◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

磷石膏预处理技术优化与资源化利用路径的研究进展

李　丰，单　冰，耿一硕，田鹏杰，邹嘉怡，王亚静，刘姣艳，孙　宁

（中蓝连海设计研究院有限公司，江苏 连云港　222004）

［摘　要］磷石膏作为湿法磷酸生产的主要工业副产物，其年产量与历史堆存量持续攀升。然而，磷石膏中因含有可溶性磷、氟、重金属及有机质等杂质，致使大量堆存，不仅造成土地资源侵占，更对土壤、水体和大气构成严峻的环境风险。在此背景下，如何实现磷石膏的高效无害化处理与资源化利用，已成为磷化工行业实现绿色可持续发展的关键瓶颈问题。本文系统梳理磷石膏的理化特性与杂质赋存规律，对比评估水洗、石灰中和、浮选、煅烧等预处理技术的原理与适用性，并总结磷石膏在建材、化工、农业及矿山等领域的资源化利用途径与关键设备选型原则。指出未来磷石膏治理应聚焦源头减量、预处理工艺调控及高值化产品研发三大方向，通过技术创新与政策引导协同发力，推动磷石膏从“污染源”向“资源库”的根本性转变，为我国磷化工产业的绿色低碳转型提供技术支撑。

［关键词］磷石膏；有害杂质；预处理；资源化利用；设备选型

［中图分类号］X781　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）08-0079-09

Research progress on optimization of phosphogypsum pretreatment technologies and pathways for resource utilization

LI Feng, SHAN Bing, GENG Yishuo, TIAN Pengjie, ZOU Jiayi, WANG Yajing, LIU Jiaoyan, SUN Ning

(*China Bluestar Lehigh Engineering Corp*, *Lianyungang* 222004, *China*)

Abstract: Phosphogypsum, the primary industrial by-product of the wet-process phosphoric acid industry, has seen a continuous surge in both annual production and historical stockpiles. However, due to the presence of complex impurities such as soluble phosphorus, fluorine, heavy metals, and organic matter, the comprehensive utilization rate of phosphogypsum remains persistently low. The resultant large-scale stockpiling not only occupies valuable land resources but also poses significant environmental risks to soil, water bodies, and the atmosphere. In this context, achieving efficient and harmless treatment and resource utilization of phosphogypsum has become a critical bottleneck hindering the green and sustainable development of the phosphorus chemical industry. The physicochemical properties of phosphogypsum and the occurrence patterns of its impurities are systematically reviewed. A comparative evaluation of the principles and applicability of various pretreatment technologies is provided, including washing, lime neutralization, flotation, and calcination. Furthermore, it summarizes the pathways for phosphogypsum resource utilization in sectors such as building materials, chemical engineering, agriculture, and mining, along with the principles for selecting key processing equipment. The paper highlights that future phosphogypsum management should focus on three key directions: source reduction, precise control of pretreatment processes, and the development of high-value products. Through the synergistic efforts of technological innovation and policy guidance, a fundamental transformation of phosphogypsum from a “pollutant” to a “resource base” can be promoted, thereby providing technical support for the green and low-carbon transition of China’s phosphorus chemical industry.

Key words: phosphogypsum; harmful impurities; pretreatment; resource utilization; equipment selection

收稿日期：2026-05-07

作者简介：李　丰（1985—　），女，河北唐山人，正高级工程师，研究方向为资源开发及循环利用技术。

基金项目：连云港市重点研发计划（产业前瞻与关键技术）（CG2507）

0 引言

磷石膏是硫酸法湿法磷酸生产过程中产生的主要工业副产物，每生产磷酸（以P_2O_5计）1 t副产磷石膏4.5~5.0 t。其主要成分为硫酸钙（$CaSO_4·nH_2O$），通常以二水石膏（$CaSO_4·2H_2O$）形态存在，亦含有少量半水石膏。随着全球磷肥需求持续增长，磷石膏的年产生量不断攀升。据统计，全球磷石膏年产量已超过2.8亿t，累计堆存量逾60亿t[1]。我国作为磷肥生产大国，年新增磷石膏8 000万t左右，主要集中分布于云南、贵州、四川、湖北、安徽5省，历史堆存量已超过8亿t。据统计，2024年我国磷石膏利用率约为60.7%[2]。受限于现有磷石膏处理技术经济性与稳定性不足，目前多数磷化工企业仍采用露天堆存作为主要处置方式。大量磷石膏长期堆存不仅占用宝贵的土地资源，而且因降雨淋溶和风力扬散造成周边水体、土壤及大气的复合污染，其中可溶性磷、氟的渗漏已成为长江流域“三磷”污染的重要来源之一。此外，堆存过程中放射性元素的潜在暴露风险亦对生态环境与人体健康构成威胁。

面对日益严峻的环境压力，磷石膏的资源化综合利用已成为磷化工行业实现节能减排与绿色转型的核心任务。2022年，工业和信息化部等八部门联合印发《关于加快推动工业资源综合利用的实施方案》，明确提出到2025年工业副产石膏综合利用率达到73%的目标。2024年初，国家八部委再次联合发布《推进磷资源高效高值利用实施方案》，要求到2026年实现新增磷石膏无害化处理率达到100%[3]。因此，磷石膏的高效利用不仅有助于生态环境保护，更对行业发展和社会进步具有深远意义。

当前，国内外学者围绕磷石膏的无害化预处理与资源化利用开展了大量研究工作。在预处理技术方面，物理分选、水洗、化学固化、热处理等方法各有优劣，但单一技术往往难以实现对复杂杂质的高效脱除。在资源化利用方面，磷石膏已广泛应用于水泥缓凝剂、建筑材料、道路基层、土壤改良剂及化工原料提取等领域，但仍面临产品附加值偏低、市场需求不足、长期环境安全性存疑等瓶颈制约。基于上述背景，本文旨在系统梳理磷石膏的理化特性与杂质赋存规律，比较各类无害化预处理技术的原理、效果与适用性，深入分析磷石膏资源化利用的主要模式及关键生产设备选型原则，并在此基础上提出未来磷石膏治理的技术路径与发展方向，以期为磷化工行业的固废资源化利用与可持续发展提供理论参考与实践指导。

