

钢铁行业挥发性有机物（VOCs）排放特征及治理策略研究

佟鹏

鞍钢股份有限公司鲅鱼圈钢铁分公司，辽宁省营口市，115007；

摘要：钢铁行业作为国民经济的重要支柱，在生产过程中会排放大量挥发性有机物（VOCs），对环境和人体健康造成潜在威胁。本文通过对钢铁行业生产流程的分析，明确了VOCs的排放源，详细阐述了其排放特征，并深入探讨了相应的治理策略。研究表明，钢铁行业VOCs排放源具有多样性，不同工序排放的VOCs成分和浓度差异显著，且排放具有区域差异性，与能源消耗密切相关。在治理方面，吸附法、催化燃烧法、生物处理法、膜分离法等多种技术各有优劣，企业应根据自身实际情况选择合适的治理技术组合。通过实施有效的治理策略，钢铁行业有望在实现减排目标的同时，推动产业的绿色可持续发展。

关键词：钢铁行业；挥发性有机物；排放特征；治理策略

DOI：10.64216/3080-1508.25.05.052

引言

钢铁行业是国家工业基石，但其复杂生产工序会产生大量污染物，其中挥发性有机物（VOCs）排放问题受关注。VOCs成分复杂、含毒有害物质，大量排放污染大气、危害人体健康。全球环保力度加大，钢铁行业作为VOCs排放重点行业减排压力大。故研究其排放特征与治理策略，对钢铁行业绿色发展、改善区域大气质量意义重大。

1 钢铁行业 VOCs 排放现状

1.1 排放源分析

钢铁行业VOCs排放源涉及多个生产工序。焦化工序中，煤炭高温干馏产生的焦炉煤气含苯、甲苯等，其净化过程VOCs排放占比大；烧结工序里，固体燃料燃烧及铁矿石等原料高温分解会释放VOCs；炼钢工序因高温和复杂反应产生一定量VOCs；此外，物料储存、输送及产品表面处理等环节也可能排放VOCs。

1.2 排放量估算

排放量估算有物料衡算法、实测法和模型法。物料衡算法依据物质守恒，需详细工艺和物料信息，结果较准但复杂；实测法直接监测，能实时反映情况，却成本高、实施有难度；模型法结合多种因素模拟估算，有预测性但准确性依赖数据和模型。虽不同方法估算结果有差异，但总体随钢铁产能增加，VOCs排放总量上升，成大气污染重要来源。

2 钢铁行业 VOCs 排放特征

2.1 排放源多样性

钢铁行业VOCs排放呈现多方面特征。排放源具有多样性，生产各工序因工艺和反应不同，均可能产生VOCs。焦化的煤焦油加工、粗苯精制，烧结的混合料制备，炼钢的炉渣处理等环节，都会释放不同VOCs，增加了治理难度。

2.2 成分复杂性

成分复杂性显著，涵盖多种有机化合物。芳香烃类在焦化废气中占比高，推焦和装煤时可达90%以上；热轧车间无组织排放含高碳烷烃；烧结因用含硫燃料，含硫VOCs如二硫化碳占比高，且各工序成分差异与工艺、原料相关。

2.3 浓度波动性

浓度存在波动性，受工况、设备启停、原料质量等影响。烧结机状态变化会使VOCs浓度短时间内从几十 mg/m^3 升至数百 mg/m^3 ；焦化厂周期性操作导致排放浓度周期性波动，对治理和监测设备要求高。

2.4 区域差异性

区域差异性明显，受气候、产业布局、环保政策影响。干燥多风地区VOCs易扩散，湿润静风地区易积累；钢铁集中区排放总量大，影响显著；不同地区环保标准不同，也导致排放特征差异。

3 钢铁行业 VOCs 治理策略

3.1 源头控制

3.1.1 原料选择与优化

选择低挥发、低硫、低氮原料是源头减VOCs的重

要措施。焦化工序用优质炼焦煤,其挥发分低,干馏产 VOCs 少,挥发分降 5%可使焦炉煤气中 VOCs 减 10%-15%。烧结工序选杂质少、活性高的铁矿石等,能少用燃料,降低 VOCs。原料预处理如煤炭洗选,去杂质和部分挥发分,也助于减 VOCs。

3.1.2 工艺改进与升级

优化钢铁生产工艺、采用先进技术设备可有效降 VOCs。炼钢用先进电弧炉,较传统转炉废气少,优化炉内气氛等参数能进一步减排。轧钢用无头轧制技术,减少启停以降挥发。升级设备提高密闭性,如密封储罐、管道,可减无组织排放

