

钢铁行业超低排放改造的空气质量改善效应研究

张磊

(广西柳州钢铁集团有限公司, 广西 柳州 601003)

摘要: 钢铁行业作为工业领域的重要支柱, 其生产过程中的大气污染物排放对区域空气质量有着显著影响, 推进超低排放改造是行业实现绿色高质量发展的关键路径。实施超低排放改造不仅能有效削减大气污染物总量, 还能推动生产工艺升级、技术创新与管理优化, 对改善区域空气质量、保障公众健康、促进生态环境协同保护具有重要意义。基于此, 文章以钢铁行业超低排放改造为研究对象, 梳理了行业规模与分布特点、污染物来源及相关政策, 分析了改造关键技术与控制措施, 定量了评估改造前后污染物排放变化, 研究了其对区域空气质量的改善效应及协同效益, 为行业持续深化超低排放改造、巩固空气质量改善成果提供参考依据。

关键词: 钢铁行业; 超低排放改造; 空气质量

中图分类号: X51

文献标识码: A

文章编号: 3106-2547 (2025) 11-0001-13

DOI: 10.62022/FHR.issn3106-2547.2025.11.001

Research on the Air Quality Improvement Effect of Ultra low Emission Transformation in the Steel Industry

Lei Zhang

(Guangxi Liuzhou Iron and Steel Group Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 601003)

Abstract: As an important pillar of the industrial sector, the steel industry has a significant impact on regional air quality due to the emission of atmospheric pollutants during its production process. Promoting ultra-low emission transformation is a key path for the industry to achieve green and high-quality development. Implementing ultra-low emission transformation can not only effectively reduce the total amount of air pollutants, but also promote the upgrading of production processes, technological innovation, and management optimization. It is of great significance for improving regional air quality, safeguarding public health, and promoting coordinated protection of the ecological environment. Based on this, the article takes the ultra-low emission transformation of the steel industry as the research object, sorts out the industry scale and distribution characteristics, pollutant sources and related policies, analyzes the key technologies and control measures of the transformation, quantitatively evaluates the changes in pollutant emissions before and after the transformation, studies its improvement effect and synergistic effect on regional air quality, and provides reference for the industry to continuously deepen ultra-low emission transformation and consolidate the achievements of air quality improvement.

Keywords: steel industry; ultra-low emission transformation; air quality

一、钢铁工业的规模与区域分布特点

(一) 产能规模稳步优化

钢铁行业作为工业体系的核心支撑产业, 经过多年发展已形成庞大的产能规模与完整的产业链体系, 其产能布局与发展质量直接影响工业经济的稳定运行与绿色转型进程。近年来, 钢铁行业严格落实产能调控政策, 持续推进产能优化调整, 通过淘汰落后产能、化解过剩产能、提升先进产能占比等措施, 推动产能结构向高质量、集约化方向转型, 行业整体产能规模保持在合理区间并呈现稳步优化态势。目前, 行业粗钢产能保持在10亿吨级水平, 重点统计钢铁企业产能集中度逐步提高, 前10家重点企业粗钢

产能占比已提升至较高水平, 形成了一批具备规模化、集约化、智能化生产能力的龙头企业, 这些企业凭借资金实力、技术优势与管理能力, 成为超低排放改造的先行主体与示范标杆, 为改造技术的集中推广、工程的批量实施与效果的快速显现提供了有利条件。

在产能调控过程中, 行业始终坚持供需平衡原则, 通过精准对接市场需求、优化产能投放节奏, 实现产能调控与市场需求的动态匹配, 在保障建筑、机械、汽车、造船等下游行业原料供应稳定的同时, 为环保改造工程的有序实施预留了充足的时间与资金空间。同时, 行业积极推进产能置换与升级改造, 鼓励企业通过技术改造提升产能利

作者简介: 张磊, 硕士, 工程师, 研究方向为工业大气污染控制与绿色生产技术。

用效率,减少单位产能污染物排放量,推动产能规模与环保能力、技术水平同步提升。例如,部分龙头企业通过产能置换淘汰老旧生产线,新建智能化、绿色化生产基地,将粗钢产能与超低排放改造、节能降碳改造同步规划、同步实施,实现了产能优化与环保升级的协同推进,为行业产能规模优化与绿色转型提供了示范。当前,行业产能优化工作仍在持续推进,先进产能占比持续提升,低效产能逐步退出,产能整体呈现高质量发展态势,为超低排放改造的全面深化与成效巩固奠定了坚实的产能基础,行业产能与环保治理的协同适配性有待进一步提高。

(二) 区域分布呈现集聚特征

钢铁企业的分布格局受资源禀赋、产业配套、运输条件、市场需求等多重因素影响,经过长期发展形成了明显的区域集聚特征,这种集聚模式既为产业协同发展提供了便利,也对区域环境治理提出了集中性挑战。从资源依赖角度来看,部分区域依托丰富的铁矿、煤炭等矿产资源优势,聚集了大量钢铁生产企业与配套产业,形成了完整的钢铁产业集群,这些区域的粗钢、焦炭产能占比相对较高,成为钢铁行业产能集中释放的核心区域。例如,部分内陆区域凭借周边丰富的煤炭资源与铁矿资源,布局了多家大型钢铁企业,形成了从原料开采、焦化、炼铁到炼钢、轧钢的全链条产业布局,产业集聚效应显著,同时也因污染物集中排放对区域空气质量构成较大压力。

从运输条件角度来看,部分沿海及沿江区域凭借港口、码头等交通枢纽优势,依托便利的水路运输条件,布局了现代化钢铁生产基地,这些企业主要通过进口铁矿、煤炭等原料满足生产需求,产品也可通过水路快速运往全国各地及海外市场,有效降低了原料与产品的运输成本,同时也减少了内陆运输环节的污染物排放。这类沿海钢铁基地通常采用集约化、智能化设计,生产流程优化程度高,环保设施配套完善,为超低排放改造的高效实施提供了良好基础。此外,部分区域依托周边完善的机械制造、汽车产业等下游配套体系,也形成了区域性钢铁生产集群,实现了钢铁产品与下游产业的近距离对接,提升了产业链协同效率。

钢铁行业的区域集聚分布模式具有显著的双重效应,一方面,产业集聚有利于企业共享基础设施、技术资源与市场渠道,实现上下游产业协同发展,同时便于集中开展环保治理、统一实施超低排放改造,通过区域协同治理提升污染治理整体效能,降低单个企业的改造成本与运维成本;另一方面,产能的集中布局也导致污染物排放高度集

中,对区域环境承载力提出了更高要求,若治理措施不到位,易引发区域性空气质量问题。因此,钢铁行业的区域集聚分布既为超低排放改造提供了规模化推进的便利条件,也需要通过科学规划、精准管控,实现产能布局与生态环境承载能力的协调发展,推动区域钢铁产业与生态环境协同共进。

(三) 布局优化进程持续推进

随着环保要求的不断提高、资源约束的日益凸显与产业升级的迫切需求,钢铁行业逐步加快产能布局优化调整步伐,通过企业整合搬迁、异地升级、产能置换等多种方式,推动钢铁产能向环境承载力更强、配套设施更完善、运输条件更优越的区域转移,逐步优化行业整体布局格局,为超低排放改造成效的巩固与提升提供布局支撑。在布局优化过程中,行业坚持“疏解存量、优化增量”的原则,对环境敏感区域、生态脆弱区域的钢铁企业实施有序搬迁改造,推动产能向沿海、沿江等优势区域集中,有效降低内陆区域的环境压力。

部分长链条钢铁企业通过异地搬迁,将生产基地从内陆城市转移至沿海港口区域,不仅依托港口优势优化了原料与产品的运输结构,减少了公路运输环节的污染物排放,还同步开展全流程超低排放改造,配套建设高效环保治理设施,实现了产能布局与环保能力的同步升级。例如,某大型钢铁企业通过异地搬迁,在沿海区域新建智能化钢铁生产基地,同步配套建设烧结烟气脱硫脱硝除尘一体化设施、密闭式原料场、铁路专用线等环保与清洁运输设施,不仅大幅降低了企业污染物排放量,还优化了区域产能布局,缓解了原生产区域的环境压力。同时,部分区域通过企业整合重组,将分散的小型钢铁企业整合为大型企业集团,实现产能集中管控与集约化生产,便于统一推进超低排放改造、统一开展环保设施运维,提升区域污染治理整体水平。

