钢铁行业烟气脱硫脱硝一体化工艺效能提升机制探索

卜兴乐

宝钢工程技术集团有限公司 上海 201999

【摘　要】：钢铁行业烟气具有污染物组分复杂、排放负荷波动明显及治理能耗较高等特征，脱硫脱硝一体化工艺的运行效能直接影响污染物减排效果与企业环保成本。围绕一体化工艺效能提升需求，分析多污染物协同脱除、系统能耗控制及绿色低碳运行的重要性，探讨反应条件匹配不足、能源与物料消耗偏高、工艺参数调控滞后等问题。从强化脱硫脱硝反应耦合、优化工艺流程与能源利用、完善动态调控机制三个方面提出改进路径，阐明污染物协同转化、传质过程强化及运行参数精准匹配对工艺效能的提升作用，为钢铁行业烟气净化系统高效稳定运行提供技术参考。

【关键词】：钢铁行业；烟气治理；脱硫脱硝一体化；协同脱除

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.020

引言

钢铁生产过程中，烧结、球团、焦化等工序产生的烟气含有二氧化硫、氮氧化物、颗粒物，烟气组分及排放负荷受生产工况影响较大，污染物稳定达标治理难度大。传统分段式脱硫脱硝工艺存在设备配置繁复、运行阻力大、能源重复消耗等问题，不能顾及净化能力以及运行经济性。脱硫脱硝一体化工艺把污染物反应过程和烟气处理单元整合起来，给多污染物协同治理赋予技术支撑。但是由于不同的污染物反应条件不同、传质能力低、参数调节滞后等原因，使得系统整体效能受到限制。对反应耦合机制、能源利用途径及动态调控方法实行分析，对增加钢铁行业烟气净化质量、运行稳定性有实际意义[1]。

1 钢铁行业烟气脱硫脱硝一体化工艺效能提升的重要性

1.1 提高烟气多污染物协同脱除效率

钢铁生产烟气中二氧化硫及氮氧化物的化学反应特征不同，二氧化硫主要凭借吸收、中以及、氧化固定等方式脱除，氮氧化物需要经过催化还原、氧化吸收等方式转化。传统的分段治理方式把两种污染物放在不同的反应单元里，烟气在不同的设备间连续输送，反应条件没有协调，容易造成脱硫和脱硝能力不匹配的问题。一体化工艺是协调氧化、吸附、催化、产物分离等环节，强化污染物在同一个系统中协同转化，减少反应单元之间的运行冲突，增加烟气净化过程整体能力的一种工艺。

协同脱除能力的增加直接关系到钢铁企业烟气排放浓度的稳定控制。烧结烟气中氧含量、水分、污染物浓度随原料配比、生产负荷变化，单一反应条件不能满足不同污染物的净化要求。改良活性组分分布、改良反应物接触状态、协调反应温度可以增加二氧化硫以及氮氧化物的传质、转化效果。催化氧化吸收体系中，氧化能力以及吸收液反应性能的匹配程度决定污染物转化后固定能力。提高多污染物协同脱除水平，可以减少出口浓度波动，减少局部反应不足造成的污染物穿透现象，增加烟气净化系统的连续治理能力。

1.2 降低烟气净化系统运行能耗

钢铁行业烟气净化系统一直处在大流量、连续运行的状态，风机输送、烟气加热、吸收液循环、反应介质再生都需要一直消耗能源。传统的脱硫脱硝分段工艺一般会设置独立的反应塔、增压风机以及温度调节装置，烟气经过多级处理之后会产生较大的流动阻力。对于使用选择性催化还原技术的净化系统，烟气温度不足时还需要配置补热设施，造成热能消耗增大。脱硫脱硝一体化工艺把处理单元整合起来，削减重复输送环节并协调反应温度，给减少系统融合能耗赋予了技术条件[2]。

运行能耗与设备装机功率有关，也和反应能力、介质利用率、烟气流动特性有关。脱除能力不够会增大吸收剂的投加量及循环处理负荷，设备阻力增大直接增加引风机电耗。通过改善烟气通道结构、增加气液接触能力、加强余热回收，在保证污染物净化效果的时候减少单位烟气处理能耗。对于使用低温催化路线的一体化工艺，合理利用入口烟气显热，减小反应温度调节幅度，可以减少外部能源投入。减少能源消耗可以减少设备长时间高负荷运行造成的机械损耗，使烟气治理成本及污染物脱除效果相协调。

1.3 推动钢铁行业绿色低碳转型

钢铁行业能源消耗集中、污染物排放环节多，烧结、球团、焦化工序不光是生产环节，又是烟气排放控制环节。脱硫脱硝设备运行要消耗电力、热能以及化学药剂，治理过程本身也存在一定的间接碳排放。如果只依靠增加反应装置数量或者增加药剂投加量来控制污染物浓度，就会加重企业能源和资源消耗。一体化工艺效能增强指的是污染物脱除、能源利用、运行成本三者之间的协调关系，可以减少末端治理环节的重复投入，改良钢铁生产全过程的环境绩效。

