

磷石膏无害化与资源化技术研究进展与展望

张雷泽雨, 刘金荣

(武汉千水环境科技股份有限公司, 湖北 武汉 430000)

[摘要] 磷石膏是湿法磷酸生产中产生的大宗固体废弃物, 其无害化与资源化是解决磷化工固废堆积与环境污染问题的关键。系统综述近10年来磷石膏无害化处理与资源化利用的技术研究进展。在无害化方面, 重点分析滤液的多级化学沉淀、预处理-过滤-膜浓缩联用、短流程全化学处理工艺及蒸发结晶资源化处理技术, 以及磷石膏本体的水洗、煅烧、中和与浮选等预处理技术的原理与适用性。在资源化方面, 总结其在建材、农业改良、生态修复领域的规模化应用, 以及制硫酸联产水泥、氟硅资源回收、制备高值材料等创新高值化途径。最后, 探讨填海造岛基料、荒漠化治理、稀土提取及多源固废协同处置等未来资源化创新方向。综述表明, 通过技术集成、政策引导与市场开拓, 推动磷石膏从低附加值消纳向高值化、全流程资源化转型, 是实现其大规模综合利用与磷化工产业绿色发展的必由之路。

[关键词] 磷石膏; 无害化; 资源化; 固废协同

[中图分类号] X703.1; X705 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 04-0087-08

Research progress and prospects in harmless and resource utilization of phosphogypsum

ZHANG Leizeyu, LIU Jinrong

(Wuhan Qianshui Environmental Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Phosphogypsum, a major solid waste generated in the wet-process phosphoric acid industry, is crucial for addressing the accumulation of phosphorus chemical waste and environmental pollution through its safe disposal and resource utilization. The technological advancements in the past decade regarding the safe disposal and resource utilization of phosphogypsum are systematically reviewed. In terms of safe disposal, the focus is on analyzing the principles and applicability of multi-stage chemical precipitation, preprocessing-filtering-membrane concentration, short-process technologies and evaporation crystallization resource utilization technology for leachate treatment, as well as pre-treatment techniques such as washing, calcination, neutralization, and flotation for phosphogypsum itself. For resource utilization, the review summarizes its large-scale applications in construction materials, agricultural improvement, and ecological restoration, along with innovative high-value approaches such as co-producing sulfuric acid and cement, recovering fluorosilicate resources, and manufacturing high-value materials. Finally, potential future directions for resource utilization innovation are explored, including the use of phosphogypsum as a foundation material for island building, desertification control, rare earth extraction, and the co-processing of multi-source solid wastes. The review indicates that through technological integration, policy guidance, and market development, transitioning phosphogypsum from low-value disposal to high-value, full-process resource utilization is essential for achieving its large-scale comprehensive utilization and promoting the green development of the phosphorus chemical industry.

Key words: phosphogypsum; harmless treatment; resource utilization; solid waste synergy

磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的典型固体废弃物, 每生产磷酸1 t产生磷石膏4.5~5.5 t。全球磷石膏堆存量已超过60亿t, 且每年以约2亿t的

速率增长, 我国磷石膏年产量达8 000万 t。我国作为农业大国对磷肥的需求更大, 磷石膏的产生量也更大, 若不能得到及时有效的处理, 将对经济造成严

收稿日期: 2025-07-23

作者简介: 张雷泽雨(1993—), 男, 湖北武汉人, 工程师, 从事专业为环境工程及资源化。

重负担。磷石膏历史存量巨大、关键共性技术缺乏、利用规模和应用场景有限^[1]，而国内对磷石膏的研究仅仅局限在无害化处理以及部分消纳上，无全流程的资源化研究，磷石膏资源化需要从单一或部分资源化路径向全流程资源化方向转变^[2]。习近平总书记于2013年7月在湖北考察时提出：“垃圾是放错位置的资源，把垃圾资源化是一门艺术”。这一理念为磷石膏的利用指明了方向，磷石膏不应再被视为单纯的固废，而是蕴藏着丰富钙、硫、磷资源及潜在价值的生产原料，都是可以回收利用的宝贵资源。

近年来，在政策和技术创新的双轮驱动下，《磷石膏利用和无害化贮存污染控制技术规范》（HJ 1415—2025）在2025年7月1日全面实施，标志着磷石膏管理走向精细化的新阶段。目前各地方政府相继出台相关支持性的政策和资金补贴，与此同时，高校、企业联合攻克磷石膏综合利用关键技术，并不断探索资源化利用新技术、新途径、新方法^[3-5]。本文总结近10年来磷石膏资源化研究方面的成果进展，提出新的综合利用途径，以期为磷石膏综合利用绿色转型提供参考。

1 国内外磷石膏无害化、资源化研究进展

1.1 国际研究进展

2011年6月欧盟启动“Gypsum to Gypsum”项目，建立了建筑石膏闭环回收技术体系。废弃石膏板经破碎筛分后，90%以上可重新用于新石膏板生产；开发高纯石膏晶体提纯工艺，使其成为光学元件基材，提出了石膏材料“分级再生”模型，通过煅烧实现二水石膏向 α/β 半水石膏的定向转化，奠定了工业石膏副产品循环利用理论基础^[6]。马来西亚国立大学通过CTAB/P123表面活性剂调控水热合成路径，将磷石膏转化为1D/2D同质结羟基磷灰石，用于降解有机污染物，创新性提出“形态-能隙”协同调控理论^[7]。匈牙利学者利用磷石膏合成蒙脱石-羟基磷灰石-壳聚糖复合薄膜吸附剂，对砷的吸附容量达85.49 mg/g，吸附效率较传统材料提升40%^[8]。