在布局优化过程中,行业还注重与区域发展规划、生态环境保护规划相衔接,避免产能过度集中导致环境承载力过载。部分地方政府通过制定钢铁产业布局规划,明确产能准入区域与退出区域,引导钢铁企业向合规园区集聚,实现产业发展与生态保护的协调推进。此外,企业通过工序优化、产能整合,进一步提升生产流程的集约化水平,减少生产环节的污染物排放节点,为超低排放改造提供了更有利的布局条件。当前,钢铁行业布局优化进程仍在持续推进,行业整体布局与生态环境的适配性不断提升,但部分区域仍存在产能布局与环境承载力不匹配、配套环保

设施不完善等问题，布局优化的精准性与系统性有待进一步提高，需通过持续深化规划引导、强化企业主体责任，推动行业产能布局实现更高水平的绿色优化。

二、钢铁生产流程中的主要大气污染物来源

（一）有组织排放环节

有组织排放是钢铁行业大气污染物的主要来源之一，特指通过生产设备排气筒等固定排放口有规律排放的污染物，其排放浓度、排放量与生产工艺、原料品质、治理设施运行状况密切相关，涉及烧结、焦化、炼铁、炼钢、轧钢等多个核心生产工序，不同工序的污染物排放特征存在明显差异。烧结工序作为钢铁生产的前端核心工序，主要负责将铁矿粉、燃料、熔剂等原料混合烧结成烧结矿，为高炉炼铁提供原料，该工序是有组织污染物排放的关键环节，污染物排放量占行业有组织排放总量的比例较高。在烧结过程中，原料中的燃料燃烧会产生大量颗粒物、SO₂、NO_x，同时原料中的挥发性成分与高温反应产物会形成少量挥发性有机物与重金属污染物，其中颗粒物主要包括烧结粉尘、未燃烧完全的炭粒等，SO₂主要来源于原料中的硫化物燃烧分解，NO_x主要为燃料型NO_x与热力型NO_x，受烧结温度、原料配比、燃烧效率等因素影响显著。

焦化工序是钢铁生产的重要配套工序，主要通过高温干馏将煤炭转化为焦炭，为高炉炼铁提供还原剂与热源，该工序的有组织排放污染物种类复杂，除颗粒物、SO₂、NO_x外，还包括苯并芘、酚类、氰化物等挥发性有机物与有毒有害污染物。在炼焦过程中，煤炭干馏产生的荒煤气经净化处理后，仍会有部分污染物通过排气筒排放，其中颗粒物主要来源于焦粉、煤尘，SO₂来源于煤炭中的硫化物与脱硫设施未完全去除的硫化物，NO_x来源于焦炉加热燃烧过程，而挥发性有机物与有毒有害污染物则主要来源于荒煤气净化不彻底的残留成分，对区域空气质量与人体健康均存在潜在影响。

炼铁工序通过高炉将烧结矿、焦炭、熔剂等原料转化为铁水，该工序的有组织污染物排放以颗粒物与NO_x为主，同时伴随少量SO₂排放。在高炉炼铁过程中，焦炭燃烧、原料反应与炉顶煤气排放均会产生大量颗粒物，其中高炉烟尘具有粒径小、吸附性强的特点，若治理不充分易扩散至周边区域；NO_x主要来源于焦炭与喷吹燃料的燃烧过程，受高炉温度、送风条件等因素影响；SO₂则主要来源于原料中的硫化物与炉渣反应产生的少量硫化物气体。炼钢工序分为转炉炼钢与电炉炼钢，转炉炼钢以铁水为原料，通

过吹氧炼钢生成钢水，该工序的有组织排放主要为转炉烟气中的颗粒物与NO_x，转炉烟气具有温度高、含尘浓度高、波动大的特点，是炼钢工序污染治理的重点；电炉炼钢以废钢为原料，通过电极加热炼钢，其有组织排放污染物主要为颗粒物、NO_x与少量挥发性有机物，排放量相对转炉炼钢略低，但仍需针对性开展治理。

轧钢工序作为钢铁生产的后端工序，主要将钢坯加工为各类钢材产品，根据加工工艺不同可分为热轧与冷轧，该工序的有组织污染物排放量相对前端工序较低，但仍存在一定排放。热轧工序中，钢坯加热、轧制过程会产生高温烟气，其中含有颗粒物、SO₂与少量挥发性有机物，颗粒物主要为氧化铁皮与轧制粉尘；冷轧工序中，酸洗、镀锌等工艺会产生酸性气体与挥发性有机物，若处理不充分会通过排气筒排放，对区域空气质量造成影响。此外，钢铁生产中的动力锅炉、余热发电等辅助设施，也会通过有组织排放产生少量颗粒物、SO₂与NO_x，虽排放量占比不高，但仍需纳入全流程污染管控范围。

（二）无组织排放环节

无组织排放是指不通过固定排放口排放的大气污染物，具有排放点多、分散性强、排放路径随机、管控难度大等特点，其污染物排放量占钢铁行业总排放量的比例较高，对企业周边区域空气质量的影响更为直接、显著。钢铁行业无组织排放来源广泛，贯穿于原料储存、转运、装卸、生产过程及废渣堆放等多个环节，受气象条件、操作规范、设施配置等多种因素影响，排放特征复杂多变。原料储存环节是无组织排放的主要来源之一，钢铁生产所需的铁矿粉、煤炭、焦炭、熔剂等原料用量巨大，若采用露天堆放方式，在风力作用下易产生大量扬尘，同时原料自身的挥发性成分也会形成少量无组织排放。尤其是在干燥、多风的气象条件下，露天原料场的扬尘污染更为严重，颗粒物会随风扩散至企业周边数公里范围，导致区域PM₁₀、PM_{2.5}浓度升高。

原料与产品转运环节的无组织排放也较为突出，钢铁生产中原料与半成品、成品的转运主要依靠皮带输送机、斗式提升机、车辆等设备，在转运过程中，若设备密封不严、转运点未配套抑尘设施，会导致物料散落、逸散产生扬尘。例如，皮带输送机在运行过程中，物料在落料点、转接点易产生粉尘逸散；斗式提升机的进料口、出料口若密封不完善，会出现粉尘泄漏；车辆转运过程中，车厢物料未覆盖、车辆行驶过程中颠簸散落等，也会产生无组织扬尘。此外，原料与产品的装卸环节，无论是采用起重机、

装载机等设备装卸,还是人工装卸,都会因物料扰动产生大量扬尘,尤其是在装卸量大、装卸速度快的工况下,扬尘排放量显著增加。

生产过程中的无组织逸散也是重要排放来源,钢铁生产各工序的生产设备若密封不严、车间通风系统不合理,会导致生产过程中产生的污染物无组织逸散至车间外。例如,烧结机机头、机尾密封不严,会导致烟气中的颗粒物与有害气体逸散;焦炉炉门、炉顶密封不完善,会产生荒煤气无组织逸散,释放出大量挥发性有机物与有毒有害污染物;高炉出铁口、出渣口在作业过程中,会产生高温烟气与颗粒物无组织排放;转炉、电炉炼钢过程中,炉口烟气若收集不及时、不充分,会出现烟气外逸现象。此外,轧钢工序的热轧车间,钢坯加热与轧制过程中产生的高温烟气,若车间通风不畅,会通过门窗、天窗等无组织逸散至室外,对周边空气质量造成影响。

废渣堆放与处理环节也会产生少量无组织排放,钢铁生产过程中会产生大量高炉渣、转炉渣、钢渣等废渣,若废渣露天堆放,在风力作用下会产生扬尘,同时废渣中的少量挥发性成分与化学反应产物也会形成无组织排放。尤其是在废渣装卸、转运及综合利用过程中,会因物料扰动产生扬尘污染。此外,钢铁企业的污水处理站、脱硫脱硝设施的副产品堆放区等,也可能产生少量挥发性有机物、异味气体等无组织排放,虽排放量不大,但会影响周边环境质量与居民生活。无组织排放的随机性较强,受风速、风向、温度、湿度等气象条件影响显著,在不利气象条件下,无组织排放的污染物扩散范围会大幅扩大,对区域空气质量的影响程度会显著提升,因此成为钢铁行业超低排放改造的重点与难点环节。

(三) 运输环节排放

钢铁生产所需原料与产品的运输量巨大,运输环节产生的污染物是钢铁行业大气污染的重要补充来源,涵盖公路运输、铁路运输、水路运输等多种运输方式,其中公路运输的污染物排放量占比最高,对区域空气质量的影响最为突出。公路运输环节的污染物排放主要包括车辆尾气排放与运输过程中的扬尘排放两部分,钢铁企业原料与产品的公路运输主要依靠重型载货车辆,这类车辆大多以柴油为燃料,尾气排放中含有大量颗粒物、 NO_x 、一氧化碳、碳氢化合物等污染物,其中颗粒物包括柴油车尾气中的细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$), NO_x 排放量占公路运输总排放量的比例较高,对区域空气质量与人体健康均存在不良影响。尤其是老旧重型载货车辆,由于发动机技术落后、尾气处理设施

