

化工新材料中试放大及工业化应用可行性研究

邢天宇¹ 曹夕涛²

1. 香港理工大学大亚湾研究院, 广东 惠州 516083

2. 埃克森美孚(惠州)化工有限公司, 广东 惠州 516083

[摘要]化工新材料的小试到中试放大的过程就是由科研开发到产业化的过渡阶段,而这一过程的成功与否也意味着新产品能否真正实现产业化生产。文中针对中试放大与工业化应用可行性这一课题开展研究,从中试放大条件具备与否、工艺工程化的主要难题、工业化应用评价指标体系、产业化推广应用方案四个方面进行阐述。通过研究得出结论:小试到中试放大的主要问题是放大效应的问题,即如何在多重限制条件下实现最优的放大效果。目前我国化工新材料行业正处在由“跟跑”向“并跑”,局部“领跑”的重要转变阶段,需要建立系统的中试放大规模技术和体系以及综合性评估指标,破解科技成果转移转化的“最后一公里”。文中所提出中试平台搭建思路,工程放大技术策略,产业链联合方式以及风险管理机制均可作为类似项目的工业化进程决策依据。

[关键词]化工新材料; 中试放大; 放大效应; 工业化应用; 可行性评价

DOI: 10.33142/sca.v9i3.19359

中图分类号: TQ226

文献标识码: A

Feasibility Study on Pilot Magnification and Industrial Application of New Chemical Materials

XING Tianyu¹, CAO Xitao²

1. Daya Bay Research Institute, the Hong Kong Polytechnic University, Huizhou, Guangdong, 516083, China

2. Exxon Mobil (Huizhou) Chemical Co., Ltd., Huizhou, Guangdong, 516083, China

Abstract: The process of small-scale to pilot magnification production of new chemical materials is a transitional stage from scientific research and development to industrialization, and the success or failure of this process also means whether the new product can truly achieve industrial production. The article focuses on the feasibility of pilot magnification and industrial application, and elaborates on four aspects: whether the conditions for pilot magnification are met, the main challenges of process engineering, the evaluation index system for industrial application, and the promotion and application plan for industrialization. Through research, it is concluded that the main issue in scaling up from small-scale to pilot magnification is the amplification effect, that is, how to achieve the optimal amplification effect under multiple constraints. At present, Chinese chemical new materials industry is in an important stage of transformation from "following" to "running in parallel" and "leading" locally. It is necessary to establish a systematic pilot magnification technology and system, as well as comprehensive evaluation indicators, to crack the "last mile" of scientific and technological achievement transfer and transformation. The ideas proposed in the article for building a pilot platform, engineering scaling up technology strategies, production chain collaboration methods, and risk management mechanisms can all serve as decision-making basis for the industrialization process of similar projects.

Keywords: chemical new materials; pilot magnification; amplification effect; industrial application; feasibility evaluation

引言

目前中国正处于由化工大国迈向化工强国的历史阶段,化工新材料已经从宏观上的“配套材料”变为支撑新一代战略性新兴产业发展的基本骨架,在产业结构方面还存在着明显的瓶颈问题,在某些高端聚烯烃、电子化学原料等一些重要的部分国内自给率仅为 60%左右,具有极

大的安全隐患,而中试放大的作用就是连接着实验室研发到生产的桥梁,中试放大的技术体系建设及可行性评估手段的合理性已经成为了化工新材料能否实现产业化的重中之重的工作内容了。本文围绕着中试放大的工程技术可行性进行深入研究,全面解析工艺工程化中遇到的问题,建立起完整的工业应用评估体系,探索加快产业化进程的

方法手段, 希望能够为化工新材料类工程项目的技术转移及产业化推广提供系统的借鉴。

1 中试放大的技术可行性分析

中试放大是把实验室工艺推进到工业生产规模的过程。化工新材料技术产业化一般都要经过“小试-过程放大-中试试验-工业化”的完整技术开发流程。技术可行性研究的主要工作就是要确定实验室结果是否有工程放大的技术和转换前提。

从技术支持方面看, 在试验室的研究工作必须要有一套完整的工艺流程图包含原材料的性质、反应原理、催化剂的选择与性能、产品分离提纯以及纯度的控制等这些主要因素。而中试工作的主要任务就是对工艺条件进行优化、找出存在的问题并解决潜在的风险问题以及研究工艺放大效应等。只有经过小试阶段形成了明确的过程化学知识基础以及得到相应的反应动力学数据之后才能够保证后续的中试放大具有一定的基础条件。

