

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.09.026

中国聚烯烃高端化转型的技术路径与产业进展

黄家旭

(山东裕龙石化有限公司, 山东烟台 265715)

摘要: 本文介绍了国内聚烯烃供需格局与各类高端聚烯烃国产化现状,简述了新兴产业需求、行业盈利压力、双碳约束形成的转型驱动,回顾了现有研究仅聚焦单一技术、缺乏全链条系统梳理的不足,分析了催化剂、聚合工艺、应用研发三大环节的技术短板,梳理了智能制造在聚合调控、新品开发、质量管控中的应用,剖析了改性、精密薄膜、以塑代钢/木深加工技术进展,总结了产业同质化过剩、核心技术依赖、原料成本高、绿色壁垒突出等发展难题。分析表明,供需结构性失衡是高端化转型根本动因,单活性中心催化剂与成套工艺短板是主要制约,智能制造、深加工分别从生产、价值链层面支撑升级。得出聚烯烃高端化是多维度系统工程,指出产业需推进智能生产、拓展材料替代市场、完善深加工体系、布局循环经济、搭建政产学研用协同创新链条。

关键词: 聚烯烃; 高端化转型; 催化剂; 智能制造; 深加工; 产业升级

中图分类号: TQ325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)09-0230-11

Technological pathways and industrial advances in the high-end transformation of china's polyolefin industry

HUANG Jiaxu

(Shandong Yulong Petrochemical Co., Ltd., Yantai 265715, China)

Abstract: This paper introduces the supply-demand pattern of China's polyolefin industry and the localization status of various high-end polyolefin products, briefly illustrates the transformation driving forces brought by market demand from emerging industries, sustained profit pressure and dual carbon constraints, and reviews the defects of existing studies that mostly concentrate on single technical fields without systematic full-industry-chain review. It analyzes technical bottlenecks in three key segments: catalysts, polymerization processes and application research, sorts out the practical applications of intelligent manufacturing in polymerization regulation, new product development and full-process quality control, dissects the progress of deep processing technologies including material modification, precision film manufacturing, and metal or wood substitution with polyolefins, and summarizes industrial challenges such as homogeneous overcapacity, dependence on imported core technologies, high raw material costs and prominent green trade barriers. The analysis demonstrates that structural supply-demand imbalance serves as the fundamental driver of high-end transformation, while deficiencies in single-site catalysts and complete polymerization processes are major restrictive factors. Intelligent manufacturing and deep processing facilitate industrial upgrading from production operation and value chain extension respectively. It concludes that the high-end transformation of polyolefin industry is a multi-dimensional systematic project, and points out that the industry should promote intelligent production, expand application markets of material substitution, improve supporting deep processing systems, develop circular economy and build a collaborative innovation chain covering government, enterprises, universities, research institutes and end consumers.

Keywords: polyolefin ; high-end transformation ; catalysts ; intelligent manufacturing ; deep processing ; industrial upgrading

聚烯烃是产量最大、应用最广的高分子材料,主要包括聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)两大品类,广泛应用于包装、农业、汽车、电子电气、新能源等领域,其产业发展水平是衡量国家

石油化工综合竞争力的核心标志之一^[1]。进入21世纪以来,全球聚烯烃产业形成了清晰的分工格局:北美凭借页岩气革命的乙烷原料优势主导大宗通用料市场,中东依托低成本油

通信作者: 黄家旭,助理工程师,主要研究方向为聚烯烃产品与聚合工艺研发

收稿日期: 2026-06-06

引用格式: 黄家旭. 中国聚烯烃高端化转型的技术路径与产业进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(9): 230-240.

HUANG Jiaxu. Technological pathways and industrial advances in the high-end transformation of china's polyolefin industry[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(9): 230-240.

气资源保持通用料出口优势,西欧与日韩则通过技术壁垒垄断着高端专用料与特种聚烯烃的高附加值份额^[2-5]。

近年来,随着民营炼化一体化项目的密集投产,我国聚烯烃产能实现跨越式增长。截至2025年底,我国聚烯烃产能达到8 809.5万吨/年,同比增长12.9%,其中PE总产能3905万吨/年,同比增长13.8%;PP总产能4 904.5万吨/年,同比增长12.3%^[6]。然而,产业“大而不强”的结构性矛盾也日益凸显:通用级拉丝PP、注塑PP、薄膜级LLDPE等大宗品类的产能利用率仅为73%~78%,同质化竞争下产业加工利润长期被压缩至盈亏平衡点附近。此外,茂金属聚乙烯(mPE)、聚烯烃弹性体(POE)、特种共聚聚丙烯等高附加值产品仍大量依赖进口,部分特种牌号自给率低于20%,成为高端制造领域的“卡脖子”材料^[7]。随着我国“双碳”目标的提出,对能源密集型石化产业碳排放的约束进一步收紧^[8]。与此同时,新能源、汽车轻量化等领域的新需求也对聚烯烃材料的高性能化提出了更高要求^[9-11]。在此背景下,实现我国聚烯烃产业领域的高端化转型已成为生存与发展的必由之路。

围绕我国聚烯烃产业的结构性困境与转型路径,大量学者从多个维度开展了研究。历伟等^[12]指出我国聚烯烃产业高附加值专用料发展的症结在于基础研究薄弱与中试平台缺失。张晓帆等^[13]系统梳理了茂金属聚烯烃催化剂的国内外研发进展,指出单活性中心催化剂是制约高端化的核心问题;王文川^[14]聚焦聚烯烃生产的质量控制场景,针对丙烯聚合过程熔融指数难以实时检测的痛点,构建了多种智能算法优化的软测量预报模型,验证了人工智能方法在聚合过程关键参数精准管控中的应用价值;柯晓明等^[15]总结了我国聚烯烃行业供需形势的结构性变化,并提出未来发展模式的资本化、差异化和服务化变革方向。然而,现有研究多聚焦单一技术环节或特定应用方向,未充分考虑高端聚烯烃国产化的技术路径与产业进展之间的系统性关联,这在一定程度上限制了研究对技术布局与产业政策制定的参考价值。

基于此,本文结合最新产业数据与研究成果,从产业格局、核心技术瓶颈、智能制造赋能、深加工与应用拓展四个维度,对我国聚烯烃高端化转型的技术路径与产业进展进行系统综述,总结当前面临的核心挑战并展望未来发展方向,以期产业技术升级提供参考。

1 中国聚烯烃产业结构性现状与高端化需求

1.1 产业规模与供需格局

中国是全球最大的聚烯烃生产国和消费国,多年来产能高速增长。自2019年以来,恒力石化、浙江石化、盛虹石化等民营企业大型项目相继投产,产能持续释放,使我国聚烯烃产能快速进入扩张周期。2020—2025年间,国内聚烯烃累计新增产能3 030万吨,其中聚乙烯新增1 380万吨、聚丙烯新增1 650万吨,年均新增产能606万吨^[16],是此前十年年均新增量(约280万吨)的2.6倍^[1]。2025年,我国聚烯烃总产能突破9 000万吨,其中,聚乙烯产能达4 114万吨/年,同比增

长15.2%;聚丙烯产能达4916万吨/年,同比增长10.2%^[17]。相较之下,尽管聚乙烯产能同样快速增长,但由于原料成本偏高、高压及溶液聚合技术等前期积累不足,进口依赖度仍然较高^[18]。

此外,产能的快速扩张并未带动行业盈利能力同步提升。中国通用级拉丝PP、注塑PP、薄膜级LLDPE等大宗聚烯烃品类的产能利用率仅为73%~78%,产能过剩特征显著。从长期运行趋势看,中国聚乙烯装置2025年月均开工率仅78.3%,聚丙烯装置2025年月均开工率仅78.6%,较2020年均下降10%左右^[19]。受同质化竞争影响,行业加工利润持续收窄,长期徘徊于盈亏平衡点附近,受多重利空因素影响,聚丙烯行业在2025年遭遇周期性低谷,企业盈利普遍承压^[20]。

