

# 制备聚乙醇酸的技术经济分析与工业化前景展望

张 强

国能榆林化工有限公司 陕西榆林

**【摘要】**聚乙醇酸属于可降解高分子材料，市场需求呈持续增长态势。乙醇酸甲酯路线是其制备的重要技术方向。本文针对乙醇酸甲酯制备聚乙醇酸的技术瓶颈、经济可行性及工业化路径开展研究，明确单体提纯与聚合过程调控是技术瓶颈的核心环节，工艺优化是提升经济可行性的关键途径，并提出包含反应器选型、流程集成在内的工业化实施方案。本研究可为该技术的工业化转化提供技术支撑与理论参考，助力聚乙醇酸产业实现规模化发展。

**【关键词】**乙醇酸甲酯；聚乙醇酸；工业化；技术瓶颈；经济可行性

**【收稿日期】**2025 年 11 月 6 日 **【出刊日期】**2025 年 12 月 8 日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250080

## Techno-economic analysis and industrialization prospects of polyglycolic acid production

Qiang Zhang

China Energy Yulin Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi

**【Abstract】** Polyglycolic acid (PGA) is a biodegradable polymer whose market demand is steadily increasing. The methyl glycolate route represents a key technological pathway for its production. This study examines the technical bottlenecks, economic feasibility, and industrialization roadmap for PGA synthesis from methyl glycolate. It identifies monomer purification and polymerization-process control as the core technical bottlenecks, and concludes that process optimization is the critical lever for improving economic viability. An industrial implementation plan encompassing reactor selection and process integration is proposed. The findings provide both technical support and theoretical guidance for commercial deployment of the technology, facilitating large-scale development of the PGA industry.

**【Keywords】** Methyl glycolate; Polyglycolic acid; Industrialization; Technical bottleneck; Economic feasibility

全球“双碳”目标推进与环保法规收紧背景下，可降解高分子材料已成传统塑料替代核心方向。聚乙醇酸生物降解性与力学性能优异，包装、医用等领域应用前景广阔。聚乙醇酸制备技术中，乙醇酸甲酯路线原料适配性强、反应条件温和，关注度高，但技术瓶颈突出、工业化转化受阻问题并存。本文聚焦乙醇酸甲酯制备聚乙醇酸核心问题，探讨技术突破、经济可行及工业化落地路径，为技术产业化进程提供理论与实践支撑。

### 1 乙醇酸甲酯制备聚乙醇酸的技术瓶颈

#### 1.1 乙醇酸甲酯单体提纯的精度控制难题

乙醇酸甲酯单体提纯精度直接决定聚乙醇酸聚合效率与产物性能。工业级原料常含水分、甲醇、二聚体等杂质，这类杂质在聚合中充当链转移剂，破坏分子链增长，造成聚乙醇酸分子量降低且分布变宽。当前精馏提纯工艺受塔板效率限制，难以深度脱除杂质，微量水

分残留就会显著抑制开环聚合反应。提纯温度过高易引发单体自聚，生成低聚物杂质加大提纯难度。现有工艺能耗与提纯精度存在突出矛盾，提升精度会伴随能耗大幅上升，推高单体生产成本，制约后续聚合工艺的经济性。

#### 1.2 聚合反应过程中的分子量分布调控障碍

聚合反应分子量分布调控直接关联聚乙醇酸产品应用性能<sup>[1]</sup>。乙醇酸甲酯开环聚合属逐步增长型反应，催化剂浓度、反应温度、时间等参数的微小波动，都会引发分子量分布剧烈变化。催化剂活性中心分布不均，会造成分子链增长速率差异，形成宽分布聚合物体系。反应温度过高易加速链转移反应，过低则降低反应速率、增加副反应概率。搅拌均匀性不足会形成聚合物微区，后期体系黏度升高、传质效率下降，进一步加剧分子量分布不均，导致产品性能波动较大。

作者简介：张强（1994-）男，汉族，陕西榆林人，助理工程师，本科，研究方向：乙醇酸甲酯制备聚乙醇酸（PGA）。

### 1.3 聚合产物端基封端处理的效率瓶颈

聚合产物端基封端效率直接关联聚乙醇酸热稳定性与耐水解性能<sup>[2]</sup>。聚乙醇酸分子链末端羟基与羧基反应活性较强,高温加工或潮湿环境下易发生降解,造成聚合物分子量下降、性能劣化。当前常用封端剂为酸酐类、异氰酸酯类化合物,封端反应需特定温度与催化剂条件,封端剂却易挥发损失,拉低封端效率。封端反应属可逆反应,平衡难完全向封端产物生成方向移动,残留活性端基仍会引发降解。聚合物体系高黏度特性阻碍封端剂在分子链间扩散,部分端基无法与封端剂充分接触,形成未封端活性位点。封端剂加入量难以精准把控,过量会残留于聚合物中,影响产品纯度与应用安全性,加入量不足则无法实现完全封端,难以满足高端应用领域对聚乙醇酸稳定性的需求。

