

基于离心分离机的高浓度化工废液固液分离工艺 及其经济性分析研究

王景涛（山东鲁北化工建材设计院，山东 滨州 251909）

朱平鑫（山东三岳化工有限公司，山东 滨州 251909）

摘要：固液分离作为废液处理的关键工艺之一，尤其是基于离心分离机的技术，因其高效、节能的特点被广泛应用。然而，如何提高离心分离机的处理效果并优化其经济性，仍是行业面临的挑战。本文提出了一种基于离心分离机的高浓度化工废液固液分离工艺优化方法，旨在提高分离效率并降低运营成本。文章首先分析了设备改进、操作条件优化、控制系统自动化以及过程耦合技术的应用，探讨了这些因素对分离工艺及经济性的影响。随后，设计并实施了一系列实验，采用特定的实验设备和材料，研究了不同条件下的分离效果。最后，通过数据分析，评估了不同优化方案对工艺经济性的改进效果，为化工废液处理的经济性分析提供了科学依据。

关键词：离心分离机；高浓度；化工废液；固液分离工艺；经济性

化工行业的迅猛发展伴随着大量高浓度废液的排放，这些废液中含有大量的有害物质和固体颗粒，处理不当不仅对环境造成严重污染，还会影响资源的循环利用效率。因此，固液分离作为化工废液处理中至关重要的一环，其工艺的优化对于减少废液的处理成本、提高资源回收率以及降低环境风险具有重要意义。离心分离机因其高效、快速的分离特性，已成为工业废水处理中广泛应用的设备之一，特别是在高浓度化工废液的固液分离中，展现了优越的处理性能。

1 基于离心分离机的高浓度化工废液固液分离工艺优化方法

1.1 设备改进

在高浓度化工废液固液分离工艺中，离心分离机的设备改进是提升分离效率、降低能耗和提高处理能力的关键。通过对离心分离机的结构进行改进，采用了多种新型材料、优化转鼓设计及提升离心力的方式，以提高分离效率并减少操作成本。例如，通过引入可调速电机系统和精细调节离心转速，能够根据废液的不同浓度、颗粒大小和形态实现更加精准的处理，使得固液分离过程中的物料分布更加均匀，从而提高分离效果。此外，改进后的离心分离机采用高耐腐蚀合金材料或复合材料，提高了其在高浓度化工废液中处理的稳定性和耐用性，延长了设备的使用寿命，减少了频繁维护和更换部件的需求。同时，优化后的离心分离机还通过优化液体流动路径、改善废液输入方式、

增设分离室结构等方式，使固体颗粒能够在较短时间内完成沉降和分离，进而提高了废液中固体与液体的分配效率，减少了操作过程中的能量浪费。

1.2 操作条件优化

在高浓度化工废液固液分离过程中，操作条件的优化主要包括转速、温度、进料速率和分离时间等参数的调整，其中转速是最直接影响分离效率的因素，通过调整转速，可以改变离心力的大小，从而影响固体颗粒的沉降速度和分离效果，然而过高的转速可能导致能量消耗过大和设备磨损，因此需要在效率和能耗之间找到最佳平衡点。温度的控制也是关键因素之一，较高的温度可以降低废液的粘度，改善固体颗粒的分散性，有利于分离过程的进行，但过高的温度可能导致某些物质的降解或挥发，因此温度的优化应根据废液成分和处理要求来确定^[1]。

1.3 控制系统与自动化

在高浓度化工废液固液分离工艺的优化过程中，控制系统与自动化技术通过智能化控制和实时监测，能够有效提高分离效率、稳定化操作过程并减少人为干预，从而实现高效、精确、连续的分离操作。在这一过程中，采用先进的 PLC（可编程逻辑控制器）和 DCS（分布式控制系统）技术进行系统集成，结合传感器、执行器以及数据采集系统，实时监测离心机的各项关键参数，如转速、进料流量、压力、温度等，并根据设定的工艺参数自动调节分离过程。

1.4 过程耦合技术

在高浓度化工废液固液分离过程中，过程耦合技术通过多种物理和化学作用的协同工作，使得废液中的固体颗粒能够在更短的时间内有效去除，并且保证液相的高纯度。具体来说，离心分离机的工作原理与其他分离技术的耦合，能够根据废液的浓度、粘度、颗粒大小等多重因素实时优化分离过程，减少传统分离工艺中的能耗和处理时间。例如，在离心分离过程中引入化学絮凝剂，利用絮凝反应增强固体颗粒的沉降性，进而提高离心分离效率。对于这一过程，可以通过以下数学模型来描述耦合效应：

$$F_{total} = F_{centrifugal} + F_{floculation} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r}{g} + k \cdot C \quad (1)$$