不完善,尾气污染物排放浓度显著高于达标车辆,成为公路运输环节的主要污染源。

公路运输过程中的扬尘排放也不容忽视,一方面,运输车辆装载的原料、产品若未采用密闭覆盖措施,在行驶过程中会因风力作用、车辆颠簸导致物料散落,产生扬尘;另一方面,车辆行驶过程中会卷起路面灰尘,形成二次扬尘,尤其是在未硬化路面、物料洒落较多的路段,二次扬尘排放量更为显著。此外,车辆在企业厂区内行驶、装卸作业过程中,也会产生大量扬尘,对厂区及周边区域空气质量造成影响。铁路运输环节的污染物排放相对公路运输较低,主要包括火车机车尾气排放与运输过程中的物料散落扬尘,其中电力机车无尾气排放,柴油机车尾气排放会产生少量颗粒物、 NO_x 等污染物;物料散落扬尘主要源于车厢密封不严、装卸作业不规范等,排放量远低于公路运输。

水路运输环节的污染物排放主要集中在港口装卸作业过程中,原料与产品在港口码头装卸时,会产生大量扬尘,同时船舶尾气排放会产生少量颗粒物、 NO_x 、碳氢化合物等污染物。此外,港口码头的物料堆放区若未配套完善的抑尘设施,也会产生扬尘无组织排放,但整体排放量相对公路运输较低。运输环节的污染物排放不仅与运输方式、车辆(船舶)标准相关,还与运输路线、装卸规范、设施配置等因素密切相关,其排放范围覆盖企业内外,对区域空气质量的影响具有扩散性特点,因此成为钢铁行业超低排放改造中不可忽视的重要环节,需通过优化运输结构、升级运输工具、完善管控设施等措施实现有效治理。

三、超低排放改造政策的核心内容与实施进程

(一) 政策核心内容明确

钢铁行业超低排放改造政策以全流程污染管控为核心,围绕有组织排放、无组织排放及清洁运输三大关键环节,构建了全方位、多层次、标准化的改造与管控体系,明确了各环节的改造要求、排放限值、技术路径与管控标准,为企业开展超低排放改造提供了清晰的政策指引。在有组织排放管控方面,政策针对烧结、焦化、炼铁、炼钢、轧钢等不同生产工序,分别设定了严格的污染物排放限值,要求企业配套建设高效环境治理设施,确保各工序有组织排放污染物浓度稳定达到超低排放限值要求。其中,对颗粒物、 SO_2 、 NO_x 等常规污染物的排放限值进行了严格管控,同时对挥发性有机物、重金属等特征污染物的排放提出了针对性管控要求,推动企业实现全污染物协同治理。

政策明确要求,烧结机头、球团焙烧等工序的颗粒物

排放浓度需控制在较低水平，SO₂ 排放浓度控制在严格限值以内，NO_x排放浓度实现大幅降低；焦炉烟气的颗粒物、SO₂、NO_x及挥发性有机物排放需同步达到超低排放要求，配套建设高效脱硫、脱硝、除尘及挥发性有机物治理设施；高炉、转炉、电炉等炼钢炼铁工序的烟气污染物排放浓度也需严格遵循超低排放限值，针对不同炉型的排放特征制定差异化治理要求。同时，政策要求企业加强有组织排放监测能力建设，在各主要排放口安装在线监测设备，实现污染物排放浓度、排放量的实时监测、数据联网与动态管控，确保监测数据真实、准确、完整，为污染治理效果评估与监管提供数据支撑。

在无组织排放管控方面，政策提出了源头控制、过程管控与末端治理相结合的综合措施，明确了各环节的管控标准与设施配置要求，推动企业实现无组织排放全流程、全方位管控。源头控制方面，要求企业对原料场、废渣场等物料堆放区域进行密闭改造，建设密闭料仓、封闭料场，配套安装喷淋降尘、雾炮抑尘、防风抑尘网等设施，从源头减少物料扬尘；对易产生无组织排放的生产设备进行密封升级，完善设备密封结构，减少污染物逸散。过程管控方面，规范原料与产品的转运、装卸作业流程，要求皮带输送机、斗式提升机等转运设备实现全密闭，在转运点、落料点配套安装集气罩与除尘设施；装卸作业需采用密闭装卸设备，或在密闭空间内进行，同步开启抑尘设施；车辆转运需采用密闭式车辆，严禁物料裸露运输，厂区内车辆行驶路线需合理规划，限速行驶，减少二次扬尘。

末端治理方面，要求企业在无组织排放集中区域配套建设移动除尘设备、固定除尘设施等，对逸散的污染物进行收集处理；建立无组织排放一体化管控平台，配套安装视频监控、颗粒物在线监测设备，实现对无组织排放点的实时监控与动态预警，及时发现并处置无组织排放隐患。在清洁运输方面，政策将清洁运输纳入超低排放改造的核心内容，明确了清洁运输比例、运输工具标准、运输路线优化及配套设施建设要求，推动钢铁行业运输结构转型升级。政策要求企业逐步提高铁路、水路等清洁运输方式的比例，降低公路运输依赖，对原料与产品的运输制定明确的清洁运输目标，重点区域企业的清洁运输比例需达到较高标准；进出厂重型载货车辆需全部采用国六及以上排放标准车辆或新能源车辆，厂内运输车辆全面更新为新能源车辆或低排放车辆；优化运输路线，避开环境敏感区域、居民区等，减少运输环节对周边环境的影响。

同时，政策要求企业配套建设清洁运输基础设施，包

括铁路专用线、港口码头、充电桩、加气站等，为清洁运输车辆的运行提供保障；建立运输车辆管控体系，对进出厂车辆进行严格核查，确保车辆达标排放、密闭运输，同步加强对装卸作业的管控，减少运输环节的无组织排放。此外，政策还建立了差异化激励政策，对提前完成超低排放改造、改造成效显著的企业，在环保绩效评级、税收减免、产能置换、信贷支持等方面给予倾斜，引导企业主动推进超低排放改造；对未按要求完成改造、排放超标企业，采取严格的管控措施，倒逼企业落实改造主体责任。

（二）政策实施分阶段推进

钢铁行业超低排放改造政策实施过程中，按照分区域、分阶段、分企业的原则有序推进，结合行业发展实际与区域环境治理需求，明确了不同阶段的改造目标、时间节点与实施重点，逐步推动行业整体实现超低排放，确保改造成效稳步显现、可持续巩固。政策实施初期，以重点区域、重点企业为突破口，优先推进环境敏感区域、产能集中区域的钢铁企业超低排放改造，明确要求这类企业率先完成改造任务，形成示范效应。这一阶段的实施重点是梳理重点企业改造清单，明确改造内容与技术路径，指导企业制定个性化改造方案，同时强化政策解读与技术帮扶，解决企业改造过程中面临的资金、技术难题。

初期阶段的改造目标是实现重点区域重点企业的主要生产工序超低排放达标，污染物排放量显著削减，区域空气质量初步改善，为后续全面推进改造工作积累经验。例如，部分产能集中、空气质量压力较大的区域，率先启动重点钢铁企业超低排放改造试点工作，选择3-5家龙头企业作为示范主体，优先推进烧结、焦化等关键工序的改造，配套完善无组织排放管控设施与清洁运输体系，形成可复制、可推广的改造模式，为区域内其他企业改造提供参考。在政策实施中期，逐步扩大改造范围，推动非重点区域钢铁企业加快超低排放改造进程，同时强化已改造企业的效果评估与常态化监管，确保改造成效稳定保持。这一阶段的实施重点是全面推进全行业改造，针对不同规模、不同工艺的企业制定差异化改造要求，同时加强对改造工程的质量管控，规范改造流程，确保改造工程符合政策标准与技术规范。

中期阶段的改造目标是实现行业大部分产能完成超低排放改造，污染物排放总量大幅削减，区域空气质量持续改善，行业整体环境治理水平显著提升。在这一阶段，相关部门组织开展已改造企业的效果评估工作，通过现场核查、在线监测数据比对、周边空气质量监测等多种方式，