3.2 过程控制

3.2.1 加强生产管理

建立完善的生产管理制度,加强对生产过程的精细化管理,对于控制 VOCs 排放至关重要。合理安排生产计划,避免设备的频繁启停,确保生产过程的稳定运行,可减少因工况变化导致的 VOCs 排放波动。加强对设备的维护和保养,定期检查设备的运行状况,及时修复泄漏点,防止物料泄漏挥发产生 VOCs。对员工进行环保培训,提高员工的环保意识和操作技能,规范员工的生产操作行为,确保各项环保措施得到有效执行。通过严格的生产管理,可使钢铁企业的 VOCs 无组织排放减少约 20%-30%。

3.2.2 优化操作条件

在生产过程中,通过优化操作条件,可降低 VOCs 的产生和排放。在烧结工序中,合理控制烧结温度和烧结时间,确保燃料充分燃烧,减少因燃烧不完全产生的 VOCs。研究发现,将烧结温度控制在 1300-1350℃,并适当延长烧结时间,可使燃料燃烧效率提高 5%-10%,从而显著降低 VOCs 排放。在焦化工序中,优化焦炉的加热制度,保证焦炉内温度均匀,减少局部过热导致的 VOCs 过度产生。在炼钢过程中,控制好炉内的氧含量和吹炼强度,优化化学反应过程,减少 VOCs 的生成。通过优化操作条件,不仅可以降低 VOCs 排放,还能提高生产效率和产品质量。

3.3 末端治理技术

3.3.1 吸附法

吸附法利用吸附剂吸附 VOCs 净化废气。钢铁行业常用活性炭、分子筛等,其中活性炭因孔隙多、比表面积大,对多种 VOCs 吸附性好,效率达 80%-95%。新型改

性活性炭可提升特定 VOCs 的吸附选择性和容量。该法操作简单,适用于低浓度、大流量废气,但存在吸附剂需定期更换、再生成本高及可能二次污染等问题。

3.3.2 催化燃烧法

催化燃烧法借助催化剂降低 VOCs 活化能,使其在 200-500℃氧化为二氧化碳和水,适用于低浓度废气,能回收部分能量。催化剂分贵金属(钯、铂等,活性高但贵)和非贵金属(成本低,活性稳定性待提升)。较直接燃烧能耗低,但催化剂易因废气杂质失活,需预处理。

3.3.3 生物处理法

生物处理法借助微生物代谢,将 VOCs 转化为二氧化碳和水,具有运行成本低、环境影响小的优势,适用于处理低浓度、可生物降解的 VOCs 废气(如含有机酸、醇类等)。其主要工艺有生物过滤、滴滤和洗涤,以生物过滤为例,废气经含微生物载体的滤床,VOCs 被生物膜吸附后分解。处理效果受微生物种类、废气成分、温湿度等影响,需严格控制运行条件以保障微生物活性。

3.3.4 膜分离法

膜分离法是利用不同 VOCs 分子在膜材料上的吸附和扩散速率差异,实现 VOCs 与其他气体的分离和净化。常用的膜材料有聚丙烯、聚偏氟乙烯、聚丙烯腈等。膜分离技术具有分离效率高、能耗低、操作简便等优势,适用于处理高浓度 VOCs 废气。在钢铁行业中,可将膜分离技术用于回收有价值的 VOCs,如从焦化厂的废气中回收苯、甲苯等有机化合物,实现资源的循环利用。但膜材料的成本较高,且容易受到废气中杂质的污染,导致膜的性能下降,需要定期对膜进行清洗或更换。

3.3.5 其他治理技术

除了上述常见的治理技术外,还有一些其他技术也在钢铁行业 VOCs 治理中得到应用或研究。低温等离子体法通过高能电子和自由基与 VOCs 分子发生反应,将其氧化分解,适用于处理高浓度、难降解的 VOCs 废气,具有处理速度快、效率高等特点。但该技术存在设备投资大、运行成本高、可能产生二次污染等问题。吸收法利用液体吸收剂将 VOCs 从气体中吸收,达到净化目的,适用于处理低浓度 VOCs 废气,具有操作稳定、易于实施等优点,但需要选择合适的吸收剂,并对吸收后的溶液进行妥善处理。此外,一些新兴技术如光催化氧化法、生物酶法等也在不断研究和探索中,有望为钢铁行业 VOCs 治理提供新的解决方案。

