

# 微生物发酵法生产大宗化工产品的工艺优化

李香霖

伊犁川宁生物技术股份有限公司 新疆伊宁 835000

**摘要：**随着全球绿色化工产业的快速发展，微生物发酵法因具备环境友好、原料来源广泛等优势，在大宗化工产品生产领域的应用日益广泛。然而，当前该技术在生产效率、产物转化率及成本控制等方面仍存在不足，工艺优化成为提升其产业化竞争力的关键。本文围绕微生物发酵法生产大宗化工产品的工艺优化展开研究，从菌株选育、培养基优化、发酵过程参数调控及下游分离纯化工艺改进四个核心维度，系统分析各环节对发酵效率与产品质量的影响机制，提出针对性的优化策略，旨在为推动微生物发酵技术在大宗化工产品生产中的高效应用提供理论参考与实践指导。

**关键词：**微生物发酵；大宗化工产品；工艺优化；菌株选育

在“双碳”目标与绿色制造理念的推动下，传统化工生产模式因高能耗、高污染的弊端逐渐面临转型压力，而微生物发酵法凭借其低碳、可持续的特性，成为大宗化工产品（如乙醇、乳酸、柠檬酸等）生产的重要替代技术。但受限于菌株性能、发酵条件控制等因素，现有发酵工艺普遍存在产物得率低、生产周期长等问题，制约了其规模化应用。因此，开展微生物发酵工艺优化研究，对提升产品竞争力、推动化工产业绿色升级具有重要现实意义。本文基于现有研究成果，从多维度剖析工艺优化路径，为相关技术研发与产业实践提供支撑。

## 一、微生物发酵法生产大宗化工产品的工艺优化核心维度

### 1. 菌株选育与改造优化

菌株是微生物发酵过程的核心要素，其性能直接决定发酵效率、产物种类及转化率。优质菌株需具备生长速率快、底物利用率高、目标产物合成能力强及抗逆性（如耐高糖、耐高产物浓度、耐酸碱）强等特性。当前菌株优化主要通过传统育种与现代分子生物学技术结合实现。

传统育种技术中，诱变育种是常用手段，通过物理（如紫外线、 $\gamma$ 射线）、化学（如亚硝基胍、甲基磺酸乙酯）诱变剂处理微生物，诱发基因突变，筛选具有优良性状的突变株。该方法操作简便、成本较低，在早期菌株改良中广泛应用，例如在乙醇发酵菌株酿酒酵母的优化中，通过紫外线诱变筛选获得的突变株，其乙醇耐受性与产率较原始菌株显著提升。但传统育种存在随机性

强、筛选效率低的问题，难以精准定向改良菌株性状。

现代分子生物学技术的发展为菌株定向改造提供了有力工具，基因工程、代谢工程技术成为菌株优化的主流方向。基因工程技术通过克隆、表达关键功能基因，增强目标代谢途径强度，例如在乳酸发酵中，将乳酸脱氢酶基因导入大肠杆菌，可显著提高乳酸合成效率；代谢工程则通过调控微生物代谢网络，减少副产物生成，优化碳流分配，例如在柠檬酸发酵菌株黑曲霉的改造中，通过敲除副产物异柠檬酸脱氢酶基因，阻断异柠檬酸分解途径，使碳流更多流向柠檬酸合成，提升柠檬酸产率<sup>[1]</sup>。

### 2. 培养基优化

培养基作为微生物生长与产物合成的营养来源，其组成（碳源、氮源、无机盐、生长因子等）与配比直接影响微生物代谢活动，进而决定发酵效率与产物质量。培养基优化的核心目标是在满足微生物生长需求的前提下，最大限度提升目标产物产率，同时降低培养基成本，提高产业化经济性。

碳源是微生物代谢的主要能量来源与碳骨架提供者，其种类与浓度对产物合成影响显著。不同微生物对碳源的利用能力存在差异，例如酿酒酵母偏好葡萄糖、蔗糖等易利用碳源，而某些纤维素分解菌可利用秸秆、木屑等木质纤维素类碳源。在大宗化工产品生产中，选择廉价、易得的碳源是降低成本的关键，例如以玉米淀粉、甘蔗渣、废糖蜜等农业废弃物或副产品作为碳源，不仅可降低原料成本，还能实现资源循环利用。此外，碳源浓度需合理控制，过低会导致微生物生长不足、产物合

成受阻, 过高则可能引发高渗透压抑制微生物生长, 例如在乙醇发酵中, 葡萄糖浓度过高会导致酵母细胞脱水, 抑制乙醇合成, 因此需通过梯度实验确定最佳碳源浓度, 平衡微生物生长与产物合成需求。