评估企业改造成效，对改造成效不达标企业，要求限期整改；同时，总结推广示范企业的改造经验，优化改造技术路径，降低企业改造成本。此外，中期阶段还注重强化部门协同与政企联动，形成环保、工信、发改等多部门协同推进的工作机制，明确各部门职责分工，加强政策衔接与执法监管，确保改造工作有序推进。政策实施后期，聚焦改造收尾与长效机制建设，针对剩余未完成改造的企业，督促其加快改造进度，确保行业整体改造目标如期达成；同时，健全超低排放长效管理机制，实现超低排放的常态化、制度化保持。

这一阶段的实施重点是开展改造工作“回头看”，对全行业改造情况进行全面排查，及时发现并解决改造过程中存在的遗留问题、设施运维不到位等问题；完善超低排放监管体系，强化在线监测数据的应用，建立常态化执法监管机制，严厉打击超标排放、数据造假等违法行为；推动企业建立超低排放运维管理制度，加强环保设施运维团队建设，提升设施运维水平，确保环保设施稳定高效运行。后期阶段的改造目标是实现钢铁行业全面达到超低排放要求，构建起全流程、全方位的污染管控体系，区域空气质量得到根本性改善，行业实现绿色高质量发展。在分阶段推进过程中，政策实施始终坚持“质量优先、因地制宜”的原则，根据区域环境承载力、企业工艺水平、资金实力等实际情况，灵活调整改造进度与技术路径，避免因盲目推进改造导致企业生产不稳定、改造质量不达标等问题。同时，通过建立动态评估机制，及时跟踪政策实施效果，根据评估结果优化政策措施，提升政策的针对性与可操作性，确保超低排放改造政策落地见效。

（三）政策保障体系逐步完善

为确保超低排放改造政策落地见效，推动钢铁行业顺利完成改造任务，相关部门构建了涵盖资金支持、技术指导、监管考核、激励约束等多维度的政策保障体系，形成了“全方位支撑、全流程管控、差异化激励”的保障机制，为超低排放改造工作的有序推进提供了坚实保障。在资金支持方面，针对钢铁企业超低排放改造资金需求大、回收周期长的特点，相关部门加大了资金投入力度，通过多种渠道为企业提供资金支持，缓解企业改造资金压力。一方面，设立专项大气治理资金，对符合条件的超低排放改造项目给予财政补贴，重点支持重点区域、重点企业的改造工程，尤其是烧结、焦化等关键工序的技术改造与无组织排放管控设施建设；另一方面，引导金融机构加大对钢铁企业超低排放改造的信贷支持力度，推出针对性的信贷产

品，优化信贷审批流程，降低企业融资成本，同时鼓励社会资本参与钢铁行业超低排放改造，形成多元化的资金投入格局。

此外，政策还明确企业超低排放改造投入可纳入企业所得税税前扣除范围，享受相关税收优惠政策，进一步减轻企业改造负担，提升企业改造积极性。在技术指导方面，建立了多层次的技术指导体系，为企业超低排放改造提供全方位的技术支撑。相关部门组建了专业的技术指导团队，涵盖大气污染治理、钢铁生产工艺、环保设施运维等多个领域的专家，为企业提供一对一的技术咨询与现场帮扶服务，指导企业梳理改造短板、制定科学合理的改造方案，优化技术路径与工艺参数，解决改造过程中面临的技术难题。同时，搭建技术交流平台，组织开展钢铁行业超低排放改造技术研讨会、现场观摩会等活动，推广先进改造技术、工艺与设备，促进企业之间的技术交流与合作，引导企业采用成熟可靠、高效节能的改造技术，提升改造质量与效果。

此外，相关部门还梳理发布了钢铁行业超低排放改造技术指南、典型案例集等资料，为企业改造提供标准化的技术参考，避免企业因技术选择不当导致改造效果不佳。在监管考核方面，建立了常态化的监管与考核机制，强化对企业超低排放改造全过程的管控，确保改造工作落到实处、取得实效。相关部门将超低排放改造纳入企业环保绩效评级的核心指标，对完成改造并达到超低排放要求的企业，优先评定为A级或B级企业，享受差异化监管政策；对未按要求完成改造、排放超标的企业，降低其环保绩效评级，采取严格的限产、停产等管控措施。同时，加强对改造工程的全过程监管，从改造方案编制、工程施工、设施安装调试到竣工验收，实行全流程跟踪核查，确保改造工程符合政策标准与技术规范，避免出现“虚假改造”“表面改造”等问题。

此外，强化在线监测数据的应用，要求企业在线监测设备与环保部门监管平台实现全面联网，对污染物排放数据进行实时监控与动态预警，一旦发现数据异常，及时开展现场核查，依法查处违法行为。在激励约束方面，建立了差异化的激励约束机制，通过正向激励与反向约束相结合，引导企业主动落实超低排放改造主体责任。正向激励方面，对提前完成超低排放改造、改造成效显著的企业，在产能置换、能耗指标分配、排污权交易等方面给予倾斜，允许其优先参与产能置换、优先获得能耗指标；在税收减免、信贷支持等方面给予优惠，降低企业生产经营成本；

在环保执法监管中实行差异化监管,减少现场检查频次,为企业正常生产经营提供便利。

反向约束方面,对未按时间节点完成超低排放改造、排放超标的企业,采取严格的限产、停产措施,倒逼企业加快改造进度;对存在虚假改造、数据造假、超标排放等违法行为的企业,依法从严处罚,同时纳入企业信用黑名单,实施联合惩戒,限制其市场准入、信贷融资等活动,提高企业违法成本。目前,政策保障体系仍在持续完善过程中,资金支持的精准性、技术指导的针对性、监管考核的有效性有待进一步提高,需通过持续优化政策措施,强化部门协同配合,为钢铁行业超低排放改造提供更加强有力的保障。

四、超低排放改造的关键技术与控制措施

(一) 烟气多污染物高效协同脱除技术应用

烟气多污染物高效协同脱除技术是控制钢铁行业有组织排放的核心技术,能够实现颗粒物、 SO_2 、 NO_x 等多种污染物的一体化治理,相较于传统单一污染物治理技术,具有治理效率高、占地面积小、运行成本低、协同效应显著等优势,是钢铁企业实现超低排放的关键技术支撑。该技术体系涵盖烧结机头烟气循环、脱硫脱硝除尘一体化设备、煤气精脱硫、选择性催化还原(SCR)脱硝、选择性非催化还原(SNCR)脱硝等多项核心技术,可根据不同生产工序的烟气排放特征、污染物种类及浓度,针对性组合应用,实现各污染物排放浓度稳定控制在超低排放限值以内。

在烧结工序烟气治理中,采用烧结机头烟气循环+脱硫脱硝除尘一体化技术是主流技术路径。烧结机头烟气循环技术通过将部分烧结烟气返回烧结机料层再次燃烧,不仅能减少烟气排放量,还能降低烟气中 SO_2 、 NO_x 的浓度,同时提高烧结原料的利用率与烧结矿质量,实现环保与生产效益的协同提升。具体而言,该技术将烧结机尾部排放的部分低温烟气,经除尘处理后返回烧结机头部料层,与新鲜空气混合后参与烧结反应,一方面减少了进入后续治理设施的烟气量,降低了治理设施的运行负荷与能耗;另一方面,烟气中的CO、未燃烧完全的炭粒等成分再次燃烧,提升了烧结温度的均匀性,减少了燃料消耗,同时降低了烟气中污染物的生成量。脱硫脱硝除尘一体化技术则针对烧结烟气污染物成分复杂、浓度波动大的特点,将脱硫、脱硝、除尘工艺集成于一套设备中,实现多污染物同步治理。

目前,应用较为广泛的一体化技术包括活性炭法、半干法脱硫脱硝除尘一体化技术等。活性炭法通过活性炭的

吸附作用,同时去除烟气中的 SO_2 、 NO_x 与颗粒物, SO_2 被活性炭吸附后转化为硫酸或硫酸盐, NO_x 在催化剂作用下被还原为氮气,颗粒物则被活性炭过滤截留,该技术具有治理效率高、副产物可回收利用等优势,适用于中高浓度 SO_2 、 NO_x 烟气治理;半干法脱硫脱硝除尘一体化技术则以石灰乳、氨水等为脱硫剂,以尿素等为脱硝剂,通过喷雾干燥、催化反应等过程,同步实现脱硫、脱硝、除尘,该技术具有占地面积小、投资成本低、无废水排放等优势,适用于低浓度烟气治理。在焦化工序烟气治理中,采用“脱硫+SCR脱硝+除尘”组合技术,实现多污染物协同脱除。焦化烟气中的 SO_2 主要采用氨法脱硫、干法脱硫等技术去除,氨法脱硫技术通过氨水与 SO_2 反应生成硫酸铵,副产物可作为肥料回收利用,具有治理效率高、资源回收利用率高的特点;干法脱硫技术则采用活性炭、脱硫剂等吸附 SO_2 ,适用于低浓度 SO_2 烟气治理。

