

焦炉生产过程中污染物排放控制研究

王 芸

山西焦化集团有限公司 山西 临汾 041600

摘 要: 焦化工业作为钢铁产业链中的关键环节, 在为高炉提供优质冶金焦炭的同时, 也伴随着大量污染物的排放, 对生态环境和人体健康构成严重威胁。本文系统梳理了焦炉生产过程中主要污染物的种类、来源及其环境危害, 重点分析了当前主流的污染物排放控制技术, 包括源头削减、过程优化与末端治理三大路径。在此基础上, 结合国内外先进案例, 探讨了焦炉烟气脱硫脱硝一体化、VOCs高效回收、无组织排放智能监控等前沿技术的发展趋势。最后, 本文从政策法规、技术集成与智能化管理三个维度, 提出了构建焦炉污染物全过程、全要素、智能化控制体系的建议, 以期为推动焦化行业绿色低碳转型、实现“双碳”目标提供理论支撑与实践参考。

关键词: 焦炉; 污染物排放; 源头控制; 末端治理; VOCs; 脱硫脱硝

引言

焦化是将炼焦煤在隔绝空气条件下高温干馏, 生产冶金焦炭、焦炉煤气、煤焦油、粗苯等产品的热化学转化过程。作为钢铁工业不可或缺的上游工序, 焦炭在高炉冶炼中兼具还原剂、发热剂和料柱骨架三大功能。然而, 焦炉生产过程复杂、能耗高、污染重, 是典型的资源密集型与环境敏感型产业。随着我国生态文明建设的深入推进和“碳达峰、碳中和”战略目标的提出, 焦化行业面临着前所未有的环保压力与转型挑战。《炼焦化学工业污染物排放标准》(GB16171)等法规标准日趋严格, 对颗粒物、二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOCs)等污染物的排放限值不断收紧。同时, 公众环保意识日益增强, 对周边环境质量的要求不断提高。在此背景下, 深入研究焦炉生产过程中污染物的生成机理与控制技术, 构建高效、经济、可持续的污染防控体系, 已成为焦化行业实现高质量发展的核心课题。本文旨在系统分析焦炉污染物排放特征, 评估现有控制技术的效能与局限, 并展望未来技术发展方向, 为焦化企业环保升级与政策制定提供科学依据。

1 焦炉生产过程及主要污染物来源

1.1 装煤过程

在装煤过程中, 冷煤被送入温度高达1000–1100℃的炭化室, 煤中挥发分迅速热解并大量析出, 形成高浓度烟气。对于顶装焦炉而言, 装煤孔开启的瞬间极易造成烟气外逸, 产生阵发性强、污染物浓度高的排放现象; 而捣固焦炉虽采用侧装方式, 但在煤饼推入过程中同样存在密封不严导致的烟尘泄漏问题^[1]。这些烟气中含有大量颗粒物、苯系物(如苯、甲苯、二甲苯)、多环芳烃(PAHs)以及酚类等挥发性有机物, 不仅具有强烈刺

激性气味, 部分组分还具有致癌、致畸风险, 是焦化厂VOCs无组织排放的重要源头之一。

1.2 炼焦过程

尽管炼焦过程在密闭的炭化室内进行, 理论上应无明显外排, 但在实际运行中, 由于炉体长期高温运行导致耐火材料老化、炉门刀边变形或密封装置失效, 常出现炉体逸散现象。这类“炉体烟”虽排放强度较低, 但持续时间长、覆盖范围广, 成分复杂, 包含硫化氢、氨气、苯类物质、焦油雾滴及微量氰化物等, 对厂区及周边空气质量构成慢性影响, 也是环保监管中难以精确监测和控制的无组织排放源。

