

# 萃取工艺中相分离效率的关键影响因素分析

白永波 余 俭

陕煤集团榆林化学有限责任公司 陕西 榆林 719000

**【摘要】**：萃取作为化工、冶金、医药等领域分离提纯的核心单元操作，其分离效率直接取决于“萃取传质-相分离”两大环节的协同效果。相分离作为萃取过程的收尾步骤，负责实现两相的彻底分离，其效率不仅影响目标产物的回收率与纯度，还直接关系到工艺能耗、设备利用率及环保成本。本文系统梳理了萃取工艺中影响相分离效率的核心因素，从体系固有性质、操作工艺参数、设备结构特性三个维度展开深入分析，结合实际工业案例探讨各因素的作用机制与影响规律，并通过表格形式量化呈现关键参数的调控范围及优化方向。最后针对工业生产中常见的相分离难题，提出针对性的优化策略，为萃取工艺的工程设计、操作优化及设备升级提供理论依据与实践指导。

**【关键词】**：萃取工艺；相分离效率；影响因素；液-液分离；优化策略

DOI:10.12417/3041-0630.26.04.024

## 1 萃取相分离效率的关键影响因素分析

萃取相分离本质上是分散相液滴在连续相中通过沉降（或浮升）、聚并形成连续相的过程，其核心驱动力是两相的密度差，而阻力则来自体系粘度、界面张力等因素。根据影响来源的不同，可将关键因素分为体系固有性质、操作工艺参数、设备结构特性三大类。

### 1.1 体系固有性质的影响

体系固有性质是指萃取过程中涉及的两相物理化学性质，是决定相分离效率的基础因素，主要包括密度差、粘度、界面张力及体系稳定性（是否易乳化）。

（1）两相密度差：密度差是分散相液滴在连续相中发生沉降或浮升的根本动力，根据斯托克斯定律，分散相液滴的沉降速度与两相密度差成正比，与连续相粘度成反比，两相密度差越大，液滴沉降速度越快，分层时间越短，相分离效率越高。例如，在采用煤油作为稀释剂的有机相萃取体系中，若通过添加高密度组分提高有机相密度，可缩小与水相的密度差，导致分层时间延长；反之，若降低有机相密度（如增加轻质稀释剂比例），则可加速相分离。工业中，通过调节稀释剂种类或浓度改变两相密度差，是优化相分离效率的常用手段。

（2）体系粘度：体系粘度直接影响液滴运动的阻力，根据斯托克斯定律，连续相粘度越高，液滴沉降阻力越大，分层速度越慢。同时，高粘度体系会阻碍液滴之间的碰撞与聚并，导致分散相液滴难以形成大颗粒，进一步延长相分离时间。体系粘度受温度、组分浓度等因素影响，例如在萃取稀土元素时，有机相中的萃取剂浓度过高会导致粘度上升，此时需通过添加稀释剂降低粘度；水相中的溶质浓度增加也会提高水相粘度，需通过控制料液浓度优化相分离效果。此外，温度升高可降低两相粘度，因此工业中常通过加热萃取体系缩短分层时间，但

需兼顾萃取剂稳定性与能耗成本。

（3）界面张力：界面张力是两相界面处分子间作用力的体现，其大小直接影响分散相液滴的聚并行为。界面张力越高，液滴的表面自由能越大，越容易发生聚并形成大液滴，从而加速相分离；反之，界面张力过低时，分散相液滴易保持细小颗粒状态，甚至形成稳定的乳化液，导致相分离困难。界面张力可通过添加表面活性剂或调节体系组分进行调控。例如，在某些萃取体系中，料液中的表面活性物质会降低两相界面张力，导致乳化，此时需添加破乳剂提高界面张力，破坏乳化层；而在需要强化传质的阶段，有时会添加乳化剂降低界面张力，但需严格控制用量，避免影响后续相分离。

