

基于“双碳”背景下的聚丙烯产业链绿色发展路径展望

董永健 (山东裕龙石化有限公司, 山东 烟台 265700)

摘要: 在“双碳”目标驱动下, 聚丙烯产业面临深刻的绿色转型压力。本文从产业链全生命周期视角出发, 系统阐释聚丙烯绿色发展的核心内涵与路径逻辑。在此基础上, 深入剖析原料多元化、化学回收闭环利用、高端专用料国产替代三大核心优势, 研判全生命周期碳足迹管理、低碳催化与过程强化、绿氢规模化耦合三大发展趋势, 旨在为聚丙烯产业实现低碳转型、提升国际竞争力提供系统性路径参考。

关键词: 双碳目标; 聚丙烯; 绿色发展; 路径展望

中图分类号: F426

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 005-0004-03

Prospects for the green development path of the polypropylene industry chain under the “dual carbon” background

Dong Yongjian (Shandong Yulong Petrochemical Co., Ltd., Yantai Shandong 265700, China)

Abstract: The polypropylene industry is under immense pressure to go green driven by the ‘dual carbon’ strategy. In this work, a comprehensive explanation is given for the underlying principles for and methods of implementing green development for polypropylene industries over a lifecycle approach. Based on this background analysis, the current study intends to critically examine the following three significant benefits of a green development approach for polypropylene industries: utilization of varied sources of raw material, chemical cycling for the utilization of polypropylene waste as raw material, and development of indigenous substitutes for specialty polypropylene. Of the four trends emerging for polypropylene industries, this study aims to critically examine the following three: carbon footprint management for polypropylene industries over the lifecycle.

Keywords: Dual Carbon Goals; Polypropylene; Green Development; Pathway Prospects

聚丙烯作为全球产量最大的通用塑料之一, 广泛应用于包装、汽车、家电、医疗等领域, 2024年我国年产能已突破4200万t, 约占全球产能的35%。然而, 传统聚丙烯生产高度依赖化石原料, 吨产品碳排放约1.5~2.0tCO₂当量, 叠加废弃物处置不当导致的白色污染问题, 使产业面临碳排放与环境治理的双重压力。在“双碳”目标硬约束与欧盟碳边境调节机制外部压力下, 聚丙烯产业亟需突破线性增长惯性, 构建全生命周期减碳与资源循环的绿色发展新范式。鉴于此, 本文系统梳理聚丙烯产业链绿色发展的内涵逻辑、核心优势与演进趋势, 以期为行业低碳转型提供路径参考。

1 聚丙烯产业链绿色发展的内涵

聚丙烯产业链绿色发展并非单一环节的减排改造, 而是以全生命周期减碳、资源高效循环、产品高值化转型为核心的系统性变革。全生命周期减碳要求从原料获取、聚合生产、加工应用到废弃处置的全链条实施碳排放精准核算与持续削减, 企业不仅需要关注自身生产环节的直接排放, 还需将上游原料供应与下游产品使用纳入碳管理视野。资源高效循环强调打破传统开采—生产—废弃的线性模式, 通过化学回收等技术实现废塑料向原料的再生转化^[1]。产品高值化转型聚焦以高端专用料替代通用料, 用更少的资源创

造更高的价值。

2 聚丙烯产业链绿色发展的核心优势

2.1 原料路径多元化降低化石依赖

传统聚丙烯生产主要依赖石脑油蒸汽裂解和煤制烯烃两条路线, 前者碳排放约1.8~2.0t CO₂/t 丙烯, 后者高达3.5~4.0t CO₂/t 丙烯。丙烷脱氢工艺在生产丙烯的同时副产高纯度氢气, 每吨丙烯约副产35~40kg, 纯度可达99.9%以上。PDH路线吨丙烯碳排放约1.2~1.4tCO₂当量, 较石脑油裂解路线降低20%~25%, 若耦合绿氢替代燃料气供热, 减碳潜力可提升至35%以上。目前国内PDH产能已超过2000万t/a, 卫星化学、东华能源、万华化学等企业均有大规模布局。生物基丙烯技术同样取得进展, 巴西Braskem公司已实现10万t/a规模中试验证, 产品碳足迹仅为化石路线的30%~40%^[2]。当前生物基路线成本较高, 但随着碳成本显性化, 其竞争力有望在中长期显现。

