

绿色化学工艺在铁路运输节能减排中的潜力分析

郭亚俊

山西焦化集团有限公司 山西 临汾 041600

摘要:传统铁路系统在牵引动力、材料制造、维护保养及废弃物处理等环节仍存在显著的环境负荷。绿色化学工艺作为一种以原子经济性、环境友好性和资源高效利用为核心原则的新型化学技术体系,为铁路运输全生命周期的节能减排提供了全新的解决路径。本文系统梳理了绿色化学的核心理念及其在铁路领域的适用场景,重点分析其在清洁燃料开发、环保材料替代、绿色润滑与防腐技术、智能监测与催化转化等方面的应用潜力,并结合国内外典型案例进行实证探讨。在此基础上,本文进一步剖析了当前绿色化学工艺在铁路领域推广所面临的技术瓶颈、经济成本、标准缺失与协同机制不足等挑战,并从政策引导、技术研发、产业协同和国际合作四个维度提出系统性对策建议。研究表明,绿色化学工艺不仅能够显著降低铁路运输过程中的碳排放与污染物释放,还能提升系统运行效率与资源循环水平,是推动铁路行业迈向高质量、可持续发展的关键技术支撑。

关键词:绿色化学;铁路运输;节能减排;清洁燃料;环保材料;碳中和

引言

21世纪,全球气候变暖、资源枯竭等问题凸显,推动经济社会绿色低碳转型成国际共识。中国提出“双碳”目标,对各行业减排要求更高。交通运输业是二氧化碳排放主要来源之一,发展高效、清洁、低碳的综合交通体系成国家战略重点。铁路运输能耗低、碳排放强度小,是实现交通领域深度脱碳的关键。近年来,中国高铁网扩张、重载货运能力提升,铁路骨干作用凸显。但铁路绿色化面临挑战:传统内燃机车依赖化石燃料,排放污染物;车辆制造与基建大量使用高碳排材料;运维环节化学品或含毒害成分;废旧部件回收处理难,易造成二次污染^[1]。绿色化学1990年代由美国环保署提出,旨在从源头减少或消除有害物质,其12项原则为工业生态化改造提供指导。将绿色化学理念与技术融入铁路运输全链条,有望实现环境与经济效益双赢。因此,深入分析绿色化学工艺在铁路节能减排中的应用潜力,具有重要理论与现实意义。

1 绿色化学的核心理念及其在铁路领域的适用性

1.1 绿色化学的12项原则简述

绿色化学由Paul Anastas和John Warner提出,其核心在于通过分子层面的设计,使化学产品和过程更安全、更环保。这一体系强调从源头预防污染,而非末端治理。其12项原则构成了一个有机整体:例如,“预防废物优于废物处理”体现了过程设计的前瞻性;“原子经济性最大化”要求反应中尽可能多的原料原子进入最终产品,减少副产物;“设计更安全的化学品”则关注产品在使用和废弃后对人类健康与生态系统的潜在影响;而

“使用可再生原料”和“设计可降解产物”则直接呼应循环经济与碳中和目标。这些原则并非孤立存在,而是相互支撑,共同指向一个高效、清洁、可持续的化学工业未来。

1.2 铁路系统全生命周期的环境负荷分析

铁路系统的环境影响贯穿于规划、建设、运营、维护与报废五个阶段。在建设阶段,轨道、桥梁、隧道等基础设施的施工消耗大量水泥与钢材,其生产过程伴随高能耗与高碳排放;在制造阶段,机车车辆的生产涉及金属冶炼、塑料注塑、表面涂装等多个高污染工序,尤其传统溶剂型涂料释放大量挥发性有机物(VOCs);运营阶段虽以电力牵引为主,但电网若依赖煤电,则间接碳排放仍不容忽视,而内燃机车则直接燃烧柴油,产生CO₂、NO_x、SO₂及颗粒物;维护阶段频繁使用含重金属的防腐剂、含氯溶剂清洗剂以及矿物基润滑油,不仅危害作业人员健康,还可能通过雨水径流污染土壤与水体;最后,在报废阶段,大量复合材料、电子废弃物和动力电池因缺乏有效回收技术而被填埋或焚烧,造成资源浪费与二次污染。由此可见,铁路系统的绿色转型不能仅聚焦于运行能耗,而必须覆盖全生命周期,而绿色化学恰恰为此提供了从分子结构到工艺流程的系统性减污降碳工具。