绿色低碳转型对烟气治理技术提出污染物减排以及能源节约协同推进的要求。减少反应温度需求、回收烟气余热、增加吸收剂利用率，脱硫脱硝一体化工艺可以减少辅助燃料消耗

及废弃物产生量。对有着资源化条件的治理副产物，应根据成分稳定性、杂质含量和利用途径实行分类处理，防止污染物由气相向固相转移而产生新的环境负担。工艺效能的增加可以减少停机清理、设备检修、非正常排放造成的生产干扰，使环保系统同主体生产工序协调运行，为钢铁企业稳定达标排放、低碳运行给出支持。

2 钢铁行业烟气脱硫脱硝一体化工艺存在的问题

2.1 多污染物协同脱除效率不足

钢铁行业烟气脱硫脱硝一体化工艺所遇到的主要技术矛盾就是不同污染物反应条件不能得到充分匹配。二氧化硫有着较强的水溶性，脱除过程受吸收介质碱度、气液接触面积、液相传质速率的影响；烟气中一氧化氮占氮氧化物的较大比例，其水溶性较低，直接湿法吸收效果受到限制。氧化吸收型一体化工艺中，氧化剂要将一部分一氧化氮转化为易吸收的形态，但是氧化剂消耗、氧化选择性及后续吸收反应之间存在耦合关系。当氧化反应不充分或者吸收能力不足的时候，氮氧化物就会穿透净化单元，造成整体脱除能力减少[3]。

烟气组分的波动会加大协同脱除过程的不稳定性。烧结原料中硫含量、燃料配比、生产负荷发生变化时，二氧化硫浓度、烟气温度也随之变化，造成反应介质消耗速率、有效反应条件发生偏移。催化型一体化工艺中二氧化硫氧化、硫酸盐沉积还会对催化剂孔道结构、活性位点造成影响，减少氮氧化物转化能力。烟尘颗粒附着在反应表面之后，气固接触阻力增大，局部区域出现传质受限的现象。反应条件不匹配、催化活性衰减、烟气扰动相互叠加，使系统很难长期保持较高的协同脱除能力。

2.2 工艺运行能耗与物料消耗偏高

部分脱硫脱硝一体化系统虽然减少了独立处理设备，但是运行过程中依然存在较高的风机电耗、反应介质消耗和辅助加热负荷。烟气经过除尘、反应、吸收、除雾等单元时，局部流道收缩、填料阻力、沉积物附着都会使系统压降增大。引风机增加输出功率来维持烟气流量，使单位烟气处理电耗增加。对于催化还原型工艺，入口烟气温度偏离催化剂活性窗口时，补热系统一直工作，造成能源浪费。部分设备没有有效的热量回收结构，反应后烟气携带的显热没有得到充分利用，造成热能损失。

物料消耗偏高主要是由于吸收剂利用率低、氧化剂无效分解、副产物排放量增大。气液接触不均匀时，部分吸收液没有充分加入反应就进入循环系统，造成药剂投加量与实际污染物去除量不匹配。氧化剂投加没有精细调节时，过量的氧化剂以及烟气中其他的还原性组分发生副反应，造成无效消耗。循环液中盐分、悬浮物不停积累，还会造成管道结垢、喷嘴堵塞、设备腐蚀，增大清洗以及检修成本。能源及物料消耗相互影响，造成一体化工艺运行经济性受到限制。

2.3 工艺参数调控与运行稳定性不足

钢铁行业烟气排放有着明显的动态变化特征，烟气流量、温度、含氧量、污染物浓度受到生产节奏以及原料条件的共同影响。部分脱硫脱硝一体化系统依然使用固定药剂投加比例、恒定循环液流量和经验式温度控制方式，没有针对烟气扰动的实时调节机制。入口二氧化硫浓度升高时，吸收液有效碱度下降，若补充药剂不能及时响应，出口二氧化硫浓度就会增加。氮氧化物浓度波动时，氧化剂或者还原剂投加存在响应滞后，容易造成脱除不足和药剂过量交替出现的状态。

运行稳定性不足及监测信息分散、设备状态反馈不完整有关。部分系统只把出口污染物浓度当作主要控制依据，缺少对反应温度、压降、液气比、氧化还原电位以及催化剂状态的关联分析，不能找到脱除能力变化的详细原因。在线监测设备在烟尘、水汽、腐蚀性组分等影响下，检测信号容易产生漂移，减少控制指令的准确性。反应器内部流场分布不均、喷淋包含不足、局部沉积物积累都会造成相同控制参数下净化效果不同。监测、判断、执行环节缺少有效联动，造成系统运行稳定性受到影响[4]。

3 钢铁行业烟气脱硫脱硝一体化工艺效能提升的优化对策

3.1 强化脱硫脱硝反应耦合提升协同脱除效率

针对二氧化硫与氮氧化物反应条件不匹配的问题，应依据烟气组分及污染物转化特征优化一体化反应路径。采用氧化吸收型工艺时，需要协调气相氧化与液相吸收两个阶段，通过控制氧化剂投加位置、混合强度及有效停留时间，提高一氧化氮向易吸收氮氧化物的转化程度。吸收阶段应合理调节循环液酸碱度、液气比及喷淋分布，强化二氧化硫与氧化后氮氧化物的气液传质。针对高浓度二氧化硫烟气，还应评估氧化剂竞争消耗对氮氧化物转化的影响，防止单一污染物负荷升高破坏反应平衡。

