VOCs等污染物导入脱硫或焚烧系统处理,活性炭再生率可达95%以上;通过优化吸附风速(0.8-1.2m/s)与再生温度曲线,使活性炭单次使用寿命延长至15-20天,消耗量较传统一次性活性炭工艺减少80%,大幅降低运行成本。(2)臭氧氧化协同脱硫脱硝技术(O₃-basedAPC):在烟气进入吸收塔前,通过臭氧发生器产生高浓度O₃(浓度500-800mg/m³),O₃快速将NO氧化为NO₂(氧化效率>90%),同时部分氧化VOCs和二噁英;后续在吸收塔内用NaOH溶液同步吸收SO₂和NO₂,生成Na₂SO₄和NaNO₃,实现“脱硫+脱硝+VOCs/二噁英去除”协同处理,总脱硫效率98%、脱硝效率85%,且系统无氨逃逸问题,适用于中小型钢铁厂的低成本改造^[4]。

3 政策与市场驱动下的钢铁厂烧结烟气超低排放技术发展路径

3.1 政策导向分析

(1)环保税、排污许可制对技术升级的倒逼机制:我国环保税实行“多排多征、少排少征、不排不征”原则,钢铁企业若烧结烟气污染物排放浓度超标,每超1倍需按基准税额的2倍缴纳环保税,以颗粒物为例,超标排放企业每吨烟气缴税成本可增加5-8元。排污许可制则明确企业排放限值与监测要求,未达标企业将面临停产整改,双重政策倒逼企业加快脱硫、脱硝等末端治理技术升级,2023年钢铁行业超低排放改造企业占比已超60%,较政策实施前提升35个百分点。(2)绿色金融支持超低

排放改造（如低碳债券）：国家发改委将钢铁烧结烟气超低排放改造纳入绿色产业目录，企业可发行低碳债券融资，利率较普通债券低10%-15%。2024年河北某钢铁集团发行15亿元低碳债券，专项用于烧结机头WESP与中低温SCR脱硝改造，项目投资回收期缩短至4.2年；此外，银行对达标企业提供绿色信贷，贷款额度最高可达项目总投资的70%，进一步降低企业技术升级资金压力。

3.2 技术发展趋势

(1) 人工智能在烟气治理中的应用（如智能加药系统）：基于机器学习算法的智能加药系统，可实时采集烟气SO₂浓度、流量等12项参数，动态调整脱硫剂（如消石灰）投加量，较传统人工控制减少药剂浪费15%-20%，且能将出口SO₂浓度波动控制在±5mg/m³内。部分企业还引入AI视觉监测，通过摄像头识别布袋除尘器滤袋破损情况，故障响应时间从2小时缩短至10分钟，保障除尘效率稳定。(2) 碳捕集利用与封存（CCUS）技术耦合：在烧结烟气末端增设胺法碳捕集装置，利用MEA（单乙醇胺）溶液吸收CO₂，捕集效率可达90%；捕获的CO₂可用于炼钢过程中的氧气底吹，或注入油田驱油，实现“减排+资源化”双重效益。2025年宝武集团某基地将建成首套“烧结超低排放+CCUS”示范项目，预计年减碳12万吨。

3.3 国际经验借鉴

(1) 日本新日铁烧结烟气循环技术（SGR）：将烧结机尾部30%-40%的低温烟气（120-180℃）循环至机头点火区，替代部分冷空气，不仅降低燃料消耗（焦粉用量减少8%-10%），还减少烟气排放量，使后续治理设备处理负荷下降35%。该技术已在新日铁君津制铁所应用，

年减少NO_x排放22%、CO₂排放15万吨，值得我国大型钢铁联合企业借鉴。(2) 德国蒂森克虏伯的低温脱硝工艺：研发Fe-ZSM-5分子筛低温SCR催化剂，在150-200℃区间脱硝效率稳定在85%以上，且抗硫性强（SO₂浓度≤800mg/m³时活性无明显衰减）。工艺中增设SO₂预吸附塔，采用活性氧化铝吸附烟气中90%的SO₂，避免催化剂中毒，使用寿命延长至5年。该技术在蒂森克虏伯杜伊斯堡钢厂应用后，出口NO_x浓度长期稳定在30mg/m³以下，为我国北方低温地区钢铁厂脱硝提供参考。

结束语

钢铁厂烧结烟气超低排放技术优化是实现行业绿色转型的必由之路。通过源头低硫低氮原料替代、过程智能温控与烟气循环利用、末端集成高效脱硫脱硝除尘及二噁英催化降解技术，可显著降低污染物排放浓度，满足严苛环保标准。未来需进一步推动多污染物协同控制技术革新，强化人工智能与碳捕集等前沿技术应用，同时完善政策激励与市场机制，助力钢铁企业实现环境效益与经济效益的双赢，推动行业高质量发展。

参考文献

- [1] 祁腾飞,孙俊杰,张永杰.我国烧结合热回收技术发展及展望[J].冶金经济与管理,2021,(05):39-40.
- [2] 李海潮.钢铁企业烧结合热发电技术分析[J].冶金管理,2023,(13):136-138.
- [3] 张伟,李明.钢铁厂烧结机烟气余热回收利用技术研究进展[J].钢铁技术,2022,(09):94-95.
- [4] 黄永辉.钢铁烧结合热发电控制系统的设计与应用分析[J].山西冶金,2023,(15):177-178.