2 绿色化学工艺在铁路节能减排中的具体应用潜力

2.1 清洁燃料与能源载体的开发

在牵引动力领域,绿色化学为替代传统化石燃料提供了多元路径。以生物基柴油为例,利用废弃食用油、动物脂肪或非粮作物油脂,通过绿色催化酯交换反应可

制得加氢处理植物油（HVO），其分子结构接近石油柴油，但几乎不含硫与芳烃，燃烧时颗粒物与氮氧化物排放显著降低，且全生命周期碳足迹可减少80%以上。瑞典铁路公司SJ已在部分非电气化线路上规模化应用HVO，验证了其技术可行性与环境效益。此外，随着可再生能源成本下降，电转液燃料（e-fuels）——即利用绿电电解水制氢，再与捕获的CO₂合成液体烃类燃料——也成为内燃机车深度脱碳的潜在选项。尽管当前成本较高，但其与现有燃油基础设施兼容性强，具备过渡价值^[2]。更具革命性的是氢能与氨能的应用。绿色氢能通过可再生能源电解水获得，作为燃料电池机车的能源载体，可实现真正的“零排放”运行。日本JR东日本开发的Hybari氢电混合列车已投入试运行，展示了氢能技术在区域铁路中的实用性。而氨作为一种高能量密度、易于液化的无碳燃料，近年来受到广泛关注。绿色化学在高效氨裂解催化剂（如钨基或镍基体系）和低氮氧化物燃烧技术方面的进展，使得氨能在重载货运机车上的应用前景逐渐明朗。尽管氨的毒性和燃烧稳定性仍是挑战，但其无需碳捕集即可实现碳中和的特性，使其成为未来长距离、大功率铁路牵引的重要候选方案。

2.2 环保型材料的替代与创新

在材料制造环节，绿色化学推动了从“高污染、难降解”向“可再生、可循环”的转变。传统铁路车辆大量使用玻璃纤维增强塑料（GFRP）等热固性复合材料，一旦报废难以回收。而基于聚乳酸（PLA）或聚羟基脂肪酸酯（PHA）等生物基聚合物开发的可降解复合材料，不仅原料来源于玉米淀粉或微生物发酵，且在特定条件下可完全生物降解，适用于车厢内饰、座椅外壳等非承力部件。荷兰ProRail已在站台设施中试点竹纤维/PLA复合材料，既减轻重量，又降低环境足迹。与此同时，涂料与胶粘剂的绿色化也取得显著进展。传统溶剂型涂料含有大量苯、甲苯等有毒VOCs，对工人健康和大气环境构成威胁。绿色化学通过开发水性丙烯酸乳液、紫外光固化树脂或以超临界二氧化碳为分散介质的新型体系，大幅削减VOCs排放。德国BASF推出的Acronal®ECO系列水性涂料，VOCs含量低于50g/L，已在多款高速列车上成功应用，不仅满足防火阻燃等性能要求，还显著改善了涂装车间的空气质量，体现了“设计更安全化学品”原则的实际价值。

2.3 绿色润滑与防腐技术

铁路系统的高效运行离不开润滑与防腐，而传统矿物油基润滑剂和含铬防腐涂层往往具有高生态毒性与难降解性。绿色化学为此提供了更可持续的替代方案。以

植物油为基础油，辅以离子液体或纳米二硫化钼等绿色添加剂，可制备出兼具高润滑性、抗氧化性与生物降解性的生物基润滑脂。这类产品在自然环境中数周内即可被微生物分解，且对水生生物毒性极低。法国国家铁路公司SNCF已在部分支线铁路轮轨系统中试用此类润滑剂，结果显示设备磨损率下降，维护周期延长，综合运维成本反而有所降低。在防腐领域，自修复智能涂层代表了绿色化学与材料科学的前沿融合^[3]。这类涂层内部嵌入微胶囊或可逆共价键网络，当表面因刮擦或腐蚀出现微裂纹时，修复剂自动释放并发生聚合反应，重新封闭破损区域，从而延缓基材腐蚀进程。这种“主动防护”机制不仅减少了防腐涂层的重复涂覆频次，也避免了含重金属缓蚀剂的长期释放，从源头上降低了环境风险。目前，该技术已在桥梁钢结构防护中开展小规模试验，未来有望拓展至机车车体与轨道扣件等关键部位。

2.4 催化转化与智能监测技术

对于短期内无法完全淘汰的内燃机车，绿色化学在尾气后处理方面同样发挥重要作用。传统选择性催化还原（SCR）系统在低温工况下效率骤降，难以适应铁路启停频繁的特点。而基于铈-钨-钛氧化物（Ce-W/TiO₂）等新型低温催化剂的研发，可在150°C左右高效还原氮氧化物，显著提升减排效果。同时，结合分子筛吸附技术，还可回收未完全燃烧的碳氢化合物，实现资源化利用。此外，绿色分析化学的发展为铁路运维中的污染防控提供了实时、精准的手段。通过将荧光探针、电化学传感器与物联网技术结合，可构建分布式监测网络，对机务段废水中的铜、锌等重金属离子，或维修车间空气中的苯系物浓度进行连续在线检测。一旦浓度超标，系统自动预警并联动处理装置，避免污染物扩散。这种“实时分析防止污染”的策略，正是绿色化学第11项原则的生动体现，有助于将环境风险控制萌芽状态。