1.3 推焦过程

推焦是将红热焦炭(约1000℃)从炭化室推出的关键操作, 此过程焦炭与空气剧烈接触, 瞬间产生大量高温烟尘。推焦烟尘粒径细小, 富含 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$, 且吸附有高浓度的多环芳烃和重金属(如铅、砷), 具有极强的毒性和环境持久性。若采用传统湿法熄焦, 高温焦炭遇水还会产生大量含酚、氰化物、硫化物及氨的蒸汽, 不仅造成大气二次污染, 还伴随大量水资源消耗和废水处理压力。

1.4 熄焦过程

熄焦方式对污染物排放影响显著。湿法熄焦因操作简单、投资低而曾被广泛采用, 但其环境代价高昂; 相比之下, 干法熄焦(CDQ)通过惰性气体循环回收红焦显热, 不仅可将80%以上的热能用于发电或供热, 实现能源梯级利用, 还能从根本上避免湿熄焦产生的有害蒸汽, 大幅削减颗粒物和VOCs排放, 是焦化清洁生产的重要技术路径。

1.5 焦炉烟囱烟气

焦炉加热通常使用焦炉煤气或混合煤气作为燃料,燃烧后经烟囱排放的烟气是典型的有组织排放源。其中,氮氧化物主要源于高温燃烧条件下空气中的氮气与氧气反应生成的热力型 NO_x ;二氧化硫则来自煤气中残留的硫化氢、羰基硫等含硫组分在燃烧过程中的氧化产物。此外,烟气中还含有少量一氧化碳和细微颗粒物,虽浓度相对较低,但在超低排放要求下仍需严格控制。

1.6 化产回收系统

煤气净化环节包括脱硫、脱氨、洗苯、蒸氨等工序,虽旨在回收有用组分,但过程中亦会产生含硫、含氨、高浓度有机物的废水和废气。例如,脱硫废液若未妥善处理,易造成水体富营养化;粗苯储槽呼吸气、污水调节池逸散气等则成为VOCs和恶臭气体的重要来源。这些污染源分布零散、浓度波动大,治理难度高,亟需系统化收集与集中处理。

综上所述,焦炉污染物呈现出种类繁多、毒性显著、排放形式多样(有组织与无组织并存)、时空分布不均等特点,决定了其控制必须采取全过程、多维度的综合策略。

2 焦炉污染物排放控制技术体系

针对焦炉复杂的污染特征,行业已逐步构建起“源头预防—过程控制—末端治理”三位一体的污染控制技术体系,强调从根源减少生成、在过程中抑制逸散、在末端高效净化。

2.1 源头削减技术

源头削减是实现绿色焦化的核心战略,其根本在于通过优化原料结构与工艺参数,从污染物生成的初始环节加以控制,从而大幅减少后续末端治理的压力。在配煤环节,科学选择并合理搭配低硫、低灰、低挥发分的优质炼焦煤,是降低焦炭中有害元素含量的关键。同时,通过在配煤中适量添加固硫剂(如石灰石、白云石等)或掺配弱黏结性煤种,不仅可有效抑制焦化过程中硫化物的释放,还能调控热解反应路径,减少挥发性有机物(VOCs)的析出量。此外,焦炉加热燃料的清洁化亦至关重要。推广使用经深度脱硫、脱萘、脱焦油处理后的焦炉煤气作为加热介质,可显著降低燃烧烟气中 SO_2 、 NO_x 及颗粒物的初始浓度,从源头减轻大气污染负荷。尤为关键的是全面推行干法熄焦(CDQ)技术替代传统湿法熄焦。干熄焦通过惰性气体(通常为氮气)在密闭系统中循环冷却红焦,不仅高效回收红焦显热用于发电或供热,实现能源梯级利用,更彻底避免了湿熄焦过程中产生的大量含酚、氰、硫化物及粉尘的蒸汽无组织排放,从根本上消除了该环节的环境污染问题,真正

