

聚丙烯装置催化剂国产化应用研究

刘开剑 张 龙

宁波富德能源有限公司 浙江 宁波 315000

摘要：聚丙烯生产依赖高效催化剂，其国产化对降低产业对外依存度、保障供应链安全意义重大。本文聚焦聚丙烯装置催化剂国产化展开研究，概述了装置与催化剂特性，阐述其在聚合反应及产品性能调控中的关键作用；接着梳理国产催化剂的发展历程、技术现状与市场应用。深入探讨研发关键技术与工业应用效果，并通过实验对比验证其性能与经济性。结果表明，国产催化剂在催化活性等方面取得突破，能满足工业需求，助力产业国产化升级。

关键词：聚丙烯催化剂；国产化；催化活性

引言：在全球化竞争日益激烈的当下，化工产业的自主可控发展愈发关键。聚丙烯作为重要的通用塑料，其生产高度依赖高效催化剂，而长期以来我国聚丙烯催化剂依赖进口，制约了产业发展。实现催化剂国产化，不仅能降低对外依存度、保障供应链安全，更是推动产业升级的关键。本文将深入剖析聚丙烯装置催化剂国产化应用，探讨其发展历程、技术现状、关键研发技术及工业应用效果。

1 聚丙烯装置与催化剂概述

当前，许多聚丙烯装置采用中国石化第二代液相本体环管法+气相法聚丙烯工艺（简称ST工艺）技术，该工艺具有生产效率高、产品质量稳定等优势。聚丙烯装置是生产聚丙烯的关键设施，其规模与工艺水平直接影响聚丙烯的产量与质量。聚丙烯作为一种重要的通用塑料，广泛应用于包装、汽车、家电等诸多领域。而催化剂在聚丙烯生产过程中扮演着核心角色，它能够降低聚合反应的活化能，使反应在温和条件下高效进行。不同类型的催化剂会引发不同的聚合反应路径，从而决定聚丙烯的分子结构与性能。目前，聚丙烯生产常用的催化剂体系多样，各有特点。了解聚丙烯装置与催化剂的基本情况，是深入研究催化剂国产化应用的基础，有助于我们更好地把握产业发展方向，为提升我国聚丙烯产业的整体水平提供有力支撑。

2 催化剂在聚丙烯生产中的关键作用

2.1 催化聚合反应原理

聚丙烯生产中，催化剂能降低聚合反应活化能，推动丙烯单体链式聚合，作用机理因催化剂类型而异。以主流的Ziegler-Natta催化剂为例，它由主催化剂（如 $TiCl_4$ ）和助催化剂（如 AlR_3 ）组成，二者形成活性中心后，丙烯单体双键与活性中心金属原子配位，打破双键形成新键，实现链增长。催化剂活性中心的数量和稳定

性影响聚合反应速率：数量多，单位时间内参与反应的丙烯单体多，反应效率高；稳定性强，可减少链转移与终止反应，保障聚合物链持续增长，形成分子量分布均匀的聚丙烯^[1]。此外，催化剂还能调控反应条件，优化反应进程，避免副产物生成，确保生产连续稳定。

2.2 对产品性能的影响机制

催化剂不仅是聚合反应的“推动者”，更是调控聚丙烯产品性能的核心因素，其对产品性能的影响主要体现在分子量分布、等规度及力学性能三个方面。在分子量分布调控上，催化剂活性中心的种类与分布直接决定聚合物链的长度差异：若活性中心均一性高，生成的聚丙烯分子链长度相近，分子量分布窄，产品具有更优异的加工流动性与透明度，适用于薄膜、纤维等高端产品；若活性中心多样性强，分子量分布宽，产品则具备更好的抗冲击性能，适合注塑成型制品生产。在等规度方面，催化剂的立体选择性决定丙烯单体在聚合过程中的空间排列方式：高立体选择性催化剂可使丙烯单体按特定构型连接，形成高等规度聚丙烯，其结晶度高、耐热性与刚性优异；低立体选择性催化剂则会导致产品等规度下降，性能偏向柔性。同时，催化剂残留量也会影响产品力学性能，残留量过高可能引发产品老化、脆化，需通过后续工艺严格控制，因此催化剂的性能设计需兼顾活性与产品质量的双重需求。

3 国产催化剂的发展历程与现状

3.1 发展历程回顾

我国聚丙烯催化剂国产化始于20世纪70年代，历经三个阶段。第一阶段（1970-1990年）是技术引进与模仿期。彼时国内聚丙烯产业初兴，催化剂全靠进口。科研机构引进国外Ziegler-Natta催化剂生产技术，逆向模仿研发，初步掌握基础制备工艺，但产品性能与进口差距大，仅能满足低端生产需求。第二阶段（1990-2010年）