国际上普遍将研究方向放在材料的高值化上，如光学晶体、光催化材料等。受限于苛刻的原料纯度与设备投入，磷石膏高值化在发展中国家推广难度大，适用性窄。

1.2 国内研究进展

我国磷石膏无害化、资源化利用重点仍是工程，主要涉及废水处理、固废处理、建筑充填材料、

矿山修复等。湖北大学李海波团队提出硫循环菌耦合磷石膏回收造纸废水磷新工艺， PO_4^{3-} 回收率达95%，同步生成羟基磷灰石，实现磷资源闭路循环^[9]。中国五环工程有限公司提出磷石膏-赤泥-电石渣三元固废协同配方，形成抗压强度 ≥ 30 MPa的充填体用于矿山充填^[10]。该技术难度低，适用性强，但依赖区域范围存在多源固废。昆明勘察院科技开发有限公司提出基于微生物诱导碳酸钙沉淀的磷石膏协同处理工艺，利用微生物代谢产生沉淀，包裹可溶磷、氟及重金属，实现污染物原位固化与资源回收，适用于中低污染磷石膏，但受限于菌剂成本。中能建绿色建材有限公司联合武汉大学开发磷石膏/黏土/生物炭复合再生土壤，压制成交锁式生态模块用于边坡防护与矿山回填。该技术难度较低，可广泛适配废弃矿山、盐碱地及荒漠化治理，却依赖生物炭原料供应。

国内的情况是以工艺创新实现成本降低，但在不同区域内推广时有一定壁垒。今后，可将国外高值化理念与国内工程化经验相结合，打造“低门槛-广适配-高回报”的磷石膏利用方式。

2 磷石膏无害化处理技术

2.1 磷石膏渣场渗滤液处理技术

解决磷石膏无害化和资源化的同时还得解决磷石膏渣场渗滤液的问题。磷石膏渣场渗滤液具有高磷、高氟、高氨氮、高盐及强酸性等特征，成分复杂且污染强度大。近10年国内磷石膏渗滤液处理的主流技术和进展如下。

2.1.1 多级化学沉淀法

通过钙盐分级沉淀实现污染物去除：投加石灰形成氟化钙和磷酸钙沉淀，再引入铝盐作为混凝剂，最后经聚丙烯酰胺絮凝沉淀分离，实现磷、氟和重金属的去除，次氯酸钠用于氧化降解氨态氮。该技术可将总磷质量浓度降至0.5 mg/L以下，氟离子质量浓度降至1.5 mg/L以下，氨氮质量浓度降至10 mg/L以下，出水满足《污水综合排放标准》（GB 8978—1996）一级标准要求。该技术是目前最常用的处理技术，主要消耗为石灰、絮凝剂和助凝剂，药剂消耗成本较高（12~15元/t）^[11]，同时也会产生大量新的污泥需要二次处理。

2.1.2 预处理-过滤-膜浓缩联用技术

采用石灰中和沉淀和膜法联用实现污染物的去除：渗滤液投加石灰去除氟、磷预处理后进入孔隙调节型纤维过滤器的过滤单元，后经过超滤、纳滤、反渗透膜进行浓缩分离。该技术是在膜法处理

的基础上针对磷石膏渣场渗滤液改良后的处理技术，被成功运用到湖北某大型磷化工企业污水站应急项目中。该项目是国内处理量最大的一套废水处理系统，出水全部回用，浓水回前段处理和分质套用，但仍存在硫酸钙结晶堵塞膜组件风险。

2.1.3 短流程全化学处理工艺

短流程全化学处理工艺是针对传统处理工艺流程长、成本高问题提出的改进技术，其特点是将硝态氮还原与氨态氮氧化相结合，实现高效脱氮。基于沉淀除磷氟+还原降硝态氮+氧化脱氨态氮的原理，首先利用石灰乳二级沉淀去除磷和氟，随后在铁基复合材料催化下将硝态氮还原为氨态氮，最后通过次氯酸钠折点氧化将氨态氮转化为氮气去除。该工艺硝态氮还原率高达67%，氨态氮几乎完全去除，出水总磷、氟离子、氨态氮质量浓度分别稳定在0.37、1.50、2.10 mg/L附近，其运行成本较低，药剂费用约为9.5元/t^[12]。

2.1.4 树脂吸附与资源回收技术

树脂吸附与资源回收技术是一种深度处理与资源化相结合的方法，旨在从渗滤液中回收高纯度磷产品。该技术采用两步法：首先利用强酸性阳离子交换树脂选择性去除渗滤液中的钙、镁、铝等阳离子杂质；然后通过Fe²⁺/H₂O₂沉淀法从纯化的渗滤液中合成高纯度磷酸铁。该技术可生产纯度达98.22%