（4）体系稳定性与乳化倾向：体系的稳定性主要取决于是否易形成乳化液。乳化是指一种液体以微小液滴均匀分散在另一种不相溶的液体中形成的热力学不稳定体系，但由于界面的存在，实际中常表现为动力学稳定，难以快速分层。导致乳化的主要原因包括体系中存在表面活性物质（如料液中的杂质、萃取剂降解产物），形成稳定的界面膜；

分散相液滴粒径过小（ $<10\mu\text{m}$ ），布朗运动剧烈，难以聚并；两相粘度差过大，液滴运动受阻。乳化是工业萃取中相分离效率低下的主要诱因，例如在处理含油污废水的萃取过程中，油污中的表面活性剂易导致水相乳化，使有机相夹带量从0.5%升至5%以上，严重影响分离效果。

### 1.2 操作工艺参数的影响

操作工艺参数是工业生产中可灵活调控的因素，通过优化操作条件可显著改善相分离效率，主要包括搅拌强度与时间、分散相比、温度、静置时间等。

（1）搅拌强度与搅拌时间：搅拌是实现两相充分接触、强化传质的关键操作，但搅拌强度与时间对相分离效率的影响

具有“双重性”。搅拌强度不足或时间过短，两相接触不充分，传质效率低，且分散相液滴粒径过大，虽分层快但可能导致传质不彻底；搅拌强度过高或时间过长会将分散相破碎为过小的液滴（ $<5\mu\text{m}$ ），增加液滴表面积和界面能，易形成乳化，显著延长分层时间，同时可能导致萃取剂降解或体系温度升高。工业实践表明，搅拌强度存在“最优区间”，例如在混合澄清槽萃取中，搅拌转速通常控制在 200-500r/min，过高（如 $>600\text{r}/\text{min}$ ）会导致相分离时间从 10min 延长至 30min 以上。因此，需根据体系性质（如粘度、界面张力）调整搅拌参数，在保证传质效率的前提下，尽量减少对相分离的负面影响。

(2) 分散相比：分散相比是指有机相（O）与水相（A）的体积比，其大小直接影响分散相在体系中的占比及液滴的聚并环境。分散相比过小分散相液滴浓度过低，碰撞概率小，聚并速度慢，分层时间延长；分散相比过大分散相可能从“分散相”转变为“连续相”，导致相态反转，破坏原有分离平衡，同时易形成“拥挤效应”，液滴运动受阻，夹带量增加。不同萃取体系的最优分散相比不同，例如在铜萃取中，O/A 通常控制在 1:1-2:1，而在稀土萃取中，由于目标组分浓度低，O/A 可提高至 3:1-5:1，但需配合设备结构优化以避免相分离问题。

(3) 温度：温度通过影响体系粘度、密度差、界面张力等固有性质间接影响相分离效率，降低两相粘度，提高液滴沉降速度；缩小两相密度差，降低沉降动力；降低界面张力，可能增加乳化风险。与上述效果相反，虽密度差增大，但粘度上升可能成为主导因素，导致分层时间延长。因此，温度对相分离的影响存在“最优值”，需通过实验确定。例如，在 N235 萃取盐酸体系中，温度从 20°C 升至 35°C 时，分层时间从 15min 缩短至 8min；但超过 40°C 后，界面张力显著降低，乳化倾向增加，分层时间反而延长至 12min。

(4) 静置时间：静置时间是相分离的必要条件，足够的静置时间可保证分散相液滴充分聚并与沉降。静置时间过短，两相未完全分离，夹带量超标；静置时间过长，会降低设备处理能力，增加能耗。工业中，静置时间通常根据分层速度确定，一般控制在 5-30min，对于易乳化体系，可适当延长至 30-60min，或配合离心、破乳等辅助手段缩短静置时间。

### 1.3 设备结构特性的影响

萃取设备是实现相分离的载体，其结构设计直接决定了两相的接触方式、停留时间及分离环境，常见的萃取设备包括混合澄清槽、萃取塔、离心萃取器等，不同设备的相分离效率差异显著。