2.2 化学回收技术实现废塑料闭环利用

物理回收虽然技术成熟、成本较低, 但对废塑料洁净度和成分纯度要求较高, 回收产品性能往往逐级降解, 难以实现真正意义上的闭环循环。化学回收通过热解、催化裂解、溶剂萃取等工艺将废聚丙烯降解为单体或低分子烃类, 再重新聚合为新料, 从而突破

物理回收的固有局限。目前，热解技术发展最为成熟。废聚丙烯在 450~550 °C 无氧环境下裂解为热解油，液体收率可达 70%~80%。以巴斯夫 ChemCycling 项目为例，热解油经蒸汽裂解装置处理后可生产与原料品质一致的聚丙烯，产品已获 ISCC PLUS 质量平衡认证，成功实现“废塑料—热解油—烯烃—聚丙烯”的全闭环循环。

国内方面，中石化、金发科技等企业也在积极布局化学回收产线，部分项目已进入中试阶段。从碳足迹视角分析，根据欧洲塑料制造商协会（Plastics Europe）发布的生命周期评价数据，化学回收聚丙烯相较于原生聚丙烯可降低 30%~50% 的全生命周期碳排放，同时减少对化石原料的直接消耗。化学回收本身也存在能耗较高的问题，其环境效益的充分发挥有赖于工艺优化与清洁能源的耦合应用。

2.3 高端专用料替代进口拓展价值空间

在通用料产能过剩背景下，高端专用料成为产业价值提升的重要方向。茂金属聚丙烯分子量分布窄、立构规整度高、力学性能优异，国内年需求量约 25~30 万 t，进口依赖度超 80%，吨价较通用料高 3000~5000 元。汽车轻量化趋势推动改性聚丙烯在保险杠、仪表板等部件的应用，单车用量已达 40~50kg，预计 2030 年突破 60 kg，高性能长玻纤增强聚丙烯吨价可达 1.5~2.0 万元，为国内企业提供进口替代与价值提升的双重机遇。

3 聚丙烯产业链绿色发展趋势

3.1 全生命周期碳足迹管理体系加速构建

碳足迹管理正从企业自愿行为向行业强制规范快速演进。国内方面，生态环境部已将石化行业纳入全国碳排放权交易市场扩容计划，预计 2026—2027 年间聚丙烯生产企业将被正式纳入履约范围，中国石油和化学工业联合会正牵头制定《聚丙烯产品碳足迹核算方法》团体标准，核算边界涵盖原料获取、聚合生产、运输仓储、加工应用、废弃处置全流程^[4]。国际层面，欧盟碳边境调节机制已于 2026 年进入实质征收阶段，出口企业须提供符合 ISO 14067、欧盟产品环境足迹（PEF）等国际标准的碳数据报告。

3.2 低碳催化与过程强化技术深度融合

催化剂技术革新是聚丙烯生产降本增效的核心抓手，新一代 Ziegler-Natta 催化剂活性已突破 80 kg PP/g Cat，较十年前提升约 50%，助剂用量降低 30% 以上。茂金属催化剂领域，国内中石化北京化工研究院开发的 BCM 系列已实现工业化应用，产品等规度达 98% 以上。过程强化技术与催化剂革新的协同效应将进一步显现，环管反应器与气相反应器串联工艺配合先进

控制系统可将聚合转化率提升至 99% 以上，吨产品综合能耗降至 350 kgce 以下，数字孪生技术使聚合装置具备实时仿真与预测优化能力，高效催化剂 + 智能化控制的组合将成为未来聚丙烯装置的标准配置。