的电池级磷酸铁，总磷回收率高达86.3%^[13]。树脂吸附预处理会增加初期投资，但资源化产品价值高，经济技术评估表明其具有可行性，尤其适用于对磷回收有较高需求的场景。

2.1.5 蒸发结晶资源化处理技术

基于晶种法的蒸发结晶资源化处理技术通过蒸发水分将渗滤液中的溶解性盐类浓缩并结晶析出，达到渗滤液零排放和资源化利用。其中，晶种法蒸发结晶技术能有效防止结垢、提高系统运行稳定性。预处理与软化去除钙、镁等易结垢的硬度离子，预处理后的清液可采用反渗透或高效反渗透等膜技术进行预浓缩。浓缩后的浓液进入蒸发结晶器。在蒸发结晶器中，通过投加石膏等作为晶种，提供大量的结晶核心，使溶液中的硫酸钙等难溶盐优先在晶种表面生长，而非在换热管壁析出，从而有效抑制硬垢的形成，保障蒸发系统长时间稳定运行。蒸发结晶技术能有效实现渗滤液的“零排放”，产生冷凝水的水质良好，可回用于生产过程^[14]。蒸发结晶系统的初始投资较高，但晶种法的应用减少了设备结垢清洗和维护的频率，提高了运行稳定性，从而降低了长期运行成本。通常每吨水处理成本可能在几十元至上百元。

2.1.6 小结

磷石膏堆场渗滤液各处理技术对比如表1所示。

表1 磷石膏堆场渗滤液处理技术对比

Table 1 Comparison of leachate treatment technologies for phosphogypsum storage yard

技术	优点	缺点	适用性
多级化学沉淀法	技术成熟稳定，处理效果好	产生大量污泥，需要二次处理，工艺流程较长	适用性广，药剂消耗成本高
预处理-过滤-膜浓缩联用	出水水质好，可实现全部回用；有大规模成功应用案例	对预处理要求高，存在硫酸钙结晶堵塞膜组件的风险	适用于有严格回用要求的大型企业；初始投资高和膜系统投资维护成本较高
短流程全化学处理工艺	流程短，脱氮效率高，出水各项指标稳定	技术缺乏应用案例，对反应条件控制要求较高	适用于处理含有较高硝态氮且对运行成本敏感的改造或新建项目
树脂吸附与资源回收技术	资源化程度高，可生产高纯度电池级磷酸铁	树脂存在再生、损耗等问题，工艺针对性较强	初期投资较大，树脂吸附单元成本高，适用于对磷回收有极高需求的场景
蒸发结晶资源化处理技术	冷凝水可回用，晶种法有效防止结垢	系统复杂，对预处理和操作维护要求极高	初始投资和能耗极高，通常作为其他方法无法满足要求时的终极手段

2.2 磷石膏无害化处理处置技术

磷石膏中有质量分数0.5%~2.5%的可溶磷、0.8%~1.5%的氟以及部分有机质和重金属，磷石膏中杂质成分复杂，但由于预处理技术不成熟，其利用率长期较低，大多采用堆存处理^[15]。磷石膏无害化处理是采用物理法、化学法、生物法等将其中含有的一些污染物或者有毒物质去除或固定下来，使得它在未来能够进行资源化利用或者是在贮

存过程中不会造成环境污染，经过本体处理或转化成为稳定形态是技术关键。

2.2.1 多级逆流水洗技术

多级逆流水洗技术是基于逆流洗涤原理，通过多级串联的洗涤系统实现磷石膏深度净化。洗涤水与最洁净的磷石膏接触，而浓度较高的洗涤液用于前端初级洗涤，形成逆向流动模式。洗涤后，可溶性磷、氟等被水冲洗带走，再通过固液分离实现净

化。三级逆流水洗工艺能有效脱除磷石膏中的水溶磷、水溶氟，脱除率分别为78.81%、89.94%，质量分数可降至0.087%、0.018%，预处理后的磷石膏质量也可达到《磷石膏》(GB/T 23456—2018)的二级品指标要求^[16]。该技术初始投资较高，但通过水资源梯级利用和自动化控制，运营成本可降低30%。

2.2.2 热法煅烧改性技术

热法煅烧改性技术利用高温热处理去除磷石膏中的有机质和共晶磷，分为低温煅烧(120~240℃)和高温煅烧(600~800℃)两类。武汉理工大学开发的分段煅烧工艺首先在200~240℃下进行第一次煅烧，降低可溶性磷和氟含量；随后在120~140℃下进行第二次煅烧，增加半水硫酸钙含量，激发胶凝特性^[17]。高温煅烧可使有机质彻底分解，在900℃下煅烧制备的无水石膏白度达89.12%，28d抗压强度为8.23MPa^[18]。煅烧后产品附加值显著提升，适用于高强石膏粉等高价值产品制备。

2.2.3 酸碱中和稳定化技术

酸碱中和稳定化技术通过添加碱性材料(如石灰、电石渣、赤泥)与磷石膏中的游离酸反应生成

难溶性沉淀物^[19] ($H_3PO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaHPO_4 + 2H_2O$)。贵州磷化(集团)有限责任公司采用的动态中和系统通过精确控制碱性材料投加量确保反应充分。为提高效果，可投加复合固化剂(如工业级石灰、氧化镁和粉煤灰)，室温下搅拌反应30min后过滤。该技术可使磷石膏浸出液中总磷、氟、氨态氮等指标达到GB 8978—1996一级标准。处理成本约为35元/t，工艺简单、投资少、效果显著^[20]。但无法彻底去除有机杂质，且可能引入新的盐类。