1 磷石膏主要特性以及主要杂质的危害

在湿法磷酸生产工艺中，通常采用过滤机进行三级逆流洗涤，以回收磷石膏料浆中的磷酸，随后通过磷石膏库的回水再浆后输送至堆场。磷石膏中二水石膏质量分数一般为70%~90%，pH介于2~5，属酸性[4]。其游离水分质量分数为20%~25%，结晶水质量分数16.0%~18.0%。主要杂质包括：w(F) 0.5%~0.9%，w(P_2O_5) 0.9%~1.5%，w(SiO_2) 5%~14%，w(MgO) 约0.2%，w(有机质) 一般为6.4 mg/kg。放射性杂质以Ra和U为主，含量极低，可忽略不计。与半水石膏相比，二水石膏晶体粗壮均匀，多呈六面板状，颗粒粒径高度集中在20~150 μm，平均粒径为74 μm，真密度为2.37 t/m^3，堆密度为1.15 t/m^3，硬度为2，自然安息角约37°，摩擦角为20°~40°[5]。磷石膏具备易吸潮黏结（结力为0~0.6 MPa）、沉淀速度快、细粒级沉降深、易脱水、高溶解性、易发生溶蚀再结晶和失水板结导致流动性差等特性，同时具有一定黏聚力。磷石膏原料中常含有未分解的磷矿、未完全反应的硅石、未洗净的磷酸、氟化盐、铁铝化合物、酸不溶物、有机物，以及少量重金属和微量放射性物质。其颜色由灰白至棕黑，能溶于酸、铵盐、甘油，微溶于水，不溶于乙醇。磷石膏的无害化预处理和资源化利用需符合《磷石膏的处理处置规范》（GB/T 32124—2015）及相关磷石膏制品地方标准。

（1）磷：磷是石膏中含量较多的杂质，按化学性质可分为水溶性磷、共晶磷和难溶性磷。水溶性磷以H_3PO_4、$H_2PO_4^-$、HPO_4^{2-} 3种形式存在[6]。当磷石膏水化时，水溶性磷会与Ca^{2+}反应生成难溶的$Ca_3(PO_4)_2$，覆盖在磷石膏表面，阻碍其进一步溶解和水化，从而降低磷石膏制品的强度。此外，水溶性磷随雨水渗入土壤和水体，易造成环境污染。共晶磷主要指HPO_4^{2-}取代石膏晶格中的SO_4^{2-}，形成$CaHPO_4·2H_2O$，使生成的结晶体变粗、结构疏松，进一步降低石膏制品的强度。难溶性磷以未反应的磷矿、铁铝磷酸盐为主，对磷石膏制品性能影响较小。

（2）氟：在磷矿石经硫酸和磷酸分解过程中，有20%~40%的氟残留在磷石膏中，主要以可溶氟和难溶氟两种形式存在[7]。可溶氟主要为NaF、KF等化合物，难溶氟则包括CaF_2、未反应的磷矿、Na_2SiF_6、K_2SiF_6及Na_2AlF_6等。可溶性氟会导致磷石

膏凝固时间缩短、制品强度降低，还可能进入水体和土壤，对人类健康和生态环境造成较大危害。相比之下，难溶氟为惰性，对磷石膏制品影响较小。

（3）有机质杂质：磷石膏中的有机质杂质主要来源于磷矿石中的碳质包裹体，以及磷酸生产过程中添加的萃取剂、絮凝剂等。这些有机质杂质通常以絮状形式存在，且随着磷石膏颗粒粒径增大，其含量也相应增加[8]。有机质杂质会导致磷石膏标准稠度需水量上升，凝结和硬化速度减慢，硬化体结构变得疏松，力学强度降低，并显著影响其白度，使磷石膏呈现灰白色或黑灰色。

（4）钾、钠：钾、钠碱金属离子会使磷石膏受潮，或者使磷石膏制品表面粉化、泛霜和长毛。

（5）重金属：重金属杂质主要有Cr、Pb、Mn等，以磷酸盐或碳酸盐形式存在，会随雨水进入土壤和水系，对环境污染极大，不过含量较低。

2　磷石膏无害化预处理

当前，磷石膏无害化除杂的预处理方法主要包括水洗法、石灰中和法、浮选法、酸浸法、煅烧法、自然陈化法及筛分法等，各类方法均存在各自的优势与不足。

（1）水洗法。该方法通过多次反复水洗，可将磷石膏的pH调节至中性，使其中水溶磷、水溶氟含量符合GB/T 23456—2018《磷石膏》二级品的杂质指标要求。从处理效果来看，水洗法能有效去除约90%的可溶磷、可溶氟，同时去除约50%的有机质及重金属离子，处理后的磷石膏基本可满足无害化堆存及后续资源化利用的原料要求[9]。其典型工艺流程为：磷酸生产系统中经二水石膏过滤机得到的滤饼，采用石膏过滤洗涤产生的洗液与部分滤液进行再浆；浆液顶部的泡沫通过刮泡板分离，去除大部分有机质；将处理后的浆液输送至过滤机，进行2～3次逆流清洗。清洗完成后，滤饼经胶带机送至干堆库堆存；滤液则分为两部分，一部分回流至再浆槽循环利用，另一部分进入水处理系统，经处理达标后重新用于洗涤环节。需重点说明的是，配套水处理工艺是保障水洗法高效运行的关键，具体流程包括预处理、超滤及深度处理三大系统。预处理系统采用两级沉淀法，核心目的是去除大部分有机污染物、氟化物、磷酸盐及重金属：一级沉淀阶段，添加石灰将pH调节至5，生成硫酸钙和氟化钙，压滤后滤液进入二级沉淀；二级沉淀阶段，继续添加石灰将pH调节至12，生成磷酸氢钙和少量氟化钙，压滤后滤液送入软化反应槽；在软化反应槽内，添加硫酸将废水pH调节至6～8，再投加碳酸钠，使水中钙、镁离子生成碳酸钙、碳酸镁沉淀以降低硬度。预处理后的废水依次进入多介质过滤器和活性炭过滤器，进一步脱除细小悬浮物、小分子有机物及余氯，避免后续软化树脂和纳滤膜中毒。过滤、吸附后的废水经软化器通过树脂吸附深度软化，再进入超滤系统（过滤孔径0.05 μm），截留微小颗粒以降低悬浮物含量和浊度；最终，超滤滤液进入反渗透系统（过滤精度约0.000 1 μm），去除溶解盐类、胶体、细菌、病毒等杂质，反渗透产生的淡水返回水洗工序的二洗作业，浓水则返回一洗作业，实现水资源循环利用[10]。