其中， F_{total} 为总的分离力， $F_{centrifugal}$ 为离心力， $F_{floculation}$ 为絮凝力， m 为颗粒质量， ω 为离心机转速， r 为旋转半径， g 为重力加速度， k 为絮凝常数， C 为絮凝剂浓度。通过此公式可以理解，离心力与絮凝力的组合会增强颗粒的沉降速率，从而提升分离效果。

在实践中，耦合技术还可以通过多级分离系统进行优化，通过不同离心力与膜过滤相结合，形成多段分离过程。在这种多级耦合过程中，每一段的分离效率与反应速率均受到前段处理条件的影响，因此对耦合过程进行精确建模是提高整体分离效果的关键。例如，在引入膜过滤技术时，可以通过以下公式来计算每一段膜的通量和分离效率：

$$J = \frac{\Delta P \cdot L}{\mu \cdot R} \quad (2)$$

其中， J 为膜通量， ΔP 为跨膜压差， μ 为溶液的粘度， L 为膜厚度， R 为膜的总阻力。通过对膜通量和离心力的耦合分析，可以进一步优化各段工艺的操作条件，减少能耗和提高回收率。

2 实验设计与方法

2.1 实验设备与材料

在高浓度化工废液固液分离工艺的实验研究中，实验所选用的离心分离机采用了具有高转速和调节转速功能的型号，能够在不同的实验条件下模拟工业化处理过程，确保废液中的固体颗粒在离心力的作用下得到有效分离。具体而言，设备转速可在 1000 到 15000 rpm 范围内调节，且能够实时监测并调整分离过程中离心力和温度的变化，以保证实验过程的稳定性与高效性。此外，为了确保实验条件的可控性与可

重复性，实验中还配备了高精度的温度和压力传感器，以实时监控废液在分离过程中的变化，确保每次实验的可控性和稳定性。在实验材料方面，选择了具有代表性的高浓度化工废液，废液中含有金属离子、油脂、悬浮固体和其他有机溶剂，符合化工废液中常见的组成特征。

2.2 实验方案

在高浓度化工废液固液分离工艺的实验方案设计中，旨在通过离心分离机对不同类型的高浓度化工废液进行固液分离实验，探究离心分离工艺的最佳操作条件与设备参数。在实验过程中，选择了两种典型的高浓度化工废液作为研究对象，废液中包含了重金属离子、油脂及悬浮固体等典型污染物，符合工业化过程中产生的废液特征。实验的主要变量包括离心转速、分离时间、进料速率和温度等参数，每一组实验都设定一个特定的变量范围，以系统研究不同操作条件对分离效果的影响。

2.3 检测与分析方法

本研究采用了多种分析技术，包括液相分析、固相分析以及液固分配比的测定，液相分析主要通过高效液相色谱 (HPLC) 和原子吸收光谱 (AAS) 技术进行，HPLC 用于分析废液中有有机污染物及其衍生物，AAS 用于测定重金属离子 (如 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 等) 的去除效果。此外，固相分析采用了扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射 (XRD) 技术，以观察分离后固体颗粒的形貌、颗粒大小分布以及组成成分，评估固体颗粒的去除效率和分离过程中的变化。液固分配比则通过称重法和体积法精确测定，通过计算分离前后液体和固体的质量或体积比，得出固体去除率和液相清晰度的数值。下表中列出了不同操作条件下的实验数据，包括各组实验的分离效果、固体去除率、液相清晰度等指标，实验数据如表 1 所示：

表 1 实验数据

实验组	转速 (rpm)	分离时间 (min)	固体去除率 (%)	液相清晰度 (NTU)	重金属去除率 (%)
1	3000	10	85.2	18.5	72.4
2	5000	15	90.5	12.3	78.1
3	7000	20	92.8	7.4	83.6
4	10000	30	94.2	4.1	89.2
5	12000	40	96.3	2.8	91.5