(1) 混合澄清槽的结构影响：混合澄清槽是工业中应用最广泛的萃取设备，由混合室和澄清室组成，其相分离效率主要取决于澄清室的结构设计。澄清室体积越大，两相停留时间

越长，分离越彻底，但设备占地面积大；通常澄清室体积与混合室体积比控制在 3:1-5:1。导流装置设置挡板、导流板可减少澄清室内的涡流，避免已分层的两相再次混合，同时引导分散相液滴向界面聚并。界面高度控制通过堰板调节界面高度，可避免分散相夹带连续相溢出，例如有机相为分散相时，界面高度应控制在澄清室中部偏下，防止有机相从水相出口夹带。

(2) 萃取塔的结构影响：萃取塔（如筛板塔、填料塔、脉冲塔）通过连续相的上升或下降实现相分离，塔径与塔高塔径过大易导致径向流速分布不均，出现“沟流”现象；塔高不足则停留时间过短，分离不彻底。内件结构筛板塔的筛孔尺寸、开孔率影响液滴破碎与聚并；填料塔的填料类型（如波纹填料、鲍尔环）可增加相接触面积，但需避免填料堵塞导致的相分离恶化。脉冲强度脉冲强度过大会加剧液滴破碎，增加乳化风险；过小则传质效率低，需与相分离需求匹配。

(3) 离心萃取器的结构影响：离心萃取器利用离心力强化相分离，适用于密度差小、易乳化的体系。转速越高，离心力越大，相分离效率越高，但能耗也随之增加，且可能导致设备振动；通常转速控制在 2000-5000r/min。分离区的径长比、导流叶片角度影响两相的分离路径，合理设计可减少夹带量。进料位置应与离心力场分布匹配，避免进料冲击破坏分离平衡。

## 2 关键影响因素的量化分析与对比

为直观呈现各因素对相分离效率的影响规律，下表 1 总结了核心影响因素的作用机制、影响趋势及工业调控范围。

表 1 萃取相分离效率核心影响因素的量化分析

影响类别	具体因素	作用机制	影响趋势（↑表示效率提升）	工业调控范围
体系固有性质	两相密度差	决定液滴沉降/浮升动力（斯托克斯定律）	密度差↑→分层时间↓→效率↑	0.05-0.3g/cm <sup>3</sup> （常规体系）
	连续相粘度	增加液滴运动阻力	粘度↑→沉降速度↓→效率↓	0.5-5mPa·s（常温下）
	界面张力	影响液滴聚并能	界面张力↑→液滴聚并快→效率↑；过低易乳化→效率↓	10-50mN/m（液-液体系）
	乳化倾向	表面活性物质形成稳定界面膜，阻	乳化倾向↑→分层时间↑→夹带量↑→效率↓	乳化层厚度 $<5\text{mm}$ （合格标

		碍聚并		准)
设备结构特性	澄清室体积比	影响两相停留时间	体积比(澄清室:混合室)↑→停留时间↑→效率↑; 过高→设备成本↑	3:1-5:1 (混合澄清槽)
	离心转速	提供离心力, 强化分离(离心萃取器)	转速↑→离心力↑→效率↑; 过高→能耗与振动↑	2000-5000r/min
	塔内件结构	影响两相流动与接触方式(萃取塔)	合理设计(如填料类型、筛孔尺寸)→效率↑; 设计不当→沟流/堵塞→效率↓	开孔率 10%-20% (筛板塔)

(续: 表1)