氮源是微生物合成蛋白质、核酸等细胞结构物质的重要原料, 其种类(有机氮源、无机氮源)与浓度对微生物生长速率及产物合成途径具有调控作用。有机氮源(如酵母提取物、蛋白胨、豆粕粉)不仅提供氮元素, 还含有生长因子, 可促进微生物生长与产物合成, 适用于生长需求复杂的微生物; 无机氮源(如硫酸铵、硝酸铵)成本较低, 但营养单一, 适用于代谢途径简单的微生物。在培养基优化中, 需根据微生物特性与产物合成需求选择氮源类型, 例如在谷氨酸发酵中, 有机氮源(如玉米浆)可促进谷氨酸合成, 而无机氮源(如氯化铵)则更适合菌体生长阶段。

无机盐与生长因子虽在培养基中含量较低, 但对微生物代谢具有重要调节作用。无机盐(如钾、镁、磷、铁离子)参与酶活性调节、细胞渗透压维持及代谢产物合成, 例如镁离子是许多酶的辅酶, 可促进糖酵解途径关键酶活性, 提升产物合成效率; 磷酸盐可调节细胞代谢速率, 过高会抑制某些产物(如柠檬酸)合成, 过低则影响菌体生长。生长因子(如维生素、氨基酸)是微生物自身无法合成或合成量不足的微量营养物质, 需从培养基中获取, 例如在某些乳酸菌发酵中, 维生素B族可促进菌体生长与乳酸合成。因此, 在培养基优化中, 需通过单因素实验、正交实验或响应面法等方法, 确定无机盐与生长因子的最佳添加量, 避免因营养缺乏或过量抑制发酵过程。

### 3. 发酵过程参数调控

发酵过程参数是影响微生物代谢状态与产物合成的重要外部因素, 主要包括温度、pH值、溶解氧、搅拌速率、发酵时间等。合理调控这些参数, 可优化微生物生长环境, 增强目标产物合成能力, 提升发酵效率与产物质量稳定性。

温度对微生物生长与酶活性具有显著影响, 不同微生物具有特定的最适生长温度与最适产物合成温度。例如, 中温微生物(如酿酒酵母、大肠杆菌)的最适生长温度通常为25-37℃, 而高温微生物(如嗜热链球菌)可在45-55℃下生长。在发酵过程中, 需根据微生物特性与产物合成需求分阶段调控温度: 菌体生长阶段采用最适生长温度, 促进菌体快速增殖; 产物合成阶段切换

至最适产物合成温度, 提升产物合成效率。

pH值是发酵环境的重要化学参数, 直接影响微生物细胞膜通透性、酶活性及代谢途径方向。不同微生物对pH值的适应范围不同, 例如细菌偏好中性或弱碱性环境(pH 6.5-7.5), 真菌偏好酸性环境(pH 4.0-6.0)。在发酵过程中, 微生物代谢会产生酸性或碱性物质, 导致发酵液pH值发生变化, 进而影响发酵效率。例如在乳酸发酵中, 乳酸菌代谢产生乳酸会使发酵液pH值下降, 过低的pH值会抑制乳酸菌生长与乳酸合成, 因此需通过添加中和剂(如碳酸钙、氢氧化钠)或采用pH自动控制系统, 将发酵液pH值维持在适宜范围。此外, 不同产物合成对pH值的要求存在差异, 例如在青霉素发酵中, 酸性环境有利于青霉素G合成, 而中性环境则促进青霉素V合成, 因此需根据目标产物特性调控pH值, 定向优化产物合成。

溶解氧是好氧微生物发酵过程的关键限制因素, 直接影响微生物呼吸代谢与能量供应, 进而调控产物合成途径。在好氧发酵中, 溶解氧不足会导致微生物呼吸受阻, 切换至无氧代谢途径, 产生副产物(如乙醇、乙酸), 降低目标产物产率; 溶解氧过高则会增加能耗, 且可能对某些厌氧或微好氧微生物产生抑制作用。因此, 需根据微生物需氧特性与产物合成需求, 通过调控搅拌速率、通气量、发酵罐压力等方式优化溶解氧浓度。例如在谷氨酸发酵中, 菌体生长阶段需较高溶解氧(20%-30%饱和度)以促进菌体增殖, 而谷氨酸合成阶段需适当降低溶解氧(5%-10%饱和度), 通过控制溶解氧可定向调控代谢流向谷氨酸合成。此外, 搅拌速率不仅影响溶解氧传递, 还会影响发酵液混合均匀性与菌体剪切力, 过高的搅拌速率可能导致菌体损伤, 因此需综合考虑溶解氧需求与菌体耐受性, 确定最佳搅拌速率<sup>[2]</sup>。

发酵时间是发酵过程的重要调控参数, 直接影响产物积累量与生产效率。发酵时间过短, 微生物尚未充分合成目标产物, 导致产物得率低; 发酵时间过长, 微生物可能进入衰亡期, 分解目标产物或产生副产物, 降低产物质量与产率。因此, 需通过监测发酵过程中菌体浓度、底物消耗速率、产物积累速率等参数, 确定最佳发酵终点。例如在乙醇发酵中, 当发酵液中葡萄糖浓度降至一定阈值(如0.5%以下)、乙醇浓度达到峰值时, 即可终止发酵, 避免过度发酵导致乙醇分解。此外, 发酵时间的优化需结合生产周期与成本控制, 在保证产物质量与产率的前提下, 缩短发酵时间, 提高设备利用率与生产效率。