水洗法的核心优势在于工艺成熟可靠，且通过处理水洗浓水可回收磷石膏中部分水溶磷、水溶氟。但同时存在明显不足：新水消耗量较大（处理1 t磷石膏需新水1～3 t），且处理后磷石膏的纯度与白度提升效果有限。

（2）石灰中和法。石灰中和法是向磷石膏中添加碱性石灰或其他碱性矿渣，通过化学固化作用将其中的水溶磷、水溶氟转化为$CaHPO_4$、$Ca_3(PO_4)_2$、CaF_2等惰性物质，同时中和磷石膏中的酸性物质（H^+），处理后磷石膏水溶液pH可稳定在7～9[11]。该方法分为干法和湿法两种工艺路线[12]：干法中和法多用于水泥缓凝剂的预处理环节。将磷石膏与石灰按特定比例混合搅拌完成改质，随后送入均化库堆存均化，均化时间不少于7 d，处理后的磷石膏即可作为水泥缓凝剂原料。湿法中和法是先将生石灰配制成质量分数约10%的石灰乳溶液，再将磷石膏与石灰乳置于反应槽内充分混合，将体系pH中和至8即可完成处理。

石灰中和法可与水洗法耦合使用，既能降低水洗工艺的新水消耗量，又能确保最终预处理产物的pH稳定在7～9的中性区间。该工艺的核心优势是流程简单、操作便捷、处理成本较低，且能有效去除大部分水溶磷和水溶氟；但存在明显局限性，无法去除磷石膏中的有机质、重金属以及未反应的磷矿，同时也不具备回收水溶磷、水溶氟资源的能力。

（3）重选法。重选法的核心原理是利用磷石膏与部分难溶性杂质的密度差异实现分离。具体而言，磷石膏与体系中混杂的有机质、未反应磷矿、硅质脉石，以及湿法磷酸工艺中生成的难溶磷酸盐、氟硅酸盐等杂质[13]，在密度和粒径上存在显著差异，这为重力分选提供了基础条件。实际应用

中，可通过水力旋流器、重选柱、螺旋溜槽、摇床、跳汰机等重选设备，实现磷石膏与上述难溶杂质的有效分离，进而提升磷石膏纯度、降低杂质含量。该工艺的突出优势是无需添加浮选药剂，避免了化学药剂对环境的污染，对环境友好。

但需注意其局限性：磷石膏的粒度大多集中在20～150 μm，在此粒度范围内单独采用重选法，分选精度有限，难以达到高标准的提纯要求。因此，重选法通常不单独使用，而是与水洗法、浮选法联合应用，以实现更优的除杂效果。

（4）浮选法。浮选法的核心原理是通过药剂作用强化磷石膏与杂质矿物的可浮性差异，进而实现分离提纯。其基础工艺为：按特定液固比将磷石膏与水混合后送入浮选机，通过添加酸调节体系酸碱度，并投加专用浮选药剂，完成磷石膏与杂质的分选。该方法的常用流程分为反浮选和正浮选两类，适配不同分离需求：反浮选主要在酸性条件（pH 2～3）下开展，通过添加非极性捕收剂特异性吸附有机质，实现有机质的脱除；正浮选可在酸性或碱性条件下进行，核心是投加磷石膏专用捕收剂，优先富集磷石膏矿物，达到提纯目的。

浮选法的优势较为突出，能高效脱除有机质，同时显著提升磷石膏品质，纯度可提升至90%以上，白度从约30%提高至60%[14]。但存在明显局限性：对可溶性磷、可溶性氟及重金属等杂质的去除效果较差；工艺流程相对复杂，药剂消耗与设备运营成本较高。因此，实际应用中通常需与水洗工艺联合使用，互补短板以获得更优的预处理效果。

（5）筛分法。筛分法的核心原理是利用磷、氟、有机质等杂质与磷石膏在粒度分布上的显著差异实现分离[15]。但该方法的适用条件较为苛刻，仅当杂质在磷石膏中分布严重不均时才会考虑采用，因此在磷石膏预处理工艺中应用极少。

（6）陈化法。陈化法是将磷石膏置于堆场中自然堆存，借助雨水淋洗、光照降解等自然条件，经过长时间陈化降低其中的杂质含量[16]。该方法的主要缺点是陈化周期长，且陈化过程中产生的淋溶水等易对周边环境造成污染。

（7）酸浸法。酸浸法通过采用硫酸、盐酸等强酸对磷石膏进行洗涤，使磷石膏中的不溶性磷、铁、铝、镁化合物及氟化钙等杂质溶解，再通过固液分离完成除杂[17]。其优势在于能有效脱除磷石膏中的难溶性杂质，同时提升磷石膏的白度；但局限性明显，无法去除水溶磷、水溶氟及有机质，且强酸消耗导致处理成本较高。

（8）煅烧法。煅烧法是将磷石膏置于200～400 ℃的高温环境中处理：一方面，有机质及部分氟会分解为气体挥发去除；另一方面，无机磷和部分氟会与Ca^{2+}反应，生成焦磷酸钙、氟化钙等稳定的难溶性化合物，从而实现无害化。根据煅烧温度不同，二水石膏可转化为β–半水石膏（170 ℃）或无水石膏（800 ℃）等胶凝材料，白度可大幅度提升至80%以上，因此主要用作建筑石膏原料[18]。常用煅烧设备包括炒锅、回转窑、沸腾炉、闪烧炉等，工艺多采用两级煅烧模式：首级煅烧脱除磷石膏表面的游离水，次级煅烧进一步去除结晶水。该方法的优点是能显著提升磷石膏的白度和原料品质，但存在能耗高、处理成本高、设备投资大的问题，且难以去除原料中的难溶性杂质。

