

磷酸铁锂生产废水处理工艺优化及资源化路径

郑立爽

宜宾天原锂电新材料有限公司 四川 宜宾 644000

摘要：磷酸铁锂生产废水成分复杂，含重金属离子、磷酸盐及有机物等。处理需兼顾污染物去除与资源回收。优化方向包括预处理单元杂质去除与盐分初步分离、主处理单元污染物深度去除、深度处理单元微量污染物去除。资源化路径涵盖盐分回收、水资源循环利用及有价值物质回收。工艺优化与资源化协同可实现环境与经济效益双赢。

关键词：磷酸铁锂；生产废水；工艺优化；资源化；协同效应

引言：磷酸铁锂产业发展迅猛，但其生产过程产生大量废水。这类废水来源多样、成分复杂，重金属离子、磷酸盐及难降解有机物并存，处理难度极大。若处理不当，会对环境造成严重污染，且浪费锂、铁、磷等宝贵资源。在此形势下，开发高效处理工艺与资源化路径迫在眉睫，既能实现环保目标，又能挖掘废水潜在价值，助力产业绿色发展。

1 磷酸铁锂生产废水特性与处理需求

1.1 废水主要来源与成分特征

磷酸铁锂生产废水源自多个关键工艺环节，各环节产生的废水在性质与成分上存在差异。原料预处理阶段，矿石粉碎、研磨后的清洗工序产生含悬浮物废水，裹挟未反应矿石颗粒与杂质；原料混合搅拌后的分离工序排出的废水携带原料粉末，化学成分与原料一致。反应合成环节是废水的主要来源。锂盐、铁盐与磷酸盐在反应釜内合成磷酸铁锂后，产物分离过程产生大量废水，含有未反应的锂盐、铁盐、磷酸盐等可溶性盐类。为调控反应条件添加的酸碱调节剂使废水呈强酸性或强碱性。合成过程中引入的有机添加剂如表面活性剂等，增加了有机物成分的复杂性。后处理阶段也产生特定类型废水^[1]。产品洗涤工序去除表面杂质离子，废水富含残留金属离子与盐类；干燥、研磨设备清洗水除含少量物料颗粒外，还可能混入微量油脂污染物。从成分来看，重金属离子是主要污染物，锂、铁浓度较高。磷酸盐作为原料的重要组成，残留量大，易引发水体富营养化。有机物虽含量较低，但成分复杂，部分具有生物毒性且难降解，各类污染物相互作用，增加处理难度。

1.2 处理目标与核心难点

磷酸铁锂生产废水处理需实现污染物去除与资源回收双重目标。首要任务是降低污染物浓度，确保处理后出水符合排放标准，有效去除重金属离子、降低磷酸盐含量、降解有机污染物。鉴于废水中锂、铁、磷等资

源具备回收价值，需通过技术手段转化为可再利用产品或原料，提升资源利用率。处理过程面临多重挑战。污染物浓度高且成分复杂，重金属离子与磷酸盐可能形成难溶性化合物，影响沉淀效果；有机物干扰重金属去除与磷资源回收。废水中盐分含量高，对膜分离等后续处理工艺造成膜污染，降低生物处理系统微生物活性，增加蒸发结晶等深度处理的能耗与成本。资源回收虽潜力大，但不同资源回收条件与方法各异，需开发针对性强、成本效益高的技术，在保障资源回收率的同时确保水质达标，对处理工艺设计优化提出更高要求。

2 磷酸铁锂生产废水处理工艺优化方向

2.1 预处理单元优化

预处理单元是废水处理的基础环节，其优化着重于杂质去除和盐分初步分离。在杂质去除方面，复合型絮凝剂应用提升处理效果。此类絮凝剂凭借多组分协同，对悬浮物和胶体产生更强吸附架桥作用，促使颗粒快速聚集成大絮体，加快沉淀速度。斜管沉淀池与絮凝工艺配合，通过增加沉淀面积、缩短颗粒沉降路径，显著提高固液分离效率。针对胶体态杂质，臭氧预氧化可破坏其表面电荷结构，使其脱稳后更易被后续工艺去除。对于油类污染物，溶气气浮技术利用微小气泡附着油滴，使其上浮分离，防止污染后续处理流程。盐分初步分离采用蒸发浓缩与离子交换结合的方式。多效蒸发通过串联蒸发器，实现二次蒸汽梯级利用，大幅降低能耗；机械蒸汽再压缩（MVR）技术提升二次蒸汽压力并循环使用，进一步减少能源消耗。蒸发过程中，盐类物质随水分汽化结晶析出，经固液分离实现初步回收。离子交换树脂对锂、铁等金属离子具有选择性吸附能力，既能降低废水盐分浓度，又能富集有价值金属。通过优化树脂类型和运行参数，可有效提升离子交换效率，减轻后续处理压力。

