◆设备、控制与安全生产◆

半水–二水法磷酸装置真空带式过滤机技术改进

周华波

（云南云天化红磷化工有限公司，云南 开远 661600）

［摘 要］真空带式过滤机是半水–二水法磷酸工艺中实现磷酸料浆固液分离的核心设备，其运行稳定性与过滤效率对产品质量、生产成本及装置产能具有决定性影响。针对云南云天化红磷化工有限公司7万t/a半水–二水湿法磷酸装置中真空带式过滤机长期存在的过滤能力不足、系统结垢堵塞频繁、设备故障高发等问题，结合装置实际工况，从过滤机核心零部件结构优化、材质升级、辅助系统改进等方面开展技术攻关。改进后，装置运行周期由7～8 d延长至12～15 d，运转率由90%提升至92%，磷石膏中水溶磷质量分数由0.4%～0.5%降至0.2%以下，过滤能力从80 m^3/h提升至115 m^3/h，年产能由7万t提升至10万t，显著降低了检修成本与劳动强度，为湿法磷酸行业同类设备改进提供了可借鉴的技术方案与工程实践经验。

［关键词］半水–二水法磷酸装置；真空带式过滤机；2205双相不锈钢；滤布选型；系统防结垢；产能提升

［中图分类号］TQ126.3+5 ［文献标志码］B ［文章编号］2097-4566（2026）05-0120-06

Technical improvement of vacuum belt filter in semihydrate-dehydrate phosphoric acid plant

ZHOU Huabo

(*Yunnan Yuntianhua Red Phosphorus Chemical Co., Ltd., Kaiyuan* 661600, *China*)

Abstract: The vacuum belt filter is the core equipment for achieving solid-liquid separation of phosphoric acid slurry in the semihydrate-dehydrate wet-process of phosphoric acid production. Its operational stability and filtration efficiency have a decisive impact on product quality, production costs, and plant capacity. In the 70 000 t/a semihydrate-dehydrate phosphoric acid phosphoric acid plant of Yunnan Yuntianhua Red Phosphorus Chemical Co., Ltd., there are long-term problems with insufficient filtration capacity, frequent system scaling and blockage, and frequent equipment failures in the vacuum belt filter. Combining the actual operating conditions of the plant, technical research is carried out from aspects such as the structural optimization of core components of the filter, material upgrading, and improvement of auxiliary systems. After the improvement, the operation cycle of the plant is extended from 7 - 8 days to 12 - 15 days, the operation rate is increased from 90% to 92%, the water-soluble phosphorus quality fraction is reduced from 0.4% - 0.5% to below 0.2%, the filtration capacity is increased from 80 m^3/h to 115 m^3/h, the annual production capacity is increased from 70 000 t to 100 000 t, significantly reducing maintenance costs and labor intensity, and providing a technical solution and engineering practical experience that can be referred to for the improvement of similar equipment in the wet-process phosphoric acid industry.

Key words: semihydrate-dehydrate process phosphoric acid plant; vacuum belt filter; 2205 duplex steel; filter cloth selection; system anti-scaling; capacity enhancement

0 引言

磷化工产业是支撑我国农业现代化与新能源产业发展的重要基础产业，其中湿法磷酸因原料适应性强（可利用中低品位磷矿）、生产成本低等特点，占据全球磷酸总产量的85%以上。我国磷矿资源丰富但品位偏低（平均$w(P_2O_5)$约17%），且杂质（如钙、镁、铁、铝、氟等）含量较高，这对湿法磷酸生产工艺的分离效率提出了更高要求。半水–二水

收稿日期：2025-03-11； 修回日期：2025-12-21

作者简介：周华波（1981— ），男，云南昭通人，高级工程师，长期从事磷化工生产及技术管理工作。

再结晶浓酸工艺作为湿法磷酸的主流工艺之一，通过“半水石膏结晶—过滤—二水石膏转化—再过滤”的流程，可直接产出$w(P_2O_5)$ 40%以上的浓磷酸，无需后续浓缩工序。相比传统二水法工艺，能耗降低15%～20%；相比半水法工艺，石膏过滤性能更优，因此被广泛应用于国内大型磷化工企业[1]。

