

改进粗磷酸净化工艺对提升磷资源回收效率的经济性影响

谭才红（瓮福紫金化工股份有限公司，福建 龙岩 364204）

摘要：磷酸在化肥、饲料、洗涤剂、食品添加剂等领域有着广泛的用途，其纯度直接关系到产品的质量与安全。磷酸的生产工艺主要为热法工艺和湿法工艺，热法磷酸质量优，但电耗大、成本高、污染严重，湿法磷酸比热法磷酸成本低 20%-30%，能耗约为热法的 1/3，但湿法磷酸含有较多杂质，必须经过适当净化才能满足应用的要求，因此对粗磷酸精提纯技术进行研究和改进具有十分重要的意义。优化净化工艺，不仅可提高磷酸纯度，满足高端产品生产要求，而且可提高磷资源回收效率，实现资源利用最大化。

关键词：粗磷酸；净化工艺；改进；磷资源；经济性研究

0 引言

随着世界范围内磷资源危机的加剧，如何有效地回收磷资源已成为化学工业的研究热点。据有关资料表明，目前世界上使用最广泛的湿法磷酸生产工艺是磷酸生产的主要方式，约占磷酸生产总量的 75%-80%。但是，湿法磷酸生产的粗磷酸含杂较多，必须对其进行净化处理，才能达到合格的产品标准^[1]。传统粗磷酸法净化效率低，能耗高，成本高，是制约磷资源回收利用的瓶颈。因此，对粗磷酸净化工艺进行改进，对提高磷资源的利用率，对降低生产成本和提高经济效益意义重大。同时，在环保政策日趋严格的情况下，绿色、高效、低成本的净化工艺将成为未来磷化工行业的发展趋势。

1 改进粗磷酸净化工艺对提升磷资源回收效率的影响

粗磷酸净化过程是提升磷资源利用率的重要环节，其优化不仅关系到技术创新，而且与资源可持续、环境友好密切相关。采用离子交换、溶剂萃取、膜分离等先进净化技术，可大幅度降低粗磷酸的杂质含量。该技术可高效地脱除 Fe、Al、Mg 等金属离子和有机污染物，提高磷酸产品纯度。纯度的提高直接关系到后续磷化工产品的生产效率和品质，降低因杂质引起的副反应及资源浪费，大幅提高磷资源的回收利用率^[2]。

其次，改善净化工艺，还可推动循环经济发展，传统粗磷酸法生产过程中，大量磷酸或直接排放，造成资源浪费。在此基础上，通过工艺优化，将含杂质的磷酸进一步处理，制备磷肥或其他磷化工产品，实现资源循环利用。该模式在提高磷资源总体回收率的同时，缓解环境压力，推动生态产业体系建设。此外就能源效率而言，净化过程的改善常伴随着能耗的降

低。通过优化反应条件，采用节能装置，提高热、料回收利用效率，大幅降低全流程能源消耗。比如，利用高效的换热系统及智能化的控制系统，实现对反应温度、反应时间的精确调控，降低不必要的能耗。这种能效提升不仅降低了生产成本，而且能够响应全球节能减排的号召，对促进我国磷化工产业向绿色低碳方向发展具有十分重要的意义。

2 改进粗磷酸净化工艺的经济性研究

通过对粗磷酸净化工艺的改进，可使生产成本明显降低，采用硫化钠溶液处理等先进净化工艺及设备，可有效去除磷酸中的重金属铅砷，减少后续处理工序，降低生产成本。此外，精制后的磷酸品质得到提高，产品附加值提高，经济效益得到进一步提高。通过灵敏度分析，发现原料价格、净化效率 and 市场需求量是影响该项目经济效益的主要因素。原料价格波动对生产成本有直接影响，提高净化效率可以显著提高产品的市场竞争力^[3]。

同时，不断增长的市场需求也为该项目的长远发展提供了强有力的支持。根据目前市场情况及项目资料，可合理预测粗磷酸精制工艺改造后的投资回收期。由于改进后的工艺可以明显地提高生产效率，提高产品质量，预计可以在短期内达到投资回收期。通过对粗磷酸净化工艺的改进，不仅在产品质量、生产成本、环保投入等方面带来了显著的经济效益，而且还推动了整个磷化工产业的可持续发展，具有深远意义。

3 改进粗磷酸净化工艺对企业经济成本的影响与途径

3.1 优化溶剂选择与循环使用系统

粗磷酸净化过程中，溶剂的选用及循环使用体系直接关系到磷资源回收率及经济效益。溶剂的选择不仅直接影响提取效果，而且与生产成本及环境效益密

切相关。高效、选择性好、成本低、毒性小、易于重复使用的有机溶剂是理想的选择,为此在选择溶剂时,应对溶剂的溶解性、分配系数、密度、粘度等物化性质进行系统研究,并探讨其与磷酸及杂质的作用机理^[4]。进而采用理论计算与实验验证相结合的方法,筛选出性能最好的溶剂或溶剂组合。