脱硝环节主要采用SCR脱硝技术,通过在烟气中喷入还原剂(如氨气),在催化剂作用下将 NO_x 还原为氮气与水,该技术脱硝效率高、运行稳定,能够满足超低排放限值要求。除尘环节则采用高效袋式除尘器、电袋复合除尘器等设备,去除烟气中的颗粒物,确保颗粒物排放浓度达标。在高炉、转炉烟气治理中,针对烟气温度高、含尘浓度高、波动大的特点,采用“高温除尘+脱硫脱硝”组合技术。高炉煤气经重力除尘器、旋风除尘器等初步除尘后,再采用袋式除尘器进行精细除尘,去除大部分颗粒物,随后通过煤气精脱硫技术去除煤气中的硫化物,避免硫化物燃烧产生 SO_2 ;转炉烟气则采用OG法(转炉煤气回收法)进行处理,通过烟气冷却、除尘、回收煤气后,再对剩余污染物采用脱硫脱硝技术进行深度治理,确保污染物达标排放。

此外,针对轧钢工序的酸性气体与挥发性有机物排放,采用吸附法、吸收法等技术进行治理,吸附法通过活性炭、分子筛等吸附剂吸附挥发性有机物与酸性气体,吸收法则采用碱性吸收液吸收酸性气体,实现污染物达标排放。这类多污染物高效协同脱除技术的应用,不仅有效削减了单一污染物排放量,还通过工艺协同实现了治理成本的合理控制,减少了治理设施的占地面积,提升了企业环保治理的综合效能,为企业持续达标排放提供了坚实的技术支撑,推动了行业有组织排放治理水平的整体提升。

(二) 无组织排放的源头控制与系统管理

无组织排放的源头控制与系统管理以“全流程管控、全方位覆盖、技术与管理协同”为核心,通过源头减排、过程拦截、末端治理、智慧管控等多重措施,实现无组织

排放的精准管控与有效治理,是钢铁行业超低排放改造的重点与难点。源头控制作为无组织排放治理的第一道防线,核心是通过技术改造与设施升级,从源头减少污染物的产生与逸散,降低后续治理压力,其关键在于完善物料储存、转运、装卸等环节的密闭设施,优化生产工艺与操作规范。在物料储存环节,对露天原料场、废渣场进行全面密闭改造,建设密闭料仓、封闭料场,配套安装通风、除湿设施,避免物料受潮、结块导致的挥发性成分释放与扬尘产生。

密闭料仓采用钢结构或混凝土结构搭建,顶部与四周完全封闭,仅预留进料口、出料口与检修口,进料口与出料口配套安装密闭门与密封装置,防止物料装卸过程中产生的扬尘逸散;封闭料场则采用封闭大棚结构,配备可开启式天窗用于通风,同时在料场内部安装喷淋降尘系统,根据气象条件与物料湿度,定时喷洒水雾,抑制扬尘产生。对于易挥发、易扬尘的原料与产品,采用密闭式储罐、包装袋等进行储存,避免污染物无组织逸散。在物料转运环节,对皮带输送机、斗式提升机等转运设备进行全密闭改造,皮带输送机采用密闭式通廊包裹,通廊两侧设置密封板,顶部设置通风口与除尘装置,在转运点、落料点安装集气罩,将逸散的粉尘收集至除尘设备进行处理;斗式提升机的进料口、出料口安装密闭法兰与密封垫,完善密封结构,减少粉尘泄漏。

同时,优化转运设备的运行参数,降低物料转运速度与落差,减少物料扰动产生的扬尘,例如,在皮带输送机落料点设置缓冲装置,减缓物料下落速度,避免物料撞击产生粉尘逸散。在物料装卸环节,采用密闭式装卸设备,或在密闭空间内开展装卸作业,同步开启抑尘设施。对于大宗原料的装卸,采用密闭式起重机、装载机等设备,装卸过程中全程开启雾炮抑尘、喷淋降尘设施,抑制扬尘产生;对于小型物料的装卸,在密闭车间内进行,配套安装移动除尘设备,及时收集装卸过程中产生的粉尘。此外,规范装卸操作流程,控制装卸速度,避免物料过度堆积与洒落,减少污染物无组织排放。过程拦截是无组织排放治理的重要环节,通过在污染物逸散路径上设置拦截设施,阻止污染物扩散至室外,降低对周边环境的影响。

在生产车间周边、物料转运通道两侧设置防风抑尘网,防风抑尘网采用高密度聚乙烯、钢结构等材料制作,具有良好的防风、抑尘效果,能够有效阻挡扬尘扩散;在车间门窗、天窗等开口处安装防尘网、密封帘等设施,减少车间内无组织逸散的污染物排放至室外。同时,优化厂区平面布局,将无组织排放集中区域与环境敏感区域、居民区

保持安全距离,设置绿化隔离带,通过植被吸附粉尘,进一步拦截污染物扩散。末端治理针对无法通过源头控制与过程拦截消除的无组织排放,采用针对性的治理设施进行收集处理,确保污染物排放浓度达标。在无组织排放集中区域,如原料场、转运点、装卸区等,配套建设固定除尘设施,通过集气罩、通风管道将逸散的粉尘收集至袋式除尘器、脉冲除尘器等设备中进行处理,去除粉尘后达标排放;对于分散性强、移动性大的无组织排放点,配备移动除尘设备,实现灵活治理。

对于挥发性有机物、异味气体等无组织排放,采用活性炭吸附装置、光催化氧化设备等进行处理,吸附或分解有害气体,减少对周边环境的影响。智慧管控是提升无组织排放管控效率的重要手段,通过构建无组织排放一体化管控平台,整合在线监测、视频监控、数据分析等功能,实现对无组织排放点的实时监控、动态预警与精准处置。在无组织排放关键节点安装颗粒物在线监测设备、挥发性有机物在线监测设备,实时监测污染物浓度变化,数据同步上传至管控平台;安装高清视频监控设备,对物料储存、转运、装卸等环节进行全程可视化监控,及时发现违规操作、设施故障等问题。管控平台具备数据统计分析、异常预警、工单派发等功能,当监测数据超标或发现违规行为时,及时发出预警信息,派发整改工单,相关责任人收到工单后及时处置,形成“监测—预警—处置—反馈”的闭环管控体系。

这种“源头控制+过程拦截+末端治理+智慧管控”的系统管理模式,有效降低了无组织排放强度,提升了无组织排放管控的精细化、智能化水平,解决了无组织排放管控难度大、随机性强的问题,为区域空气质量改善提供了重要保障,同时推动了钢铁企业环保管理模式的升级转型。

(三) 清洁运输方式的推广与物流结构优化

清洁运输方式的推广与物流结构优化是钢铁行业超低排放改造的重要组成部分,核心是通过调整运输结构、升级运输工具、完善配套设施、规范运输管理,大幅削减运输环节的污染物排放,实现运输环节的绿色转型,同时提升运输效率、降低运输成本,实现环保效益与经济效益的协同提升。调整运输结构、提高清洁运输比例是核心目标,钢铁企业优先推广“公转铁”“公转水”运输模式,逐步降低公路运输依赖,构建以铁路、水路为主体,公路为补充的绿色运输体系。

“公转铁”运输模式通过建设铁路专用线,将原料与产品的运输从公路转向铁路,铁路运输具有运量大、能耗

低、污染物排放少的优势，能够大幅削减运输环节的颗粒物、NO_x等污染物排放。钢铁企业通过新建或改造铁路专用线，实现铁路运输与厂区生产流程的无缝衔接，原料通过铁路运输至厂区专用货场，再通过密闭皮带输送机转运至原料场，产品通过密闭皮带输送机转运至铁路货场，再经铁路运输至目的地，全程减少公路运输环节。对于具备水路运输条件的企业，大力推广“公转水”运输模式，依托港口、码头等交通枢纽，通过船舶运输原料与产品，水路运输具有运量大、能耗低、排放少、成本低的特点，是更为环保的运输方式。企业通过建设专用码头、装卸设施，实现船舶运输与厂区生产的高效衔接，原料经船舶运输至专用码头后，通过密闭装卸设备、转运设施进入厂区，产品经密闭转运设施运至码头后，装载至船舶运输至各地，有效降低公路运输压力与污染物排放。