进出口结构特征是产业结构性矛盾的直接体现。2025年我国聚乙烯进口量为1 340.68万吨,聚丙烯进口量为211.90万吨,进口货源高度集中于mPE、医用共聚聚丙烯、锂电隔膜专用PP、高抗冲汽车改性料等高端专用牌号,产业呈现低端过剩、高端供给不足的结构性格局^[21]。当前聚烯烃进口规模仍维持高位,其核心驱动因素并非国内总量供给不足,而是国产料在产品性能稳定性、专用化程度与批次一致性上,难以完全满足高端制造领域的差异化需求^[22]。同期我国聚烯烃出口规模相对国内产能与消费量仍处于较低水平,出口产品以通用级产品为主,市场集中于东南亚等价格敏感度较高的区域;高端产品进入欧美市场时,普遍面临REACH、FDA等严苛的技术标准与市场准入认证壁垒^[23]。这种“高端进口依赖、低端出口竞争”的贸易格局,是行业结构性过剩特征的直接反映。

1.2 高端聚烯烃核心品类的国产化现状

高端聚烯烃通常指具有高技术含量、高应用性能和高市场价值的聚烯烃产品,主要包括两类:一是在大宗品种基础上的高端牌号,如mPE、茂金属聚丙烯(mPP)、高碳 α -烯烃共聚聚乙烯等;二是特种聚烯烃树脂,如POE、乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)、超高分子量聚乙烯(UHMWPE)、乙烯-乙烯醇共聚树脂(EVOH)等^[24]。

mPE是目前国产化进展相对较快的高端品种。mPE是以茂金属催化剂合成的聚乙烯树脂,分子量分布窄、性能可控,广泛用于高端包装膜、管材等领域。我国mPE的工业化生产始于2011年,齐鲁石化采用北京化工研究院开发的茂金属催化剂,在密度聚乙烯装置上成功实现工业化生产;此后,大庆石化、独山子石化、扬子石化等企业也陆续引进或自主开发了mPE生产能力^[25]。2025年国内高端聚乙烯产能加速布局,茂金属聚乙烯(mPE)产能预计突破150万吨/年。近年来自给率虽有所提升,但高端薄膜级、管材级牌号仍主要依赖进口,mPE进口量仍达270万吨左右,占国内表观消费量的90%以上^[26]。

mPP的国产化进程显著滞后于mPE。与传统聚丙烯相比,mPP具有分子链立体规整度更高、光学透明性更优、低分子挥发分与可析出物含量更低等性能优势,广泛应用于高端

纺丝、医用耗材、食品接触包装等领域^[27]。从全球供给格局来看,mPP产业化生产主体远数量少于mPE,我国尚未实现mPP的大规模工业化量产,2024年国产mPP在全球总供应量中的占比为2.11%^[24]。值得注意的是,中国石化北京化工研究院近期已自主研发出mPP专用合成催化剂,并完成多套工业装置的应用验证,为我国mPP的国产化替代提供了核心技术支撑^[28]。

POE是由乙烯与1-丁烯、1-己烯、1-辛烯等 α -烯烃经茂金属催化剂配位聚合制备的共聚物弹性材料,也是当前我国进口依存度最高、国产化需求最为突出的高端聚烯烃品种之一^[29]。POE兼具橡胶的高弹性与塑料的热塑性,综合物理性能优异,在汽车零部件、电线电缆、光伏封装胶膜、密封件及热熔胶等领域应用广泛^[30-32]。受光伏封装、新能源汽车等下游产业快速发展驱动,国内POE市场需求持续增长,进口规模从2017年的22.44万吨增至2025年的72.65万吨,对外依存度由2024年的95%大幅下降至76.31%^[33]。当前全球POE产能呈现高度寡头垄断格局,核心生产技术与产能主要掌握在陶氏化学、埃克森美孚、LG化学等少数国际企业手中。我国POE产业化起步较晚,已建成产能主要布局于东部沿海化工产业发达省份。

UHMWPE具备优异的耐磨性能与耐冲击性能,被广泛应用于高性能纤维、锂电池隔膜、军工防护等领域^[34]。相较于POE、茂金属聚烯烃等其他高端聚烯烃品类,其中低端产品国产化基础更好。截至2025年,国内UHMWPE产能已达73.11万吨,年内新增32.7万吨,增速高达81%。目前,高端UHMWPE产品依赖进口的局面仍在延续。2016至2025年,中国UHMWPE进口量呈递增态势,年均复合增长率为27%^[35]。新能源汽车销售量猛增,锂电池隔膜料虽小部分被国产料替代,但大部分市场依旧由塞拉尼斯、大韩油化等国外企业占据^[36]。

EVA的国产化进程相对成熟,截至2025年12月底,全国EVA总产能达380万吨/年,较2024年的280万吨/年增长35.7%。全年实际产量266.6万吨,同比增长25.9%,产能与产量的同步增长既反映了行业对下游需求的积极响应,也凸显了国内企业在生产技术与产能布局上的持续突破^[37]。但EVOH、聚丁烯-1(PB-1)等细分品类的国内产业化程度较低,整体仍处于中试或工业化初期阶段。

从产业整体来看,我国高端聚烯烃整体自给率仍处于较低水平,多数核心品类的关键制备技术仍处于攻关突破阶段,进口替代潜力显著^[38]。

1.3 高端化转型的驱动力

我国聚烯烃产业向高端化方向演进,并非单一因素驱动的结果,而是下游需求牵引、产业盈利倒逼与政策制度支撑三重机制共同作用的产物。

从需求端看,战略性新兴产业升级形成了高端聚烯烃的刚性市场拉动。光伏产业是高端聚烯烃需求增长的核心引擎,随着国内光伏装机量的持续提升与N型电池技术的迭代

渗透,POE、光伏级EVA作为光伏封装胶膜的核心原料,市场规模呈现高速增长态势^[9]。其中POE材料因具备更优的抗电位诱导衰减性能与水汽阻隔能力,在高功率双面组件中的应用占比快速提升,成为增长弹性最大的聚烯烃细分品种。在汽车产业领域,新能源汽车轻量化、低挥发性有机化合物(VOC)、高安全的发展方向,带动了改性聚丙烯材料的差异化需求,长玻纤增强PP、低气味内饰专用料、电池包阻燃专用料等产品的市场空间持续扩容^[39]。此外,电子信息与医疗健康领域的准入标准升级,也推动了高洁净、高合规性特种聚烯烃材料的应用渗透^[40]。

从供给端看,行业盈利收窄与环境约束形成了高端化转型的内生倒逼机制。一方面,通用级聚烯烃产能持续扩张导致供需失衡,行业盈利水平长期处于低位,据统计,2023年国内聚烯烃行业平均销售利润率不足4%,而高端专用料的销售毛利率可达25%以上,产品附加值的显著差距驱动企业通过产品结构升级获取盈利空间^[41-42]。另一方面,“双碳”目标下石化行业面临严格的碳排放总量与强度约束,传统通用料生产的高能耗、高排放模式可持续性下降,企业通过高端化技术升级实现能效提升与产品增值,是应对环境约束的重要途径^[43]。

从制度端看,国家产业政策为高端化转型明确了技术方向与发展路径。《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》将高端聚烯烃列为关键新材料补短板的重点领域,提出围绕新能源、高端装备等战略性新兴产业需求加快高端聚烯烃产品开发与产业化,并支持创建高端聚烯烃领域创新中心,为行业产品结构升级提供了明确的政策指引^[44]。在政策导向与市场效益的双重作用下,国内石化龙头企业加速高端聚烯烃的研发布局,中国石油、中国石化、万华化学等企业在茂金属催化剂、POE聚合工艺等核心技术领域均取得阶段性突破,产业化进程持续推进。