真空带式过滤机是半水–二水工艺的“心脏设备”，其核心功能是实现磷酸料浆中磷酸溶液与石膏晶体的高效分离，同时通过多级逆流洗涤降低石膏滤饼中的水溶磷含量。然而，在实际运行中，受料浆特性与设备结构限制，国内多数装置的真空带式过滤机普遍存在以下问题：一是在真空骤冷效应下，料浆中钾、钠、铁、铝等盐类杂质易析出结垢，堵塞真空箱、滤液管道及泵体，导致装置被迫停车检修；二是大胶带易跑偏、裙边漏料，滤布易堵塞打折，真空箱密封性能差，导致真空度不足，过滤效率下降；三是设备检修难度大，如真空箱升降需多人协作，耐磨带卡死故障频发，严重影响装置连续运行[2-5]。

云南云天化红磷化工有限公司（以下简称公司）7万t/a湿法磷酸装置自1993年投产以来，其半水、二水工段真空带式过滤机长期受上述问题困扰，装置运行周期仅7～8 d，年有效运行时间不足8 000 h，产能利用率仅70%，不仅造成磷矿、硫酸等原料浪费，还增加了检修成本与环保压力。为解决上述问题，公司成立专项技术攻关组，结合装置10年运行数据与行业先进经验，开展真空带式过滤机系统性技术改进，通过优化设备结构、升级材料、改进辅助系统，最终实现装置稳定高效运行，相关技术成果已在国内多家磷化工企业推广应用。

1　存在的问题

1.1　系统结垢堵塞问题

1.1.1　结垢成因与分布

系统结垢堵塞是影响装置运行周期的核心因素，主要源于料浆的“真空骤冷效应”与杂质析出。半水料浆在闪蒸室冷却至90～95 ℃后，进入真空带式过滤机时，受真空抽引作用，料浆温度在10～15 s内骤降至65～70 ℃，温度差达20～30 ℃。这种骤冷效应导致溶解在酸液中的钾、钠、铁、铝盐类杂质（如K_3PO_4、Na_3PO_4、$FePO_4$、$AlPO_4$）溶解度急剧下降，快速析出并附着在真空箱内壁、管道及泵体内，形成坚硬的结垢层（主要成分为磷酸盐与硫酸盐混合物）。

通过对2024年1—12月检修数据统计，结垢堵塞主要分布在以下部位：（1）半水过滤机真空箱，每周期结垢厚度达5～8 mm，导致真空箱有效容积减少15%～20%，真空度下降10～15 kPa。（2）二水过滤机真空箱，每周期结垢厚度3～5 mm，影响过滤效率。（3）滤液管道（半水侧ϕ150 mm，二水侧ϕ200 mm），结垢导致管道内径缩小30%～40%，滤液流量从50 m^3/h降至30 m^3/h以下。（4）排液罐与下液管，结垢导致排液不畅，真空系统出现“气阻”现象。（5）取酸泵（成品酸泵）与洗涤泵，叶轮结垢厚度2～3 mm，泵扬程下降20%～25%，需频繁拆泵清理。

1.1.2　结垢带来的影响

结垢堵塞直接导致装置运行周期缩短，2021年平均运行周期仅7.2 d，每次检修需停车8～10 h，具体影响包括：

1）产能损失。每次检修导致产能损失约500 t（按装置满负荷35 t/h计算），全年累计产能损失1万t，产能利用率仅85.7%（设计产能7万t/a，实际产量6万t）。

2）检修成本增加。每次检修需消耗人工（8～10人/次）、备件（如密封件、滤布）、化学清洗剂（如盐酸、柠檬酸）等费用，全年检修成本达120万元。

3）环保风险。结垢导致滤布堵塞，滤饼$w(H_2O)$升高至20%以上，石膏渣浆输送过程中易出现漏料，造成现场环境污染，2021年因漏料导致的环保整改达6次。

1.2　设备结构缺陷问题

1.2.1　真空箱结构不合理

原真空箱采用Q235B钢板焊接而成，内壁衬5 mm厚天然橡胶防腐，但存在以下问题。

1）材质耐腐蚀性差。天然橡胶在80～90 ℃、高浓度磷酸（$w(P_2O_5)$ 40%～42%）环境下易老化开裂，平均使用寿命仅6个月，橡胶脱落物混入成品磷酸，导致磷酸中杂质含量升高。