对于催化型一体化路线，应该从催化剂活性、抗硫性能、反应温度窗口三个方面实行针对性的改良。通过改善催化剂载体的孔结构以及活性组分的分散状态，增加有效反应位点，减少烟尘沉积对气固接触的不利影响。催化反应器前端要加大颗粒物控制，减少碱金属及其他杂质对催化剂造成的失活影响。根据实际烟气温度选择合适的催化体系，合理安排脱硫、脱硝反应顺序，减少硫酸盐沉积风险。建立污染物入口浓度、反应条件及出口排放之间的关系，可以清楚地知道各个工况下反应的限制环节，继而助推协同脱除能力的一直增加。

3.2 优化工艺流程与能源利用降低运行能耗

针对风机电耗及辅助加热负荷偏高的问题，从烟气流动阻力以及热量利用两个方面改进工艺流程。反应器及连接烟道设

计要顾及流速均匀性、压降控制，借助改变导流板布置、烟道截面、气流转向结构来减少局部涡流、无效压力损失。湿法吸收系统应合理配置喷淋层、除雾装置、循环泵运行组合，不能靠增加循环流量来弥补传质能力不足。对于有余热回收条件的系统，应根据烟气温度、酸露点和后续反应温度要求来配置换热单元，减少直接补热造成的能源消耗，控制低温腐蚀风险。

减少物料消耗要建立污染物负荷及药剂需求之间的定量匹配关系。吸收剂投加应根据入口二氧化硫浓度、烟气流量、循环液有效碱度来调节，减少过量投加造成的无效消耗。氧化剂用量要根据氮氧化物浓度、氧化还原反应状态动态调节，减少副反应损失。加强循环液盐分、悬浮物浓度、结晶状态的管理，可以减少结垢堵塞对设备能力的影响。对风机、循环泵、补热设备实行分项能耗监测，以单位烟气处理能耗、单位污染物脱除物耗为评定指标，可以找出主要的能耗环节，让工艺运行由高投入维持向高效利用转变。

3.3 完善工艺参数动态调控提高系统运行稳定性

对于烟气工况波动以及固定参数控制的不足，应该建立以入口负荷识别、过程状态反馈、出口排放约束为主要内容的动态调控机制。利用在线监测烟气流量、温度、二氧化硫、氮氧化物浓度等污染物负荷变化信息，与吸收液酸碱度、氧化还原电位、液气比、反应器压降等参数相关联，形成折射反应状态的运行数据体系。根据污染物负荷的变化来调节药剂投加量、循环泵频率、温度控制设定值，使运行参数以及实际处理需求相适应，减少固定运行形式下药剂浪费和排放浓度波动[5]。

动态调控机制还要加强异常状态识别及设备运行联动。针对监测数据漂移、喷嘴堵塞、催化剂活性下降、反应器阻力升高等问题，建立运行参数偏离阈值和故障诊断规则，用压降变化、出口污染物浓度趋势、药剂消耗特征来判断异常来源。对于有明显响应滞后的反应过程，可以利用历史运行数据建立预测控制模型，提前修正高负荷工况下的控制设定。定期校准在线监测设备、精进执行机构反馈可以增加调控指令的可靠性。建立监测、分析、调节、验证相衔接的运行机制，达到了协同脱除能力、能源消耗、系统稳定性融合改良的目的。

4 总结

钢铁行业烟气脱硫脱硝一体化工艺效能增强包含污染物协同反应、能源利用效率、系统运行控制等诸多方面。协同脱除能力低、能源以及物料消耗大、参数调节滞后等问题，加强反应条件匹配、气液传质过程，有利于增加二氧化硫及氮氧化物的协同转化能力；改良烟气流道、余热回收、药剂投加方式，有利于减少系统运行负荷；精进在线监测、动态反馈控制，有利于增加繁复工况下的净化稳定性。工艺效能增进要以污染物脱除能力、单位处理能耗、排放稳定性为评定标准，推进反应过程改良、设备节能运行、智能调控协同开展，为钢铁行业烟气治理技术升级、绿色低碳发展给予支撑。

参考文献：

[1] 甘敏,马世辉,范晓慧,等.烧结烟气低能耗脱硝工艺技术现状与展望[J].钢铁,2026,61(8):167-178+235.

[2] 毛瑞,张涛,邵久刚.烧结烟气脱硫脱硝技术现状及展望[J].中国冶金,2025,35(5):1-9.

[3] 李金辉,陶家杰,于阳,等.脱硫剂喷吹耦合活性焦技术降低烧结烟气 SO2[J].中国冶金,2023,33(11):151-157.

[4] 魏瑞瑞,顾凤年,卜树烽,等.烧结脱硫脱硝活性炭中毒的原因及控制[J].钢铁研究学报,2023,35(5):521-531.

[5] 向思羽,张朝晖,邢相栋,等.烧结烟气脱硫脱硝活性炭的研究进展[J].钢铁研究学报,2023,35(3):233-246.