#### 4. 下游分离纯化工艺改进

下游分离纯化工艺是微生物发酵法生产大宗化工产品的重要环节，其目的是从发酵液中提取、纯化目标产物，去除菌体、杂质及副产物，获得符合质量标准的产品。下游工艺的效率与成本直接影响产品的产业化竞争力，据统计，下游分离纯化成本占发酵法生产总成本的40%~70%，因此优化下游工艺对降低生产成本、提升产品质量具有重要意义。

发酵液预处理是下游分离纯化的第一步，主要目的是去除菌体细胞、悬浮颗粒及部分杂质，为后续纯化工艺奠定基础。常用的预处理方法包括离心分离、过滤、絮凝沉淀等。离心分离通过离心力作用分离菌体与发酵液，适用于菌体密度较大的发酵液，但能耗较高；过滤（如板框过滤、膜过滤）通过过滤介质截留菌体与杂质，膜过滤技术（如微滤、超滤）具有分离效率高、常温操作、无二次污染等优势，在发酵液预处理中应用日益广泛，例如采用微滤膜去除乳酸发酵液中的菌体，可显著提升后续纯化效率。

提取与纯化是获取高纯度目标产物的核心环节，不同大宗化工产品需根据其物理化学性质（如溶解性、沸点、极性）选择适宜的提取纯化方法。对于水溶性产物（如乳酸、柠檬酸），常用的提取方法包括离子交换法、溶剂萃取法、电渗析法等。离子交换法通过离子交换树脂吸附目标产物，再经洗脱获得粗产物，具有选择性高、操作简便等优势，但树脂再生成本较高；溶剂萃取法利用目标产物在不同溶剂中溶解度的差异实现分离，需选择高效、低毒、易回收的萃取剂，例如在柠檬酸提取中，采用叔胺类萃取剂可有效分离柠檬酸；电渗析法通过离子交换膜的选择透过性，在电场作用下实现目标产物与杂质的分离，具有能耗低、无污染等优势，适用于有机酸、氨基酸等带电产物的纯化<sup>[3]</sup>。

对于挥发性产物（如乙醇），蒸馏法是传统的提取纯化方法，通过利用产物与杂质沸点的差异，经精馏获得高纯度产品。但蒸馏法能耗较高，为降低成本，可采用节能蒸馏技术（如多效蒸馏、热泵蒸馏）或结合渗透汽化膜技术，通过渗透汽化膜优先分离乙醇，再经精馏提纯，显著降低能耗。此外，结晶法适用于溶解度随温度变化较大的产物（如谷氨酸、赖氨酸），通过控制温度、

浓度等条件，使目标产物结晶析出，再经离心、干燥获得产品，具有操作简单、产品纯度高优势。

产品精制与干燥是下游工艺的最后环节，主要目的是进一步去除微量杂质，获得符合质量标准的产品，并通过干燥降低产品水分含量，提高稳定性。精制方法包括重结晶、色谱分离等，重结晶通过溶解、结晶过程进一步纯化产品，适用于对纯度要求较高的产品；色谱分离（如高效液相色谱）具有分离效率高、选择性强等优势，适用于微量杂质的去除。干燥方法需根据产品特性选择，例如对热敏性产品（如某些氨基酸），需采用真空干燥、冷冻干燥等低温干燥技术，避免产品变性；对非热敏性产品（如乙醇、柠檬酸），可采用喷雾干燥、流化床干燥等高效干燥技术，提高干燥效率。

#### 结语

微生物发酵法生产大宗化工产品是推动化工产业绿色转型的重要方向，而工艺优化是提升该技术产业化水平的关键。本文从菌株选育、培养基优化、发酵过程参数调控及下游分离纯化工艺四个核心维度，系统分析了各环节的优化策略与方法。未来，随着分子生物学、生物工程及过程工程技术的不断发展，微生物发酵工艺优化将朝着精准化、智能化方向发展，例如通过合成生物学技术构建高效工程菌株，结合人工智能与传感器技术实现发酵过程的实时监测与智能调控，进一步提升发酵效率与产物质量。同时，需加强多学科交叉融合，推动工艺优化与资源循环利用、低碳生产相结合，为大宗化工产品的绿色、高效生产提供更有力的技术支撑，助力“双碳”目标实现与化工产业高质量发展。

#### 参考文献

- [1] 万景瑞, 蒋鹏飞, 史冠莹, 等. 乳酸菌接种发酵生产辣椒酱的工艺优化[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(2): 84-92.
- [2] 刘璐, 李建婷, 刘林培, 等. 响应面法优化运动发酵单胞菌发酵面包工艺[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(9): 137-143.
- [3] 高文静. 基于恒温和菌种强化发酵的高含量乙酸乙酯清香型白酒生产工艺的优化[D]. 山西农业大学, 2023.