### 1.4 连续化生产工艺中的设备相容性问题

连续化生产工艺的设备相容性是聚乙醇酸规模化生产的核心障碍。聚合反应体系腐蚀性较强,乙醇酸甲酯单体与聚合产物在高温条件下会腐蚀金属设备,不锈钢反应器长期使用易出现表面腐蚀、金属离子溶出问题,溶出的金属离子会催化聚合物降解,影响产品质量。聚合后期高黏度熔体易粘附设备内壁与管道,形成的积料高温热降解会污染后续产品。常规橡胶密封材料易被溶胀或老化,导致密封失效破坏无氧聚合环境。普通泵体难以适配高黏度熔体输送,专用设备则会增加工业化投入成本。

## 2 乙醇酸甲酯制备聚乙醇酸的经济可行性

### 2.1 原料乙醇酸甲酯的市场价格波动影响分析

原料乙醇酸甲酯市场价格波动影响分析需聚焦产业链上下游联动机制,从原料供应端生产工艺差异切入,煤基合成与生物质发酵路线的技术成熟度直接决定基础产能与成本基线,不同路线产能释放节奏差异引发市场供需阶段性失衡,诱发价格波动<sup>[3]</sup>。上游煤化工行业政策调控与生物质原料种植周期变化,通过原料成本传导影响市场定价,下游聚乙醇酸等聚合物产品需求扩张或收缩,反向作用于价格走势。价格波动直接影响聚乙醇酸生产成本稳定性,高位运行压缩利润空间,低位则为规模化生产提供成本优势,波动规律研究可为生产企业制定原料采购策略与长期成本控制方案提供理论支撑,助力规避市场价格风险,提升产业链抗风险能力。

### 2.2 聚合工艺的能耗与物耗成本核算

聚合工艺能耗与物耗成本核算需贴合乙醇酸甲酯开环聚合工艺特性,温度、压力、催化剂用量等工艺参

数直接影响能耗与物耗水平<sup>[4]</sup>。反应温度提升可加快聚合速率,却会增加加热系统能耗,还可能引发副反应,加剧原料无效消耗。催化剂催化效率与回收利用率是物耗核算核心,高效催化剂能降低乙醇酸甲酯单耗,回收工艺复杂度则决定回收成本,影响整体物耗成本。聚合反应体系搅拌功率消耗与反应时间的匹配性需精准核算,搅拌功率不足导致反应体系混合不均,延长反应时间推高能耗,过高则造成能源浪费。聚合过程物耗核算可通过原料单耗公式量化:

$$C_{\text{单耗}} = \frac{M_{\text{原料总投入}} - M_{\text{回收原料}}}{M_{\text{聚乙醇酸产物}}}$$

式中,  $C_{\text{单耗}}$  为制备单位质量聚乙醇酸的乙醇酸甲酯单耗,  $M_{\text{原料总投入}}$  为聚合反应投入的乙醇酸甲酯总质量,  $M_{\text{回收原料}}$  为分离提纯环节回收并可循环利用的乙醇酸甲酯质量,  $M_{\text{聚乙醇酸产物}}$  为最终获得的合格聚乙醇酸产物质量。此外,聚合过程溶剂回收能耗属核算重点,溶剂回收率与回收工艺能效水平直接影响总能耗。对各工艺环节能耗与物耗精细化核算,明确聚合工艺成本控制点,为工艺参数优化与节能降耗技术研发提供数据支撑,推动聚合工艺向低成本、高效率方向升级。