2）无保温措施。真空箱外壁无保温层，酸液在真空箱内进一步降温（从75 ℃降至60 ℃以下），加剧盐类杂质析出。

3）安装精度低。真空箱滑槽平面度误差达1.5 mm/1 000 mm（设计要求0.5 mm/1 000 mm），导致胶带运行时与滑槽摩擦增大，胶带跑偏频繁。

4）升降装置落后。原真空箱升降采用手动螺旋升降机，需8～10人同步操作，升降速度慢（单次升降需1.5 h），且易出现“卡滞”现象，检修时

劳动强度大。

1.2.2 大胶带性能不足

原大胶带为进口产品（德国福伊特品牌），但存在以下缺陷。

1）沟槽参数不合理。原胶带沟槽深度17 mm，槽宽上口16 mm，底部无圆弧过渡，导致滤液流动阻力大，部分滤液滞留槽内，加剧结垢。

2）骨架结构强度低。胶带骨架采用3层聚酯纤维布（EP150型），设计最大拉力2 800 kN，在满负荷运行时（布料量80 m^3/h），胶带拉伸变形量达5%～8%，导致胶带跑偏。

3）接头硫化质量差。原接头硫化单位面积压力1.2 MPa（设计要求1.5 MPa），硫化温度140 ℃（设计要求146 ℃），导致接头强度不足，2021年发生3次接头开裂故障，每次故障导致装置停车8～10 h。

1.2.3 耐磨带与传动系统故障

1）耐磨带卡死。原耐磨带采用普通聚乙烯材质，厚度5 mm，耐磨性差，且与胶带接触面无润滑措施，平均每月发生3～4次耐磨带卡死现象。卡死的耐磨带被吸入真空箱，需拆真空箱清理，每次处理需3 h，导致装置非计划停车4 h。

2）减速机性能不匹配。原减速机型号为ZLY-250，电机功率55 kW，速比250，胶带速度调节范围3～18 m/min，无法满足高负荷运行需求（布料量80 m^3/h时，胶带速度需要20～23 m/min），导致减速机过载运行。2021年发生2次减速机齿轮损坏故障，维修费用达15万元/次。

1.2.4 滤布选型不当

原滤布采用涤纶材质，孔径50 μm，存在以下问题。

1）透气性差。涤纶滤布在高浓度磷酸环境下易吸潮堵塞，透气量从初始的80 L/(m^2·s）降至30 L/(m^2·s）（需更换滤布），更换周期仅30 d，全年滤布消耗成本达80万元。

2）耐温性不足。涤纶滤布长期在80～90 ℃环境下运行，易收缩变形，导致滤布跑偏、打折，2023年因滤布问题导致停车10次。

1.3 运行效率低下问题

上述问题导致过滤机运行效率低下，具体表现为。

1）过滤能力不足。原过滤机最大布料量80 m^3/h，取酸量25 m^3/h，仅能满足装置70%产能需求。

2）运转率低。2021年装置平均运转率90%，低于行业先进水平（95%以上）。

3）能耗高。因真空度不足，真空泵需满负荷运行，全年真空泵电耗达85万kW·h，比设计值高20%。

4）劳动强度大。频繁的检修与清理工作，导致操作人员人均日工作时间超过10 h，员工疲劳度高。

2 解决措施

针对上述问题，公司联合国内真空带式过滤机专业制造商（江苏新宏大集团有限公司）开展技术攻关，从设备材质升级、结构优化、参数调整、辅助系统改进4个维度制定解决方案，具体措施如下。

2.1 真空箱结构优化与材质升级

2.1.1 材质升级为2205双相不锈钢

将原真空箱材质从Q235B+天然橡胶改为2205双相不锈钢，2205双相不锈钢是一种集优良耐腐蚀性、高强度于一体的不锈钢材质，在80～90 ℃、$w(P_2O_5)$ 40%～42%的磷酸环境下，腐蚀速率仅0.02 mm/a（天然橡胶腐蚀速率为0.50 mm/a），使用寿命可延长至5年以上。