（9）化学转晶法。化学转晶法主要通过蒸压法、常压盐溶液法、硫酸法等工艺，将二水石膏转晶为α–半水石膏[19]。在转晶过程中，磷石膏晶体包裹的杂质及共晶磷会被释放，后续通过水洗、过滤即可脱除。与β–半水石膏相比，α–半水石膏晶体缺陷少，多呈短柱状，强度可提升3～4倍，是优质的建筑石膏原料。该工艺的缺点是能耗高、处理成本高、设备投资大，且受原料杂质含量影响较大，因此通常需要先对磷石膏进行前置除杂预处理。

3 磷石膏资源化利用途径

经过无害化预处理后，磷石膏中的有害杂质得到有效脱除或固化，其理化性能得以显著改善，为后续资源化利用提供了原料。目前，磷石膏的资源化利用已形成建材、化工、农业、矿山及环保等多领域协同发展的格局，利用途径涵盖水泥缓凝剂、建筑石膏材料、路基材料、矿山充填材料、制备硫酸联产水泥、硫酸钙晶须、农业肥料及生态修复材料等多个方向。

（1）水泥缓凝剂：水泥缓凝剂是一种能延长水泥凝结时间、调节其水化速度的外加剂。采用磷石膏制备水泥缓凝剂时，原料需满足以下指标：w（水溶性P_2O_5）≤0.1%，pH 10～11，w（水溶性F）≤0.2%，w(SO_3）≥35%，结块率≤5%[20]。为避免产品在运输和储存过程中发生黏结和堵料，需将成品w(H_2O）控制在3.0%～5.0%，并通过造粒工艺将其制成540 mm的颗粒或块状。工艺流程为：将磷石膏与石灰或电石渣等碱性改性剂按比例混合并均

化，经造粒后进行蒸压反应，最后将产品破碎、筛分，合格品入库。

（2）建筑石膏材料：磷石膏用于建材时，原料需经过无害化预处理，并达到GB/T 23456—2018《磷石膏》二级品及以上标准。建筑石膏材料主要包括β-半水石膏、α-半水高强石膏和Ⅱ型无水石膏，广泛应用于抹灰砂浆、纸面石膏板、自流平砂浆、石膏条板、石膏砌块、现浇填充墙、石膏粉、胶凝材料、陶瓷、精密铸造、医用及3D打印等领域。

（3）路基材料：将磷石膏作为路基材料是一种大规模消纳的综合利用方式。原料须符合GB/T 23456—2018《磷石膏》三级品及以上标准。路基材料一般采用水泥稳定磷石膏混合料，以磷石膏和水泥为主要原料，辅以有机和无机固化剂（无机固化剂如粉煤灰、石灰，有机固化剂常用有机高分子材料），固化有害离子，提高材料的抗压和抗剪强度[21]，使其满足公路路基的工程要求。

（4）充填材料：以磷石膏为主要原料制备充填材料，可用于露天矿坑回填或井下采空区充填，有助于减少磷石膏堆存带来的环境压力和处理成本，同时提升矿山边坡稳定性、预防采空区塌陷等安全风险。用于井下填充时，磷石膏须符合GB/T 32124—2024《磷石膏的处理处置规范》要求。充填方式包括二水石膏和半水石膏两种。二水石膏充填通常以水泥或碱性材料为胶凝剂，二水磷石膏为骨料，并掺加一定比例的粉煤灰作为激发剂。半水石膏则作为新型充填材料，可部分替代水泥作胶凝剂，与二水磷石膏和生石灰等碱性激发剂配合，既降低了充填成本，也提高了磷石膏的综合消纳能力[22]。

（5）生产硫酸联产水泥：利用磷石膏生产硫酸联产水泥是实现磷石膏资源化、促进硫和硅元素循环的有效途径。磷石膏原料须进行无害化预处理，达到GB/T 23456—2018《磷石膏》二级品及以上标准，重点脱除磷和氟等有害杂质。目前主要技术包括碳还原磷石膏制酸法和气体硫酸还原法。碳还原技术将磷石膏、焦炭、黏土等混合研磨后导入反应器，经历石膏化学还原分解（水泥熟料烧制，1 000～1 450 ℃；石膏分解反应，900～1 100 ℃）和SO_2制备过程；气体硫酸还原法工艺类似，石膏还原温度为750～900 ℃，分解温度为900～1 100 ℃[23]。在生产过程中，磷石膏$w(H_2O)$ 30%～40%，需大量能耗予以脱除，高温煅烧亦对能源提出较高要求。因此，降低能耗、提高能源利用效率和优化余热回收，是发展该工艺的关键。

（6）硫酸钙晶须：硫酸钙晶须是一种具有独特性能和广阔应用前景的无机非金属材料，呈纤维状单晶体，长径比一般为10～200。按成分分为α-半水硫酸钙晶须和无水硫酸钙晶须，具有高强度、高耐热性和良好绝缘性等优点，主要应用于熟料增强、橡胶补强、刹车片、离合器片及造纸工业等领域。其制备方法主要有蒸压法、加压水热法和常压水热法，通过调控溶液的电解质浓度、pH及晶须控制剂添加量等参数，实现不同形貌和尺寸（微米级）的晶须合成[24]。磷石膏中的可溶磷、可溶氟、金属离子和有机杂质会影响晶须的白度和品质，因此相较于其他用途，需对磷石膏进行深度提纯和除杂处理。

（7）农业肥料：磷石膏可作为硫酸铵、硫酸钾等化学肥料的原料。硫酸铵是一种重要的硫、氮肥，常用生产工艺包括：一是用氨直接中和，二是氨和二氧化碳处理磷石膏，生成碳酸铵溶液（在碳化塔内完成）[25]。硫酸钾则作为主要的无氯钾肥，石膏转化法目前包括一步法、两步法和氨化-复分解法：一步法是在助溶剂作用下，磷石膏与氯化钾直接反应生成硫酸钾；两步法和氨化-复分解法需先制得中间体硫酸铵，再进一步转化为硫酸钾。磷石膏转化属于溶解-再结晶过程，杂质会显著影响溶解速度和产品品质，如减缓硫酸钙溶解、影响碳酸钙晶体生长、导致晶体粒度细化及转化率降低。因此，磷石膏原料须经过无害化处理，提高纯度，降低杂质含量，以保证肥料产品质量和转化效率。