2.2.4 浮选提纯技术

浮选提纯技术利用磷石膏与杂质表面物理化学性质的差异，通过浮选剂实现分离，该技术特别适用于去除疏水性的有机杂质。浮选过程将磷石膏与水混合后加入浮选剂，有机杂质随气泡上浮形成泡沫层，净化磷石膏留在浆料中^[21]。该技术常与水洗、煅烧等工艺结合使用。浮选法可有效去除大部分有机杂质，改善磷石膏作为建材原料的性能。浮选水和药剂可循环使用，降低运行成本。但其效果受磷石膏来源和颗粒细度影响较大，且需处理浮选废水。

2.2.5 小结

磷石膏无害化处理处置技术对比如表2所示。

表2 磷石膏无害化处理处置技术对比

Table 2 Comparison of harmless-treatment technologies for phosphogypsum

技术	优点	缺点	适用性
多级逆流水洗技术	杂质去除率高,节水效果好,产品附加值高	初始投资大;工艺流程长;产生废水需处理	适用于大规模、高值化利用场景
热法煅烧改性技术	去除共晶磷效果好,产品性能优	能耗高,设备投资大	适用于对产品品质要求高的领域
酸碱中和稳定化技术	工艺简单、投资少,运行成本低	无法去除有机物,可能引入新杂质	适用于有机杂质含量低的磷石膏预处理
浮选提纯技术	选择性高;能耗低,药剂可循环	受原料性质影响大,流程复杂,产生废水	适用于有机杂质含量高的磷石膏

3 磷石膏的资源化利用现状

磷石膏目前主要利用途径是在建筑、农业、生态修复工程上，大量的磷石膏被用作水泥缓凝剂、建材、土壤调理剂等^[34]。

3.1 建筑领域的应用

磷石膏在建筑领域的应用已形成规模化产业链，主要转化为墙体材料、抹灰石膏、防火涂料及路基填料等产品。

用改性磷石膏替代水泥或天然石膏，可使建材生产能耗降低30%以上，综合成本节约15%~30%。例如，贵州磷化(集团)有限责任公司开发的“原位模板磷石膏喷筑复合墙体”技术，通过标

准化生产预制构件，在贵州医科大学等4所高校项目中高效建成29万m²墙体，综合成本降低15元/m²，年产能达到了500万m²。湖北保康县妇幼保健院迁建项目采用磷石膏砌块替代传统建材，施工效率提高40%，项目3万m²主体工程节约工期30%，砂浆用量减少了20%。襄阳市中心医院东津院区生态停车场首次应用磷石膏水稳层^[24]，消耗近7000t无害化磷石膏做路基铺设，抗压强度达C20标准，成本与传统水泥砂浆持平，抗水性得到了提升，同时可耐受-20~70℃极端环境。中国建筑第八工程局有限公司在贵阳婚博园项目中使用2600m³磷石膏砌块和23000m²轻质抹灰石膏，综合成本降低

20%。此外,在磷石膏替代碎石用作水稳层/路基填料上年消纳磷石膏超200万t,是近年磷石膏消纳重点拓展领域^[25],使道路工程成本降低30%。安徽铜陵700 m试验路消纳磷石膏8 000 t,环保指标达标;云南计划2025年通过路基材料消纳磷石膏100万t。磷石膏透水混凝土在贵州高速公路路基中掺用,年消纳磷石膏超50万t。

3.2 农业领域的应用

磷石膏应用在盐碱地改良^[26]和土壤调理^[27]方面,在利用钙离子置换土壤中的钠离子并降低土壤pH的同时也可以增加硫、钙等元素的含量。新洋丰农业科技股份有限公司在河北黄骅市中捷农场进行试验,667 m²用1.5 t磷石膏调理剂,在中度盐碱地种植的小麦灌浆期可以延长7~10 d,单位面积穗数增加,千粒质量增加,产量增加37%,小麦出苗率增加1倍。内蒙古巴彦淖尔市临河区白脑包镇连年示范推广磷石膏盐碱改良技术,667 m²施用磷石膏改良剂0.5~1.0 t,绝收田块667 m²产量可以达到100~200 kg,盐碱地改良面积累计达2 333 hm²(3.5万亩),避免了使用过多石灰石等原料造成的原料浪费问题。山东省德州市武城县实施的重度盐碱地项目,通过用磷石膏调理剂配土结合“良肥+良技+良法”,实现了小麦苗期出苗率较普通土壤提高100%以上;土地pH由原来的9.2降到7.5以下,土壤 w (有机质)由原来的2.44%提升到3.05%以上;实现中重度盐碱地“当年改造、当年收获”的效果。综上所述,目前我国磷石膏农业利用年产能已经达到800万t,667 m²平均改造费用为200~300元,通过提高粮食和经济作物的产量,一般仅需1~2季就可收回成本,且该技术可完全避免可溶性的磷和氟向水体迁移。