真空箱钢板厚度确定为4 mm，通过有限元分析（ANSYS软件）验证，4 mm厚2205双相不锈钢钢板在−80 kPa真空度下，最大变形量仅0.3 mm，满足强度要求。同时，真空箱内壁采用机械抛光处理（粗糙度Ra≤0.8 μm），减少结垢附着面积。

2.1.2 增设蒸汽保温夹套

在真空箱外壁增设50 mm厚蒸汽保温夹套，保温夹套材质为316L不锈钢，夹套内通入133 ℃、0.3 MPa的饱和蒸汽，通过温度控制系统（PID调节）将真空箱内酸液温度控制在70～75 ℃，避免酸液温度过低导致盐类析出。保温夹套设蒸汽进口（DN25）、出口（DN25）及疏水阀（DN20），确保蒸汽冷凝水及时排出，提高保温效率。

2.1.3 提高安装精度

1）滑槽加工精度提高。真空箱滑槽采用数控铣床加工，平面度误差控制在0.5 mm/1 000 mm以内，每段真空箱全长平面度误差≤0.8 mm。

2）法兰连接密封优化。真空箱端面法兰采用榫槽式密封结构，密封材料选用聚四氟乙烯（PTFE）垫片（耐温260 ℃，耐酸腐蚀），法兰面垂直度误差≤0.2 mm，确保密封无泄漏。

3）整体组装校准。真空箱分为7段（每段长3 200 mm），组装时采用激光准直仪校准，确保7段

真空箱轴线偏差≤0.5 mm，滑槽顶面高差≤0.3 mm。

2.1.4　改进真空箱升降装置

1）增设气动升降系统。半水、二水过滤机真空箱各增加2组重锤及支架，同时配备气动升降装置，升降点数量：半水过滤机8处、二水过滤机7处。

2）气缸选型。采用亚德客SC100×200型气缸，缸径100 mm，行程200 mm，操作压力0.5～0.7 MPa，操作气量0.013 m^3/min，单缸最大提升力15 kN，满足真空箱（质量约5 t）的升降需求。

3）材质升级。提升支架采用316L不锈钢材质（耐酸腐蚀），配重块采用碳钢材质（表面涂覆环氧树脂防腐）。

4）增加自动控制系统。配备PLC自动控制系统，可实现单人远程操作，升降速度控制在10 mm/s，单次升降时间缩短至30 min，且可实现“点动调节”，便于真空箱与胶带的精准对位。

2.2　*大胶带国产化优化与参数改进*

为降低成本并提升胶带性能，采用国产胶带替代进口胶带，通过优化胶带参数与生产工艺，提升了胶带运行稳定性[6]。

2.2.1　优化胶带沟槽参数

1）增加沟槽深度。将沟槽深度从17 mm增至18 mm，槽宽上口从16 mm增至18 mm，底部采用直径5 mm圆弧过渡，减少滤液流动阻力。通过流体力学模拟（Fluent软件）分析，改进后滤液流动速度从0.8 m/s提升至1.2 m/s，沟槽容积增加5.88%（理论计算），有效减少滤液滞留。

2）调整槽间距与开孔。槽间距从24 mm增至25 mm，每槽开设2个ϕ16 mm圆孔（原1个ϕ14 mm圆孔），孔间距20 mm，确保滤液快速排出，减少结垢。

2.2.2　强化胶带骨架结构

1）骨架层数与材质升级。胶带骨架采用5层聚酯纤维布（EP200型），单层EP200型纤维布的拉伸强度≥200 kN/m，5层结构设计最大拉力提升至3 520 kN（原2 800 kN），满负荷运行时（布料量115 m^3/h），胶带拉伸变形量≤2%，有效防止胶带跑偏。

2）胶层材质优化。胶带顶层（与料浆接触层）采用三元乙丙橡胶，厚度26 mm（原24 mm），三元乙丙橡胶耐酸、耐温性能优于天然橡胶[7]，在80～90 ℃环境下使用寿命达2年以上；底层（与滑槽接触层）采用三元乙丙橡胶（PU），厚度8 mm（原6 mm），耐磨性提升30%；波纹边采用软质丁腈橡胶，邵氏硬度A42～50，确保裙边密封性能，减少漏料。

