

焦油加工过程中的节能减排技术应用

石 舫

山西焦化股份有限公司 山西 临汾 041606

摘要: 焦油作为煤化工、石油化工及生物质热解等过程的重要副产物,其深加工不仅可提取高附加值化学品(如酚类、萘、蒽、咔唑等),更是实现资源综合利用、延伸产业链的关键环节。然而,传统焦油加工工艺普遍存在能耗高、污染重、资源利用率低等问题,与当前国家“双碳”战略目标及绿色低碳发展要求存在显著矛盾。本文系统梳理了焦油加工的主要工艺流程,深入剖析了各环节存在的能源消耗与环境污染特征;在此基础上,从源头减量、过程优化、余能回收、智能控制及清洁替代等多个维度,全面综述了当前国内外在焦油加工领域应用的节能减排关键技术,包括高效分离技术、热集成与能量梯级利用、先进加热与换热设备、智能化控制系统、绿色溶剂萃取以及耦合可再生能源等。最后,对焦油加工节能减排技术的未来发展趋势进行了展望,指出多技术协同集成、数字化与智能化深度融合、以及全生命周期绿色化将是推动焦油加工业绿色低碳转型的核心路径。本研究旨在为焦油加工企业实施节能降碳改造、提升绿色制造水平提供理论参考与实践指导。

关键词: 焦油加工; 节能减排; 热集成; 高效分离; 智能控制; 绿色低碳

引言

焦油是复杂有机混合物,来源多样,如煤炭干馏、煤气化等。其中煤焦油产量最大、成分最复杂,含上万种有机化合物,是宝贵的芳香烃资源库。借助精馏等深加工手段,能从中分离出多种基础化工原料和精细化学品,广泛应用于染料、医药等多个领域。不过,焦油加工本质是高能耗、高排放的物理化学分离转化过程。典型工艺含原料预处理、蒸馏切割、馏分精制等步骤,此过程消耗大量蒸汽、电力和冷却水,还产生含多种有毒有害物质的废水、废气和废渣。传统焦油加工厂吨产品综合能耗在80-120kgce之间,“三废”处理成本高,环境风险大。当下,全球气候变化加剧,我国提出“碳达峰、碳中和”战略目标,传统高耗能、高排放工业模式转型压力巨大。《“十四五”工业绿色发展规划》要求加快传统产业绿色化改造,推动重点行业节能降碳。焦油加工是煤化工产业链重要一环,其绿色低碳转型既是企业降本增效、提升竞争力的内在需求,也是实现国家能源安全与生态保护战略目标的必然要求。所以,系统研究并推广其节能减排技术,意义重大、价值深远。

1 焦油加工工艺流程及能耗排放特征

1.1 典型工艺流程概述

现代焦油加工工厂的核心工艺遵循“先切后精”的基本思路,整体流程具有高度的连续性和系统性。来自焦化厂的粗焦油首先被送入焦油储槽,在静置状态下完成初步的水分沉降与固体杂质分离。随后,经过初步净化的焦油由泵输送至管式加热炉,在此被加热至适宜温度

后进入蒸馏系统。蒸馏是整个流程的核心单元,通常采用常压与减压相结合的方式。常压蒸馏主要切割出轻油($<170^{\circ}\text{C}$)、酚油($170\text{--}210^{\circ}\text{C}$)、萘油($210\text{--}230^{\circ}\text{C}$)、洗油($230\text{--}300^{\circ}\text{C}$)和蒽油($300\text{--}360^{\circ}\text{C}$)等馏分,塔底得到软沥青。对于沸点更高的组分或为了降低操作温度以防止裂解,常采用减压蒸馏对蒽油或软沥青进行进一步切割。蒸馏所得各馏分尚不能直接作为商品出售,必须经过深度精制^[1]。例如,酚油需通过碱液萃取转化为酚钠盐,再经酸化析出粗酚,最终精馏获得高纯度酚类产品;萘油则多采用压榨结晶或溶剂结晶法提取工业萘,并进一步精制为精萘;而洗油和蒽油馏分则可用于分离咔唑、苈等高附加值组分。蒸馏残余物——沥青,则根据市场需求调制不同规格的产品,或作为碳材料前驱体进行深加工。整个流程环环相扣,任一环节的效率低下都将直接影响整体能耗与产品质量。

1.2 能耗与排放特征分析

1.2.1 能耗特征

焦油加工过程的高能耗特性主要源于其物料本身的物理化学性质。焦油粘度大、沸点高,导致在预热和蒸馏阶段需持续输入大量热能,其中管式加热炉和精馏塔再沸器是主要的能源消耗点,燃料燃烧所占比例超过六成。此外,为维持精馏操作所需的回流比,塔顶蒸汽冷凝及产品冷却过程消耗大量循环冷却水,间接推高了电耗。分离精度要求越高,回流比越大,能耗也相应增加。除主工艺外,机泵输送、真空系统运行及仪表风供应等辅助系统亦构成不可忽视的能耗组成部分。