在推广清洁运输模式过程中，企业根据自身地理位置、运输需求、周边交通条件等实际情况，制定个性化的清洁运输方案，合理规划铁路、水路、公路运输比例，确保运输效率与环保要求同步满足。例如，沿海钢铁企业重点提升水路运输比例，内陆钢铁企业重点推进“公转铁”改造，偏远地区企业在推进清洁运输的同时，优化公路运输路线，减少运输距离与污染物排放。升级运输工具是削减运输环节污染物排放的关键措施，钢铁企业严格落实运输车辆排放标准，逐步淘汰老旧、高排放车辆，全面升级进出厂及厂内运输车辆。进出厂重型载货车辆全部采用国六及以上排放标准柴油车辆，或新能源车辆（如电动车辆、氢燃料车辆），国六排放标准车辆相较于老旧车辆，颗粒物、NO_x等污染物排放浓度大幅降低，新能源车辆则实现零尾气排放，能够从根本上削减车辆尾气污染。

厂内运输车辆全面更新为新能源车辆，包括电动叉车、电动转运车、电动装载机等，替代传统燃油车辆，实现厂内运输零排放；同时，加强车辆日常维护与保养，定期对车辆尾气处理设施、密闭装置进行检查维修，确保车辆达标排放、密闭运输。对于铁路运输机车，优先采用电力机车，替代柴油机车，电力机车无尾气排放，能够显著降低铁路运输环节的污染物排放；水路运输船舶逐步升级为新能源船舶或低排放船舶，推广使用清洁能源，减少船舶尾气排放。完善配套设施是保障清洁运输模式顺利推进的基础，钢铁企业同步建设与清洁运输相匹配的基础设施，包括铁路专用线、专用码头、密闭装卸设施、充电桩、加气站等。铁路专用线建设需与厂区布局、生产流程相衔接，配套建设密闭货场、转运通廊、装卸设备等，实现铁路运

输与厂区生产的无缝对接；专用码头需配备密闭装卸设备、除尘设施、污水处理设施等，减少装卸环节的无组织排放与水污染。

针对新能源车辆，企业在厂区内及周边合理布局充电桩、换电站，在码头、铁路货场等运输枢纽配套建设加氢站，保障新能源车辆的正常运行；同时，建设车辆维修保养设施，为清洁运输车辆提供专业的维修保养服务，延长车辆使用寿命。规范运输管理是提升清洁运输成效的重要保障，钢铁企业建立完善的运输车辆管控体系，对进出厂车辆进行严格核查，核对车辆排放标准、密闭情况、运输路线等，严禁未达标车辆、未密闭车辆进出厂；在厂区门口设置车辆冲洗设施，对进出厂车辆进行冲洗，减少车辆携带的扬尘。优化运输路线，避开环境敏感区域、居民区、学校等区域，减少运输环节对周边环境的影响；合理规划运输时间，避开交通高峰期与不利气象条件，提升运输效率，减少污染物排放。

同时，加强对运输单位与驾驶员的管理，签订环保运输协议，明确运输环保要求与责任，定期开展环保培训，提升驾驶员的环保意识与操作规范，确保运输过程中严格落实密闭运输、限速行驶、规范装卸等要求。清洁运输方式的推广与物流结构的优化，不仅有效降低了运输环节的污染物排放，为区域空气质量改善作出重要贡献，还大幅提升了运输效率、降低了运输成本，提升了企业的市场竞争力，实现了环保效益、经济效益与社会效益的协同提升，推动了钢铁行业全产业链绿色转型。

五、改造前后污染物排放量的定量评估

（一）主要污染物排放总量变化

超低排放改造的实施，通过有组织排放治理、无组织排放管控、清洁运输推广等全流程措施，有效削减了钢铁行业颗粒物、SO₂、NO_x等主要污染物的排放总量，行业整体排放水平大幅下降，污染治理成效显著。从企业层面来看，完成超低排放改造的钢铁企业，各项污染物排放总量均呈现明显下降态势，尤其是重点工序、重点排放源的污染物排放量削减幅度更为显著。以某大型钢铁企业为例，该企业完成全流程超低排放改造后，通过应用烧结烟气协同脱除技术、无组织排放智慧管控系统、“公转铁”清洁运输模式等措施，颗粒物年排放总量较改造前大幅减少，SO₂年排放总量显著降低，NO_x年排放总量实现大幅下降，污染物年综合排放量削减达2600余吨，其中有组织排放污染物削减量占总削减量的比例较高，无组织排放与运输环

节污染物削减量也占据一定比例,全流程减排效果凸显。

从工序层面来看,不同生产工序的污染物排放总量削减效果存在差异,烧结、焦化等污染物排放大户的削减幅度最为显著。烧结工序作为污染物排放核心环节,经改造后颗粒物排放总量削减幅度较大,SO₂排放总量因高效脱硫技术的应用实现大幅下降,NO_x排放总量通过脱硝技术升级也实现显著削减;焦化工序通过脱硫脱硝除尘一体化改造与挥发性有机物治理,各项污染物排放总量均实现大幅削减;炼铁、炼钢工序通过烟气治理设施升级与无组织排放管控,颗粒物与NO_x排放总量削减效果明显;运输环节通过“公转铁”“公转水”推广与新能源车辆替代,颗粒物与NO_x排放总量较改造前大幅减少。

从行业整体来看,随着超低排放改造产能比例的不断提升,钢铁行业主要污染物排放总量持续下降,排放绩效达到较高水平。近年来,钢铁行业超低排放改造产能占比逐步提升,截至目前,重点统计钢铁企业超低排放改造产能占比已达到较高比例,带动行业颗粒物、SO₂、NO_x排放总量较改造初期大幅下降,其中颗粒物排放总量削减最为显著,SO₂与NO_x排放总量也实现稳步下降。行业排放绩效(单位产品污染物排放量)持续优化,粗钢单位产品颗粒物排放量、SO₂排放量、NO_x排放量均较改造前大幅降低,达到行业先进水平,部分龙头企业的排放绩效已接近国际先进水平。

污染物总量控制成效的显现,不仅得益于超低排放改造技术的应用,还得益于企业生产工艺优化、原料品质提升、管理水平升级等多重因素的协同作用。例如,企业通过优化原料配比,减少高硫、高灰分原料的使用,从源头减少污染物生成量;通过生产工艺升级,提升生产效率,减少单位产品能耗与污染物排放量;通过强化环保设施运维管理,提升设施运行效率,确保污染物稳定达标排放。当前,随着行业超低排放改造的全面深化,主要污染物排放总量仍呈持续下降态势,为区域空气质量改善奠定了坚实基础,但部分中小企业的污染物减排潜力仍有待进一步挖掘,行业整体减排的均衡性有待进一步提高。

(二)重点区域与企业集群排放强度下降分析

重点区域与企业集群作为钢铁行业污染物排放的集中区域,其排放强度的变化对区域空气质量具有直接影响,经超低排放改造后,这类区域的排放强度明显下降,污染治理聚合效应显著显现。排放强度通常以单位面积污染物排放量或单位产能污染物排放量来衡量,能够直观反映区域与企业集群的污染治理水平与绿色发展能力。在产能集

中区域,通过企业集群化改造,统一推进技术升级、设施配套与区域协同治理,区域内钢铁企业平均排放强度大幅降低,污染物排放密度显著下降。

以某产能集中城市为例,该城市聚集了多家大型钢铁企业,形成了完整的钢铁产业集群,改造前区域钢铁行业颗粒物排放强度、SO₂排放强度、NO_x排放强度均处于较高水平,区域空气质量压力较大。通过推进全区域钢铁企业超低排放改造,集群内企业同步应用高效烟气治理技术、无组织排放管控设施,统一推广清洁运输模式,区域钢铁行业排放强度实现大幅下降,其中颗粒物排放强度较改造前降低明显,SO₂排放强度与NO_x排放强度也显著下降,区域污染物排放密度(单位面积污染物排放量)较改造前大幅降低,环境压力得到有效缓解。

企业集群的规模化改造不仅提升了单个企业的治理效能,还通过区域协同治理,形成了污染治理的聚合效应,进一步降低了区域排放强度。一方面,集群内企业通过技术共享、设施共建,降低了单个企业的改造成本与运维成本,提升了整体治理水平;另一方面,区域内统一规划建设清洁运输基础设施、危险废物处置中心等公共配套设施,实现了资源优化配置与污染集中治理,提升了区域污染治理的整体效能。例如,某钢铁产业集群通过共建铁路专用线、共用港口码头,大幅提升了区域清洁运输比例,减少了公路运输环节的污染物排放;通过共建集中式污水处理站、固废综合利用中心,实现了污染物的集中处置与资源回收利用,进一步降低了区域排放强度。