3.3 生态工程的应用

磷石膏的生态修复包括渣场原位治理、矿坑回填、边坡复绿等应用途径。其中贵州开磷(集团)有限责任公司在开阳县龙井湾磷石膏渣场修建生态修复示范工程,将磷石膏改良为植生基质代替砂石填充采空区,铺设两层HDPE(高密度聚乙烯)防渗膜,表面覆土种植柏树,修复工地面积为4.6万m²,复绿率约为27%,消纳磷石膏136.7万t,同时提高磷酸产量约35万t/a,相比传统覆土法修复成本下降60%。荆门市将通过“水洗+中和”无害化工艺处理的磷石膏用于东宝区矮子沟矿坑回填,修复矿区面积7.72 hm²,计划填埋磷石膏200万t,并配套拦挡坝、渗滤液处理系统,项目投入约7 500万

元,不但可以节约磷石膏渣场堆存用地,消除山体滑坡隐患,并且符合《磷石膏综合利用行动方案》相关要求。《无害化磷石膏综合利用露天矿山生态修复环境监管规范》(荆门市地方标准)计划3年内修复矿山158个,治理面积980 hm²,消纳磷石膏大于1 000万t,把“废渣”变为“生态黏合剂”。

3.4 磷石膏的创新高值化利用

3.4.1 硫酸联产水泥

贵州磷化(集团)有限责任公司瓮福化工公司“1468项目”,采用磷石膏高温分解工艺,将磷石膏与高硫煤混合后在回转窑中经1 450 °C煅烧,分解产生的SO₂气体经催化氧化制取硫酸^[28],残渣与黏土配料烧成水泥熟料。该项目投资13.14亿元,仅用331 d建成投产,每年可消纳磷石膏140万t,产出65万t工业硫酸和80万t水泥。硫酸制造成本是硫铁矿制硫酸成本的33%,水泥制造成本较石灰石法工艺降低了40%。该项目通过硫-钙资源循环利用,硫酸回用于磷酸生产,水泥外销,形成“废渣-原料-产品”闭环产业链,成为全球规模最大的磷石膏制硫酸联产水泥装置,入选贵州省“富矿精开”战略标杆工程。

3.4.2 氟硅资源回收

贵州司尔特新能源材料科技有限公司在开阳县建有磷氟新材料矿化一体化产业园,创新研发出“磷石膏分级筛分-氟硅酸协同提取”的新技术,采用穆罕默德六世理工大学和OCP集团研究的结果^[29],氟98%富集于粒径>250 μm的粗颗粒,以钠氟硅石(Na₂SiF₆)和萤石(CaF₂)的形式存在;项目通过干法筛分得到粗颗粒,酸浸后纯化获得氟硅酸,再与硫酸钠反应得到氟硅酸钠产品,年产量1万t;项目配套了年产40万t硫黄制硫酸装置,能为上述系统提供反应所需要的硫酸,并消纳磷酸二铵项目产生的磷石膏80万t,减少了项目的能耗;利用“磷石膏分级筛分-氟硅酸协同提取”技术获得氟硅酸降低了项目的能耗,氟的回收率由70%提升到85%,降低了项目的成本(节约了60%);副产物氟硅酸钠作为铝电解助熔剂出售,每年可增加收入1.5亿元,实现了磷石膏中氟硅资源的高值利用。

3.4.3 制备互锁式高精度模块

中能建绿色建材有限公司与武汉工程大学联合研发“磷石膏基再生土壤创制技术”,用无害化的磷石膏按6:3:1的比例与黏土、生物炭混合并经过陈化改性后,采用液压压制成互锁式的生态模块,

尺寸误差控制在 ± 0.5 mm内,抗压强度 ≥ 15 MPa,并可以直接拼接形成边坡防护墙或者矿山回填等工程的构件。在湖北武穴全域土地综合整治示范工程中,该项技术每年可以消纳磷石膏30万t,生产生态模块200万块,投入到武穴市158座废弃矿山生态修复中去,与常规的混凝土模块相比,成本降低了35%,有较好的透水保墒性能,植被恢复周期比之前缩短了50%。此外,该项目还入选了“零碳中国十大创新技术”,此后3年内将在长江经济带推广,预计每年能消纳磷石膏超过100万t。

3.4.4 制备PE(聚乙烯)排水管

湖北安圆新材料科技有限公司依托专利(CN223121841U),开发磷石膏/PE复合排水管。将磷石膏烘干研磨后,用硅烷偶联剂改性,再与高密度聚乙烯(HDPE)熔融共混,采用双螺杆挤出机挤出成型 $\phi 300 \sim 600$ mm的排水管,年产200 km管道,可消纳磷石膏5万t/a,其耐腐蚀性能相比纯PE管提高了3倍,成本降低了22%,产品已成功应用于襄阳市生态停车场透水路基工程中,用于承载580个车位水稳层的排水使用,透水率提高30%。

3.4.5 制备无水石膏包装箱

宜昌西部化工有限公司磷石膏基无水石膏包装箱项目,采用第三代磷石膏制硫酸联产水泥工艺的中间产物 β 型无水石膏^[30]为原料,将煅烧脱水后纯度 $> 98\%$ 的无水石膏粉与玻纤增强聚丙烯复合,注塑成型为可循环物流箱。该项目投资额1.2亿元,建设全自动生产线,可年产50万只标准箱,每年共消纳磷石膏3万t,产品抗压强度达8 MPa,质量减轻40%,且防水防潮。该项目成本较塑料周转箱低30%,年替代木材1.5万 m^3 ,为磷石膏建材开辟轻量化高值化路径。