在工艺验证方面, 小试装置要对生产工艺的主要步骤进行仿真, 检验工艺参数在较小规模上的稳定性与重现性, 比如 C8 体系聚烯烃弹性体小试项目中的成功例子, 小试装置上稳定的状态数据作为工艺是否可行的重要判断标准之一, 该项目开发的高温溶液聚合催化剂体系在小试装置上显示出高效的催化活性、低的副产物生成量以及较宽的操作温度区间, 为其后续开发年产 10 万吨级成套技术包提供了有利的支持; 另一个判断技术可行性的角度在于催化剂及核心原材料的放大适应性^[1]。催化材料被称为“化工之芯”, 世界 80% 以上的化工生产都依赖于催化剂的性能革新。催化新材料工艺放大规模平台建设的经验表明, 百公斤/批以上的放大试验需涉及从“原料预处理-成核-表面改性-晶化-浸渍-过滤-干燥-焙烧-后处理-成型”整个工艺流程。“全链条验证法”是能够用于判定技术可行性的实际依据。

2 工艺工程化关键问题研究

2.1 反应过程放大效应分析

放大效应是化工新材料工业化放大过程中遇到的第一个技术难题。传统的釜式反应最大的不足就是反应体积增大以后, 传质、传热效率剧降, 物料混合不均匀, 温度控制无法准确调节, 尤其对于放热反应而言, 参数敏感性和安全性的要求特别严格, 必须有流动过程中的热量交换才能做到一致放大。

放大效应的表现主要有传热速率的变化、搅拌混合作用减弱、反应物浓度差异、驻留时间分布变化等, 在放大阶段所遇到的主要困难有: 热交换速率的变化、搅拌效果

不佳、反应浓度的变化、后处理及提纯困难、工程难题、工艺稳健性要求等, 这些问题最体现在化工新产品合成中的聚合反应、催化反应等领域内。

最近几年, 微工艺技术为消除放大效应提供了一种新方法, 它的基本思想就是“数增不放大”, 即不同于传统的用增大容器体积的方式来增加生产能力, 而采用的是在每一个微通道不变的前提下, 增加微通道数目来达到扩大生产的目的, 微通道大小为亚毫米量级, 提供高高的比表面积 (有 $10000 \sim 50000 \text{m}^2/\text{m}^3$ 的数量级), 传质、传热效率比常规反应器提高上百倍左右。计算流体动力学 (CFD) 技术可以仿真反应器流场特性, 改善剪切、传质、搅拌等条件, 并应用于各种类型的工业放大。表 1 比较了传统釜式反应和微通道反应器之间的传热、传质、持液量以及安全性的一些主要属性。

表 1 传统釜式反应与微反应技术放大特性对比

对比维度	传统釜式反应	微反应技术
比表面积 (m^2/m^3)	约 100~1000	10000~50000
传热效率	较低, 存在温度梯度	极高, 近似等温操作
传质效率	依赖搅拌, 存在混合死区	分子扩散为主, 混合均匀
持液量	大 (数百升至数万升)	小 (毫升级至升级)
放大方式	几何放大 (体积增大)	数量放大 (通道数增加)
本质安全性	较低, 泄漏风险高	很高, 失控后果局限

对比显示, 微反应技术通过对放大原理进行调整从根本上解决了大化工放大中传热传质效率下降的问题, 在强放热、快速反应、易燃易爆化工新材料领域中的工业开发过程中有着重要的作用。

2.2 设备选型与工程配套研究

中试装置所选用的设备直接影响着后续放大工作的质量与进度。化工新材料中试基地的建立经验告诉我们, 模块化思想是当今中试装置设备选择的趋势之一。如五环新材催化新材料过程放大平台进行模块化设计, 可以根据不同种类如金属氧化物、复合氧化物、多级孔材料以及核壳结构材料等催化剂进行不同组合使用。

装置选择主要考虑的是是否适合反应器类型需求、是否具有良好的抗腐蚀性能、是否满足传质、传热需求、物料输送系统是否可靠稳定、分离提纯装置工作效率如何等。对于合成新型材料装置而言, 需要考虑的问题还包括高温高压下装置的密封性、搅拌桨叶对物料是否有过度剪切作用以及脱挥过程效率高低问题^[2]。放大主要是指工程放大、设备确定以及工艺验证、符合标准及降低成本等方面。工程配套还要有自动化控制系统——聚乙烯装置智能化虚