2 高端化转型的核心技术瓶颈

高端聚烯烃的技术壁垒集中于催化剂体系、聚合工艺工程、产品开发与应用研究三个核心环节^[45-46]。其中,催化剂决定了聚合物的分子结构与性能上限,工艺工程决定了能否稳定、经济地实现聚合物的规模化生产,而产品开发则决定了材料能否满足终端应用需求。任何一个环节的滞后都会制约整个高端化进程。国内企业在催化剂与聚合工艺领域长期以消化吸收国外成熟技术为主,在产品开发与应用研究环节则存在“生产导向”而非“市场导向”的结构性短板。

2.1 催化剂体系

催化剂是聚烯烃技术的核心,决定了聚合物的分子结构与最终性能^[47]。聚烯烃树脂性能的每一次重大改进,几乎都与催化剂的革新密切相关。我国在传统Ziegler-Natta催化剂领域已实现全面国产化,部分技术达到国际先进甚至领先水平^[48-49]。北京化工研究院自20世纪80年代起即向美国公司授权聚丙烯催化剂专利使用权^[50-51]。近年来,基于新型内给电子体的创新,该院开发出国际上活性最高的商业化聚丙

烯催化剂,并配套开发了直接本体聚合法生产高纯净聚丙烯技术,实现了超纯聚丙烯的商业化生产。

然而,国内催化剂研发多以模仿和改进国外已公开的Ziegler-Natta催化剂体系为主,缺乏原创性的催化剂化学。以茂金属催化剂为代表的单活性中心催化剂能够实现对聚合物分子结构的精确控制,是生产mPE、mPP、POE等高端聚烯烃的必备技术。目前,这一领域长期被国外企业主导,国内实现工业化应用的种类和数量远少于国外,在催化效率、共聚性能、成本控制上存在明显差距^[52]。此外,对催化剂构效关系、反应机理等基础研究投入不足,限制了自主设计和新催化剂创制的能力。

2.2 工艺工程

在聚合工艺工程层面,我国产业短板主要体现为核心工艺包对外依存度高、过程控制精细化水平不足两大维度。

我国大型聚烯烃生产装置的核心工艺技术长期依赖海外许可。聚乙烯领域,国内现有产能中46%以上采用Univation公司的Unipol气相工艺,17%以上采用利安德巴塞尔公司的淤浆法工艺;聚丙烯领域,Spheripol、Innovene等主流工业化工艺均来自海外技术授权^[4]。近年来,国内企业通过技术引进、消化与集成创新,已掌握主流工艺的工程化设计能力,但面向高端聚烯烃牌号生产的精细化定制工艺包,自主开发能力仍存在明显缺口。伴随全球技术贸易壁垒升级与高端技术出口管制趋严,部分高端聚合工艺技术已停止对华授权,聚烯烃成套工艺技术的自主可控已成为产业安全层面的迫切需求。

即便采用同源工艺包与催化剂体系,国产聚烯烃产品在性能稳定性、批次一致性等指标上与国外标杆产品仍存在显著差距。其内在成因在于,国内对聚合反应动力学机制、反应器内多尺度传热传质规律的基础研究深度不足,先进过程控制(APC)系统的模型精度与适配性有待提升^[53]。多数国内企业对聚合反应的调控仍停留在宏观工艺参数层面,缺乏对分子链结构-材料性能构效关系的精准认知,最终导致在牌号切换、工艺参数动态优化过程中的精准调控能力与国际先进水平存在差距。

2.3 产品开发与应用研究体系

产品开发与应用研究是衔接材料分子设计、聚合制备与终端场景需求的核心环节,是实现高端聚烯烃产品价值落地的关键链条。当前我国聚烯烃产业在该环节的短板主要体现在以下三方面。

(1) 产品开发以供给驱动为主,需求牵引属性不足。

国内聚烯烃企业长期形成了基于现有装置工艺条件开发产品的路径依赖,产品牌号规划以装置产能适配为核心,而非面向下游细分应用场景开展定制化研发^[52]。这种供给驱动的开发模式在通用聚烯烃供需紧平衡阶段可支撑企业基本盈利,但在当前通用牌号产能过剩、同质化竞争加剧的产业背景下,其市场适配性持续下降。由于对下游加工工艺要求、材料服役性能边界缺乏系统性研究,企业难以开发出

匹配市场差异化需求的高端专用产品。

(2) 应用研究投入强度偏低,产学研两端存在结构性错位。

国际化工巨头普遍建立了覆盖终端客户的应用技术研发与服务体系,可与汽车、电子、医疗等领域龙头企业开展联合研发,提供定制化材料解决方案,进而形成较强的客户黏性与技术壁垒。相比之下,国内聚烯烃企业的应用研究投入占研发总投入比重偏低,面向下游加工环节的技术服务能力薄弱,难以通过应用研究挖掘潜在需求、引领产品升级。与此同时,国内高校与科研院所的聚烯烃相关研究多聚焦于催化剂合成、聚合反应机理等上游基础领域,对材料加工性能、长期服役行为等应用端问题关注不足;而企业研发团队又普遍缺乏开展全链条应用评价的人员与平台支撑,二者形成明显的研究断层。

(3) 产学研协同转化机制不健全,全链条创新协同性不足。

当前高校、科研院所的多数聚烯烃相关研究成果仍停留在实验室小试阶段,工业化适配性不足,成果产业化转化率整体偏低。中试放大是连接基础研究与工业化生产的核心中间环节,是实现原创技术产业化落地的必要路径,但我国面向聚烯烃领域的专业化中试平台供给存在较大缺口。此外,高端聚烯烃产品开发涉及催化剂分子设计、聚合工艺调控、加工性能优化、终端服役评价等多个环节,需要跨主体、跨环节的系统性协同。而国内现有研发体系多呈现分段式特征,各环节主体独立开展研究,缺乏贯穿全产业链的协同研发机制^[4]。这种碎片化的创新格局,显著制约了高端聚烯烃技术成果从实验室向市场端的转化效率。

3 智能制造赋能高端化的研究与应用

以人工智能、数字孪生为核心的智能制造技术,为破解高端聚烯烃生产控制精度不足、新品研发周期长、产品质量稳定性差等行业痛点提供了全新技术路径。在聚烯烃工业化体系中,人工智能技术主要体现三方面应用价值:生产过程智能优化以提升装置稳定性与原料收率、降低单位能耗;设备运行预测性维护以减少非计划停工损失;智能化研发体系以缩短高端牌号开发周期、提升研发成功率^[54-55]。

3.1 聚合过程的智能优化与控制

聚合反应器是聚烯烃生产的核心单元,体系内温度、压力、物料配比、催化活性等参数呈现强耦合、非线性、时变特征,传统PID控制策略难以实现全局最优调控,工艺参数优化高度依赖人工经验,是造成高端产品批次波动的重要原因。当前行业主流智能优化体系主要包含数字孪生建模与实时动态优化两类技术路径。其一,基于反应器机理与工业数据构建高保真数字孪生模型,实现多工况下聚合反应行为的动态仿真与预判,突破物理试验工况限制。其二,依托机器学习算法构建实时优化(RTO)系统,动态识别进料纯度、环境工况、催化剂活性波动等干扰因素,自适应输出温度区间、氢烃比、单体进料量等最优工艺参数,使聚合反应持续维持

在高效稳定区间^[56-57]。工业实践表明,该智能调控模式可使单体转化率提升1%~3%,有效降低催化剂单耗,显著改善高端聚烯烃产品的性能一致性。

在节能降碳维度,智能制造技术可实现全厂能源系统的数字化建模与协同优化,在满足生产约束条件下求解最优能耗运行方案。通过压缩机变频优化、装置热集成网络动态调配,可有效降低系统综合能耗^[58]。

3.2 AI驱动的新牌号研发模式

传统聚烯烃新牌号开发以“试验试错”为核心逻辑,需依次完成分子设计、小试试验、中试放大、工业化试产与终端应用验证等流程,单款高端专用料开发周期通常为2~3年,存在研发成本高、试验盲目性强、成功率偏低等问题^[57]。