2.2.3　改进接头硫化工艺

1）优化硫化参数。接头硫化单位面积压力提升至1.5 MPa（原1.2 MPa），硫化温度控制在146 ℃（±2 ℃），正点硫化时间90 min，保温降温90 min，确保接头硫化充分。

2）加强硫化质量检验。硫化后接头采用拉伸试验（拉力≥3 000 kN为合格）、气密性试验（通入0.2 MPa压缩空气，保压30 min无泄漏）进行检验，确保接头强度与密封性。

2.3　*耐磨带与传动系统改进*

2.3.1　耐磨带材质与结构优化

1）升级材质。耐磨带采用高密度聚乙烯（HDPE），分子量500万（原300万），高密度聚乙烯具有优异的耐磨性与耐腐蚀性，在80 ℃环境下摩擦系数仅0.15（原普通聚乙烯摩擦系数为0.30），使用寿命延长至6个月以上。

2）改进结构。耐磨带厚度从5 mm增至8 mm，宽度从100 mm增至120 mm，与胶带接触面开设V型润滑槽（槽深2 mm，间距10 mm），注入食品级润滑脂（耐酸、耐温），减少摩擦阻力，避免耐磨带卡死[8]。

3）安装定位优化。在耐磨带两侧增设导向条（材质316L不锈钢），导向条与耐磨带间隙控制在0.5～1.0 mm，防止耐磨带跑偏吸入真空箱。

2.3.2　传动系统升级

1）优化减速机选型。将原ZLY–250减速机更换为HHDJ71.2–JSJ–X4FS260e/HU/B型减速机（江苏泰隆减速机股份有限公司），电机功率从55 kW增至75 kW（四级电机，转速1 480 r/min），速比296.76（原250），胶带速度调节范围3～23 m/min，满足高负荷运行需求。

2）改进润滑系统。减速机采用VG320极压工业齿轮油（原VG220），油量260 L（原200 L），配备自动润滑系统，定时定量向轴承与齿轮啮合处供油，减少磨损。

3）升级电机防护。电机型号改为Y2VP–280S–4–75 kW，绝缘等级F级（原B级），防护等级IP54（原IP44），可在潮湿、多尘的化工环境下稳定运行。

2.4　*滤布选型与辅助系统改进*

2.4.1　滤布材质与参数优化

通过对比试验（选取涤纶、丙纶、锦纶3种材

质，不同孔径滤布进行过滤性能测试），最终选用丙纶针刺毡滤布，表面涂覆聚四氟乙烯（PTFE）；孔径80 μm（原50 μm），确保石膏晶体（100～150 μm）被有效截留，同时减少滤布堵塞；透气量120 L/(m²·s)（原80 L/(m²·s)），降低过滤阻力；耐温性，长期耐温100 ℃（原80 ℃），满足装置运行温度需求[9]。

试验数据表明，丙纶针刺毡滤布的更换周期从30 d延长至50 d，全年滤布消耗成本从80万元降至50万元，且滤饼w(水溶磷）降低0.1%～0.2%。

2.4.2 防结垢辅助措施

1）密封水优化。真空箱密封水原采用工艺水（硬度200～300 mg/L），改为采用蒸汽冷凝水（硬度<50 mg/L），减少钙、镁离子带入，降低结垢风险[10]。

2）密封水量控制。通过流量计精确控制密封水量（原10 m³/h，改进后6～8 m³/h），在确保耐磨带安全运行的前提下，减少密封水对酸液温度的影响。

3）定期清洗系统。在真空箱与滤液管道上增设清洗接口，每运行5 d通入8%稀硫酸溶液（温度70～80 ℃）清洗3 h，溶解已析出的盐类结垢，延长运行周期。

2.4.3 自动化控制系统升级

1）增设在线监测仪表。在真空箱出口安装温度传感器、压力传感器，在滤液管道安装流量传感器、浓度传感器，实时监测酸液温度、真空度、滤液流量与浓度，数据传输至DCS（分布式控制）系统。