（8）生态修复材料：磷石膏含有钙、磷、硫、镁等元素以及有机物和作物生长所需的营养物质，可以制备土壤调理剂以改良酸性土壤和盐碱地，磷石膏原料质量应符合GB/T 23456—2018《磷石膏》中三级以上要求，土壤调理剂应符合GB 38400、HG/T 4219的规定。

4　主要设备选型

（1）粉磨：建筑石膏粉磨改性设备一般采用球磨机、立式针式磨粉机、雷蒙磨和立磨等。球磨机是水泥行业应用最为广泛的磨矿设备之一，它主要由圆柱形筒体、端盖、轴承和传动装置等部分组成，具有适应范围广、生产能力大、产品细度均匀等优点，常用于水泥生料的粉磨、水泥熟料的粉磨以及矿渣等混合材料的粉磨等环节。立式针式磨粉机是一种高效的现代细磨设备，适用于熟石膏的改

性，主要由机壳、定盘、动盘、齿盘、出料斗、高速轴、机架等部分组成，具有运行可靠、占地面积小、生产能力大、产品质量好、粉碎效率高等优点。立磨：也叫辊式磨，主要由磨盘、磨辊、加压装置、分级装置、传动装置和壳体等部分组成。与球磨机相比，立磨能量利用率高，集粉碎、烘干、粉磨、选粉、输送于一体，具有粉磨效率高、电耗低（比球磨机节约电20%～30%）、烘干能力大、产品细度调节方便、占地面积小、工艺流程简单、噪声低、检修方便等优点，目前单机台时产量300 t以上的粉磨系统，选用立磨最为经济。雷蒙磨：主要由主机、分级装置、风机、旋风集粉器等部分组成，具有适用性强、成品粒度均匀、能耗较低、占地面积小等优点，受原料硬度、湿度、黏度影响较大。

（2）搅拌：立式单轴高浓度搅拌机广泛应用于矿山、污水处理、化工、建筑材料等行业，适用于高浓度的磷石膏浆体或需要更精细搅拌的情况。主要由搅拌轴、搅拌桨叶、驱动装置、罐体等部分组成，针对高浓度物料搅拌设计，搅拌力强，能有效处理高黏度、高密度物料，防止物料沉淀和结块，具有搅拌效果好、节能、操作维护方便等优点。卧式双轴搅拌机主要由搅拌轴、搅拌桨叶、驱动装置、搅拌槽等组成，适用于磷石膏与其他添加剂的初步混合，它能够快速将磷石膏与其他物料进行均匀搅拌，形成初步的混合料，可处理较大产量的磷石膏，两根搅拌轴上的桨叶相互交错，使磷石膏在水平和垂直方向上都能得到充分搅拌，确保混合的均匀性。

（3）浮选：磷石膏浮选主要采用浮选机或浮选柱。浮选机主要由槽体、搅拌装置、充气装置、排出矿化泡装置、电机等组成，适合处理粗粒级的磷石膏，当磷石膏中粗粒级的目的矿物含量较高，且对浮选速度要求较高时，浮选机能够快速实现矿物与脉石的分离。浮选柱主要由柱体、给矿装置、充气装置、泡沫排出装置、稳流装置等部分组成，适用于处理微细粒级含量高的磷石膏，对于品位较低、杂质含量较高的磷石膏，能够通过其高效的精选作用，获得较好的分选效果。与浮选机相比，浮选柱具有能耗低、占地面积小和投资低等优点。磷石膏浮选主要脱除有机质、硅质脉石，因有机质密度较轻，可浮性较好，选择浮选柱较为适合。

（4）重选：磷石膏重选主要采用水力旋流器、重选柱、螺旋溜槽、摇床、悬振锥面选矿机等重选设备，可以脱除一部分有机质、未反应的磷矿、硅质脉石以及在湿法磷酸工艺中生成的一些难溶的磷酸盐、氟硅酸盐等杂质。水力旋流器是一种利用离心力实现固液分离或不同粒度、密度颗粒分离的设备，可以实现磷石膏料浆分级、浓缩以及杂质分离等用途。重选柱、螺旋溜槽、摇床使用粒度范围一般在0.074～2.000 mm。悬振锥面选矿机作为一种新型的细粒重选设备，适宜分选粒度为5～100 μm。

（5）过滤洗涤：磷石膏过滤洗涤一般采用水平带式真空过滤机、转台过滤机、隔膜压滤机。水平带式真空过滤机具有处理能力大、滤饼洗涤效果好（能实现多次顺流和逆流洗涤）、卸料效果好、滤布再生效果好、运行平稳、操作维护简单、运营成本低、适应性广等优点，但滤饼水含量高，$w(H_2O)$一般在20%以上。转台过滤机具有占地面积小、转动部件较少、运行平稳、过滤能力强、维护费用低、操作维护简单、运营成本低等优点，但存在卸料效果较差、滤布再生较差等缺点。隔膜压滤机的滤饼水含量较低，$w(H_2O)$一般在14%以下，过滤精度较高，能有效截留细小颗粒，滤液清澈，缺点是间歇式工作、处理能力相对较低，维护费用高、操作维护较为复杂，运营成本稍高。