3.3 绿氢与可再生能源规模化耦合应用

能源结构变革是聚丙烯产业深度脱碳的根本出路，短期内 PDH 装置副产氢经变压吸附提纯后纯度可达 99.99%，可直接并入氢气管网^[5]。国内多个石化园区已启动灰氢—蓝氢—绿氢渐进式转型规划，如宁波石化区计划 2030 年前绿氢占比达 30%。绿电替代同样重要，以 60 万 t/a 聚丙烯装置为例，高耗能单元年用电量约 1.2~1.5 亿 kWh，全部采用绿电可削减范围二碳排放约 7~9 万 t/a。

从长远看，二氧化碳加氢制甲醇再经甲醇制烯烃路线正处于工业示范阶段，其核心意义在于将碳排放转化为碳原料。目前制约因素主要是绿氢成本及 CO₂ 捕集技术的经济性，一旦突破，聚丙烯产业将实现从化石碳向循环碳的跨越。

4 聚丙烯产业链绿色发展未来前景展望

4.1 化学回收产业化进程加速落地

化学回收正处于从技术验证向规模化产业应用的关键跨越期，预计到 2030 年将在技术成熟度、产业生态与经济性三个层面实现突破。技术层面，热解油收率有望从目前的 70%~80% 提升至 85% 以上，催化裂解技术通过引入择形分子筛等新型催化剂可将丙烯选择性提升至 90% 以上，食品级再生聚丙烯的质量认证体系也将逐步完善。

产业生态层面，废塑料分类回收网络将与化学回收装置形成协同布局，头部企业将牵头构建回收—再生—应用闭环产业链，预计 2030 年国内化学回收聚丙烯产能突破 100 万 t/a。经济性方面，随着单套装置规模从千吨级向十万吨级跨越叠加碳税政策趋严，化学回收聚丙烯有望在 2028 年前后实现与原生料的成本平价^[6]。

4.2 高端专用料国产替代实现关键突破

高端专用料国产化是提升我国聚丙烯产业国际竞争力的必由之路，预计到 2030 年进口依赖度有望从当前 60% 以上降至 30% 以下。茂金属聚丙烯领域将取得实质性进展，国产催化剂技术攻关正加速推进，中石化、中石油等央企及部分民营企业均有布局，预计 2027 年前后弹性体级、高透明级 mPP 将实现万吨级稳定生产，产品性能接近进口水平，市场价格有望回落至更合理区间，从而拓展其在卫生用品、软包装等领域的应用规模。医用级聚丙烯领域同样孕育突破机遇，通过原料深度提纯、洁净车间管控升级及生产

精细化管理,国内企业正逐步攻克低溶出、低热原等技术难关,预计2028年前形成5~8万t/a的供应能力。电子级聚丙烯国产化进程也将稳步推进,电容膜用双向拉伸聚丙烯薄膜(厚度 $<3\ \mu\text{m}$)是新能源汽车、光伏储能的关键材料,随着超薄膜拉伸工艺和原料纯度控制技术的积累,预计2030年国产化率突破70%,为相关产业链安全提供重要保障。

4.3 碳足迹标准与绿色认证体系国际化输出

在碳足迹管理日益成为国际贸易门槛的背景下,我国聚丙烯产业需在标准制定与认证话语权方面抢占先机。国内标准体系将加速完善,预计2027年前发布聚丙烯产品碳足迹国家标准,建成覆盖主要生产工艺的行业背景数据库;聚丙烯产品碳标签制度有望于2028年前建立,届时消费者和下游企业可清晰了解不同产品的碳足迹差异。

国际互认进程将同步推进,我国将积极参与ISO 14067、欧盟PEF等国际标准修订工作,通过双边或多边谈判争取核算结果互认,预计2029年前后形成互认协议框架,支撑出口产品有效应对碳边境调节机制的合规要求。此外,低碳聚丙烯、再生聚丙烯的第三方认证标签将逐步推广,预计2030年获得国际认证的国产聚丙烯产品占比突破30%,显著增强中国聚丙烯在全球市场的绿色竞争力。