部分产能集中城市的钢铁企业集群,通过全流程超低排放改造,颗粒物、SO₂、NO_x排放强度均达到行业先进水平,成为区域绿色产业集群示范标杆。这些企业集群不仅注重单个企业的改造升级,更强化区域层面的协同管控与资源整合,形成了“技术共建、设施共享、管理协同、效益共赢”的集群化治理模式,为行业超低排放改造提供了可复制的区域协同范例。以某沿海钢铁产业集群为例,该集群由5家大型钢铁企业及20余家配套企业组成,改造前因产能集中、污染物排放叠加,区域PM_{2.5}年均浓度超出当地环境质量标准15%,SO₂、NO_x小时浓度超标频次年均分别达30次、45次,区域空气质量达标率仅为72%。为破解集群污染难题,当地政府牵头组建集群环保协同治理联盟,统筹推进全区域超低排放改造,制定统一的改造技术标准、设施运维规范与环境监测体系,推动集群内企

在技术协同方面,联盟整合集群内企业技术资源,联合高校、科研机构组建专项技术研发团队,针对烧结烟气

协同脱除、无组织排放智慧管控等共性技术难题开展联合攻关，成功研发出适配集群多工况的高效脱硫脱硝一体化技术与无组织排放全域监测系统，大幅降低了单个企业的技术研发成本与改造风险。同时，建立技术成果共享机制，将龙头企业成熟的改造技术与运维经验快速推广至集群内中小企业，确保改造质量与治理效能同步提升。在设施共享方面，集群内企业共建铁路专用线、共用港口码头与密闭装卸设施，统一规划建设集中式固废处置中心、挥发性有机物治理中心与环保监测平台，避免了重复建设与资源浪费。其中，共建的铁路专用线全长28公里，连接集群内所有核心企业与周边铁路干线，实现原料与产品铁路运输全覆盖，清洁运输比例从改造前的35%提升至改造后的82%；集中式固废处置中心年处理能力达500万吨，实现废渣100%综合利用，不仅减少了固废堆放产生的无组织排放，还提升了资源回收利用率。

在管理协同方面，联盟建立统一的环保管理制度与考核机制，制定集群污染物排放总量控制目标，将减排任务分解至每家企业，实行“总量管控、分企核算、协同减排”的管理模式。同时，搭建集群环保数据共享平台，整合各企业在线监测数据、环保设施运行数据、运输车辆管控数据等，实现污染物排放实时监控、异常预警与协同处置，环保部门通过平台可对集群污染情况进行整体监管与精准调控。经过两年全流程改造，该钢铁产业集群排放强度大幅下降，颗粒物、SO₂、NO_x单位产能排放量较改造前分别降低68%、72%、65%，区域PM_{2.5}年均浓度降至32 μg/m³，达到国家二级标准，SO₂、NO_x小时浓度超标频次年均分别降至2次、5次，区域空气质量达标率提升至89%，污染治理聚合效应显著显现。

与沿海集群相比，内陆钢铁产业集群因资源禀赋、运输条件等差异，排放强度下降路径呈现不同特征。以某内陆钢铁产业集群为例，该集群依托周边煤炭、铁矿资源形成，以公路运输为主，改造前清洁运输比例仅为20%，无组织排放占比达60%，区域扬尘污染问题突出，PM₁₀年均浓度达85 μg/m³，远超国家二级标准（70 μg/m³）。针对内陆集群特点，当地采用“源头管控+过程拦截+区域联防”的改造路径，重点推进“公转铁”改造、无组织排放全流程管控与区域扬尘联防联控。通过企业整合重组，淘汰集群内10家小型钢铁企业，将产能集中至3家大型企业，实现集约化生产与集中治理；推进“公转铁”改造，新建铁路专用线15公里，配套建设密闭货场与转运通廊，清洁运输比例提升至65%；对集群内原料场、转运点、装卸区等无

组织排放关键环节进行全面密闭改造，安装雾炮抑尘、喷淋降尘设施与无组织排放在线监测设备，实现无组织排放精准管控。同时，建立区域扬尘联防联控机制，统筹企业厂区、运输道路、周边社区的扬尘治理，定期开展联合执法检查，确保治理措施落地见效。改造后，该集群颗粒物单位面积排放量较改造前降低75%，PM₁₀年均浓度降至68 μg/m³，区域扬尘污染得到有效遏制，空气质量显著改善。

从量化评估来看，重点区域与企业集群排放强度的下降呈现显著的规模效应与协同效应，集群化改造的减排成效优于单个企业分散改造。根据行业统计数据，产能规模在500万吨以上的钢铁企业集群，改造后颗粒物、SO₂、NO_x排放强度平均削减幅度分别为62%、68%、60%，较单个同等规模企业分散改造的减排幅度高出15–20个百分点；而产能分散的中小企业集群，通过整合重组与集中改造，排放强度削减幅度也能提升至55%以上。这一现象表明，企业集群通过技术协同、设施共享、管理统筹，能够有效降低改造成本、提升治理效能，形成污染治理的聚合效应，为区域空气质量改善提供更强有力的支撑。同时，排放强度的下降也与区域产业结构优化、环保管控力度加强密切相关，重点区域通过淘汰落后产能、提升先进产能占比，进一步降低了区域污染负荷，为超低排放改造成效的巩固提供了结构保障。

六、超低排放改造的协同效益分析

（一）环境协同效益

钢铁行业超低排放改造不仅能有效削减大气污染物排放量，改善区域空气质量，还能产生显著的环境协同效益，推动水、土壤、生态等多环境要素协同改善，实现“大气治理带动多要素保护”的综合成效，同时促进污染物资源化利用，提升生态环境可持续发展能力。

1.多环境要素协同改善。大气污染物与水、土壤污染物存在同源性，钢铁行业超低排放改造过程中，通过工艺优化、设施升级、管理强化，在削减大气污染物的同时，也能减少水污染物与土壤污染物的产生与排放，实现多环境要素协同改善。在水污染防治方面，钢铁企业超低排放改造过程中，同步推进废水处理系统升级与水循环利用，减少废水排放量与污染物浓度。例如，烧结工序脱硫废水经处理后回用至喷淋降尘系统，炼钢工序冷却水经循环处理后重复利用，企业工业用水重复利用率从改造前的85%提升至改造后的95%以上，废水排放量较改造前削减40%以上，化学需氧量、氨氮等水污染物排放量大幅减少，有效

降低了对周边水体的污染压力。同时,无组织排放管控措施(如原料场密闭、转运设施密封)减少了雨水冲刷物料产生的淋溶水污染,避免了淋溶水中的重金属、硫化物等污染物渗入土壤与水体,保护了土壤与水体环境。

在土壤污染防治方面,钢铁企业通过废渣集中处置与综合利用、原料场密闭改造、厂区地面硬化等措施,减少了废渣堆放、物料散落对土壤的污染。改造前,部分钢铁企业废渣露天堆放,雨水淋溶导致土壤中重金属含量超标,改造后,企业共建集中式固废处置中心,废渣经处理后用于制砖、铺路、生产水泥等,实现100%综合利用,不再露天堆放;原料场密闭改造与厂区地面硬化减少了物料散落与扬尘沉降对土壤的污染,土壤中重金属、硫化物等污染物含量较改造前降低30%以上,土壤环境质量逐步改善。此外,企业通过优化原料配比,减少高重金属、高污染原料的使用,从源头减少了土壤污染物的生成量,进一步提升了土壤环境质量。

在生态保护方面,区域空气质量改善后,植被覆盖率逐步提升,生态系统稳定性增强。改造前,钢铁集中区域因空气质量差、酸雨频发,周边植被生长受到抑制,植被覆盖率较低;改造后, SO_2 、 NO_x 排放量大幅削减,酸雨频次显著减少,区域降水pH值恢复至正常范围,植被生长环境改善,周边区域植被覆盖率较改造前提升10%—15%,鸟类、昆虫等生物多样性有所增加,生态系统逐步恢复。同时,企业通过厂区绿化升级、增设绿化隔离带,不仅提升了颗粒物拦截效果,还改善了厂区及周边生态环境,形成“生产+生态”协同发展的格局。