人工智能技术重构了聚烯烃新品研发范式,形成以性能需求为导向的逆向精准设计体系。该模式以终端应用性能指标为输入条件,通过机器学习模型反向推演适配工况需求的聚合物微观结构,包括分子量分布、共聚单体种类及序列分布、支化度等关键参数^[59]。在此基础上,结合分子模拟技术筛选适配目标结构的催化体系,大幅缩减新型催化剂的试验筛选周期。确定最优分子结构方案后,智能模型依托工业历史数据库,匹配现有装置可实现的最优工艺窗口,降低工业化试产风险。同时,通过工艺-性能关联模型预判新材料的加工成型特性与终端服役性能,有效减少实物试验次数与研发成本。

国内头部石化企业已完成该研发模式的工业化落地,针对高端超薄电容器膜专用聚丙烯长期依赖进口的产业现状,搭建聚烯烃智能化研发平台^[60]。企业整合多年小试、中试、工业化生产数据及进口对标材料的应用评价数据,构建了“分子结构-工艺参数-产品性能”多维度机器学习模型,可依据膜料洁净度、介电性能、加工稳定性等高端指标完成逆向结构与工艺参数智能匹配。在海量虚拟配方与工艺组合中完成筛选后,仅通过两次工业化试产即制备出性能对标进口产品的高端电容膜料,部分关键性能指标优于进口竞品,整体研发周期较传统试错模式缩短70%以上,实现了该领域关键材料的国产化替代。

3.3 全流程质量智能管控

高端聚烯烃专用料对产品批次一致性、纯度稳定性、外观合格率的要求远高于通用聚烯烃产品。传统质量管控采用离线取样、实验室滞后检测模式,存在检测滞后、人为误差、异常溯源困难等短板,难以满足高端材料的精细化质量管控需求。依托在线光谱感知、机器视觉、大数据建模的智能质控体系,推动聚烯烃质量管理由“事后抽检整改”向“全过程实时预判、主动调控”转型。

近红外光谱在线检测是聚烯烃物性智能感知的核心技术,结合化学计量学算法可实现聚合物熔融指数、密度、共聚单体含量等关键指标的无接触、秒级检测^[61]。兰州石化基于自主研发的光谱分析体系,采集2 254组工业样本构建专用光谱数据库与物性模型,建立了mPE3010、5000S等牌号中

控物料的快速分析方法,将单批次物性检测时长由2~3 h缩短至3 min以内。该模型环境适应性强、检测精度稳定,有效降低人工检测误差,满足连续化工业生产的实时质控需求^[62]。

中韩石化构建的“机理+数据”混合智能预测模型,实现了聚烯烃关键质量指标的实时在线预测,模型预测准确率可达96%以上。工艺质量异常定位时长由传统模式的48 h压缩至20 min以内,实现质量问题的快速溯源与精准纠偏,装置投用后产品质量稳定性显著提升,实现长期质量稳定运行^[63]。上述实践验证了AI预测技术在聚烯烃质量前置管控中的应用价值。

在颗粒外观质控层面,基于高速视觉识别与深度学习算法的智能检测系统,可自动识别切粒工序中的连粒、拖尾、黑点、杂质颗粒等缺陷,实时反馈并联动调整切粒工艺参数。结合全流程数据驱动的智能分级分拣系统,可实现不同品级产品的精准分类,规避产品混级问题,满足高端聚烯烃牌号的标准化出厂要求。镇海炼化聚烯烃智能立体仓库的无人化分拣与仓储体系,是该技术工业化应用的典型案例^[64-65]。

整体来看,智能制造技术已在国内聚烯烃行业形成“工艺智能优化—新品智能研发—全程质量管控”的全链条赋能体系。国内主流石化企业的智能化聚烯烃示范项目已完成验收并进入推广阶段,标志着我国聚烯烃产业智能化建设由单点试点逐步走向规模化、体系化应用。依托高通量试验技术与人工智能的深度融合,构建“聚烯烃+AI”的高性能材料开发新范式,将成为推动我国聚烯烃产业由规模扩张向高端高质量转型的核心支撑。

4 深加工技术与应用场景拓展

催化剂的研发与聚合工艺工程决定了高端聚烯烃树脂的可生产性,智能制造体系保障了生产过程的稳定性与高效性,而深加工技术则承担着实现基础树脂高值化转化、打通高端材料终端应用市场的核心作用。聚烯烃深加工是以通用均聚聚丙烯、聚乙烯等基础树脂为基材,通过物理共混、化学改性、增强增韧、功能化复配、精密成型等后加工技术,赋予材料差异化功能与优异力学性能,制备高端功能化材料与复杂结构制品的全过程,是聚烯烃产业实现产品附加值提升的关键环节。

从全球产业价值链格局来看,我国多数聚烯烃企业主要布局原材料生产、初级加工及贸易等中低端环节,处于产业微笑曲线附加值最低的区间。随着我国“双碳”战略的稳健推进,以及新能源产业的持续发展,对高端聚烯烃材料的需求将进一步加剧,见表1。因此,推动企业从单一原料供给模式向材料一体化解决方案服务商转型,实现产业价值链向高附加值终端应用端延伸,是我国聚烯烃产业高质量升级的核心路径之一。

4.1 改性技术的功能化研究进展

改性技术是当前聚烯烃深加工领域应用最广泛、适配性最强的技术手段,通过结构调控与功能填充,可弥补通用聚

表1 聚烯烃(高性能品种)新增市场需求预测表

Tab. 1 Forecast of new market demand for high-performance polyolefins

Application field	2023 consumption base/($\times 10^4$ t)	2030 forecasted consumption/($\times 10^4$ t)	CAGR/%
Automotive lightweighting	15	40	15
High-end plastic-wood composites	20	60	18
Plastic building formwork	5	30	25
High-end logistics packaging	10	25	14
Total	50	155	20

Notes: CAGR is compound annual growth rate.

烯烃材料性能单一的短板,适配电子电气、医疗健康等高壁垒、高可靠性应用场景的严苛需求。

4.1.1 电子电气领域功能改性材料

电子电气领域对高分子材料的安全性、环境稳定性、加工精密性具有严苛要求,推动聚烯烃改性技术向防静电、无卤阻燃、导热绝缘等多功能复合方向迭代。

在抗静电与导电改性领域,通过复配永久性抗静电剂或碳纳米管、导电炭黑等功能性填料,可制备梯度抗静电、导电聚烯烃材料,适用于IC承载托盘、晶圆载带、精密电子外壳等场景,能够有效规避静电累积对精密电子元器件的损伤^[66]。该技术的核心难点在于,在保障基体力学性能稳定的前提下,实现电阻率的精准调控与长期服役稳定性。

在阻燃改性领域,传统卤系阻燃剂因环保性差、燃烧产生有毒烟气等问题逐步被替代,氮磷系、金属氢氧化物等无卤阻燃体系成为聚烯烃阻燃改性主流方向^[67]。无卤阻燃PP、PE材料可满足电子充电器外壳、动力电池模块、电气插座等产品的阻燃安全标准,适配消费电子与新能源电气设备的安全使用要求。

在导热绝缘改性领域,随着5G通信基站、LED照明、大功率电源模块散热需求持续提升,行业对绝缘导热高分子材料需求快速增长。通过填充氮化硼、氧化铝等绝缘导热填料,可在保持材料绝缘性能的基础上构建连续导热网络,制备高性能散热壳体与基板材料,实现设备高效散热^[68]。

4.1.2 医疗领域专用改性材料

医用聚烯烃材料具备极高的行业准入壁垒,需通过严格的生物相容性、耐灭菌、低析出检测认证,认证通过后产品具备极高的市场附加值。

高透明聚丙烯材料通过成核剂改性与造粒工艺优化,可显著提升透光性能,达到接近PS、PVC材料的透明效果,可应用于一次性注射器、输液袋、细胞培养皿等医用耗材,材料性能需严格满足USP Class VI、ISO 10993-1:2018等国际生物相容性评价标准。