2.2 主处理单元优化

主处理单元承担核心污染物去除任务,需对膜分离、电化学和生物处理工艺进行参数优化与组合。新型聚酰胺复合膜通过纳米级孔径设计提升对小分子有机物和盐分的截留能力;表面改性技术赋予膜抗污染特性,减少污染物附着。运行参数方面,采用低压操作降低膜机械损伤,结合化学清洗与物理冲洗维持膜通量稳定。电化学处理工艺通过改进电极材料与反应体系提升效能。三维电极结构增加比表面积,增强电化学反应活性;掺杂过渡金属的钛基涂层电极提高对有机物的催化氧化能力^[2]。在反应体系中引入氯离子等助催化剂,促进羟基自由基生成,加速有机物矿化。将电化学工艺与生物处理串联,通过电化学预处理提高废水可生化性,再利用微生物降解剩余污染物。生物处理工艺优化依赖微生物驯化与参数调控。筛选耐盐嗜极微生物并逐步驯化,使其适应高盐、高重金属环境。优化活性污泥法的溶解氧浓度,精准控制供氧,调整污泥龄和回流比,维持微生物代谢活性。厌氧-好氧联合工艺中,厌氧段分解大分子有机物,好氧段去除氨氮和小分子污染物,通过控制水力停留时间和污泥浓度,强化整体处理效果。

2.3 深度处理单元优化

深度处理单元致力于去除微量污染物,实现水质稳定达标。针对微量重金属离子,新型纳米吸附材料展现出优异性能。纳米二氧化锰凭借高比表面积和丰富的活性位点,对锰、铁等重金属离子产生强化学吸附;石墨烯复合材料通过 $\pi-\pi$ 共轭作用吸附有机重金属络合物。优化吸附过程的pH值和接触时间,可提升吸附容量和选择性。残留微量有机物采用高级氧化技术去除。光催化氧化利用二氧化钛负载型催化剂,在紫外或可见光照射下产生强氧化性自由基,将有机物彻底矿化。臭氧-生物活性炭工艺中,臭氧预氧化分解大分子有机物,生物活性炭通过吸附和微生物降解协同作用,去除小分子污染物。水质稳定化通过多环节调控实现。酸碱调节剂精准调节pH值,防止水质波动影响回用或排放;超滤膜进一步截留微小颗粒和胶体物质;紫外线消毒或氯消毒灭活有害微生物。通过构建多级过滤-消毒体系,确保出水水质满足严格标准,为废水回用或安全排放提供保障。

3 废水处理资源化路径设计

3.1 盐分回收与再利用

浓盐水处理与工业级盐类提取需构建系统化技术路径。蒸发结晶是盐分浓缩的核心工艺,多效蒸发通过串联多个蒸发器,利用前一效产生的二次蒸汽作为后一效的加热热源,降低能耗;机械蒸汽再压缩(MVR)技术则通过机械压缩提升二次蒸汽温度与压力,实现蒸汽循

环利用,进一步减少外部能源消耗。在蒸发过程中,随着水分不断汽化,盐类物质逐渐达到饱和浓度并结晶析出,通过固液分离设备收集晶体。为获取高纯度工业级盐类,需配套结晶优化与精制技术。采用分步结晶法,依据不同盐类物质溶解度随温度、浓度变化的差异,控制蒸发过程中的温度与蒸发量,实现多种盐类的分步分离。例如,先通过降温结晶分离出溶解度受温度影响较大的盐类,再通过蒸发结晶提取剩余盐类。对收集的粗盐晶体进行重结晶处理,利用合适的溶剂将粗盐溶解后重新结晶,去除杂质离子;结合离子交换技术,选用对特定杂质离子具有高选择性的树脂,进一步提纯盐类产品,使其达到工业级使用标准。回收的盐类可返回磷酸铁锂生产环节作为原料使用,或用于其他工业领域,实现资源循环。

3.2 水资源循环利用

处理水回用至生产系统需保障水质并做好工艺衔接。在水质保障方面,构建多级深度处理体系。通过超滤膜过滤去除微小颗粒、胶体物质及大分子有机物,降低浊度;采用反渗透膜进一步截留小分子有机物、盐类物质,确保水质满足生产用水要求^[3]。针对可能残留的微生物,采用紫外线消毒或氯消毒技术灭活,防止微生物在生产系统中滋生繁殖。同时建立在线水质监测系统,实时监测处理水的pH值、电导率、浊度等关键指标,一旦水质出现异常,立即启动应急处理措施,如增加过滤环节或调整消毒剂投加量。工艺衔接需根据生产环节用水需求进行设计。对于对水质要求较低的环节,如设备冲洗、冷却用水等,处理水经简单消毒、pH调节后即可回用;对于参与化学反应或对水质要求较高的环节,如原料混合用水,处理水需经过严格的脱盐、除杂处理,并进行水质稳定性测试,确保不会对生产工艺和产品质量产生负面影响。在回用水输送过程中,优化管道布局,避免与其他水源交叉污染,同时设置水质缓冲罐,调节回用水的流量与水质波动,保障生产系统稳定运行。