实现节能、降耗、减排与增效的多重目标。

2.2 过程控制技术

过程控制技术聚焦于焦化生产全流程中无组织排放的精细化管理,通过提升设备密封性能、优化操作规程及强化过程监控,最大限度抑制污染物逸散。在装煤阶段,高压氨水无烟装煤技术已在国内大中型焦炉广泛应用。该技术利用高压氨水喷射在炭化室内形成瞬时负压,将装煤过程中产生的烟气迅速导入集气管系统,实现装煤作业基本无烟化,有效控制苯并^[2]芘、VOCs等有毒有害物质的逸散。炉体密封方面,采用弹性刀边炉门、自动压紧装置、弹簧门栓及新型密封泥等先进结构与材料,显著提升了炉门、炉盖及上升管等关键部位的密封可靠性,大幅减少炼焦过程中因炉体泄漏造成的烟气外逸。推焦环节则普遍配套建设地面除尘站系统,通过拦焦机上方的移动式集尘罩高效捕集推焦瞬间产生的高温烟尘,并经负压管道输送至布袋除尘器进行深度净化,除尘效率可达99%以上,确保颗粒物达标排放。此外,针对煤场、焦仓、转运站等物料储运区域,实施全封闭或半封闭改造,并集成智能喷雾抑尘、负压收尘、防风抑尘网等综合措施,构建覆盖原料进厂、储存、转运至产品输出的全链条无组织排放防控体系,有效控制扬尘污染,全面提升焦化企业的清洁生产水平与环境管理能力。

2.3 末端治理技术

2.3.1 焦炉烟囱烟气治理

焦炉烟囱烟气治理近年来成为行业超低排放改造的重点。由于焦炉烟气温度普遍较低(通常低于 300°C),传统SCR脱硝技术面临温度窗口不匹配的难题。为此,低温SCR技术应运而生,通过开发Mn-Ce、V-W-Ti等新型低温催化剂,可在 $180\text{--}250^\circ\text{C}$ 范围内高效催化还原 NO_x ,脱硝效率达80%以上。脱硫方面,旋转喷雾干燥法(SDA)和循环流化床半干法(CFB)因其无废水、副产物易处理等优势成为主流选择,脱硫效率普遍超过90%。部分企业利用焦化厂自产氨水实施氨法脱硫,生成硫酸铵化肥,实现资源循环利用,但需严格控制氨逃逸以避免二次污染。除尘则普遍采用覆膜滤袋布袋除尘器或电袋复合除尘器,可将颗粒物浓度稳定控制在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。目前,“SDA脱硫+低温SCR脱硝+布袋除尘”的组合工艺已成为焦炉烟气超低排放改造的典型技术路线。

2.3.2 VOCs与恶臭气体治理

VOCs治理因其组分复杂、浓度波动大而成为焦化环保的难点。对于装煤、推焦等有组织排放源,烟气经高效除尘后,可采用蓄热式焚烧(RTO)或催化燃烧

(RCO) 技术进行深度氧化处理。RTO通过蓄热体回收热量,热效率高,适用于高浓度VOCs;RCO则在催化剂作用下于较低温度(250–400℃)实现完全氧化,能耗更低。对于化产区域储槽呼吸气、污水池逸散气等无组织源,则需通过负压收集系统将其导入集中处理设施^[3]。生物滤池或生物滴滤塔适用于处理低浓度、大风量的含硫、含氨恶臭气体,利用特定微生物的代谢作用将其降解为无害物质,运行成本低但占地面积较大。活性炭吸附虽适用于部分工况,但存在再生困难、二次污染风险等问题,应用逐渐受限。

2.3.3 废水治理

焦化废水含有高浓度酚、氰、氨氮及难降解有机物,处理难度大。常规工艺通常包括物理预处理(除油、均质调节)、生物处理(如A/O、A²/O、SBR等)和深度处理三个阶段。近年来,为实现近零排放目标,企业普遍在生化处理后增加高级氧化(如Fenton氧化、臭氧催化氧化)和膜分离(如反渗透)单元,通过强氧化破坏难降解有机物结构,再经膜系统实现盐分与水的分离,最终实现废水回用或达标排放。“生化+高级氧化+反渗透”的组合工艺已成为焦化废水深度处理的主流方向。