为自主研发突破期。国家重视化工产业升级，科研团队加大投入，攻关催化剂活性与选择性，成功研发出N型、DQ型等有自主知识产权的Ziegler-Natta催化剂系列产品，催化活性提升超30%，产品等规度达95%以上，逐步替代部分进口催化剂，用于中型装置。第三阶段（2010年至今）是高端化与多元化期，研发拓展至茂金属等领域，优化传统催化剂性能，适配大型连续装置，部分产品达国际先进水平，打破国外高端垄断^[2]。在适配ST工艺的国产催化剂研发方面也取得显著进展，能够更好地满足该工艺对催化剂性能的特殊要求。

3.2 技术水平现状

目前我国聚丙烯催化剂国产化技术已取得显著突破，在传统Ziegler-Natta催化剂领域形成成熟技术体系，部分产品性能达到国际领先水平。国产Ziegler-Natta催化剂的催化活性普遍达到30000gPP/gCat以上，部分高端产品可突破40000gPP/gCat，远超早期进口催化剂的20000gPP/gCat水平；产品等规度稳定在96%-98%，能满足均聚聚丙烯、嵌段共聚聚丙烯等多种产品生产需求，且在催化剂颗粒形态控制上实现突破，形成的聚合物颗粒流动性好，可减少装置结垢问题，提升生产效率。在适配ST工艺的国产催化剂方面，针对该工艺特点，对催化剂的活性中心分布、颗粒形态等进行了优化，使其在ST工艺装置中能够高效发挥作用，提高聚合反应效率和产品质量。在茂金属催化剂领域，国内科研机构已成功研发出单活性中心茂金属催化剂，其催化活性高、产品分子量分布窄，可生产高透明度、高韧性的高端聚丙烯产品，如医用薄膜、汽车内饰件专用料，但在催化剂稳定性与制备成本控制上，与国外巴斯夫、陶氏等企业的产品仍有一定差距。非茂金属催化剂研发也取得进展，有望成为未来高端聚丙烯产品生产的新型催化剂类型。

3.3 市场应用情况

随着国产聚丙烯催化剂技术进步，其市场应用规模持续扩大，市场占有率不断攀升。在国内，国产Ziegler-Natta催化剂已成为聚丙烯生产企业主流选择，被中石油、中石化、中海油等大型国企以及万华化学、恒力石化等民营化工企业广泛应用，市场占有率超70%，有效替代了巴斯夫、三井化学等国外传统催化剂产品。在采用ST工艺的聚丙烯装置中，国产催化剂也得到了广泛应用，凭借其良好的适配性和性价比，成为众多企业的首选。应用场景上，它能满足均聚、共聚聚丙烯等常规产品生产，广泛用于编织袋、注塑制品、薄膜等领域，部分高端产品还应用于汽车保险杠、家电外壳等对性能要求高的产品生产。不过，在医用级、电子封装用等高端

聚丙烯产品领域，国产催化剂应用受限，仍以进口茂金属催化剂为主，市场占有率不足30%。此外，国产催化剂正逐步拓展国际市场，已出口至东南亚、中东等地中小型聚丙烯企业，但国际竞争力有待提升。

4 国产化催化剂研发关键技术

4.1 催化剂配方设计与优化

催化剂配方设计与优化是国产聚丙烯催化剂研发的核心环节，直接决定催化剂的活性、选择性与稳定性。针对ST工艺双反应区特性，Ziegler-Natta催化剂配方优化聚焦两点：一是调整MgCl₂载体晶型与TiCl₄负载方式，增加活性中心密度；二是创新内给电子体种类，采用二醚类与琥珀酸酯复合给电子体，提升立体选择性的同时，增强催化剂抗丙烯原料中硫化物、水等杂质的能力。助催化剂配比也至关重要，国产催化剂将Al/Ti摩尔比优化至120-180，在保证活性的同时降低助催化剂用量。在茂金属催化剂配方设计中，通过修饰茂环取代基，调控活性中心电子效应与空间位阻，实现对聚合反应速率与产品性能的精准调控^[3]。

4.2 催化剂活性与选择性提升策略

提升催化剂活性与选择性是国产聚丙烯催化剂研发的重要目标，需从多个维度制定策略。在活性提升方面，一方面通过优化催化剂制备工艺，如采用球磨法、喷雾干燥法改进载体分散性，增加活性中心暴露面积，提高单位质量催化剂的活性中心数量；另一方面通过引入新型活性组分，如在Ziegler-Natta催化剂中添加微量Cr、Zr等金属元素，增强活性中心的催化能力，使催化活性提升20%-30%。对于适配ST工艺的催化剂，进一步优化制备工艺参数，使其活性中心在ST工艺的反应环境中能够更稳定地发挥作用，提高催化活性。在选择性提升方面，针对不同产品需求制定差异化策略：对于等规聚丙烯生产，通过优化内给电子体结构，增强活性中心对丙烯单体配位的空间选择性，减少无规结构生成；对于共聚聚丙烯生产，通过调控催化剂活性中心的电子环境，提高乙烯、丙烯单体的共聚能力，实现共聚单体在聚合物链上的均匀分布，提升产品韧性。此外，催化剂颗粒形态控制也是提升选择性的重要手段，通过优化制备工艺，形成球形度高、粒径分布均匀的催化剂颗粒，可减少聚合过程中聚合物颗粒破碎，避免反应器结壁，进一步提升产品质量稳定性。在ST工艺中，根据其反应器特点，精确控制催化剂颗粒形态，确保催化剂在反应器内均匀分散，提高反应效率和产品质量。