4.4 跨行业协同应用场景多元拓展

聚丙烯的绿色发展不仅体现在自身产业链低碳转型,更将通过跨行业协同为下游应用领域的绿色化提供支撑。新能源汽车领域协同效应最为显著,改性聚丙烯凭借密度低、成型性好、成本适中等优势正成为替代金属材料的首选,预计到2030年单车聚丙烯用量从当前40~50 kg提升至80~100 kg,应用部位从保险杠、内饰件向电池壳体、结构件拓展,长玻纤增强聚丙烯、微发泡聚丙烯等高性能品种将助力整车实现10%~15%的减重目标。

绿色包装领域变革同样深刻,在“禁塑令”与生产者责任延伸制度推动下,单一材质包装正取代多层复合材料以提升回收效率,预计2030年单一材质聚丙烯包装市场份额突破40%,配合数字水印等追溯技术构建易回收、可追溯的包装循环体系。医疗健康领域的需求增长则为高端聚丙烯提供了稳定的增量空间,高端医用无纺布、高阻隔包装膜、透明注射器等产品需求将保持年均8%~10%增速,预计2030年市场规模突破50万t,有力带动产业向高端化方向升级。

4.5 零碳能源深度融合重塑产业能源结构

展望更长远的未来,零碳能源与聚丙烯产业的深度融合将推动能源结构发生根本性变革。绿氢应用将

进入规模化阶段,预计到2030年主要石化园区绿氢占比达20%~30%,2035年突破50%,届时聚丙烯生产所需氢气将从灰氢主导向绿氢主导转变,PDH装置副产氢与电解水制绿氢协同发展,将形成更加灵活清洁的氢气供应体系。

绿电替代将趋近全覆盖,随着可再生能源装机规模扩大及电网消纳能力提升,预计2030年头部企业绿电比例突破50%,2035年实现聚合单元用电全绑定替代,届时范围二碳排放将趋近于零。更具革命性意义的是碳捕集利用技术的突破,二氧化碳加氢制甲醇、甲醇制烯烃技术预计2028—2030年实现经济性突破,届时聚丙烯生产将不再单纯消耗化石碳,而是将大气或工业排放中的二氧化碳转化为产品原料,这一变革将从根本上重塑产业能源与原料结构,助力行业在2060年前实现碳中和目标。

5 结语

综上所述,聚丙烯产业链绿色发展正处于从理念共识向实践落地的关键转型期。原料多元化、化学回收闭环利用、高端专用料国产替代构成了当前产业绿色转型的核心优势。全生命周期碳足迹管理、低碳催化与过程强化、绿氢规模化耦合标定了中期演进方向。化学回收产业化、碳足迹标准国际化、零碳能源深度融合则勾勒出远期前景图景。未来,聚丙烯产业应以“双碳”目标为牵引,加快构建原料低碳化—生产清洁化—产品高端化—废弃物资源化四位一体绿色发展体系,将绿色发展理念深度嵌入产业链各环节,实现减碳与增值的协调统一。

参考文献:

- [1] 周韦慧. 中国聚烯烃工业的现状和发展 [J]. 中国塑料, 2002, 16(10): 4-4.
- [2] 李登海, 刘韶泽, 李爱平, 等. 聚丙烯薄膜改性研究进展 [J]. 化工新型材料, 2017, 45(1): 3-3.
- [3] 赵泽熙, 李汉初, 冯金良, 等. 电工膜专用聚丙烯树脂的研究与应用进展 [J]. 塑料科技, 2025, 53(11): 189-194.
- [4] 霍国良. 高端聚丙烯专用料开发: 市场驱动、关键技术及产业化路径研究 [J]. 广州化工, 2025, 53(19): 28-30.
- [5] 邓建辉, 叶嘉辉. 生物基聚丙烯的应用进展 [J]. 石油石化绿色低碳, 2025, 10(04): 56-63.
- [6] 傅和青, 黄洪, 张心亚, 等. 聚丙烯阻燃剂及其发展趋势 [J]. 合成树脂及塑料, 2004, 21(3): 4-4.

作者简介:

董永健(1988-), 男, 汉族, 山东省泰安市人, 大专, 研究聚丙烯生产方向。