2）增设自动调节功能。根据真空度自动调节真空泵运行频率（原恒速运行），根据滤液流量自动调整胶带速度，根据酸液浓度自动调整洗涤水量，实现过滤机智能化运行，减少人工干预。

3）增设故障预警系统。设置故障预警阈值（如真空度低于–50 kPa、胶带跑偏量超过10 mm），当参数超标时，DCS系统发出声光报警，并显示故障位置与处理建议，提高故障处理效率[11]。

3 运行情况

改进措施于2024年4月完成安装调试，5月正式投入运行，截至2025年6月，装置已连续稳定运行13个月，各项运行指标均达到或超过设计要求。

3.1 过滤能力显著提升

通过优化胶带参数、改进真空箱结构与滤布选型，过滤机的过滤能力大幅度提升。

2024年5—12月，装置累计生产磷酸（以P_2O_5计）7.8万t，按此推算年产能可达10.4万t，较改进前的7万t/a提升48.57%，超额完成10万t/a的设计目标。

3.2 系统结垢堵塞明显缓解

通过真空箱材质升级、增设保温层、优化密封水等措施，有效减少了盐类杂质的析出，系统结垢堵塞情况显著改善。

改进后，半水过滤机真空度稳定在–70～–80 kPa（原–60～–70 kPa），二水过滤机真空度稳定在–60～–70 kPa（原–50～–60 kPa），真空度的提升使过滤效率显著提高：半水过滤机过滤效率从1.14 m³/(m²·h）提升至1.64 m³/(m²·h），提升43.86%；二水过滤机过滤效率从1.0 m³/(m²·h）提升至1.43 m³/(m²·h），提升43.00%。

过滤能力大幅度提高：过滤机布料量从80 m³/h提升至115 m³/h，取酸量从25 m³/h提升至35 m³/h，年产能从7万t提升至10万t，满足企业扩能需求。

3.3 设备故障频率大幅度降低

3.3.1 耐磨带与胶带故障

改进前，每月耐磨带卡死3～4次。改进后，耐磨带连续运行12个月未发生卡死现象，胶带跑偏次数显著减少，接头强度满足满负荷运行需求，未发生开裂故障，设备运行稳定性大幅度提升。

3.3.2 传动系统与升降装置

改进后减速机运行15个月未发生故障，电机电流稳定在45 A，无过载现象；真空箱升降装置采用气动升降后，每次升降仅需2人操作，升降时间从1.5 h缩短至0.5 h，劳动强度降低80%以上，且未发生“卡滞”现象。

3.4 产品质量提升

改进后，成品酸浓度与纯度均有所提升，w(水溶磷）从0.4%～0.5%降至0.2%以下，酸中杂质质量分数降低30%～40%，优于国家标准要求，产品市场竞争力增强[12]。

4 经济效益测算

以2024年5—12月运行数据为基础，测算改进后的经济效益。

产能提升收益：年产能从7万t提升至10万t，增加3万t，按磷酸（w(P_2O_5) 42%）市场价格5 000元/t计算，年增加销售收入1.5亿元。

检修成本节约：年检修次数从85次减少至24次，每次检修成本从1.4万元降至1.2万元，年节约检修成本90.2万元。

滤布消耗节约：滤布更换周期从7 d延长至30 d，年滤布消耗量从52块减少至12块，每块滤布价格1.5万元，年节约滤布成本60万元。

能耗节约：真空泵平均运行频率从50 Hz降至40 Hz，年电耗从85万kW·h降至68万kW·h，按工业电价0.6元/(kW·h）计算，年节约电费10.2万元。

人工成本节约：因检修次数减少与劳动强度降低，减少2名检修人员，人均年薪10万元，年节约人工成本20万元。

综上，改进后年新增经济效益约15 180.4万元，投资回收期仅2个月（改进总投资约2 500万元），经济效益显著。

5　结论与展望

5.1　结论

本次针对湿法磷酸半水–二水工艺真空带式过滤机的技术改进，通过对真空箱、大胶带、耐磨带、传动系统等核心部件的材质升级、结构优化与参数调整，结合自动化控制系统的完善，成功解决了装置长期存在的系统结垢堵塞、设备故障高发、运行效率低下等问题，取得以下关键成果：运行稳定性显著提升，装置运行周期从7～8 d延长至12～15 d，运转率从90%提升至92%，设备故障次数减少70%以上，实现装置长周期稳定运行。