3 典型案例分析:某大型钢铁联合企业焦化厂超低排放改造

该企业对其6米顶装焦炉实施了系统性环保升级。在装煤环节,采用高压氨水结合单孔炭化室压力自动调节技术,有效抑制了装煤烟气外逸;推焦过程配套高效地面除尘站,确保烟尘捕集率与净化效率双高。焦炉烟囱烟气治理采用“SDA脱硫+低温SCR脱硝+覆膜滤袋除尘”一体化工艺,运行稳定,排放指标远优于国家标准。化产区域所有VOCs逸散点均实现负压收集,并集中送入RTO焚烧系统处理。全厂同步完成干熄焦改造,配套余热锅炉发电,年节能量显著。改造后,烟囱排放颗粒物 $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\text{SO}_2 \leq 30\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\text{NO}_x \leq 100\text{mg}/\text{m}^3$,VOCs无组织排放总量下降80%以上,成为行业绿色转型标杆。

4 技术发展趋势与挑战

未来焦炉污染物控制将向多污染物协同、资源化利用与智能化管理方向发展。一体化协同治理技术如活性焦吸附法,可同步脱除 SO_2 、 NO_x 、二噁英及重金属,简化系统、降低投资,具有广阔前景。VOCs治理将不再局

限于“末端焚烧”,而是探索组分分离与高值化利用路径,例如从焦炉煤气中提纯苯、甲苯作为化工原料,实现变废为宝。智能化方面,基于物联网、大数据和人工智能的环保监控平台将逐步普及,实现无组织排放实时溯源、治理设施智能诊断、排放数据自动预警与能效环保协同优化^[4]。然而,挑战依然存在。低温SCR催化剂在焦炉烟气复杂组分下的长期稳定性与抗中毒能力仍需提升;VOCs来源广、组分杂、浓度波动剧烈,单一技术难以普适;环保设施运行成本高昂,对中小企业构成较大经济压力;此外,VOCs无组织排放的核算方法、监测规范等标准体系尚不健全,制约了精准监管与科学评估。

5 结语

为系统提升焦炉污染物控制水平,建议从多维度协同推进。首先,应加快修订《炼焦化学工业污染物排放标准》,增设VOCs无组织排放控制要求,明确碳排放核算方法,推动环保与“双碳”目标深度融合。其次,加大财政金融支持力度,对实施干熄焦、超低排放改造、VOCs深度治理的企业给予税收减免、绿色信贷或专项补贴,降低转型成本。第三,强化技术集成创新,鼓励产学研联合攻关低温脱硝、VOCs资源化、智能监控等关键技术,建立绿色技术推广目录与示范工程。最后,推动构建覆盖设计、建设、运营全生命周期的环保管理体系,推广“环保管家”和环境绩效合同(EPC)等新模式,提升企业环保治理的专业化与可持续性。展望未来,焦化行业将加速向“绿色化、智能化、低碳化”转型。通过技术创新与管理升级,焦炉有望从传统高污染单元转变为集能源转换、资源回收与环境友好于一体的现代化生产节点,在保障国家钢铁产业链安全的同时,为建设美丽中国贡献积极力量。

参考文献

- [1] 庞克亮,武吉,刘冬杰,等.焦炉燃料燃烧控制及污染物排放特性[J].钢铁,2018,53(04):83-88.
- [2] 孔德文,张平存.焦炉污染物源头减排技术进展[J].河北冶金,2020,(06):17-22.
- [3] 易凯.焦炉烟气污染物排放的控制[J].化工管理,2018,(20):220.
- [4] 焦炉烟气活性炭法多污染物协同控制技术[J].中国环保产业,2022,(10):85.