### 2.3 产物分离提纯环节的成本优化空间评估

产物分离提纯环节成本优化空间评估需围绕聚乙醇酸粗产物分离提纯工艺,粗产物中残留未反应单体、催化剂、低聚物等杂质的分离难度决定提纯工艺成本<sup>[5]</sup>。沉淀法、精馏法、膜分离法等不同提纯工艺成本构成差异显著,沉淀法溶剂消耗成本较高,精馏法能耗成本占比大,膜分离法设备投资成本偏高。温度、压力、流速等操作参数影响分离效率与产品纯度,参数优化可在保证纯度前提下降低分离成本,调整精馏塔回流比即可提升单体回收率并降低能耗<sup>[4]</sup>。提纯过程中杂质资源化利用潜力是成本优化重要方向,分离出的未反应单体重新回用于聚合反应可降低原料消耗成本,低聚物降解回收工艺研发能进一步提升原料利用率。对各提纯工艺成本构成与优化潜力开展系统性评估,可筛选经济高效提纯工艺路线,为聚乙醇酸分离提纯工艺升级改造提供理论依据,提升环节经济性。

### 2.4 规模化生产下的成本分摊效应测算

规模化生产成本分摊效应测算依托规模经济理论,聚焦设备、原料、公用工程等成本要素。设备固定成本随规模扩大摊薄,原料采购规模效应实现降本,公用工程消耗随规模扩大借效率提升减少,连续化生产降低无效消耗。规模化生产的单位产品成本分摊可通过成

本分摊公式量化:

$$C_{\text{单位}} = \frac{C_{\text{固定}}}{Q} + C_{\text{可变}}$$

式中,  $C_{\text{单位}}$  为聚乙醇酸的单位产品成本,  $C_{\text{固定}}$  为生产环节的总固定成本(含设备折旧、管理成本等不随产量变化的成本项),  $Q$  为聚乙醇酸的生产规模,  $C_{\text{可变}}$  为单位产品可变成本(含原料消耗、公用工程消耗等随产量变化的成本项)。此外, 规模化生产下人力资源成本与管理成本分摊比例同步下降, 专业技术与管理人員配置可匹配更大生产规模, 无需同比例增员。各成本要素分摊效应的精准测算, 能明确聚乙醇酸规模化生产临界规模, 为企业产能扩张计划制定提供科学依据, 推动产业向规模化、集约化方向发展。

### 3 乙醇酸甲酯制备聚乙醇酸的工业化路径

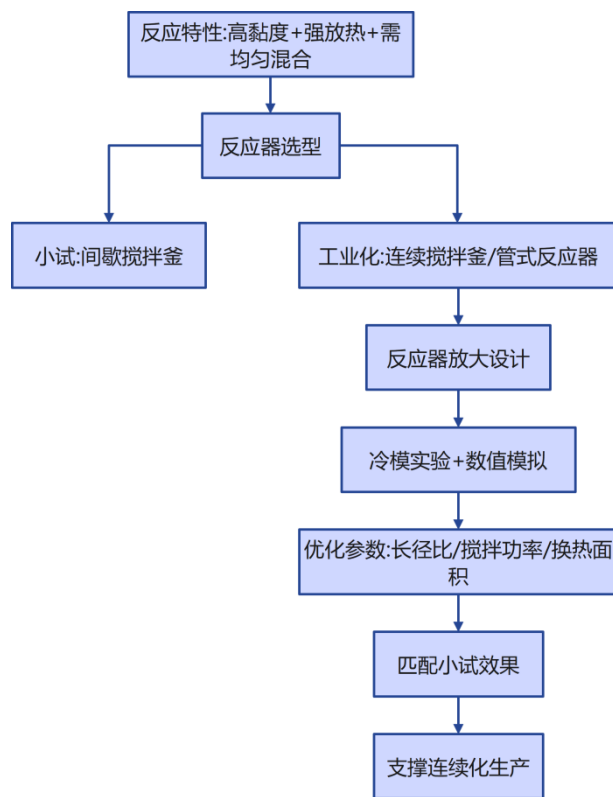


图1 乙醇酸甲酯开环聚合反应器选型及放大流程

### 3.2 工业化生产的工艺流程集成方案

工业化生产工艺流程集成方案需以高效协同为核心, 整合原料预处理、聚合反应、产物分离提纯及副产物回收等关键环节<sup>[7]</sup>。原料预处理需调控乙醇酸甲酯单体纯度与含水率, 为聚合反应提供稳定原料条件, 避免杂质干扰反应进程。聚合反应与产物分离提纯单元采