拟工厂的研发表明,在装置的基础上结合企业全流程数字化平台进行催化剂-工艺-产品质量的研究,能够大幅度降低新产品的研发时间。

3 工业化应用可行性综合评价

3.1 技术经济性分析

技术经济性研究作为工业化推广选择的关键基础,在研究体系方面一般由以下几方面组成:投资估算、运行成本核算、投资收益率推算、敏感度检验等。针对化工新材料领域来说,技术经济性存在明显的规模效应敏感差异,即小规模经济效益主要依托于高价销售来实现,而大工业化生产不仅要考虑市场占有率更要关注成本劣势问题,2024年全年的研发投入占营业收入的6%以上远大于传统的化学工业水平,由此可见研发投入的成本在整个的技术经济性评估里面占据了很大的比重。

技术经济性的考量,应关注原料成本所占比例以及供应链的安全稳定情况;单吨投资额高低以及相对行业的投资水平;能耗物耗高低对成本的影响;产品的定价及下游的应用市场的价格之间的契合程度等。专家提议注重低成本路线、选择新材料赛道、加快绿色化数字化转型升级,以此来推动化工产业高质量发展。

3.2 安全与环保风险评估

化工新材料工业化的安全环保风险不能小觑。安全风险评价分为:工艺危险源识别、放热风险分析、装置的安全可靠度计算、操作安全程序制定等方面。传统间歇式生产,持液量大,转化率低,因此化工产品的安全性较低,容易产生大量的排放及泄漏,安全环保事件较多。微反应技术可大幅度减少持液量,实现本征安全化—微反应器持液量很小,一般只有几毫升甚至达到毫升级,即使发生异常反应也不会造成大的损害,在较小的范围内。

环境风险评价包含废水废气废物处理方案及处置措施、清洁生产技术水平、碳排放量测算与降碳措施、环境污染风险等。目前的规定是中试基地中的中试项目可以打包处理办理备案、审批、环评等工作,在一定程度上方便了中试项目的环境审批工作,但是企业的环境保护仍需承担责任。

特别需要注意的是中试项目需要在投入运行前、运行过程中、结束或退出的各个阶段均要严格按照地方安全管理要求执行^[3]。

3.3 市场适应性分析

化工新材料市场的特点是认证时间长,客户粘性强,替代难度大等,在进行市场匹配分析时需要考虑下游行业对于产品的刚需程度及发展情况,竞争对手技术水平以及

价格竞争力,客户认证周期长短,成功率大小,产品是否有差异化特征以及市场细分情况等。部分新材料产业链国产化程度较低,一些核心技术及重要装备还依赖于国外,在国产化进程上还有一定风险。

中国的化工新材料发展道路可分为两个方面:一方面是以传统化工产业来补短板、强弱项、延链条,另一方面是高科技公司的集中攻关,解决关键技术的“卡脖子”的问题。市场契合度分析要针对这两大方面的途径的特点来采取不同的市场切入方式。

3.4 产业化进程中的不确定性分析

产业发展充满不确定性的多种来源。技术方面有催化剂寿命、生产过程稳定程度、产品质量一致性等方面的风险,在市场方面有下游需求不稳定、竞争对手更新换代、客户认证滞后等问题,在政策上有日益严格的环保要求、进出口相关政策调整等无法预料的因素,在资金方面存在投资回报周期过长以及融资困难等问题^[4]。面临重要拐点,中国化工新材料产业已由解决“有没有”的累积阶段转向提升竞争优势与掌控力的关键时期,产业环境的风险也相应提高。