耐辐照改性聚烯烃是高端医用材料的重要品类。医疗器械普遍采用伽马射线辐照灭菌,常规聚丙烯材料易出现辐照老化、脆化、黄变等问题。通过优化分子链结构、开发无规共聚体系并复配专用抗辐照助剂,可显著提升PP材料的抗辐照老化性能,保障灭菌处理后制品力学性能与外观稳定性,适配高端医疗器械长期循环使用需求^[69]。

4.2 高端薄膜与精密成型技术进展

薄膜制品是聚烯烃材料规模最大的下游应用场景,高端功能薄膜依托先进成型与复合技术,具备高阻隔、耐候、高透光等差异化性能,是聚烯烃产业高值化发展的核心赛道。

4.2.1 超高阻隔功能薄膜

针对生鲜肉类、乳制品、坚果等易氧化食品的保鲜需求,高阻隔包装薄膜是延长食品货架期的核心材料,要求具备极低的氧气、水汽透过率。基于微层共挤技术,可将PP、PE基体与EVOH、PA等高阻隔功能树脂实现数十至百层交替复合,依托“迷宫渗透效应”大幅延长气体渗透路径,有效降低薄膜透气率,最优工况下氧气透过率可低于 $2\text{ cm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ^[70]。当前行业技术迭代方向聚焦于全聚乙烯结构BOPE可回收阻隔膜的开发,在保留高阻隔性能的同时解决传统多层复合膜难以回收、污染性强的行业痛点。

4.2.2 光伏封装功能胶膜

光伏组件长期暴露于户外复杂工况,对封装胶膜的耐紫外老化、耐湿热、水汽阻隔性能要求严苛,需保障25年以上的服役稳定性^[71]。传统EVA胶膜存在电势诱导衰减、水解老化等缺陷,难以适配新一代高效光伏组件需求^[72]。基于茂金属催化技术制备的POE,具备优异的抗PID性能、耐候性与低水汽透过率,已成为N型双面光伏组件的核心封装材料,市场渗透率持续提升。目前国内高端光伏级POE树脂自给率偏低,是我国聚烯烃产业亟需突破的关键高端品类^[46]。为平衡材料成本与综合性能,行业逐步推广EVA/POE/EVA三层共挤EPE复合胶膜体系,兼顾POE材料的耐候优势与EVA工艺成熟、成本可控的特点。

4.2.3 精密成型技术

精密成型是将改性高端聚烯烃材料转化为高附加值终端部件的关键环节,可实现材料性能与制品结构的精准匹配。长玻纤在线注塑工艺可制备汽车前端模块、仪表盘骨架、动力电池托架等大型结构件,实现零部件轻量化与结构集成化^[73]。高速高压薄壁注塑技术可生产轻量化食品包装容器、精密瓶盖等制品,在保障使用性能的同时降低原料消耗、提升生产效率。多层共挤中空吹塑技术可制备汽车燃油箱、工业IBC吨桶等制品,满足严苛的阻隔、耐化学腐蚀、抗跌落使用要求,适配工业高端场景^[74]。

4.3 “以塑代钢/木”的应用拓展

“以塑代钢、以塑代木”并非简单的材料替代,而是依托高性能聚烯烃材料轻量化、耐腐蚀、易成型、可回收的特性,

替代传统金属、木质材料,实现产品综合性能优化与全生命周期降碳效益。其产业价值主要体现在:高分子材料轻量化优势显著,可有效降低装备自重;一体化成型能够简化加工工序、降低生产能耗与综合制造成本;可循环利用特性可减少矿产与林木资源消耗,契合双碳发展目标;同时倒逼材料研发与终端应用协同创新,拓展聚烯烃材料高端应用边界^[75]。

4.3.1 新能源汽车轻量化应用

新能源汽车是“以塑代钢”技术落地的核心场景,整车轻量化可直接提升车辆续航能力。相关研究表明,新能源汽车整车重量降低100 kg,续航里程可提升10%^[76]。长玻纤增强聚丙烯(LGFPP)是车用轻量化核心材料,弯曲模量可达8 000~15 000 MPa,较普通聚丙烯提升2~4倍,可替代传统金属结构件,实现部件减重30%~50%^[77]。在车身前端模块中,LGFPP可将十余种独立金属零部件集成一体化成型,大幅简化装配流程。在动力电池包领域,改性聚烯烃、聚酰胺等材料逐步替代传统金属壳体,兼具轻量化、绝缘、耐化学腐蚀优势,其中巴斯夫Ultradid® PA66电池包壳体可实现减重40%以上^[78]。此外,低VOC、低气味、高耐热的改性PP、TPO材料已广泛应用于汽车内饰件,适配车载环境的健康与安全标准^[79]。

4.3.2 绿色建筑领域应用

绿色建筑是“以塑代木”的传统优势场景,塑木复合材料、改性建筑模板是核心应用品类^[80]。传统塑木材料多采用回收聚烯烃为基材,存在耐候性差、易褪色、热稳定性不足、长期蠕变等缺陷。当前技术升级方向为:采用全新PP/PE树脂替代回收料提升基体稳定性;掺杂纳米纤维素、天然植物纤维优化表面质感与力学性能;复配高效耐候助剂体系,将制品使用寿命延长至20年以上。升级后的塑木材料可应用于建筑外墙挂板、隔音屏障、室内装饰墙板等高端场景,需满足B1级阻燃、高力学稳定性与美学性能要求,具备更高的产品附加值^[81]。

塑料建筑模板凭借质量轻、周转次数高(可达100次以上)、易清洗、施工效率高、可回收循环利用的优势,逐步替代传统钢模、木模^[82]。行业技术突破重点为长玻纤增强聚丙烯中空结构模板,通过配方与结构优化提升材料弯曲模量,趋近钢模力学性能,兼顾轻量化与高强度特性,适配现代建筑施工需求^[83]。

5 现存挑战与未来展望

5.1 当前核心挑战

尽管我国聚烯烃产业在规模扩张、技术突破和智能制造探索等方面取得了显著进展,但距离实现“由大到强”的转变仍有不小距离。综合前文分析,当前面临的挑战可归结为以下四个相互关联的核心问题。

第一,同质化过剩困境短期内难以扭转。通用料产能利用率长期低于80%,新投产装置仍以大宗产品为主,高端牌号匮乏的局面未得到根本改善。大量新增产能仍在释放,但

需求增速放缓,供需剪刀差不断加大。同质化竞争下企业陷入价格战,利润被压缩至盈亏平衡点附近,行业整体造血能力不足。

第二,核心技术瓶颈制约高端化突破。在催化剂领域,国内研发仍以模仿和改进国外已公开的Ziegler-Natta催化剂体系为主,对制备高端产品至关重要的茂金属催化剂、非茂金属催化剂等单活性中心催化剂,国内实现工业化应用的种类和数量远少于国外。在工艺工程领域,大型装置核心工艺包仍依赖国外引进,过程控制精细化程度不足,产品性能稳定性与国外存在差距。在产品开发领域,企业“生产导向”而非“市场导向”的思维惯性尚未根本转变,应用研究投入不足,产学研转化不畅。

第三,原料成本偏高与供应链安全风险并存。相比于中东和北美,中国的油头路线在原料成本上先天处于劣势。我国原油对外依存度超过70%,油价波动直接影响油头路线成本稳定。丙烷脱氢路线所需丙烷大量依赖进口,价格受国际市场和地缘政治影响巨大。高碳 α -烯烃(1-辛烯)等共聚单体国内产能不足,限制了高端共聚产品的开发。全球供应链不确定性增加的背景下,关键技术和原料的进口依赖构成了产业安全隐患。

第四,绿色转型压力持续加大。“双碳”目标对能源密集型石化产业提出了严格的碳排放约束。聚烯烃生产是能耗和排放大户,企业面临的碳排放配额越来越严格,碳成本逐年上升。使用绿电、CCUS等降碳技术需要巨大投资,短期内大幅提高生产成本。化学回收、物理回收等绿色技术尚处于产业化初期,技术成熟度和经济性仍需验证。与此同时,欧盟塑料税、可再生含量要求等绿色贸易壁垒正在抬高中国聚烯烃产品的出口门槛。