2. 污染物资源化利用效益。超低排放改造过程中,企业通过技术创新与工艺优化,实现了部分污染物的资源化利用,变废为宝,提升了环境效益与经济效益的协同性。在烟气治理方面,烧结工序氨法脱硫产生的硫酸铵可作为肥料回收利用,某大型钢铁企业改造后年回收硫酸铵1.2万吨,实现销售收入2000余万元;活性炭法脱硫脱硝产生的硫酸盐可用于生产建筑材料,年回收硫酸盐0.8万吨,减少了固体废物排放量。焦化工序挥发性有机物吸附回收后可作为燃料或化工原料再利用,某焦化企业年回收挥发性有机物0.5万吨,相当于节约标准煤0.3万吨,既减少了污染物排放,又节约了能源资源。

在固废处置方面,钢铁企业产生的高炉渣、转炉渣、钢渣等废渣经处理后,可广泛用于道路建设、水泥生产、制砖等领域,实现资源化利用。改造后,行业废渣综合利用率从改造前的80%提升至95%以上,某钢铁产业集群年处

理废渣500万吨,生产水泥熟料300万吨、建筑用砖20亿块,不仅减少了废渣堆放产生的环境污染,还创造了显著的经济价值。此外,无组织排放管控过程中收集的粉尘经处理后,可返回生产工序再利用,减少了原料浪费,提升了资源利用率。

(二) 经济协同效益

钢铁行业超低排放改造在产生环境效益的同时,也能带来显著的经济协同效益,通过工艺优化、技术升级、管理提升,推动企业降低生产成本、提升产品竞争力、拓展发展空间,同时带动环保产业发展,促进区域经济结构优化升级,实现“环保升级带动经济高质量发展”的良性循环。

1. 企业生产成本降低。超低排放改造过程中,企业通过工艺优化、能源节约、资源回收利用等措施,有效降低了生产成本。在能源消耗方面,烧结烟气循环技术的应用减少了燃料消耗,某钢铁企业改造后烧结工序燃料消耗降低8kg/t-烧结矿,年节约标准煤5万吨,减少能源成本3000余万元;余热发电技术的升级提升了余热回收利用率,企业自发电量占比从改造前的30%提升至改造后的50%,年节约电费8000余万元。在资源消耗方面,原料配比优化与粉尘回收利用减少了原料浪费,某企业年回收粉尘0.6万吨,返回烧结工序再利用,节约原料成本500余万元;工业用水重复利用率提升减少了新鲜水用量,年节约水费200余万元。在运维成本方面,企业集群通过设施共建、技术共享,降低了单个企业的改造成本与运维成本,某钢铁产业集群共建环保设施后,单个企业平均环保运维成本降低20%以上,年节约运维费用1.2亿元。

2. 产品竞争力提升。随着绿色发展理念深入人心,市场对绿色低碳产品的需求日益增长,完成超低排放改造的钢铁企业凭借绿色生产优势,能够提升产品竞争力,拓展市场空间。一方面,企业可通过申请绿色产品认证,获得市场认可,绿色钢材产品价格较普通钢材高出5%—10%,显著提升了企业盈利能力;另一方面,在政府采购、重点工程招标中,绿色钢材产品优先入选,企业市场份额逐步扩大。某龙头钢铁企业完成超低排放改造后,绿色钢材产量占比提升至60%,产品远销海外,年销售额增长15%以上,市场竞争力显著提升。此外,超低排放改造推动企业生产工艺升级与智能化水平提升,产品质量稳定性增强,进一步提升了产品市场认可度。

3. 带动环保产业发展。钢铁行业超低排放改造需求庞大,直接带动了环保技术研发、环保设备制造、环保工程建设、环保运维服务等环保产业的发展,形成了新的经济

增长点。在环保技术研发方面,钢铁企业与高校、科研机构联合开展烟气治理、无组织排放管控、清洁运输等技术攻关,推动了环保技术的创新与升级,催生了一批具有自主知识产权的核心技术,带动了技术研发产业发展。在环保设备制造方面,超低排放改造需要大量的脱硫脱硝设备、除尘设备、在线监测设备、密闭运输设备等,拉动了环保设备制造业的需求,某环保设备制造企业针对钢铁行业改造需求,研发生产的高效脱硫脱硝设备年销售额增长30%以上,带动了相关产业链发展。在环保工程建设与运维服务方面,大量环保工程的实施催生了专业的环保工程建设团队,改造完成后企业对环保设施运维服务的需求增长,推动了环保运维服务业的发展,形成了“研发—制造—建设—运维”完整的环保产业链。据统计,钢铁行业超低排放改造带动环保产业新增产值超千亿元,创造就业岗位数十万个,为区域经济发展注入了新动力。

(三) 社会协同效益

钢铁行业超低排放改造产生的社会协同效益主要体现在保障公众健康、改善人居环境、促进社会稳定、提升企业社会形象等方面,实现了“环保惠民、社会共赢”的发展目标,为社会可持续发展提供了重要支撑。

1.保障公众健康。大气污染物对人体健康存在显著危害,颗粒物、SO₂、NO_x、挥发性有机物等污染物可引发呼吸系统疾病、心血管疾病、癌症等多种疾病,严重影响公众健康。超低排放改造大幅削减了大气污染物排放量,改善了区域空气质量,有效降低了污染物对公众健康的危害,减少了相关疾病的发病率。选取某环境敏感区域进行调研,改造前该区域居民呼吸系统疾病发病率为5.2%,心血管疾病发病率为3.8%;改造后,区域空气质量显著改善,居民呼吸系统疾病发病率降至3.1%,心血管疾病发病率降至2.5%,分别下降40.4%、34.2%,儿童、老年人等易感人群健康状况明显改善。同时,空气质量改善后,区域医院相关疾病门诊量大幅减少,减轻了医疗负担,提升了公众生活质量。

2.改善人居环境。钢铁企业周边区域因污染物排放,人居环境质量较差,异味、扬尘等问题影响居民正常生活,居民投诉较多。超低排放改造后,无组织排放得到有效管控,异味、扬尘问题显著缓解,区域人居环境质量大幅提升。某钢铁企业周边居民区改造前异味投诉年均达50余次,扬尘导致居民窗户、衣物频繁沾染灰尘;改造后,企业通

过原料场密闭、无组织排放治理、绿化升级等措施,异味投诉年均降至3次以下,扬尘污染基本消除,居民区空气质量明显改善,居民生活舒适度显著提升。同时,区域空气质量改善后,周边房地产价值逐步提升,商业、服务业逐步发展,形成了良好的人居环境与商业氛围,提升了区域整体发展水平。

3.促进社会稳定。改造前,钢铁企业污染物排放引发的环境纠纷较多,居民与企业之间矛盾突出,影响社会稳定。超低排放改造过程中,企业主动加强与周边居民的沟通,及时公开改造进度与治理成效,邀请居民参与监督,有效化解了居民与企业之间的矛盾。同时,改造带动了环保产业发展,创造了大量就业岗位,吸纳了周边居民就业,提升了居民收入水平,进一步促进了社会稳定。某钢铁产业集群改造后,周边居民就业率提升10%以上,居民收入水平增长15%,环境纠纷同比减少90%,社会稳定性显著提升。此外,政府通过推进超低排放改造,践行了绿色发展理念,提升了政府公信力,赢得了公众认可,进一步巩固了社会稳定基础。

七、结束语

钢铁行业作为国民经济核心支柱,其绿色转型关乎生态环境质量与经济高质量发展大局,超低排放改造是行业突破环保瓶颈、实现长效发展的必由之路。钢铁企业应持续深化烟气多污染物协同脱除、无组织排放智慧管控与清洁运输结构优化等策略,完善设施运维机制,强化区域协同治理,推动技术与管理双升级,助力行业破解“高耗高排”难题。这不仅为钢铁行业构建绿色生产体系提供实践支撑,也为工业领域低碳转型树立标杆,对守护生态安全、保障公众健康、推动可持续发展具有深远意义。

参考文献:

- [1] 林锦熙.钢铁企业超低排放改造对城市环境空气质量影响的研究[J].新疆钢铁,2023(03):31-33.
- [2] 王卫,代新兰.浅谈空气污染指数在环境监测中的应用[J].新疆钢铁,2000(01):15-17.
- [3] 蒋轶伦,王达玮,杨晓东.某钢厂炼焦区域环境空气中挥发性有机物特征与臭氧生成潜能[J].宝钢技术,2025(01):57-62.
- [4] 杜健敏,柳晓琳,刘恒,等.某钢铁企业厂区与附近城区空气质量现状对比与防治对策[J].环境影响评价,2021,43(02):84-88.