（6）均化：针对磷石膏原料品位和杂质含量波动，在进入石膏煅烧炉之前采用原料预均化或者原料均化可以保证后续煅烧出的β–半水石膏的性能稳定，一般有堆场均化、机械均化、气力均化和管道均化。堆场均化一般采用堆取料机或者装载车，将不同来源、不同成分的磷石膏在堆料过程中混匀。机械均化主要是采用双轴搅拌机将不同地区的磷石膏按一定配比翻滚混匀。管道混匀是针对磷石膏矿浆的，通过安装混合器使磷石膏料浆混合。气力均化是磷石膏最常用的均化方式，主要是利用空气使磷石膏不断混合和翻滚，从而达到均化的效果，常用的气力均化库主要有间歇式均化库、连续式均化库、多料流式均化库。间歇式均化库为最早应用的均化库，主要利用高压空气充分搅拌生料实现均化，由于动力消耗大等原因已逐步被淘汰。连续式均化库兼有储存与均化功能，采用库内“平铺直取”与混合室或均化室内空气搅拌相结合，结构较为复杂，充气装置及空气搅拌室维修困难，生料卸空率高，电耗较大，已逐渐被多料流式均化库代替。多料流式均化库是目前使用比较广泛的库型，利用库内重力混合作用，实现基本不用或减少气力

均化作用，具有操作简单、电耗较低等优点，主要有IBAU型中心室均料库、CF型控制流式均化库、MF型多料流式均化库、TB型多料流式均化库、NC型多料流式均化库等。

（7）造球：造球设备一般有圆盘/圆筒造球机、高压压球机以及挤压造球机。圆盘/圆筒造球机基于离心力、摩擦力和毛细水作用，通过旋转圆盘使物料颗粒在运动中相互碰撞、滚动并团聚成球，适用于各种矿石、精矿粉等物料的造球，尤其对于需要生产高质量、粒度均匀生球的场合，如铁精矿粉造球用于高炉炼铁、有色金属矿粉造球用于冶炼等。高压压球机是一种利用高压将物料压制成型的造球设备，主要用于处理难以通过传统造球方法（如圆盘/圆筒造球机）成球的物料，适用于高湿度、高黏性或细粒级物料（如煤粉、冶金粉尘、污泥、磷石膏、尾矿渣等）。挤压造球机是一种通过机械挤压将粉状或颗粒状物料强制团聚成球的设备，广泛应用于化工、制药、食品、环保等领域（如化肥、树脂颗粒、饲料、危险废弃物固化、活性炭等）。其核心特点是通过模具控制颗粒形状和尺寸，适用于对颗粒形态、密度和强度要求较高的场景。圆盘/圆筒造球机能耗低，生产成本低、球团强度低（抗压强度通常 < 50 N），连续工作，适用于易团聚的干燥或低湿度物料。高压压球机能耗高、生产成本高、球团强度高（抗压强度可达 50 ~ 200 N），间歇式或半连续式，适用于高黏性、细粒、难团聚物料。挤压造球机能耗较高、生产成本较高、球团强度较高（抗压强度 30 ~ 80 N），连续生产，适用于干粉、低黏性物料。

（8）煅烧设备：工业副产石膏年生产能力在10万t以下且游离水含量不大的情况下可采取一步法煅烧；生产规模16万t以上的，应采用二步法煅烧工艺，特别是w（游离水）大于12%的工业副产石膏原料。二步法煅烧工艺为第一步脱除磷石膏的游离水，第二步脱除磷石膏的结晶水。煅烧主要包括低温慢速煅烧、快速煅烧以及中速煅烧，低温慢速煅烧物料温度小于180 ℃，炉内停留时间为1 h左右，如连续炒锅、沸腾炉等设备，煅烧产品大部分为β–半水石膏，产品纯度好，w（结晶水）一般为4.5% ~ 5.8%，广泛应用于建材行业。快速煅烧指煅烧物料温度远大于180 ℃，物料在炉内停留十几秒到几分钟的煅烧方式，煅烧后需要增加冷却装置，生产效率高，但煅烧产品Ⅲ型无水石膏相对较多，生产中通过良好的冷却和陈化环节使产品质量得到保证，广泛应用于石膏条板、石膏砌块等产品制备。中速煅烧指物料在窑内停留时间在几分钟、十几分钟，物料温度为140 ~ 165 ℃，典型的煅烧设备是回转窑。表1为目前主要的磷石膏煅烧工艺。350 ℃以下得到的是Ⅲ型无水石膏，晶体缺陷多，具有较强的水化能力，水化速度快。850 ℃以上得到的是Ⅱ型无水石膏，晶体缺陷小，凝结时间显著延长，硬化体积密度与强度增加。

表1　磷石膏煅烧工艺[26–30]

Table 1　Calcination process of phosphogypsum

工艺	传热方式	产品质量	特点	产能
炒锅煅烧工艺	间接或直接传热	产品质量稳定性差，易过烧或欠烧	工艺成熟，容易操作，但热效率低(65%)，能耗高，自动化程度低	适合小规模生产，生产效率低
回转窑煅烧工艺	间接或直接传热	物料受热均匀，产品质量稳定	工艺成熟，但热效率相对较低(80%)，设备投资大，占地面积大	生产能力大，适用于大规模生产
流化煅烧工艺	间接或直接传热	物料受热均匀，产品质量稳定	热效率较高(90%)，无传动部件，能耗较低，自动化程度高，占地少，可同时生产β–半水石膏和无水石膏，粒度小于5 mm，但煅烧前需要脱除游离水	生产能力大，适用于大规模生产
多室煅烧炉工艺	间接或直接传热	物料受热更为均匀，产品质量稳定	采用分室精细煅烧，煅烧时间长，热效率较高(95%)，能耗较低，自动化程度高，使用寿命长，占地少，可同时生产β–半水石膏和无水石膏，粒度小于5 mm，但煅烧前需要脱除游离水	生产能力大，适用于大规模生产
锤式煅烧设备	磷石膏磨细后与热气体直接换热	产品质量稍差	集磨碎、烘干和煅烧功能于一体，能耗相对较低，占地面积小、设备投资低，但锤头易磨损	适合中小规模生产，生产效率较高

5　结语

（1）磷石膏减量化是破解磷化工行业固废污染难题、实现产业绿色低碳发展的核心路径。未来应重点聚焦两大方向开展技术研发与产业化应用：一是研发新型高效磷矿选矿工艺，提升磷精矿品质，从源头减少磷石膏产生量；二是攻关非硫酸法磷酸

生产工艺，从生产端实现磷石膏的源头减量。

（2）对于磷石膏预处理而言，每增加一道处理工序都会直接推高后续资源化利用的成本。因此，磷石膏预处理工艺的选择需紧密结合后续资源化利用的实际需求进行调整与优化，避免因过度处理造成不必要的生产成本增加。