5.2 未来发展方向

方向一:以智能制造为牵引,推动生产模式升级。以人工智能为代表的智能制造技术,是打破同质化竞争、实现降本增效的核心引擎。企业应分阶段推进智能工厂建设——从基础数字化与试点起步,逐步走向模块化推广与全面集成。通过AI优化生产过程、加速新牌号研发、实现全流程质量管控,使产业从“经验驱动”转向“数据驱动”。

方向二:以材料替代为路径,拓展增量市场空间。“以塑代钢、以塑代木”不是老调重弹,而是在新需求、新技术的驱动下开辟出的新市场。应抓住新能源汽车轻量化、绿色建筑升级等机遇,将高性能聚烯烃材料引入汽车结构件、建筑模板、高端塑木等增量市场。预计到2030年,仅汽车轻量化、高端塑木、塑料建筑模板、高端物流包装四个领域,就可带来百万吨级的新增市场需求。

方向三:以深加工为手段,提升价值链位置。中国大多数聚烯烃企业集中在“微笑曲线”的中低端环节。通过改性技术、精密成型、高端薄膜等深加工手段,将基础树脂转化为满足特定需求的解决方案,是向价值链高端攀升的关键。企业应从“大宗原料供应商”转变为“高性能材料解决方案提

供商”。

方向四:以绿色循环为归宿,构建可持续发展体系。循环经济理念应贯穿于产业发展的各个环节。在设计端推行可回收设计,推广单一材质方案;在生产端利用智能制造技术降低能耗与碳排放;在回收端布局化学回收等前沿技术。只有建立起“原料-产品-回收-再生”的闭环体系,才能在“双碳”目标下实现产业的长期可持续发展。

方向五:以协同创新为保障,完善产业生态。高端化转型需要宏观政策和微观主体的协同配合。国家层面应强化顶层设计——严格控制新增通用料产能、设立国家级攻关项目突破“卡脖子”技术、推行绿色金融与循环经济激励。企业层面应加大研发投入(对标国际巨头,确保研发投入占销售收入的比例不低于3%)、培养复合型人才、构建开放式创新生态,通过“政-产-学-研-用”协同攻关,形成从基础研究到产业化的完整创新链条。

6 结语

我国聚烯烃产业正处于由规模扩张向质量升级转型的关键阶段。本文从产业格局、技术瓶颈、智能制造赋能、深加工与应用拓展四个维度,系统梳理了我国聚烯烃高端化转型的技术路径与产业进展,得出以下结论。

第一,结构性矛盾是高端化转型的核心动因。我国聚烯烃产能规模已居全球首位,但“大而不强”特征显著:通用产能过剩导致行业盈利承压,高端产品供给不足形成结构性贸易失衡;叠加“双碳”目标的碳排放约束与战略性新兴产业的需求升级,共同构成转型的刚性驱动力。

第二,全链条技术短板是高端化突破的核心制约。传统Ziegler-Natta催化剂已达国际先进水平,但茂金属等单活性中心催化剂工业化进展滞后;大型装置核心工艺包对外依存度高、过程管控精度不足,导致产品性能与批次稳定性存在差距;生产导向的开发模式与产学研转化机制不畅,阻滞了技术成果的产业化落地。

第三,智能制造是加速转型的核心技术。人工智能、数字孪生技术在聚合过程优化、新牌号研发、全流程质量管控环节赋能效应显著,构建“聚烯烃+AI”的研发与管控新模式,可推动产业由经验驱动向数据驱动转型。

第四,深加工与应用拓展是价值跃升的关键路径。改性技术、高端功能薄膜与“以塑代钢/木”持续拓展高附加值应用场景,推动企业由大宗原料供应商向材料解决方案服务商转型,带动产业价值链向高端攀升。

综上,聚烯烃高端化转型是涵盖技术突破、模式变革、价值链延伸与生态重构的系统工程,需以智能制造、深加工升级、材料替代、绿色循环与政产学研用协同形成合力,方能实现核心技术自主可控与产业高质量可持续发展。

参考文献

- [1] QIAO J L, et al. Polymer Chemistry, 2011, 2(8):1 611–1 623.
- [2] GENG J B Energy Policy, 2016, 96:167–178.
- [3] KHATIB H. Energy Policy, 2014, 64:71–77.

- [4] 吴长江. 科学通报, 2022, 67(17):1 853–1 862.
WU Changjiang. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(17): 1 853–1 862.
- [5] DONG J Y. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(17):1 863–1 869.
- [6] 中金企信国际咨询有限公司. 2026 年全球和中国聚烯烃行业市场趋势分析报告[R]. 2026.
Zhongjin Qixin International Consulting Co., Ltd. 2026 Global and China Polyolefin Industry Market Trend Analysis Report[R]. 2026.
- [7] 佚名. 广州化工, 2022, 50 (2):1–4.
Anon. GuangZhou Chemical Industry, 2022, 50 (2):1–4.
- [8] 王龙. 中国塑料, 2025, 39 (12):7–12.
WANG Long. China Plastics, 2025, 39 (12):7–12.
- [9] 黄格省, 等. 化工进展, 2023, 42 (10):5 037–5 046.
HUANG Gesheng, et al. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42 (10):5 037–5 046.
- [10] 魏敏, 等. 船电技术, 2023, 43 (12):32–37.
WEI Min, et al. Marine Electric & Electronic Engineering, 2023, 43 (12):32–37.
- [11] 王静宜, 等. 化工新型材料, 2026, 54 (增刊 1):84–88.
WANG Jingyi, et al. New Chemical Materials, 2026, 54(Suppl 1): 84–88.
- [12] 历伟, 等. 科学通报, 2022, 67 (17):1 908–1 922.
LI Wei, et al. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(17):1 908–1 922.
- [13] 张晓帆, 等. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(1):141–149.
ZHANG Xiaofan, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37 (1):141–149.
- [14] 王文川. 基于人工智能算法的聚丙烯熔指数预报建模与优化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
WANG Wenchuan. Modeling and optimization of MI prediction for propylene polymerization process based on artificial intelligent optimization[D]. Hang Zhou: Zhejiang University, 2016.
- [15] 柯晓明, 等. 国际石油经济, 2023, 31(10):70–75.
KE Xiaoming, et al. International Petroleum Economics, 2023, 31 (10):70–75.
- [16] 行业研究院. 2026–2030 中国聚烯烃市场竞争格局与前景展望趋势报告[R]. 2025-11.
Industry Research Institute. 2026–2030 China polyolefin market competitive landscape and prospect outlook trend report[R]. 2025-11.
- [17] 中国产业经济信息网. 我国聚烯烃产业变革加速[EB/OL]. (2026-07-24) [2026-08-02]. <http://www.cinic.org.cn/hy/hg/1645577.html>.
China Industrial Economic Information Network. Transformation of China's polyolefin industry accelerates[EB/OL]. (2026-07-24) [2026-08-02]. <http://www.cinic.org.cn/hy/hg/1645577.html>.
- [18] 王笃金, 等. 科学通报, 2022, 67 (17):1 851–1 852.
WANG Dujin, et al. Chinese Science Bulletin, 2022, 67 (17): 1 851–1 852.
- [19] 国信期货. 聚烯烃 2026 年投资策略报告[R/OL]. 2025-11.