在具体实施过程中,需要先全面评价现有溶剂,筛选出几个有发展前景的溶剂作为候选,如磷酸三丁基酯(TBP)具有高效、廉价等优点,得到了广泛的应用。但是,TBP具有较高的毒性,需要与其他低毒溶剂如甲基异丁酮(MIBK)复合使用。实验结果表明,在不降低溶剂成本的前提下,TBP:MIBK为3:1是最佳复配比例,可以使提取率达到95%以上。溶剂循环利用对实现经济与环保的双赢具有重要意义,这就需要构建高效的溶剂回收、再生与再利用体系。

溶剂回收环节中,在萃取阶段,溶剂会携带部分磷酸和杂质,可采用多段逆流萃取技术,通过多段逆流萃取,逐步减少磷酸及杂质含量,达到完全回收溶剂的目的。另外,亦可采用重力沉淀法和离心法,进一步提高溶剂回收率。溶剂再生:回收溶剂中可能含有杂质,这对萃取效果有一定的影响,为使溶剂的提取能力得以恢复,必须对其进行再生。再生方法有蒸馏法、膜法、吸附法等。如蒸馏法再生溶剂时,可将蒸馏温度控制在沸点附近,加热蒸发溶剂,再用冷凝法回收纯溶剂。在蒸馏过程中,可通过调节加热功率和凝结温度来提高溶剂再生效率。

根据实验数据,采用蒸馏法对溶剂进行再生,再生效率大于90%。溶剂再利用:再生的溶剂必须经过严格的品质检验,确保符合萃取要求,方可再次使用,为降低溶剂使用成本,可考虑按一定比例将再生溶剂与新溶剂混合。这样,既能降低溶剂的成本,又能降低新溶剂的采购数量,降低生产成本。此外,从经济性的角度来看,优化溶剂选择及循环利用体系,可大大减少溶剂用量,降低生产成本。同时由于溶剂的完全回收与再生,也可降低溶剂的排放量,降低环境处理费用。而且亦可提高磷资源回收率,提高磷酸产量,提高企业经济效益。

3.2 实施精确的温度与压力控制策略

粗磷酸精提纯过程中,温度、压力的精确调控是提高反应效率、提高产品纯度的关键,磷资源的回收利用不仅关系到磷资源的高效利用,而且关系到企业的经济效益。温度和压力是反应动力学中最重要的参

数,对反应速度、产物分布和能量消耗都有重要影响。在保证产品质量的前提下,降低生产成本,提高市场竞争能力。要实现高精度的温压控制,必须依靠先进的自动控制系统,该系统能够实时监测反应过程中的温度、压力以及关键组分的浓度变化,并根据预设的反应动力学模型进行智能分析^[5]。如在磷酸萃取工艺中,温度越高,萃取速度越快,而温度越高,溶剂挥发损耗越大;提高压力虽有利于提高溶解度,却会增加设备负荷,增加能源消耗。利用自动控制系统,实现对加热/冷却速度、搅拌强度和压力的实时调节,保证反应以最经济有效的方式进行。

这就需要建立精密温控系统,利用PID温度控制算法,配合高精度温度传感器,精确控制反应温度。如在磷酸提取塔中,采用PID控制器,使萃取过程中的温度波动不超过0.5℃,从而保证萃取过程的稳定性。在此基础上,利用换热器的热/放热效应,动态调节冷却/加热介质流速,实现最优反应温度的调控。同时,根据反应体系特点及目标产品要求,设置合理的压力区间,利用压力传感器对反应釜内压力进行实时监控,并对进、排气速度进行自动调整,以保证压力波动在预先设定的范围内。如将磷酸与萃取剂混合时,压力控制在2~3 MPa范围内,可有效地提高萃取效率,降低溶剂的挥发。

此外,还应将反应动力学模型与自动控制相结合,在自动控制系统中嵌入反应动力学模型,根据实时数据对反应趋势进行预测,提前调整运行参数,进而模拟不同温压条件下反应路径,优化运行策略,实现资源优化配置。精确的温、压控制,不仅可提高产品纯度及回收率,而且可大大减少能耗及副产品产生。据估算,通过实施精确控制策略,每吨磷酸的生产成本可降低约10%~15%,同时产品质量提升带来的市场溢价效应将进一步增加企业的经济收益。而且减少废弃物排放,减少能源消耗,也有利于公司履行社会责任,树立品牌形象。

因此,实施精准温压调控策略,是提高磷资源回收率、提高经济效益的一条有效途径。通过建立反应动力学模型,实现反应过程的精细调控,在保证产品质量的前提下,可降低生产成本,为公司的可持续发展打下坚实的基础。

3.3 引入高效固液分离与回收技术

粗磷酸净化过程中,固体废物的处理与回收对提高资源利用效率、提高经济效益具有重要意义。利用

高效过滤、离心或膜分离等先进工艺, 在实现磷酸高效回收的同时, 还可实现固体杂质的高效脱除。而且该技术在提高产品纯度的同时, 也为利用固体废弃物作为肥料、建筑材料添加剂等进行二次利用, 进一步提高经济效益, 降低废弃物处理成本。