4 磷石膏创新资源化的构想

4.1 填海造岛国家战略

磷石膏的主要成分是二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),经过无害化处理以后其拥有良好的胶凝固结性^[31]和抗海水侵蚀性^[32],且可以作为填海造岛的骨料来代替天然砂石。同时它还可以进行分级利用,根据具体工程实际向浆液中加入水泥、矿渣等固化剂,符合填海地基硬度的要求,并得到强度 ≥ 5 MPa的稳定基体来满足岛礁工程地基承载力的要求。如能大规模替代河砂使用,是直接响应国家的“海洋强国”和《推进磷资源高效高值利用实施方案》中的“磷石膏规模化消纳”的目标要求,也节约我国珍贵的河砂资源,缓解沿海城市土地资源紧

缺的问题,并可为南海岛礁的建设供给材料。

虽然,玻璃化包裹或者聚合物膜封闭技术可以阻隔磷石膏中的残余可溶磷氟流失至海洋,但是目前没有玻璃化磷石膏基体在深海高压条件下长期稳定性的实测数据,今后可尝试开展模拟洋流冲刷实验。现行《海洋倾废管理条例》中没有明确规定磷石膏的海洋利用规范,因此应推动标准修订,并完善跨部门联动机制,在南海海洋工程建设中予以尝试。

4.2 土壤荒漠化治理

磷石膏中的钙离子可以置换盐碱土壤中的钠离子,降低土壤pH、打破土壤板结;磷石膏中的硫酸根可以促进盐分淋洗,且为作物补充硫、钙等营养元素。内蒙古巴彦淖尔荒漠化治理试验项目在每667 m^2 耕地撒施改性磷石膏1.2 t,土壤孔隙度提高35%,水的渗入速度提高50%,葵花出苗率由30%增至85%,3年内植被覆盖率提高了40%。该项目契合我国“西北生态屏障建设”发展战略,并且对于落实《磷石膏综合利用行动方案》中提到的“土地利用技术体系”,发挥固废消纳、生态修复双重作用等均具有重要的现实意义。

磷石膏用于土壤荒漠化治理能降低土壤盐渍化指数50%以上,减少淡水资源消耗30%,同步阻断磷石膏堆存导致的粉尘污染;但需严格控制重金属及放射性核素含量,建立种植前-中-后期作物富集监测网络。由于我国干旱地区水分匮乏会导致磷石膏的溶解缓慢,需开发缓释型颗粒混合并配套滴灌系统,目前规模化应用成本较传统改良剂高20%。

4.3 稀土金属提取

磷石膏中含有大量的稀土元素如Ce、Y等金属类^[33],通过“酸浸-萃取-沉淀”的流程可以达到原料提纯的目的。由宜昌东圣磷复肥有限责任公司自主研发的 H_2SO_4 -P507体系中试线,可以在1.6万t磷石膏中提炼出超过1 t纯度为99.9%的稀土氧化物,综合回收率大于90%,满足《推进磷资源高效高值利用实施方案》关于“伴生资源综合利用”的相关要求,有利于降低我国稀土对外依存度,支撑我国新能源产业链的安全可靠。

采用酸浸-萃取工艺成本为传统矿石冶炼的65%,但磷石膏中金属受到磷矿来源影响品位波动大,需要开发相适应的分选技术;而酸浸废液含高浓度氟化物及硫酸盐,处理成本占项目总投资的30%,需耦合膜浓缩或蒸发结晶技术实现废水近零排放。若将磷石膏纳入《战略性矿产目录》,

配套政府的政策回收补贴可以加速产业化。

4.4 环保工程固废协同处理

磷石膏、赤泥、粉煤灰及电石渣等固体废物具有良好的化学互补作用^[34]：磷石膏提供Ca-S组分，粉煤灰提供Si-Al活性物质，电石渣提供高碱度，混合后可互相激发发挥出水泥胶凝性能和固定的作用。中国五环工程有限公司在湖北某项目中用磷石膏、粉煤灰和电石渣作为主要原料，分别以一定比例进行调配混合，并进行了多级逆流水洗和加入激发剂改性，制备得到抗压强度 ≥ 30 MPa的固结体，作为矿山充填物料使用，在此过程中消纳固废120万t，较采用水泥基材料降低了40%的成本。该模式遵循了《磷石膏利用和贮存污染控制技术规范》中“固废协同利用”的思路，“无废城市”建设的方向得到落实。

赤泥、粉煤灰、电石渣类碱性固体废弃物能中和磷石膏中可溶氟，粉煤灰微孔吸附重金属，减少淋溶污染风险。目前缺乏针对固废协同产物的环境安全评价标准，需制定《协同固废建材环境风险评估导则》；可在此基础上进行优化试验，探究固废比例波动对产品稳定性的影响，开发在线成分监测-智能配比系统，降低目前工程误差。