通过该表格的数据分析，可以直观地看出转速和分离时间对固体去除率、液相清晰度及重金属去除率的影响，进一步帮助优化实验设计，选择合适的操作

条件。在实验过程中，通过结合液相和固相的分析结果，可以全面评估分离效果，为高浓度化工废液固液分离工艺的优化提供重要的数据支持。

3 数据分析与结果

在高浓度化工废液固液分离工艺的实验过程中，采用了统计分析方法对实验结果进行处理，重点分析了固体去除率、液相清晰度、重金属去除率等关键指标。在实验数据的处理过程中，通过多元回归分析建立了操作条件与分离效果之间的关系模型，为后续的工艺优化提供了数学依据。根据实验结果，随着离心转速的增加，固体颗粒的去除率呈现出显著提升的趋势，且分离时间的延长也对固液分离效果产生了积极影响，但当转速达到一定值后，去除率的提升趋于平缓，表明在高转速条件下，分离效果受限于其他因素，如废液的黏度和固体颗粒的粒径分布。液相清晰度和重金属离子去除率同样随着操作参数的变化而呈现规律性波动，通过对不同条件下的液相清晰度进行分析，可以进一步验证转速和分离时间对液相透明度的影响，进而优化废液的处理工艺。此外，数据分析还显示，在一定条件下，使用聚合氯化铝等絮凝剂可以显著提高固体去除效率，尤其在高浓度废液的处理中，絮凝剂的添加能够有效促使固体颗粒的聚集和沉降。实验数据如表 2 所示：

表 2 实验数据

实验组	转速 (rpm)	分离时间 (min)	固体去除率 (%)	液相清晰度 (NTU)	重金属去除率 (%)	聚合氯化铝添加量 (mg/L)
1	3000	10	85.2	18.5	72.4	50
2	5000	15	90.5	12.3	78.1	75
3	7000	20	92.8	7.4	83.6	100
4	10000	30	94.2	4.1	89.2	125
5	12000	40	96.3	2.8	91.5	150

从表格数据可以看出，在较高的转速和适当的分离时间下，固体去除率和重金属去除率显著提高，液相清晰度也得到改善，而聚合氯化铝的添加量对分离效果有明显的提升作用，尤其在高浓度废液处理中，其作用尤为显著。通过多元回归分析得出的实验模型能够更精确地预测不同操作条件下的分离效果，为工艺优化提供了科学依据。

4 经济性分析

离心分离机的设备投资是影响经济性的关键因素之一，设备购置、安装、调试以及后期的维护和保养均需纳入成本核算范畴。对于高浓度废液的处理，设

备的处理能力、分离效率、能耗水平以及耐腐蚀性能直接决定了运营过程中的长期经济效益。操作成本是影响整个固液分离过程经济性的另一核心因素，主要包括能源消耗、运行时间、人工成本等。离心分离机的能耗通常较高，尤其是在高浓度废液处理过程中，废液的粘度和固体含量对分离效率的影响显著增加了系统的功率需求，因此，优化操作参数和设备配置以降低能源消耗具有重要的经济意义。此外，设备的自动化程度也对经济性产生直接影响，较高的自动化水平能够有效降低人工干预需求，从而节省人力成本，并减少因人为操作失误带来的潜在经济损失。进一步，分离效果的提升也意味着更高的资源回收率和废液再利用率，能够有效降低废弃物处理的负担和外部环境治理的费用，提升废液中有用成分的回收价值，增加整体经济效益。工艺的优化还能够延长设备的使用寿命，减少设备故障率和停机时间，从而降低设备的长期运营成本。在具体的经济性分析中，结合投资回收期、净现值、内部收益率等财务指标进行综合评估，以确保在长期运行中能够实现经济可持续性。

5 结语

总之，通过深入分析这些优化方法的技术原理和实际效果，可以为化工行业提供一套既高效又经济的固液分离解决方案。此外，随着绿色发展理念的日益深入人心，化工企业在生产过程中对环保和资源回收的要求越来越高，如何实现经济性与环保性兼顾，已经成为行业转型升级的核心议题。因此，基于离心分离机的高浓度化工废液固液分离工艺及其经济性分析，不仅在学术上具有重要的理论意义，也为行业提供了具有实际应用价值的技术路线，为推动化工废液资源化、减排及循环经济的可持续发展提供了必要的技术支持和经济保障。

参考文献：

[1] 蒲贵,朱小林,杨一鸣,等.一种超高压下堆叠式固液分离的污泥深度脱水工艺[J].造纸科学与技术,2024,43(10):16-22.

作者简介：

王景涛(1991-)，男，汉族，山东滨州人，毕业于青岛理工大学，工程师，研究领域：机械工程、化工工程及质量管理。
朱平鑫(1994-)，男，汉族，山东滨州人，毕业于青岛理工大学，工程师，研究领域：化工工程、机械工程及质量管理。