3.3 有价值物质回收

微量金属与有机添加剂的回收通过多种技术协同实现。对于微量金属,吸附技术是有效手段。研发具有高选择性的吸附材料,如纳米级金属氧化物、改性活性炭等,利用其表面丰富的活性位点与金属离子发生离子交换、络合等反应,实现金属离子的富集。通过优化吸附条件,如控制吸附时间、pH值、温度等,提高吸附效率与容量。吸附饱和后的材料采用合适的洗脱剂进行解吸,使金属离子从吸附材料上分离,再通过沉淀、电解等方法将其转化为金属单质或化合物,实现资源回收。

对于有机添加剂,萃取技术发挥重要作用。选择与水不互溶且对目标有机添加剂具有高萃取效率的有机溶剂,通过混合、静置分层等步骤,将有机添加剂转移至有机相中。采用多级或连续萃取工艺,提高萃取率。萃取后的有机相通过蒸馏、精馏等方式分离有机溶剂与添加剂,实现溶剂循环利用和添加剂回收。还可探索膜分离技术的应用,利用纳滤、反渗透膜对不同分子量有机物的截留特性,实现有机添加剂与其他杂质的有效分离,为回收提供新途径。

4 工艺优化与资源化的协同效应

4.1 环境效益

工艺优化与资源化协同发力,在污染物减排和水资源循环方面形成双重环境效益。处理工艺各单元的优化升级,显著提升污染物去除能力。预处理强化杂质与盐分分离,减少主处理负荷;膜分离、电化学及生物处理工艺参数优化,实现重金属离子、有机物等核心污染物深度去除;深度处理环节利用纳米吸附与高级氧化技术,进一步降低微量污染物浓度,确保出水满足严苛排放要求,从源头削减对水体、土壤的污染威胁。水资源循环利用通过处理水回用得以实现。经净化后的废水回用于设备冲洗、冷却等生产环节,直接替代新鲜水源,降低工业取水量。盐分回收技术分离浓盐水中的盐类物质,避免高盐废水排放对生态环境的不良影响。污染物减排与水资源循环的协同推进,有效缓解工业生产对自然环境的压力,助力构建绿色低碳的生产模式。

4.2 经济效益

经济效益的提升源于资源回收价值与处理成本优化的有机平衡。废水中的锂、铁、磷等有价值物质通过离子交换、蒸发结晶等技术回收后,可作为生产原料重新投入磷酸铁锂合成流程,降低对外部资源的采购依赖,直接节约原料成本^[4]。有机添加剂的回收再利用则减少辅料消耗,进一步提升资源利用效率。此外,盐类物质的工业化提取与销售,可为企业创造额外收益。在处理成本优化方面,工艺协同设计通过负荷前置分流实现能耗降低。例如,预处理阶段的盐分初步分离减少主处理环节膜分离的盐分负荷,降低膜组件的清洗频率与更换成本;MVR蒸发技术的应用提升热能利用率,降低盐分回

收的能耗成本。资源回收产生的经济效益可部分抵消消费水处理设施的投资与运行费用,通过“以废补治”模式优化成本结构,实现环境治理与经济效益的良性循环。

4.3 技术整合性

工艺优化与资源化路径的协同,依赖处理工艺链的深度整合与稳定性提升。各处理单元间形成紧密衔接的技术链条,预处理为后续工艺奠定基础,主处理承担核心污染物去除任务,深度处理保障水质达标,资源化环节实现物质回收再利用,各环节相互关联、协同作用。例如,预处理高效去除杂质可减少膜分离的污染风险,主处理的低污染物残留有利于深度处理中吸附材料的回收效率。稳定性提升通过技术冗余设计与智能调控实现。工艺系统设置备用设备和应急处理路线,应对水质波动或设备故障;智能化监控系统实时采集运行数据,通过模型分析动态调整工艺参数,增强系统对水质变化的适应能力。技术整合性的增强不仅提升整体处理效率,更确保资源回收与水回用的稳定持续,为工业化应用提供可靠技术支撑。

结束语

磷酸铁锂生产废水处理工艺优化及资源化路径的探索,不仅有助于解决废水排放带来的环境问题,还能实现资源的有效回收与再利用。通过预处理、主处理及深度处理单元的协同优化,结合盐分回收、水资源循环利用及有价值物质回收等资源化路径,可显著提升处理效率与资源利用率,为磷酸铁锂产业的绿色可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]李攀荣,胡昌顺,王佳琪,等.磷酸铁锂废水处理技术研究进展[J].江西化工,2025,41(1):81-84.
- [2]邓征宇,苏小康,陈世洋,等.磷酸铁废水零排放及资源化处理技术分析[J].中国资源综合利用,2024,42(4):105-107.
- [3]郑先锋.浅析磷酸铁锂废水零排放行业的降低电耗经济性新措施[J].仪器仪表用户,2025,32(3):90-92.
- [4]乐晨,浦燕新,韩颖.新能源行业磷酸铁锂生产废水“零排放”处理技术研究[J].安徽化工,2022,48(5):91-93.