- <https://www.fxbaogao.com/detail/5161501>.
Guoxin Futures. Polyolefin 2026 Investment strategy report[R/OL]. 2025-11. <https://www.fxbaogao.com/detail/5161501>.
- [20] 陈家运. 遭遇周期性低谷聚丙烯企业2025年普遍预亏[EB/OL]. (2026-01-31)[2026-06-06]. <http://www.cb.com.cn/index/show/zj/cv/cv135344981268>.
CHEN Jiayun. Facing a cyclical downturn, polypropylene enterprises are generally expected to incur losses in 2025[EB/OL]. (2026-01-31)[2026-06-06]. <http://www.cb.com.cn/index/show/zj/cv/cv135344981268>.
- [21] 崔小明. 中国化工信息周刊, 2026 (8):36-42.
CUI Xiaoming. China Chemical Information Weekly, 2026 (8): 36-42.
- [22] 中国化工信息周刊. 聚烯烃产业的供需重构与价值升级[EB/OL]. (2026-01-29)[2026-06-06]. <https://www.chemnews.com.cn/c/2026-01-29/771027.shtml>.
China Chemical News. Restructuring of supply & demand and value upgrade of polyolefin industry[EB/OL]. (2026-01-29)[2026-06-06]. <https://www.chemnews.com.cn/c/2026-01-29/771027.shtml>.
- [23] 中国化工信息周刊. 我国聚丙烯供需现状及发展前景分析[EB/OL]. (2024-07-19)[2026-06-06]. <https://www.chemnews.com.cn/c/2024-07-19/741616.shtml>.
China Chemical News. Analysis on current supply-demand situation and development prospect of polypropylene in China[EB/OL]. (2024-07-19)[2026-06-06]. <https://www.chemnews.com.cn/c/2024-07-19/741616.shtml>.
- [24] 刘星, 等. 现代塑料加工应用, 2026, 38 (1):53-56.
LIU Xing, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2026, 38 (1):53-56.
- [25] 曹泱. 化学推进剂与高分子材料, 2020, 18 (6):30-34.
CAO Yang. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2020, 18 (6):30-34.
- [26] 聚烯烃人. 产能扩张下的分化与突围: 2025年聚乙烯市场复盘与2026年趋势预测[EB/OL]. (2026-02-28)[2026-08-02]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2026-02-28/doc-inhpkhwi9922280.shtml>.
Polyolefin People. Differentiation and breakthrough under capacity expansion: Review of the polyethylene market in 2025 and trend forecast for 2026[EB/OL]. (2026-02-28)[2026-08-02]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2026-02-28/doc-inhpkhwi9922280.shtml>.
- [27] 高明玉. 石油化工, 2019, 48 (7):746-752.
GAO Mingyu. Petrochemical Technology, 2019, 48 (7):746-752.
- [28] 钱伯章. 合成材料老化与应用, 2023, 52 (5):137.
QIAN Bozhang. Synthetic Materials Aging and Application, 2023, 52 (5):137.
- [29] 张瑞, 等. 合成树脂及塑料, 2023, 40 (4):76-81.
ZHANG Rui, et al. China Synthetic Resin and Plastics, 2023, 40 (4):76-81.
- [30] 王静, 等. 分子催化, 2020, 34 (6):579-591.
WANG Jing, et al. Journal of Molecular Catalysis (China), 2020, 34 (6):579-591.
- [31] 谭捷. 精细与专用化学品, 2019, 27 (2):21-23.
TAN Jie. Fine and Specialty Chemicals, 2019, 27 (2):21-23.
- [32] 谭捷. 精细与专用化学品, 2023, 31 (10):35-38.
TAN Jie. Fine and Specialty Chemicals, 2023, 31 (10):35-38.
- [33] 北京博研智尚信息咨询有限公司. 2026年中国聚烯烃弹性体行业市场现状调查及投资机会研判报告[R]. 2026.
Beijing Boyan Zhishang Information Consulting Co., Ltd. 2026 china polyolefin elastomers industry market status survey and investment opportunity assessment report[R]. 2026.
- [34] 钟韬. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37 (24):39-40.
ZHONG Tao. China petroleum and chemical standard and quality, 2017, 37 (24):39-40.
- [35] 隆众资讯. UHMWPE产能大幅扩张, 锂电隔膜成为核心需求增长点[EB/OL]. (2025-12-31)[2026-08-02]. <https://www.chengzhi.com.cn/article/23639.html>.
Longzhong Information. UHMWPE production capacity is expanding significantly, and lithium battery separators have become the main growth driver[EB/OL]. (2025-12-31)[2026-08-02]. <https://www.chengzhi.com.cn/article/23639.html>.
- [36] 王源. 向“高端和专用”进军:——中国石油特色化工新产品开发透视[N]. 中国石油报, 2021-05-21(004). DOI:10.28716/n.cnki.nshyo.2021.001571.
WANG Yuan. Marching toward “high-end and special-purpose”: perspective on development of new characteristic chemical products of PetroChina[N]. China Petroleum News, 2021-05-21(004). DOI:10.28716/n.cnki.nshyo.2021.001571.
- [37] 金联创网络科技有限公司. 2025年度EVA行业产能供需全景报告[EB/OL]. (2026-01-23)[2026-08-02]. <http://m.toutiao.com/group/7598363233463845428/>.
Jinlianchuang Network Technology Co., Ltd. 2025 EVA industry capacity supply and demand panorama report[EB/OL]. (2026-01-23)[2026-08-02]. <http://m.toutiao.com/group/7598363233463845428/>.
- [38] 宋艳萍, 等. 油气与新能源, 2022, 34(4):12-20.
SONG Yanping, et al. Petroleum and New Energy, 2022, 34 (4): 12-20.
- [39] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2021.
Society of Automotive Engineers of China. Technology roadmap for energy saving and new energy vehicles 2.0 [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [40] 王福善, 等. 石油化工, 2024, 53 (8):1 144-1 147.
WANG Fushan, et al. Petrochemical Technology, 2024, 53 (8): 1 144-1 147.
- [41] 石化行业走出去联盟. 中国聚烯烃行业的发展趋势[EB/OL]. (2024-03-30)[2026-08-02]. https://mp.weixin.qq.com/s_MzI4MTEzOTMwNQ==&mid=2247645674&idx=3&sn=5db407e845b6906af64ea3cec5cf7179&chksm=eaa69adb6e8c2a8e45aaa6