### 3.1 核心聚合反应器的选型与放大设计

核心聚合反应器选型, 需结合乙醇酸甲酯开环聚合反应特性, 考量反应体系高黏度变化、反应放热控制及物料混合均匀性要求。常用间歇式搅拌釜反应器适用于小试阶段, 无法满足连续化规模化生产需求, 连续搅拌釜反应器与管式反应器成为工业化选型核心方向<sup>[6]</sup>。连续搅拌釜反应器调控搅拌速率与桨叶结构, 保障高黏度体系混合效果; 管式反应器依托连续流道设计强化传质传热效率, 减少返混现象对聚合反应影响。反应器放大设计依托冷模实验数据与数值模拟技术, 通过相似原理确定放大准则, 解决放大过程中传热效率下降、浓度分布不均等问题。对反应器内流场、温度场开展模拟, 优化长径比、搅拌功率及换热面积设计, 确保放大后反应效果与小试阶段一致, 为聚乙醇酸连续化聚合生产提供设备保障, 见图1。

用连续化衔接设计, 通过管道化输送与密闭式连接, 减少物料输送损耗, 降低副反应发生概率。副产物回收单元与主工艺深度融合, 实现未反应单体与溶剂的循环利用。同时优化公用工程系统集成, 集中规划供热、制冷与动力供应, 提升能源利用率, 构建紧凑高效低耗的工业化生产工艺流程。

### 3.3 产物质量标准与检测体系的构建

产物质量标准与检测体系构建需围绕聚乙醇酸应用场景需求,明确分子量、分子量分布、端基含量、热稳定性等关键质量指标控制范围。结合行业规范与下游差异化需求,针对生物医用、包装材料等领域设定分级质量标准,保障产品针对性与适用性。检测体系覆盖生产全流程:原料入厂用气相色谱、高效液相色谱检测乙醇酸甲酯纯度与杂质;聚合过程设在线检测节点监测黏度、温度等参数;成品出厂用凝胶渗透色谱等技术全面检测,建立质量追溯体系,确保产品质量可追溯,为质量稳定控制提供技术支撑。

### 3.4 工业化示范项目的落地实施策略

工业化示范项目落地需兼顾技术可行性与市场适用性,先开展小试与中试验证,依托中试装置考核工艺稳定性、设备可靠性及产品质量一致性,解决小试未暴露的技术问题,输出成熟技术参数<sup>[8]</sup>。项目选址综合考量原料供应、交通物流、公用工程配套及环保要求,优先布局在靠近乙醇酸甲酯原料产地或下游市场的区域,降低运输成本,保障水电汽稳定供应。设备采购安装严格遵循工艺设计,对聚合反应器、精密分离设备等关键设备严格质检调试。项目建设同步配套环保治理设施,制定完善的操作规范与安全管理体系,保障项目稳定合规运行,为后续规模化推广积累实践经验。

## 4 结语

乙醇酸甲酯制备聚乙醇酸技术产业化发展,契合环保需求与材料产业升级方向。本文系统剖析技术核心瓶颈,明确经济可行性关键影响因素,提出针对性工业化实施路径。研究显示,技术瓶颈突破需聚焦单体提纯与聚合调控,经济可行性提升依托工艺优化与规模化效应,工业化落地需强化反应器选型、流程集成等关

键环节。后续持续推进技术迭代与示范项目验证,推动技术实现规模化、低成本生产,助力聚乙醇酸产业高质量发展。

## 参考文献

- [1] 沈赞,张岱,徐晓峰,等.Ni-Ag/SiO<sub>2</sub> 催化草酸二甲酯加氢制乙醇酸甲酯反应机理研究[J].化工学报,2025,76(10):5101-5113.
- [2] 王晓晨.新型煤基乙醇酸甲酯合成技术与应用研究进展[J].现代化工,2024,44(S1):52-58.
- [3] 李秀峥,白富栋,张雷,等.乙醇酸甲酯合成工艺的研究及应用进展[J].低碳化学与化工,2024,49(01):60-69.
- [4] 卞雯,吴鹏,袁岚,等.可生物降解塑料前驱体乙醇酸甲酯催化剂研发[J].工业催化,2023,31(02):57-60.
- [5] 张大洲,卢文新,商宽祥,等.草酸二甲酯加氢制乙醇酸甲酯反应网络分析及其多相加氢催化剂研究进展[J].化工进展,2023,42(01):204-214.
- [6] 高姣,杨帅龙.聚乙醇酸的合成及工业化进展[J].河南化工,2022,39(04):8-10.
- [7] 王征,武朦朦,宋有为,等.焙烧温度对 Cu/SiO<sub>2</sub> 纳米管催化剂催化草酸二甲酯加氢制乙醇酸甲酯性能的影响[J].天然气化工—C1 化学与化工,2022,47(05):84-91.
- [8] 陈龙飞.草酸二甲酯加氢制乙醇酸甲酯工艺条件优化[J].辽宁化工,2022,51(12):1730-1733.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**