（3）水洗工艺是脱除磷石膏中可溶磷、可溶氟最有效的预处理方法。若采用蒸汽将磷石膏过滤洗涤水加热至75～80 ℃后再进行洗涤作业，可显著提升洗涤效率，降低新水消耗量。同时，可将空泵密封水作为干净洗水的补充水源，进一步减少净水的消耗。

（4）磷石膏库可采用分区设计模式，在库区内部同步实现磷石膏的无害化预处理、自然陈化两大功能，同时还能对不同品质的磷石膏进行分级存放，为后续差异化资源化利用提供便利，从而有效降低磷石膏无害化处理与资源化利用的综合成本。

（5）磷石膏作为磷化工行业的典型固废，与脱硫石膏、天然石膏相比，存在原料预处理成本偏高、制品品质相对较差的短板，因此其资源化利用存在一定的市场半径限制。建议磷石膏资源化利用充分结合项目所在地的资源禀赋与产业布局：对于磷化工企业与矿山邻近的场景，资源化方向可重点布局矿山充填、生态修复以及磷石膏制硫酸联产水泥等领域，实现矿化生产系统内硫、钙、硅、镁等元素的循环利用；对于邻近钾肥厂的磷化工企业，则可依托区域产业优势，将磷石膏用于制取硫酸钾，同时拓展盐碱地修复等应用场景。

［参考文献］

［1］ 魏大鹏，陈前林，金沙，等.磷石膏的工业应用及研究进展[J].贵州化工，2009，34(5)：22-24.
Wei Dapeng, Chen Qianlin, Jin Sha, et. al. Researchment of phosphogypsum produce sulfur dioxide and calcium carbide[J]. Guizhou Chemical Industry，2009，34 (5)：22-24.

［2］ 崔荣政，白海丹，高永峰，等.磷石膏综合利用现状及“十四五”发展趋势[J].无机盐工业，2022，54(4)：1-4.
Cui Rongzheng, Bai Haidan, Gao Yongfeng, et al. Current situation of comprehensive utilization of phosphogypsum and its development trend of 14th Five-Year Plan [J]. Inorganic Chemicals Industry，2022，54(4)：1-4.

［3］ 工业和信息化部，国家发展改革委，财政部，等.磷石膏综合利用行动方案：(工信部联节〔2024〕58号)[EB/OL].(2024-03-25)[2025-02-21].https://www.milt.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2024/art_2bd9ebffobob4cffa2obedc5d7ec15dq.html.

［4］ 张文静，张建刚，陈烨，等.盐酸法湿法磷酸工艺研究进展[J].应用化工，2019，48(1)：193-196.
Zhang Wenjing, Zhang Jiangang, Chen Ye, et al. Research advances in wet-process phosphoric acid process by hydrochloric acid[J]. Applied Chemical Industry，2019，48(1)：193-196.

［5］ 蒋达波，谭建红，袁鹏，等.磷石膏中有害成分的无害化处理方法综述[J].吉林化工学院学报，2014，31(1)：33-36.
Jiang Dabo, Tan Jianhong, Yuan Peng, et al. Methods of the Harmless Treatment of Harmful Components in Phosphogypsum [J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2024, 31 (1)：33-36.

［6］ 吴文涛，陶诚，王亮伟，等.磷石膏的无害化处理与资源化利用研究进展[J].化工环保，2026，46(3)：1-11.
Wu Wentao，Tao Cheng，Wang Liangwei，et al. Research progress on harmless treatment and resource utilization of phosphogypsum[J]. Environmental Protection of Chemical Industry，2026，46(3)：1-11.

［7］ 苏殊，许德华，李朝荣，等.硝酸法磷酸脱氟工艺研究[J].无机盐工业，2021，53(9)：24-29.
Su Shu，Xu Dehua，Li Chaorong，et al. Study on defluorination of phosphoric acid by nitric acid process[J]. Inorganic Chemicals Industry，2021，53(9)：24-29.

［8］ 杨文娟，何宾宾，朱桂华，等.磷矿制湿法磷酸技术综述[J].磷肥与复肥，2022，37(8)：26-28.
Yang Wenjuan，He Binbin，Zhu Guihua，et al. Review on the technology of wet-process phosphoric acid from phosphate rock [J]. Phosphate & Compound Fertlizer，2022，37(8)：26-28.

［9］ Xiang Junchen，Qiu Jinping，Zheng Pangkun，et al. Usage of biowashing to remove impurities and heavy metals in raw phosphogypsum and calcined phosphogypsum for cement paste preparation[J]. Chemical Engineering Journal，2023，451(Part 1)：138594.

［10］ 桑安，曹俊雅，张莉昕，等.磷石膏固废资源化利用技术及应用前景[J].现代化工，2025，45(1)：34-41.
Sang An，Cao Junya，Zhang Lixin，et al. Phosphogypsum solid waste reutilization technology and application prospects [J]. Modern Chemical Industry，2025，45(1)：34-41.

［11］ 项双龙，吴有丽.磷石膏的石灰法无害化处理技术的工业化研究[J].硫磷设计与粉体工程，2018(1)：22-24.
Xiang Shuanglong，Wu Youli. Study on Industrial Harmless Treatment Technology of Phosphogypsum with Lime Process [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering，2018(1)：22-24.

［12］ 李展，陈江，张覃，等.磷石膏中磷、氟杂质的脱除研究[J].矿物学报，2020，40(5)：639-646.
Li Zhan，Chen Jiang，Zhang Qin，et al. A Study on the removal of phosphorus and fluorine impurities from phosphogypsum[J]. Acta Mineralogica Sinica，2020，40(5)：639-646.

［13］ 罗芳，贺严，焦文宇，等.基于磷石膏的多骨料充填体强度演化规律研究[J].矿业研究与开发，2019，39(6)：41-46.
Luo Fang，He Yan，Jiao Wenyu，et al. Research on the Strength Evolution Rule of Multi-aggregate Filling Body Based on Phosphogypsum[J]. Mining Research and Development，2019，39(6)：41-46.