5.2　展望

随着磷化工行业向“绿色低碳、高端化、智能化”方向发展，未来真空带式过滤机的技术改进可从以下方面进一步深化。

1）智能化升级。引入机器视觉检测技术，实时监测滤布破损、胶带跑偏、结垢厚度等参数，结合AI算法实现故障预警与自动调整，减少人工干预。

2）绿色化改进。开发新型环保滤布（如可降解滤布），优化清洗工艺（采用无酸清洗技术），减少固废与废液排放。

3）大型化与高效化。针对大型湿法磷酸装置（50万t/a以上），开发带宽4 000 mm以上、过滤面积100 m^2以上的真空带式过滤机，进一步提升过滤效率。

4）资源综合利用：研究磷石膏滤饼的高值化利用技术（如生产石膏板、硫酸钙晶须），减少磷石膏堆存，实现“磷–硫–钙”资源的循环利用。

［参考文献］

［1］ 吴佩芝.湿法磷酸[M].北京：化学工业出版社，1987：125–156.

［2］ 江善襄.磷酸、磷肥和复混肥料[M].北京：化学工业出版社，1999：203–238.

［3］ 陈贵林，张万福.浅谈湿法磷酸带式真空过滤机的选用及生产实践[J].贵州化工，1998(2)：37–38，58.
CHEN G L，ZHANG W F. Selection and practice of vacuum filter with belt in wet phosphuric acid process[J]. Guizhou Chemical Industry，1998(2)：37–38，58.

［4］ 陈志军，王昕，於娟，等.大型湿法磷酸装置过滤设备选型[J].山东化工，2024，53(8)：227–229，235.
CHEN Z J，WANG X，YU J，et al. Type Selection of Filtration Equipment for Large Scale Wet-Process Phosphoric Acid [J]. Shandong Chemical Industry，2024，53(8)：227–229，235.

［5］ 张杏杰，于涛，赵承志. 双真空过滤机在尾矿脱水方面的应用[J]. 矿业工程，2025(1)：26–29，38.
ZHANG X J，YU T，ZHAO C Z. Application of Double Vacuum Filter in Tailings Dewatering[J]. Mining Engineering，2025(1)：26–29，38.

［6］ 王敬东，刘东伟，刘大朝.湿法磷酸装置带式过滤机技改[J].生态产业科学与磷氟工程，2026，41(3)：124–128.
WANG J D，LIU D W，LIU D C. Technical modification for belt filter in wet-process phosphoric acid plant [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2026，41 (3)：124–128.

［7］ 张东东，柳峰，许超. 无机填料对三元乙丙橡胶力学性能和磨耗性能的影响[J]. 化工新型材料，2025(S2)：359–364，370.
ZHANG D D，LIU F，XU C. Effect of inorganic fillers on the mechanical properties and abrasion resistance of EPD Mrubber [J]. New Chemical Materials，2025(S2)：359–364，370.

［8］ 李鹏龙.真空带式过滤机事故分析及改进对策[J].氮肥与合成气，2026，54(3)：16–18.

［9］ 魏东平，段阳阳.真空带式过滤机滤饼自密封技术[J].氮肥与合成气，2025，53(9)：17–18.

［10］ 景绍慧，李军，李传义，等.湿法磷酸净化工艺研究现状及未来展望[J].生态产业科学与磷氟工程，2025，40(1)：31–37.
JING S H，LI J，LI C，et al. Research status and future prospects of WPA purification process[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2025，40 (1)：31–37.

［11］ 薛河南，师永林.溶剂萃取法生产磷酸二氢钾技术[J].磷肥与复肥，2023，38(2)：16–18.
XUE H N，SHI Y L. Production technology of Potassium dihydrogen phosphate by solvent extraction [J]. Phosphate Fertilizer & Compound Fertilizer，2023，38(2)：16–18.

［12］ 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会.磷酸一铵、磷酸二铵：GB 10205—2009[S]. 北京：中国标准出版社，2010.