4.3 催化剂放大生产与工艺适配

催化剂放大生产与工艺适配是国产聚丙烯催化剂从

实验室走向工业化应用的关键技术难点。放大生产中，通过数值模拟优化反应釜搅拌桨结构，精准控制温度与压力，确保催化剂性能稳定；建立原料提纯工艺，将杂质含量控制在10ppm以下，避免活性中心失活。工艺适配方面，针对ST工艺特性优化催化剂物理性质：环管反应区需催化剂流动性好，因此控制堆密度在0.45-0.55g/cm³；气相反应区需抗静电性，通过表面改性降低颗粒带电量，防止“静电团聚”。例如，针对环管反应器优化催化剂颗粒流动性，避免沉降；针对气相流化床反应器控制粒径分布，防止形成“死床”，保障装置稳定运行。

5 国产化催化剂工业应用研究

5.1 实验设计与装置概况

为验证国产聚丙烯催化剂工业应用效果，科研机构与企业联合开展实验，按“小试-中试-工业化验证”梯度推进。小试用间歇式高压反应釜模拟聚合反应，测不同批次国产催化剂活性、产品等规度等基础性能，筛选最优样品。中试在3000吨/年规模装置进行，搭建模拟ST工艺的环管-气相组合反应系统，考察催化剂连续生产稳定性，优化工艺条件。工业化验证在宁波富德15万吨/年ST工艺装置开展，以丙烯为原料，用国产DQ-IV型催化剂连续生产45天，通过在线监测与离线分析结合，实时采集反应温度、压力及产品性能数据，确保结果可靠^[4]。

5.2 性能对比测试

国产聚丙烯催化剂工业应用实验中，以进口三井MC-100催化剂为参照，从三维度进行对比。催化活性上，国产DQ-IV型催化剂达36200gPP/gCat，略低于进口的38000gPP/gCat，但满足ST工艺需求。产品性能上，国产催化剂生产的均聚聚丙烯等规度97.8%，拉伸强度32MPa，冲击强度4.5kJ/m²，与进口产品（等规度98.0%、拉伸强度32.5MPa）基本持平。工艺适应性上，国产催化剂在ST工艺环管温度70-85℃、气相压力1.8-2.2MPa范围内活性稳定，反应器结垢量仅为进口催化剂的

30%，产品熔融指数波动≤0.2g/10min，适配性良好。

5.3 经济性分析

经济性分析是评估国产聚丙烯催化剂应用价值的关键，从生产成本、生产效率、产品收益三方面展开。生产成本上，适配ST工艺的国产DQ-IV型催化剂生产成本100元/kg，仅为进口同类产品的60%。生产效率方面，其活性高使丙烯转化率提升6%，15万吨/年装置年增产9000吨，且结垢减少使检修周期从6个月延长至12个月，减少停机损失。产品收益上，国产催化剂生产的产品售价与进口料持平，每吨利润增加280元，该15万吨级ST工艺装置年新增利润超2500万元，催化剂投资回收期仅8个月，经济效益显著。

结束语

聚丙烯装置催化剂国产化是我国化工产业自主可控发展的重要组成部分，通过对国产催化剂发展历程、技术现状与市场应用的分析，可见其已在传统聚丙烯生产领域实现突破，成为市场主流选择。研发关键技术的创新与工业应用的验证，进一步证明国产催化剂在性能与经济性上的优势。未来，需持续加大研发投入，优化催化剂性能，拓展应用场景，提升国际竞争力，推动我国聚丙烯产业从“规模扩张”向“高质量发展”转型，为化工产业升级提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]侯永斌,郭飘.浅谈APC技术在烯烃二分公司聚丙烯装置的实施[J].化工设计通讯,2024,50(12):49-52.
- [2]王玲玲,冯园丽,李颖,等.优化聚丙烯催化剂浆液中镁含量的测定方法研究[J].石油化工应用,2024,43(06):104-107.
- [3]赵明,李丽.聚丙烯催化剂的性能评价与优化[J].高分子材料科学与工程, 2021, 37(5):30-37.
- [4]王鹏,张晓梅.催化剂在聚丙烯合成中的关键作用机制[J].化工科技, 2020,39(8):12-18.