1.2.2 排放特征

在排放方面,焦油加工过程呈现出“三废”种类多、毒性大、处理难的特点。废气主要来源于加热炉燃烧产生的烟气,其中含有二氧化硫、氮氧化物及颗粒物;同时,储罐呼吸、设备密封点泄漏以及废水处理单元也会释放挥发性有机物(VOCs)和恶臭气体。废水是污染负荷最重的部分,主要包括碱洗工序产生的高浓度含酚钠废水、酸化回收酚后残留的含盐废水以及设备冲洗水等,其化学需氧量(COD)、总酚、氰化物、氨氮及多环芳烃(PAHs)含量极高,生物降解性差,处理工艺复杂且成本高昂。固体废物则以蒸馏残渣沥青和废水处理污泥为主,若未进行资源化利用或规范处置,其中富集的有毒有机物可能对土壤和地下水造成长期生态风险^[2]。由此可见,焦油加工的环境足迹与其能源消耗紧密关联,亟需通过系统性技术革新实现绿色转型。

2 焦油加工节能减排关键技术应用

2.1 高效分离与过程强化技术

提高分离效率是降低焦油加工能耗的根本途径。传统塔盘式精馏塔存在压降大、传质效率低等缺陷,难以满足现代节能要求。近年来,高效规整填料(如金属孔板波纹填料、丝网波纹填料)在焦油蒸馏塔中的应用日益广泛。这类填料具有比表面积大、空隙率高、流道规则等优点,可显著降低塔内压降,强化气液传质,从而在保证产品纯度的前提下有效降低回流比和再沸器热负荷。研究表明,在典型焦油蒸馏装置中替换为高效填料后,能耗可降低10%至20%。此外,过程强化理念正逐步渗透至焦油加工领域,例如探索将酚类萃取、反萃取甚至加氢脱氧反应集成于同一设备中,通过反应-分离耦合缩短工艺流程,减少中间物料储存与输送环节的能量损失^[3]。尽管膜分离技术在主流程中尚未大规模应用,但在含酚废水处理方面已展现出独特优势,如渗透汽化膜可实现酚的选择性脱除,相比传统溶剂萃取法,不仅能耗更低,且避免了二次污染问题,为焦油加工清洁化提供了新思路。

2.2 热集成与能量梯级利用技术

热集成是焦油加工节能降耗的核心策略,其本质在于最大化系统内部热量的回收与匹配,实现能量的梯级利用。夹点分析(Pinch Analysis)作为一种成熟的系统工程方法,被广泛用于构建最优换热网络(HEN)。通过对全厂物流进行热力学分析,该方法能够科学地确定最小公用工程消耗和最优换热匹配方案,确保高温位热源优先用于产生蒸汽或预热进料,低温位热源则用于锅炉给水预热或厂区采暖,从而避免高质低用造成的能量贬值。在

此基础上,多效蒸馏(MED)技术通过将多个蒸馏塔串联,以前效塔顶蒸汽作为后效塔釜热源,大幅降低了新鲜蒸汽消耗;而热泵精馏则通过机械压缩或蒸汽喷射方式,将塔顶低温蒸汽升压升温后回用于塔釜供热,特别适用于塔顶与塔釜温差较小的窄馏分精制过程。对于具备规模优势的大型焦油加工厂,还可进一步考虑利用加热炉烟气或高温工艺物流的余热,通过余热锅炉发电,实现能量的高品位回收,形成“热-电”联产模式,显著提升能源利用效率。

2.3 先进加热与换热设备

设备层面的技术进步是实现节能目标的基础保障。在加热环节,传统燃烧器往往存在燃烧不充分、热效率低、氮氧化物排放高等问题。采用配备分级燃烧、烟气再循环等技术的高效低氮燃烧器,不仅可将加热炉热效率提升3-5个百分点,还能有效抑制NO_x生成,实现节能与减排的双重效益。在换热环节,强化传热技术的应用至关重要。通过在换热器中引入波纹管、翅片管或静态混合器等强化元件,可显著提高传热系数,减小所需换热面积,降低流动阻力,从而在同等换热量的下减少设备投资和泵功消耗。此外,对高温管道、蒸馏塔体及加热炉外壳等部位实施高性能隔热保温,虽属细节措施,却能有效减少散热损失^[4]。采用纳米气凝胶等新型绝热材料,其导热系数远低于传统岩棉或硅酸铝,可在有限空间内实现更优保温效果,是一项投资小、见效快的节能举措。

2.4 智能化与先进过程控制(APC)