4 推进产业化实施的策略建议

4.1 中试平台建设与工艺优化路径

中试基地是连接实验室研发与工业应用之间的最后一环节,高质量中试基地要有“工艺可行性的论证、参数调整、设备匹配、生产和模拟”的主要作用。建设方式上要以促进化工新材料中试基地的发展为主,围绕如高性能聚烯烃聚合、超纯净化学品提纯、光刻胶树脂制备、维生素及尼龙产业链等关键技术展开;工艺上的改进须构建由小试至过程放大的全过程技术创新链条,实现对工艺参数改进到成套技术方案的研发全过程全覆盖。在中试基地的建设中要做好分工合理化设定,防止出现过度重叠的情况发生,引导头部企业主导形成产业共用平台,减少中小企业中试成本。同时要尽快开展中试数据管理平台的研发工作,对多个批次运转的数据加以归类整理和分析整理,以便后期工业装置工艺包的设计可以有更扎实的数据支持。工艺优化过程中需要加入高通量实验手段在单位时间里试验更多的工艺参数,极大提高了由实验室到中试的过程效率。在公辅设施方面,中试基地需要提供完善的给排水、供电、供汽、供风、消防、通信、储运、检维修、分析检测等解决方案。

4.2 工程放大技术方案设计

工程放大的技术路线应当充分兼顾工艺稳定、设备安全以及经济效益三个方面的要求,在放大方式上包括有经

验放大法、相似放大法及数学模拟放大法,需要根据不同的反应体系、工艺特点来选取合适的放大方式;工程放大设计过程应该集成连续流动微反应器、CFD 计算流体力学模拟、过程强化等新技术方法;科学研究的方式已经由过去的传统的“中试反复”演变为“数字模拟+中试实验”,应加快数字化的设计工具引入到工程放大中去。即要构建实验室动力学研究模型-中试规模模拟模型-工业放大设计模型的多层次放大规模设计程序,在过程模拟软件的基础上,预测不同放大倍数下的重要变量并予以验证。对多相反应系统而言,必须重视界面表面积变化及传递系数的关系模型,依靠冷却模型试验建立可靠的放大准则,减少热态放大试错工作量。

4.3 产业链协同与合作模式

化工新材料产业化需多方共同推进,应倡导龙头企业与高等院校、研究机构以及上下游相关企业开展产学研用一体的合作模式。在合作方式上可以选择共建中试基地、相互进行研发合作和技术转移、授权等。精细化工和新材料中试平台的价值是实现中试验证、工程放大、产业化发展的全流程创新体系,解决目前普遍存在的“小试成功,中试困难,量产失败”的问题,可尝试探索建立“公共中试”的思路,政府或者大的企业投资建设中试设备,为区域内的中小型企业提供开放性的中试服务,并根据使用的时长或者工艺复杂程度来收费^[5]。与此同时要建立起技术成果的合作双方确权及利益分配方式来防止因为知识产权问题而造成中试产品的转化中断。上中下游产业一起进行从单体、聚合物到改性的全流程测试以保证新材料通过了最终用户的鉴定之后才开始大生产线建设工作。

5 结束语

化工新材料中试放大及工业化应用可行性分析是一门综合性科学,包含了技术可行性、工艺工程化、综合评价以及实施策略等各个方面。中试放大作为实验研发与产业化应用间的桥梁,在很大程度上影响着科研成果转化为生产力的速度及质量,当下中国化工新材料产业正处在从投资带动到创新驱动转换的新阶段,产业的发展动力也将由扩大生产规模转变为自主创新和技术链协作。在这个过程中,中试平台的整体部署、放大工艺的技术升级、综合评估方式的标准化建立以及规模化实施方案的设计都成为支持化工新材料产业化的有力保障,在今后的十五五期间,由于中试放大技术体系的不断完善以及产业化实施方案越来越明确,化工新材料将在重要方面取得新的进展,从而为战略性新兴产业的发展奠定更好的原材料基础。

[参考文献]

- [1]陈会敏.中国精细化工产业发展现状及展望[J].精细与专用化学品,2025,33(11):61-63.
 - [2]戴家权,方晨.化工新材料产业须加快支撑新兴领域创新突破[J].中国石化,2026,43(3):33-36.
 - [3]DB4413/T 54-2024 惠州市《化工园区中试基地、中试项目安全管理规范》[Z].
 - [4]佚名.化工新材料“十五五”聚焦三大方向[J].浙江化工,2025,56(4):44.
 - [5]王良玉,曹辉,谭天伟.基于微生物发酵构建生物基材料及单体模块[J].化工进展,2025,44(5):2394-2406.
- 作者简介:邢天宇(1989—),男,汉族,辽宁大连人,高级工程师,研究生学历,香港理工大学大亚湾研究院项目经理。主要负责科技成果转化、小试中试孵化。