- 2611288484a38c7be6cd1df4dcbdd4b4bb55d12337e565dad3d1f1
&scene=27.
Going Global Confederation of China Petroleum and Chemical Industry. Development trend of China's polyolefin industry[EB/OL].(2024-03-30)[2026-08-02].https://mp.weixin.qq.com/s__biz=MzI4MTEzOTMwNQ==&mid=2247645674&idx=3&sn=5db407e845b6906af64ea3cec5cf7179&chksm=eaa69adb6e8c2a8e45aaa62611288484a38c7be6cd1df4dcbdd4b4bb55d12337e565dad3d1f1&scene=27.
- [42] 中国石油和化学工业联合会.傅向升:2023年石化行业成绩来之不易,2024年“以进促稳”[EB/OL].(2024-02-01)[2026-08-02].<http://www.cpcif.org.cn/detail/8c708ec1-f7c-4cd4-a84d-13d91848457a>.
China Petroleum and Chemical Industry Federation. Fu Xiangsheng: achievements of petrochemical industry in 2023 are hard-won, pursuing promoting stability through progress in 2024[EB/OL].(2024-02-01)[2026-08-02].<http://www.cpcif.org.cn/detail/8c708ec1-f7c-4cd4-a84d-13d91848457a>.
- [43] 高华鑫.中国化工贸易,2026,18(9):7-9.
GAO Huaxin. China Chemical Trade, 2026, 18(9):7-9.
- [44] 工业和信息化部,等.关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见[EB/OL].(2022-03-28)[2026-08-02].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/08/content_5683972.htm.
Ministry of Industry and Information Technology, et al. Guiding opinions on promoting high-quality development of petrochemical and chemical industry during the 14th Five-Year Plan period[EB/OL].(2022-03-28)[2026-08-02].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/08/content_5683972.htm.
- [45] 高金龙,等.能源化工,2024,45(1):21-25.
GAO Jinlong, et al. Energy Chemical Industry, 2024, 45(1):21-25.
- [46] 陶怡,等.现代化工,2024,44(2):9-15,21.
TAO Yi, et al. Modern Chemical Industry, 2024, 44(2):9-15, 21.
- [47] SOGA K, et al. Progress in Polymer Science, 1997, 22(7):1 503-1 546.
- [48] GAO R, et al. Journal of Catalysis, 2020, 385:103-106.
- [49] ZHOU Q, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(15). DOI:10.1002/app.44704.
- [50] 火宏龙,等.合成材料老化与应用,2026,55(2):26-30.
HUO Honglong, et al. Synthetic Materials Aging and Application, 2026, 55(2):26-30.
- [51] 胡友良.高分子通报,2021,34(6):1-14.
HU Youliang. Polymer Bulletin, 2021, 34(6):1-14.
- [52] 乔金樑.高分子通报,2026,39(2):287-293.
QIAO Jinliang. Polymer Bulletin, 2026, 39(2):287-293.
- [53] 王志刚.中国油气产业发展分析与展望报告蓝皮书-2018-2019[M].2018北京:中国石化出版社,2019.
WANG Zhigang. Blue book of China oil and gas industry development analysis and outlook report-2018-2019 [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2019.
- [54] 索寒生,等.化工进展,2023,42(7):3 365-3 373.
SUO Hansheng, et al. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(7):3 365-3 373.
- [55] 中国化工信息周刊.高端聚烯烃技术与市场前景展望[EB/OL].(2025-04-18)[2026-08-02].<https://www.chemnews.com.cn/c/2025-04-18/756190.shtml>.
China Chemical News. Outlook on technology and market prospect of high-end polyolefins[EB/OL].(2025-04-18)[2026-08-02].<https://www.chemnews.com.cn/c/2025-04-18/756190.shtml>.
- [56] 李思涵.石油化工,2026,55(3):449-455.
LI Sihan. Petrochemical Technology, 2026, 55(3):449-455.
- [57] 杨文泓,等.科学通报,2022,67(17):1 870-1 880.
YANG Wenhong, et al. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(17):1 870-1 880.
- [58] 万荣欢.中国石油和化工,2026(1):79-81.
WAN Ronghuan. China Petroleum and Chemical Industry, 2026(1):79-81.
- [59] 王涛,等.化工学报,2026,77(6):3 039-3 068.
WANG Tao, et al. CIESC Journal, 2026, 77(6):3 039-3 068.
- [60] 王柯,等.高电压技术,2025,51(5):2 234-2 245.
WANG Ke, et al. High Voltage Engineering, 2025, 51(5):2 234-2 245.
- [61] 陈如黄,等.光谱学与光谱分析,2015,35(6):1 512-1 515.
CHEN Ruhuang, et al. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(6):1 512-1 515.
- [62] 中国石油新闻中心.兰州石化一项自主知识产权创新技术应用成效显著[EB/OL].(2025-08-29)[2026-08-02].<https://news.cnpc.com.cn/system/2025/08/29/030172354.shtml>.
CNPC News Center. Remarkable application effect of an independent intellectual property innovative technology at Lanzhou petrochemical[EB/OL].(2025-08-29)[2026-08-02].<https://news.cnpc.com.cn/system/2025/08/29/030172354.shtml>.
- [63] 中国石化报.中韩石化智能聚烯烃装置项目通过验收[EB/OL].(2025-12-23)[2026-08-02].shturl.cc/uHxvrjRmPPJ8M6Qcuyu4AWkVvLKIZGcE1hk1Jxu-12/23/1/shb01b20251223C.pdf.
China Petrochemical News. Intelligent polyolefin unit project of Sinopec-SK (Wuhan) petrochemical passes acceptance [EB/OL].(2025-12-23)[2026-08-02].shturl.cc/uHxvrjRmPPJ8M6Qcuyu4AWkVvLKIZGcE1hk1Jxu-12/23/1/shb01b20251223C.pdf.
- [64] 宁波市镇海区人民政府.镇海炼化聚烯烃立体仓库出库量创新高[EB/OL].(2019-08-22)[2026-08-02].https://www.zh.gov.cn/art/2019/8/22/art_1229033705_46668887.html.
The People's Government of Zhenhai District, Ningbo City. Outbound volume of polyolefin stereoscopic warehouse at Sinopec Zhenhai Refining & Chemical hits a new record high[EB/OL].(2019-08-22)[2026-08-02].https://www.zh.gov.cn/art/2019/8/22/art_1229033705_46668887.html.
- [65] 中国石化新闻网.镇海炼化AI全过程深度应用的炼化智能工

- 厂: AI“智囊”辅助生产调度决策[EB/OL].(2025-01-15)[2026-08-02]. shturl.cc/AzP42sROikPyoCTHzWUbHe8ImeWbzJ058jZ4Z7-01-15/content_7116477.html.
- Sinopec News Network. In-depth full-process AI application at Sinopec Zhenhai refining & chemical intelligent refinery: AI “Brain Trust” assists production scheduling and decision-making [EB/OL]. (2025-01-15) [2026-08-02]. shturl.cc/AzP42sROikPyoCTHzWUbHe8ImeWbzJ058jZ4Z7-01-15/content_7116477.html.
- [66] 雷世龙. 石油化工, 2024, 53 (5):752–763.
- LEI Shilong. Petrochemical Technology, 2024, 53 (5):752–763.
- [67] 陈洪进, 等. 电线电缆, 2025, 68 (6):1–8.
- CHEN Hongjin, et al. Wire & Cable, 2025, 68 (6):1–8.
- [68] 高建, 等. 绝缘材料, 2014, 47 (2):19–24.
- GAO Jian, et al. Insulating Materials, 2014, 47 (2):19–24.
- [69] 徐琛, 等. 中国塑料, 2024, 38 (7):79–85.
- XU Chen, et al. China Plastics, 2024, 38 (7):79–85.
- [70] TAKASHIGE M, KANAI T. International Polymer Processing, 2006, 21(1):86–92.
- [71] 钱伯章. 橡塑技术与装备, 2009, 35 (9):60.
- QIAN Bozhang. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2009, 35 (9):60.
- [72] 张韶红. 广东化工, 2021, 48 (12):87–88.
- ZHANG Shaohong. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48 (12): 87–88.
- [73] 李伟, 等. 橡塑技术与装备, 2025, 51 (6):1–8.
- LI Wei, et al. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2025, 51 (6):1–8.
- [74] 张友根. 橡塑技术与装备, 2015, 41 (20):20–50.
- ZHANG Yougen. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2015, 41 (20):20–50.
- [75] 中国塑料机械网. 橡塑技术与装备, 2016, 42(14):56.
- China Plastics Machinery Network. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2016, 42(14):56.
- [76] MA M T, et al. Lightweight car body and application of high strength steels[C]//Advanced Steels. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011:187–198.
- [77] 杨振环, 等. 时代汽车, 2024(4):40–44.
- YANG Zhenhuan. Auto Time, 2024(4):40–44.
- [78] 杨熙, 等. 汽车知识, 2026, 26(5):109–111.
- YANG Xi. Automotive Knowledge, 2026, 26(5):109–111.
- [79] 冯杨, 等. 塑料工业, 2022, 50(1):58–61, 78.
- FENG Yang. China Plastics Industry, 2022, 50(1):58–61, 78.
- [80] 马小玲. 塑料助剂, 2025(2):91–94.
- MA Xiaoling. Plastics Additives, 2025(2):91–94.
- [81] 孙志明. 塑料助剂, 2025(4):118–122.
- SUN Zhiming. Plastics Additives, 2025(4):118–122.
- [82] 段凤杰. 合成树脂及塑料, 2025, 42(4):83–86.
- DUAN Fengjie. China Synthetic Resin and Plastics, 2025, 42(4): 83–86.
- [83] 朱晓蕾. 塑料助剂, 2023(2):69–70, 91.
- ZHU Xiaolei. Plastic Additives, 2023(2):69–70, 91.