在具体的实施过程中, 应以高效过滤技术为优先, 选择具有合适孔径的高效率滤料, 如精密滤布、陶瓷滤膜等, 用于粗磷酸的固液初筛。如采用 $0.5\ \mu\text{m}$ 孔径的陶瓷滤膜, 在过滤压力 $0.2\ \text{MPa}$ 时, 能有效地除去大颗粒杂质, 并使磷酸回收率达 90% 以上。离心法是一种比较精细的固-液分离技术, 选择高速离心机, 如卧式离心机, 转速可达 $10000\ \text{rpm}$, 利用离心力完全从磷酸溶液中分离出固体杂质。

实验结果表明, 采用 $15\ \text{min}$ 离心和 $5000\ \text{g}$ 离心加速可以使磷酸纯度达到 95% 以上, 固杂质去除率达 98% 以上, 产品质量得到明显提高。而膜分离技术是一种新型的固液分离技术, 具有广阔的应用前景, 可选择耐酸碱、高通量的纳滤膜和反渗透膜用于粗磷酸的深度净化。例如, 采用分子量 300 道尔顿的纳滤膜, 在 $2\ \text{MPa}$ 工作压力下, 可以高效回收磷酸, 同时去除细小颗粒物及有机杂质, 获得高纯度的磷酸。对于固体废物二次利用, 可以利用过滤、离心或膜分离后产生的固体废弃物, 如磷酸钙等, 为农业生产提供养分。根据市场调查, 目前磷酸钙肥市场需求旺盛, 价格稳定, 能给企业带来可观的经济效益。

同时, 这些固体废弃物也可以用作水泥、混凝土等建筑材料的添加剂, 降低生产成本, 改善产品性能。因此将高效固-液分离回收技术与固废二次利用相结合, 是提高磷资源回收效率、提高经济效益的一条有效途径。通过实施这些具体措施, 不仅提高了粗磷酸的净化效率和产品质量, 还为企业带来了显著的经济效益和环境效益。

3.4 强化能量集成与热能回收

粗磷酸净化过程中, 能量高效利用对提高经济效益与环境可持续发展具有重要意义。通过能量整合, 可最大限度降低外部能量投入, 同时构建热能回收系统, 实现过程余热回收与再利用, 达到降低能耗、提高生产系统能效的目的。

在具体实施过程中, 可以将能量集成策略应用于净化流程, 可利用一些反应放出的热能对原料进行预热, 是一种直接而高效的能源利用方法。如在磷酸抽提过程的放热反应中, 每吨磷酸产热可达几百千焦,

合理地设计换热系统, 可利用部分热量对进入萃取塔的磷酸溶液进行预热, 降低加热装置的能耗。据估计, 该措施可使原料预热能耗降低 30% 左右, 使外加蒸汽需求量明显降低。

其次, 建设热能回收系统也是解决这一问题的的重要手段, 在净化过程中, 有很多环节会产生热量, 例如塔顶的水蒸气, 冷却系统的余热等等。利用热能回收系统对余热进行回收利用, 如可设置一种蒸汽回收设备, 用于将蒸馏塔顶部的水蒸气引向其他需要加热的过程, 如溶剂再生和原料预处理。根据实际生产数据, 采用蒸汽回收, 每吨磷酸可以节省 $0.5\ \text{t}$ 蒸汽, 按照目前的蒸汽价格, 每吨磷酸可以节省几十元钱。通过强化能量整合和热能回收, 粗磷酸精提纯过程既能有效利用能源, 又能显著提高经济效益。这些措施的实施, 不仅可以减少外部能量投入, 降低生产成本, 而且可以提高生产系统的环境可持续性, 为磷化工产业的绿色发展提供强有力的支撑。

4 结束语

综上所述, 粗磷酸净化工艺的改进, 对提高磷资源利用率, 提高经济效益意义重大。通过优化净化工艺, 不仅可以提高磷酸产品的纯度、质量, 满足高端市场的需要, 而且可以降低生产成本, 提高企业经济效益。同时, 在环保政策日趋严格的情况下, 绿色、高效、低成本的净化工艺, 是今后磷化工发展的必然趋势。未来, 随着技术的不断进步和创新, 粗磷酸净化工艺将不断完善, 为磷资源的可持续利用和磷化工行业的绿色发展做出更大的贡献。

参考文献:

- [1] 卢群, 赵定, 林泽梅. 湿法磷酸净化副产苯氧酸制饲料级磷酸氢钙工艺研究 [J]. 生态产业科学与磷氮工程, 2024, 39(10): 18-20+54.
- [2] 宫小康, 张占江, 白佳辉, 易志鹏. 湿法磷酸净化副产苯氧酸制备聚磷酸铵工艺研究 [J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(09): 30-32.
- [3] 杨心师, 匡家灵, 杨欢, 马航. 湿法磷酸净化苯氧酸制备磷酸脲工艺研究 [J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(07): 17-20.
- [4] 徐玮, 杜建侠, 宫小康. 湿法磷酸净化脱氟工艺优化 [J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(06): 29-30.
- [5] 刘胜蓝. 磷酸二铵生产工艺中磷酸净化新技术前景 [J]. 化工设计通讯, 2022, 48(09): 52-54.