随着工业4.0时代的到来,数字化与智能化已成为焦油加工节能减排的新引擎。依托Aspen Plus、PRO/II等流程模拟软件构建的数字孪生模型,可对全厂工艺参数进行动态仿真与在线优化,精准识别能耗瓶颈并推荐最优操作条件。在此基础上部署的先进过程控制系统(APC),特别是基于模型预测控制(MPC)的算法,能够有效应对焦油加工过程中普遍存在的多变量强耦合、大滞后等控制难题,使装置始终稳定运行在设定的最优工况点,避免因人工操作偏差或响应滞后导致的能源浪费。与此同时,覆盖全厂的能源管理系统(EMS)通过实时采集水、电、汽、气等能源介质的消耗数据,实现能效对标、异常预警与绩效考核,为管理层提供科学决策依据,推动节能工作从“经验驱动”向“数据驱动”转变,挖掘系统运行的深层节能潜力。

2.5 清洁生产工艺与资源化技术

节能减排不仅在于“节流”,更在于“开源”与“治本”。在焦油加工领域,开发清洁生产工艺是从源头削减污染的关键。例如,在酚类萃取环节,传统使用的吡啶

等有机溶剂具有高毒性和挥发性,易造成VOCs排放和操作风险。近年来,离子液体、超临界二氧化碳等绿色溶剂因其低挥发性、高选择性和可设计性而受到关注,不仅能提高萃取效率,还可从根本上消除溶剂损耗与环境污染。在废水治理方面,单一处理工艺难以应对焦油废水的复杂性,采用“预处理—生化处理—深度氧化—膜分离”的多级组合工艺已成为主流趋势。通过臭氧催化氧化、Fenton氧化等高级氧化技术破坏断链,再结合反渗透或纳滤膜实现水质深度净化,可使80%以上的处理水回用于循环冷却系统或除盐水制备,大幅减少新鲜水取用量和废水外排量^[5]。此外,改变沥青作为低端燃料的传统定位,通过调制改性或深加工生产针状焦、碳纤维原丝乃至锂电池负极材料,不仅提升了资源价值,也减少了固体废物的环境负担,实现了“变废为宝”的循环经济模式。

2.6 耦合可再生能源与绿电

面向碳中和的长远目标,焦油加工的终极脱碳路径在于与可再生能源深度融合。一方面,随着光伏、风电等绿电成本持续下降及电网绿电比例不断提升,焦油加工厂可逐步将机泵、空压机、控制系统等用电负荷转向绿电供应,直接削减范围二(间接)碳排放。另一方面,在焦油加氢精制或加氢裂化等深度转化工艺中,氢气是关键原料,而目前工业氢气主要来源于化石燃料重整,碳排放强度高。若能采用可再生能源电解水制取的“绿氢”替代灰氢,则可在分子层面实现深度脱碳,尤其适用于生产高端碳材料或特种化学品的高附加值路线。尽管当前绿氢成本仍较高,但随着技术进步与规模化效应显现,其在焦油高端加工领域的应用前景值得期待,将成为未来绿色焦化产业链的重要组成部分。

3 结语

焦油加工过程的节能减排是一项复杂的系统工程,需从工艺、设备、控制、管理等多个层面协同发力。本文综述的高效分离、热集成、先进设备、智能控制、清洁生产和绿能耦合等技术,构成了当前焦油加工业绿色转型的技术矩阵。通过科学规划和系统集成,完全可以在保障产品质量和产能的前提下,实现能耗与排放的大幅削减。展望未来,焦油加工的节能减排技术将朝着以下方向深化发展:一是多技术深度协同集成,单一技术的节能潜力有限,未来将更注重多种技术的耦合与集成,如“热集成+APC+高效填料”的一体化优化,以实现系统能效的最大化;二是数字化与智能化深度融合,依托工业互联网、大数据和人工智能技术,构建具备自感知、自决策、自执行能力的智慧工厂,实现从“节能”到“智优”的跨越;三是全生命周期绿色化,将绿色理念贯穿于产品设计、原料采购、生产制造、物流销售乃至废弃回收的全过程,开展产品碳足迹核算,打造真正意义上的绿色供应链。

参考文献

- [1]付进,孙宝平.煤焦油加工废气的综合治理实践及过程优化控制[J].安徽冶金科技职业学院学报,2024,34(03):33-35.
- [2]张振勇,丁明洁,陈湘,等.高温煤焦油加工行业问题分析及对策研究[J].河南化工,2024,41(02):29-32+36.
- [3]朱从文.煤焦油加工工序VOCs气体资源化利用的探索与实践[J].环境工程,2023,41(S2):294-298.
- [4]谷晓玲.煤焦油加工工艺模拟优化研究[J].山西化工,2022,42(03):93-94+115.
- [5]魏江涛,权亚文,张启科,等.煤焦油加工工艺进展及其应用发展方向[J].石油化工应用,2020,39(03):1-3.