4 实际案例分析

4.1 案例一：某大型钢铁企业的 VOCs 治理实践

某大型钢铁企业涵盖焦化、烧结、炼铁等完整产业链，VOCs 治理采取综合措施。源头控制上，优选低挥发原料，升级工艺如焦化厂用干熄焦技术减少煤气逸散。过程控制中，加强管理，建设设备巡检制及时修漏，精准控温与炉内气氛降 VOCs 生成。末端治理针对不同废气：焦化废气先活性炭吸附回收苯系物，再催化燃烧处理低浓度 VOCs；烧结机头用电除尘、脱硫等一体化工艺除多种污染物。治理后，VOCs 排放量降约 60%，指标达标。

4.2 案例二：某钢铁企业的技术创新与减排成效

某钢铁企业深耕技术创新，VOCs 治理成效显著。其自主研发新型生物滤池技术，针对热轧低浓度 VOCs 废气，采用特殊微生物菌群与高效生物载体，通过优化停留时间、温湿度等参数，去除率稳定在 85%以上。同时升级冷轧废气处理系统，采用膜分离与吸附联用技术，先回收高浓度 VOCs，再深度净化低浓度废气，既提升效率，又实现资源回收、降低成本。技术创新助力其减排的同时，增强了核心竞争力，为行业绿色发展提供借鉴。

5 钢铁行业 VOCs 治理面临的挑战与对策

5.1 面临的挑战

5.1.1 技术成本高

目前，钢铁行业应用的一些先进的 VOCs 治理技术，如催化燃烧法中的贵金属催化剂、膜分离法中的高性能膜材料等，成本相对较高。这不仅增加了企业的设备投资成本，还使得运行和维护成本居高不下。对于一些中小型钢铁企业来说，难以承受如此高昂的治理成本。

5.1.2 技术适配性不足

钢铁行业 VOCs 排放具有多源、复杂、波动大的特点，不同工序（如烧结、冷轧、涂镀等）产生的废气成分、浓度差异显著。例如，烧结工序废气含高浓度粉尘与酸性气体，冷轧工序则以苯系物等溶剂挥发为主。但现有治理技术多为通用型，缺乏针对钢铁行业特殊工况的定制化方案。部分企业盲目引进技术，导致设备运行效率低下——某中型钢铁厂将适用于低浓度有机废气的生物滤池直接用于处理高湿度的轧钢废气，因微生物活性受抑制，处理效率从设计的 90%降至不足 50%。

5.1.3 监管体系不完善

当前 VOCs 监测以企业自行监测为主，第三方检测

覆盖率不足 30%，部分企业存在监测数据造假、偷排漏排等问题。此外，不同地区环保标准执行存在差异，如华北地区要求烧结废气 VOCs 排放浓度 $\leq 50\text{mg}/\text{m}^3$ ，而部分中西部地区仍执行 $80\text{mg}/\text{m}^3$ 标准，导致企业治理动力不均衡。监管技术也存在短板，现有在线监测设备对复杂组分的识别精度有限，难以实时捕捉突发性排放。

5.2 应对对策

5.2.1 强化政策引导与资金扶持

建议设立国家级 VOCs 治理专项基金，对采用先进技术的企业给予 30%-50%的设备补贴，重点支持中小企业。推行“以奖代补”机制，对治理成效显著的企业减免环保税。同时，建立区域性治理设备共享平台，中小型企业可通过租赁方式降低初期投入，如某钢铁产业集群试点的集中式 RT0 焚烧系统，使参与企业平均成本降低 40%。

5.2.2 推动技术创新与国产化替代

加大对低成本替代技术的研发投入，如开发非贵金属催化剂（如锰基、铈基材料），将催化燃烧设备成本降低 60%以上；突破膜材料国产化技术，目前某科研团队研发的聚酰亚胺复合膜，性能达到进口产品的 90%，价格仅为其 1/3。鼓励产学研合作，建立钢铁行业 VOCs 治理技术创新联盟，加速技术成果转化。

5.2.3 完善全流程监管体系

构建“在线监测+无人机巡检+第三方核查”的立体监管网络，要求年排放量超 100 吨的企业安装组分分析型在线监测设备，并与环保部门实时联网。统一全国钢铁行业 VOCs 排放标准，建立“黑名单”制度，对违法企业实施信贷限制、市场准入禁入等联合惩戒。

参考文献

- [1]王宇楠,叶代启,林俊敏,等.漆包线行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究[J].中国环境科学,2012,32(6):8. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2012.06.004.
- [2]杨利娟.我国工业源VOCs排放时空分布特征与控制策略研究[D].华南理工大学,2012.
- [3]焦健.石化行业VOCs控制治理方法研究[J].区域治理,2020.

作者简介：佟鹏（1986年2月），男，汉族，辽宁省营口市人，本科，中级工程师，钢铁企业环保管理专业。