5 结论与建议

5.1 结论

(1) 国外和国内磷石膏资源化利用技术发展差别很大。国外以立法和循环技术为主导，我国呈现出“工程应用主导、标准逐步完善”的特色路径，建材化（混凝土骨料、砌块）、生态修复（矿坑回填、边坡治理）、农业改良（盐碱地调理）三大领域每年消纳量大，但是高价值产品占比很少。

(2) 磷石膏渗滤液和无害化处理技术：渗滤液多级化学沉淀法和预处理-过滤-膜浓缩联用技术适用于大部分资源化企业，本体处理中多级逆流水洗技术及酸碱中和稳定化技术兼具高效、低成本优势，热法煅烧技术因高能耗现阶段不宜使用。

(3) 资源化创新成效显著，磷石膏制硫酸联产水泥，磷石膏中氟硅回收、稀土金属提取等使元素实现高值转化；磷石膏基互锁模块、PE排水管、环保包装箱等新材料拓展应用场景。

(4) 解决技术卡脖子问题迫在眉睫。除杂、预处理的费用高，约占资源化总成本40%左右；设备成本投入大；做原料需要跨省运输；磷石膏制品建筑用途受限、缺乏针对性的应用标准，应用领域相对匮乏（如填海造岛、荒漠化治理等）。

5.2 建议

(1) 建议建立磷石膏成分数据库，普及磷石膏多源固废协同处置技术，开发低能耗膜污染控制和生物菌剂抗冲击强化工艺；依托“酸浸-萃取-原料”的磷石膏资源化利用途径，配备近零排放废水处理系统；结合磷石膏地理池加盖或堆场覆盖膜，开发配套缓释型磷石膏改良剂，与旱作地区滴灌系统相匹配。

(2) 建议制定磷石膏在海洋利用规范填补填海造岛法规空白，开展南海及渤海岛礁磷石膏基填海材料洋流冲刷战略模拟试验；统一农业用磷石膏重金属及放射性限值标准，在内蒙古、新疆等地荒漠区实施万亩级磷石膏改良示范，同时建立起配套的动态重金属监测网。对稀土提取项目给予企业经济补贴。设立“磷石膏跨省消纳补贴基金”，打通云贵川鄂的磷石膏向沿海、西北荒漠地区、路基工程的输送渠道。

(3) 建议磷石膏综合利用与“一带一路”相结合，以埃及、摩洛哥为北非支点，印尼、越南为东南亚枢纽，通过建设国际磷石膏综合利用示范区，打造“绿色丝绸之路”标杆项目，最终实现“废料变资源，资源促共赢”的全球化布局。

若能通过技术迭代、市场开拓、政策推动协同发力，利用现有的工业化基础，重新审视磷石膏的可利用价值，我国磷石膏有望脱颖而出成为新的“城市矿山”，并带动磷化工产业发生“绿色蝶变”。

[参考文献]

- [1] 江涛, 乔雪园, 童军, 等. 长江经济带磷石膏资源化利用现状、问题及对策[J]. 化学与生物工程, 2026, 43(2): 1-7, 49.
JIANG T, QIAO X Y, TONG J, et al. Current Situation, Problems, and Counter measures of Resource Utilization of Phosphogypsum in Yangtze River Economic Belt[J]. Chemistry & Bioengineering, 2026, 43(2): 1-7, 49.
- [2] 唐向阳, 何新建, 谢陈鑫, 等. 磷石膏资源化研究现状及展望[J]. 无机盐工业, 2025, 57(6): 18-26.
TANG X Y, HE X J, XIE C X, et al. Research status and prospect of phosphogypsum resource utilization[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2025, 57(6): 18-26.
- [3] 白平, 胡峻菘, 梁傲岚, 等. 磷石膏综合利用及预处理方法综述[J]. 现代化工, 2023, 43(S2): 76-79, 85.
BAI P, HU J S, LIANG A L, et al. A review on comprehensive utilization and pretreatment method of phosphogypsum[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(S2): 76-79, 85.
- [4] 周正, 唐杰林, 胡冬璞, 等. 磷石膏渗滤液资源化处理技术应用实践与研究[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(3): 78-84.
ZHOU Z, TANG J L, HU D P, et al. Industrial application and