［14］ 邹凯，肖军辉，鲁涛，等.磷石膏预处理-浮选强化分离提纯新工艺[J].非金属矿，2022，45(6)：70-73.
Zou Kai，Xiao Junhui，Lu Tao，et al. New Technology for Separation and Purification of Phosphogypsum by Pretreatment-

Flotation[J]. Non-Metallic Mines,2022,45(6):70-73.

[15] 赵沁媛,陈文,何治良,等.改性磷石膏基复合胶凝材料配比设计及力学性能研究[J].化工矿物与加工,2025,54(6):48-56.
Zhao Qinyuan, Chen Wen, He Zhiliang, et al. Research on the proportioning design and mechanical properties of modified phosphogypsum-based composite cementitious materials [J]. Industrial Minerals & Processing, 2025, 54(6): 48-56.

[16] 李冰雁,李晨,游晨,等.磷石膏堆场区域水环境中主要污染物分布特征及其风险评价[J].化工环保,2024,44(2):279-285.
Li Bingyan, Li Chen, You Chen, et al. Distribution characteristics and risk assessment of major pollutants in regional water environment of phosphogypsum yard [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2024, 44(2): 279-285.

[17] 张雷泽雨,刘金荣.磷石膏无害化与资源化技术研究进展与展望[J].生态产业科学与磷氟工程,2026,41(4):87-94,123.
Zhang Leizeyu, Liu Jinrong. Research progress and prospects in harmless and resource utilization of phosphogypsum [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2026,41(4):87-94,123.

[18] 付静伟,丁明,张庚福.加热对磷石膏中水溶性磷、氟的变化研究[J].安徽化工,2015,41(2):42-45.
Fu Jingwei, Ding Ming, Zhang Gengfu. Research on the Thermal Process of Soluble Phosphogypsum and Fluorine [J]. Anhui Chemical Industry, 2015, 41(2): 42-45.

[19] 李育彪,池汝安,李瑞,等.磷石膏常压制备硫酸钙晶须试验及机理研究[J].金属矿山,2025(9):279-286.
Li Yubiao, Chi Ru'an, Li Rui, et al. Experiment and Mechanism Study on the Preparation of Calcium Sulfate Whiskers Using Phosphogypsum under Atmospheric Pressure [J]. Metal Mine, 2025(9): 279-286.

[20] 王林,孙国超,程莹莹.磷石膏制酸和水泥熟料的预处理技术[J].硫磷设计与粉体工程,2025(5):8-11,57.
Wang Lin, Sun Guochao, Cheng Yingying. Pretreatment Technology for Sulfuric Acid and Cement Clinker Production from Phosphogypsum [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2025(5): 8-11, 57.

[21] 焦宁,张立师,丁建文,等.电石渣与磷石膏改良隧道渣土路基的力学性能与微观机理[J/OL].交通运输工程学报[2025-12-12]. http://doi.org/10.19818/j.caki.1671-1637.2026.111.
Jiao Ning, Zhang Lishi, Ding Jianwen, et al. Mechanical behavior and micro-mechanisms of abandoned tunnel spoils improved with calcium carbide slag and phosphogypsum for roadbed filling [J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering [2025-12-12]. http://doi.org/10.19818/j.caki.1671-1637.2026.111.

[22] 徐恒,王贻明,刘子涵,等.磷石膏分层充填组合体界面效应的影响研究[J/OL].材料导报[2026-02-12]. http://doi.org/10.11896/cldb.25110147.
Xu Heng, Wang Yiming, Liu Zihan, et al. Study on the influence of interface effect in phosphogypsum filling assembly [J/OL]. Materials Reports [2026-02-12]. http://doi.org/10.11896/cldb.25110147.

[23] 马汝普,刘翠翠,闫永,等.石膏制硫酸联产水泥回转窑高温窑气自动分析系统的应用[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(4):119-124.
Ma Rupu, Liu Cuicui, Yan Yong, et al. Application of automatic analysis system for high-temperature gas of rotary kiln in coproduction of sulfuric acid and cement from gypsum [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(4): 119-124.

[24] 吴开振,李瑞,李育彪,等.磷石膏常压制备二水硫酸钙晶须机理研究[J].硅酸盐通报,2024,43(12):4461-4470.
Wu Kaizhen, Li Rui, Li Yubiao, et al. Mechanism of Preparing Calcium Sulfate Dihydrate Whiskers from Phosphogypsum under Atmospheric [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(12): 4461-4470.

[25] 侯佳宝,宁尚栋,程梓峻,等.不同改良剂对重度苏打盐碱地土壤理化性质及水稻产量的影响[J].江苏农业科学,2025,53(18):278-284.

[26] 楼思迪,曾彦琦,任浏祎,等.磷石膏煅烧工艺研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2025(5):194-203.
Lou Sidi, Zeng Yanqi, Ren Liuyi, et al. Analysis and Prospects of Phosphogypsum Calcination Process Technology [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2025(5): 194-203.

[27] 李恒,张晖,资学民.磷石膏煅烧工艺进展分析[J].无机盐工业,2023,55(6):27-35.
Li Heng, Zhang Hui, Zi Xuemin. Analysis on calcination process progress of phosphogypsum [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2023,55(6):27-35.

[28] 李玉山,宋树峰,富丽娥.流态化煅烧石膏技术的进展:FC分室石膏煅烧炉[J].非金属矿,2005,28(6):34-36,49.
Li Yushan, Song Shufeng, Fu Li'e. Development of Fluidized Calcination Technology for Gypsum-FC Multi-chamber Calcinator [J]. Non-Metallic Mines, 2005, 28(6): 34-36, 49.

[29] Kazragis A. High-temperature decontamination and utilization of phosphogypsum [J]. Journal of Environmental Engineering and Land scape Management, 2004, 12(4): 138-145.

[30] 焦叶宏,杨林,李贺军,等.流态化热处理对磷石膏杂质及胶凝性能的影响[J].建筑材料学报,2019,22(3):401-407,439.
Jiao Yehong, Yang Lin, Li Hejun, et al. Effect of Fluidized Heat Treatment on Impurities and Gelling Properties of Phosphogypsum [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 401-407, 439.