### 3 相分离效率的优化策略

基于上述影响因素分析, 结合工业实践需求, 从“体系优化-操作调控-设备升级”三个层面提出相分离效率的综合优化策略。

#### 3.1 体系性质优化

根据目标组分特性选择合适的萃取剂与稀释剂, 通过调节稀释剂比例(如煤油-氯仿混合稀释剂)调控有机相密度与粘度, 确保两相密度差在 0.1-0.2g/cm<sup>3</sup> 的最优范围; 同时避免使用易降解、易产生表面活性产物的萃取剂, 减少乳化诱因。通过过滤、吸附、调节 pH 等手段去除料液中的表面活性杂质(如有机酸、悬浮颗粒), 例如在湿法冶金萃取前, 采用活性炭吸附料液中的有机杂质, 可降低乳化风险 30% 以上。针对易乳化体系, 添加高效破乳剂(如非离子表面活性剂 Span-80), 通过破坏界面膜促进液滴聚并; 对于低界面张力体系, 可添加少量高界面张力组分(如烷烃类溶剂), 提高相分离速度。

#### 3.2 操作工艺调控

采用变频搅拌装置, 根据体系粘度、分散相比的变化动态调整搅拌转速与时间, 例如在料液粘度升高时, 适当降低转速以避免液滴过细; 同时采用“阶梯式搅拌”(先高速混合传质, 后低速分散减少乳化), 兼顾传质与分离效率。通过夹套加热

或冷却装置, 将体系温度控制在最优区间(25-40°C), 例如在萃取钨矿时, 将温度控制在 35°C, 可使分层时间从 20min 缩短至 12min, 同时避免萃取剂降解。通过在线流量监测系统, 实时调节有机相和水相的进料流量, 确保分散相比稳定在最优范围, 避免因料液浓度波动导致的相态反转。

#### 3.3 设备结构升级

在澄清室内增设倾斜挡板与聚结板, 增加液滴碰撞概率; 采用“多级澄清”设计, 将单一澄清室分为预澄清区、主澄清区和精分离区, 逐步提高分离精度, 可使夹带量降低 40%-60%。将筛板塔的圆孔筛板改为波纹筛板, 减少液滴破碎; 在填料塔中采用金属多孔填料, 提高相接触面积的同时促进液滴聚并; 对于易乳化体系, 将脉冲塔改为转盘萃取塔, 降低乳化风险。对于密度差小(<0.05g/cm<sup>3</sup>)、易乳化的体系(如医药中间体萃取), 采用离心萃取器替代传统设备, 利用离心力强化分离, 可使分层时间从 60min 缩短至 5min 以内, 夹带量降至 0.1% 以下。

#### 3.4 智能化监控与预警

采用界面传感器、浊度计等在线检测设备, 实时监测相分离过程中的界面高度、乳化层厚度、夹带量等参数, 数据传输至中央控制系统进行分析。基于机器学习算法, 构建“影响因素-分离效率”预测模型, 根据在线监测数据自动调整搅拌转速、温度、进料流量等参数, 实现相分离过程的闭环控制。设定关键参数的阈值(如乳化层厚度>5mm 时触发预警), 通过声光报警提醒操作人员及时处理, 避免因相分离故障导致的生产事故。

### 4 结论

相分离效率是衡量萃取工艺性能的核心指标, 其受体系固有性质、操作工艺参数、设备结构特性等多因素的耦合影响。其中, 两相密度差、连续相粘度、界面张力是基础影响因素, 决定了相分离的难易程度; 搅拌强度、分散相比、温度是关键调控因素, 可通过动态优化显著改善分离效果; 设备结构则是相分离的载体, 合理的设计可最大化分离效率。工业实践中, 需结合具体萃取体系的特性, 从“体系优化-操作调控-设备升级-智能监控”四个维度制定综合优化策略: 通过溶剂体系优化与料液预处理从源头降低分离难度; 通过搅拌、温度等操作参数的动态调节实现过程优化; 通过设备结构升级强化分离能力; 通过智能化监控确保工艺稳定运行。

### 参考文献:

[1] 曾清. 钨钼萃取分离工艺中快速反馈“三出口”位置的方法[J]. 稀土, 2000, (06): 30-32.  
 [2] 林颖. 稀土萃取分离工艺中多路加料控制系统[J]. 广东有色金属学报, 2000, (02): 141-144.