3 典型案例分析

德国铁路货运公司DBCargo推行的“绿色机车”计划颇具代表性。该公司联合化工企业Clariant，为其BR232型内燃机车加装基于钒钛系催化剂的尾气净化系统，并同步改用HVO生物柴油。经第三方机构实测，改造后单车年均NO_x排放减少85%，颗粒物下降90%，二氧化碳减排量超过1200吨。这一案例表明，绿色化学技术与既有装备的兼容性良好，可在不更换整车的前提下实现显著环境效益。

在中国，“复兴号”动车组的制造过程也深度融入了绿色化学理念。中车青岛四方公司在CR400AF车型中大规模采用水性涂料替代传统溶剂型产品，单列车VOCs

排放减少近2吨；同时，电缆护套采用无卤阻燃材料，避免火灾时释放二噁英等剧毒物质；车体结构中再生铝材使用比例达到30%，不仅降低原材料开采压力，还使制造环节能耗减少约40%^[4]。这些举措系统性地践行了绿色化学的多项原则，彰显了中国制造向绿色高端转型的决心。

日本JR Central则着眼于未来能源体系，在中央新干线建设中前瞻性布局氢能基础设施。公司与丰田合作开发基于固体氧化物燃料电池（SOFC）的辅助电源系统，用于隧道应急照明与信号设备供电，替代传统的柴油发电机。该系统以氢或氨为燃料，发电效率高、噪音低、无碳排放，体现了绿色化学在能源载体与电化学转换技术交叉领域的创新潜力。

4 面临的挑战与对策建议

4.1 主要挑战

尽管前景广阔，绿色化学工艺在铁路领域的推广应用仍面临多重障碍。首先，部分关键技术尚处实验室或中试阶段，如高性能生物润滑剂在极端温度下的稳定性、氨燃料发动机的爆震控制等，其工程可靠性与耐久性有待长期验证。其次，绿色产品的初始成本普遍高于传统方案，例如HVO价格约为普通柴油的1.5–2倍，水性涂料施工工艺更复杂，导致铁路企业在投资决策时顾虑重重。再次，行业标准体系严重滞后，缺乏针对铁路专用绿色化学品的认证规范、测试方法与准入门槛，使得优质产品难以获得市场认可。最后，跨学科协同不足，化学、材料、轨道交通等领域的科研机构与企业之间信息壁垒明显，产学研用链条断裂，制约了技术成果的快速转化。

4.2 对策建议

为破解上述困境，需采取系统性举措。在政策层面，应将符合绿色化学原则的产品纳入《绿色铁路装备推荐目录》，并通过增值税减免、绿色信贷贴息等方式降低企业采纳成本；同时设立铁路绿色技术创新专项资金，

重点支持中试平台建设示范工程建设。在技术层面，应聚焦“卡脖子”环节，如低成本生物催化剂、高韧性可降解复合材料、高效氨燃烧器等，组织跨学科联合攻关，并依托国家重点实验室推动基础研究向应用转化。在标准建设方面，应联合国际铁路联盟（UIC）、ISO等组织，加快制定《铁路用绿色化学品环境性能评价指南》，建立涵盖原料来源、生产过程、使用安全与废弃处置的全生命周期评估体系。在产业生态层面，应鼓励成立“铁路-化工-材料”产业创新联盟，搭建技术供需对接平台，并探索“以旧换绿”商业模式，将废旧部件回收所得用于抵扣绿色材料采购费用，形成闭环激励机制。

5 结语

绿色化学工艺为铁路运输实现深度节能减排提供了从分子设计到系统集成的全链条解决方案。通过清洁燃料替代、环保材料应用、绿色运维技术革新与智能监测手段，不仅可显著降低碳排放与污染物释放，还能提升资源利用效率与系统韧性。尽管当前面临技术、经济与制度等多重障碍，但在“双碳”战略驱动与科技创新加速的背景下，绿色化学与铁路行业的深度融合将成为必然趋势。未来应加强顶层设计、突破关键技术、完善标准体系、促进跨界协同，系统释放绿色化学在构建可持续铁路运输体系中的巨大潜力，为中国乃至全球交通绿色转型贡献化学智慧。

参考文献

- [1]中国国家铁路集团有限公司.铁路“十四五”发展规划[Z].2021.
- [2]刘堃.基于铁路运输节能技术应用[J].机械管理开发,2016,31(01):74-76.
- [3]李志强,王磊.绿色化学在交通运输领域的应用前景[J].化工进展,2023,42(5):2301-2310.
- [4]中车青岛四方机车车辆股份有限公司.复兴号动车组绿色制造技术白皮书[R].2022.