- research of phosphogypsum leachate recycling treatment technology[J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2025, 40(3):78-84.
- [5] 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 A, CAO J Y, ZHANG L X, et al. Phosphogypsum solid waste reutilization technology and application prospects[J]. *Modern Chemical Industry*, 2025, 45(1):34-41.
- [6] SMITH J, WANG L, LIU H. Preparation of water proof light weight materials by electrochemical enhancement of phosphogypsum[J]. *Journal of Materials Science*, 2023, 58(6):0897-0905.
- [7] SAZALI N N, MOHAMED M A, MOHD Y S F, et al. Conversion of waste phosphogypsum into value-added 1D/2D homojunction hydroxyapatite with enhanced structural, morphology, and photoelectrochemical performance [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3):112784.
- [8] JOUDI M, GOUDALI O, ATTOUCH M, et al. Efficient Arsenic Adsorption by Montmorillonite-Hydroxyapatite-Chitosan Films Synthesized from Phosphogypsum Waste: Kinetics, Isotherms, and Thermodynamics [J]. *Chemistry Select*, 2025, 10(26):01242.
- [9] CHENG Y, LI H B, HE W J, et al. Novel strategy for recovering phosphorus from sulfate-rich wastewater combined with phosphogypsum recycling [J]. *Bioresource Technology*, 2025, 435:132861.
- [10] XIAO Y D, JIN H X, WANG M L, et al. Collaborative Utilization Status of Red Mud and Phosphogypsum: A Review [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2022, 8(4):1422-1434.
- [11] 魏凯. 化学法处理磷石膏渣场渗滤液工程实例[J]. *给水排水*, 2020, 56(7):87-90.
WEI K. Chemical treatment of leachate from phosphogypsum slag field[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 56(7):87-90.
- [12] 董亮. 磷石膏堆场渗滤液短流程处理中的全化学工艺技术[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(4):429-433.
DONG L. A Study of All Chemical Process Technology in Short Process Treatment of Phosphogypsum Storage Yard[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 40(4):429-433.
- [13] WEN M X, YANG F, LIANG S, et al. Recovery of high purity iron phosphate from phosphogypsum leachate via a two-step route of resin pretreatment and Fe^{2+}/H_2O_2 precipitation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 371:133361.
- [14] 谢文刚, 童新国, 罗继武, 等. DTZ蒸发法处理渗滤液处理厂浓缩液工程设计[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(16):56-60.
XIE W G, TONG X G, LUO J W, et al. Design of Leachate Concentrate Treatment Project Based on DTZ Evaporation[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(16):56-60.
- [15] 徐长忠, 於金浩, 李义连. 磷石膏的预处理和综合利用研究进展[J]. *安全与环境工程*, 2024, 31(1):260-270.
XU C Z, YU J H, LI Y L. Research progress of pretreatment and comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(1):260-270.
- [16] 张利珍, 张永兴, 吴照洋, 等. 脱除磷石膏中水溶磷、水溶氟的实验研究[J]. *无机盐工业*, 2022, 54(4):40-45.
ZHANG L Z, ZHANG Y X, WU Z Y, et al. Experimental study on removal of water-soluble phosphorus and water-soluble fluorine from phosphogypsum [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2022, 54(4):40-45.
- [17] 黄婷婷, 王柳, 贺浩祥, 等. 一种磷石膏及其无害化及资源化处理方法和应用: CN118026562A [P]. 2024-05-14.
- [18] 龚辉, 冷为贵, 赵国军, 等. 磷石膏煅烧制备超白 II 型无水石膏工艺研究[J]. *化工矿物与加工*, 2025, 54(5):48-55.
GONG H, LENG W G, ZHAO G J, et al. Process research on preparation of uper-white type II anhydrous gypsum by calcined phosphogypsum [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2025, 54(5):48-55.
- [19] 李彬, 刘宇, 宁平, 等. 一种赤泥与磷石膏协同稳定固化的方法: CN109704715A [P]. 2019-05-03.
- [20] 胡兆明, 郭国清, 张华丽, 等. 磷石膏污染物固化工艺研究 [J]. *磷肥与复肥*, 2022, 37(4):4-7, 13.
HU Z M, GUO G Q, ZHANG H L, et al. Solidification process of phosphogypsum pollutants [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2022, 37(4):4-7, 13.
- [21] 夏志祥, 丁一刚, 龙秉文, 等. 一种磷石膏浮选净化方法: CN115957891A [P]. 2023-04-14.
- [22] 闵洁. 基于 MICP 技术的磷石膏胶结充填体性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.
MIN J. Study on Properties of Phosphogypsum Cemented Filling Body Based on MICP Technology [D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [23] 肖洪贵. 云南云天化股份有限公司磷石膏综合利用现状分析 [J]. *磷肥与复肥*, 2019, 34(7):35-37.
XIAO H G. Status analysis on comprehensive utilization of phosphogypsum in Yunnan Yuntianhua Co., Ltd. [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2019, 34(7):35-37.
- [24] 卿三成, 王昕, 潘社卫, 等. 掺加磷石膏-钢渣对水稳层强度和固废利用影响 [J]. *有色金属(矿山部分)*, 2024, 76(5):198-205.
QING S C, WANG X, PAN S W, et al. Strength and solid waste utilization analysis of water stability layers with dosing phosphogypsum-steel slag [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2024, 76(5):198-205.
- [25] 吴赤球, 吕伟, 孙涛. 一种磷石膏轻骨料制备技术 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(2):98-100.
WU C Q, LYU W, SUN T. A Preparation Technology of Phosphogypsum Lightweight Aggregate [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020(2):98-100.
- [26] 吴洪生, 陈小青, 马文舟, 等. 水分胁迫下施用磷石膏改良滨海盐碱土对小麦生长影响与环境风险评估初探 [J]. *土壤*, 2024, 56(5):1042-1050.
WU H S, CHEN X Q, MA W Z, et al. Primary Study of Effects of Phosphogypsum on Growth of Winter Wheat and Environmental Risk Assessment in Costal Saline-sodic Soil Under Different Soil Moistures [J]. *Soils*, 2024, 56(5):1042-1050.
- [27] 于畅. 利用磷石膏制备土壤调理剂工艺技术研究与应用 [D]. 昆明: 云南农业大学, 2022.