

# 磷石膏除杂方法及综合利用研究进展

谭靖<sup>1,2,3\*</sup>, 李国栋<sup>1,2,3</sup>, 彭兴华<sup>1,2,3</sup>, 尤大海<sup>1,2,3</sup>, 张晋<sup>1,2,3</sup>, 张朝宏<sup>1,2,3</sup>, 张立<sup>1,2,3</sup>,  
胡修权<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>湖北冶金地质研究所(中南冶金地质研究所), 湖北 宜昌

<sup>2</sup>湖北省矿物材料及应用工程技术研究中心, 湖北 宜昌

<sup>3</sup>矿产资源综合利用宜昌市重点实验室, 湖北 宜昌

收稿日期: 2024年10月3日; 录用日期: 2024年11月2日; 发布日期: 2024年11月13日

## 摘要

磷石膏的利用对环境保护和资源节约至关重要, 其中杂质制约了磷石膏的利用。文章分析了磷石膏的除杂工艺, 包括物理、化学和热处理方法, 并探讨了其在建筑、化工和农业领域的应用。以期开发高效除杂技术、探索磷石膏新兴应用, 推动磷石膏的绿色、安全利用和可持续发展提供参考。

## 关键词

磷石膏, 固废综合利用, 除杂, 材料化, 高附加值

# Research Progress on the Impurity Removal Methods and Comprehensive Utilization of Phosphogypsum

Jing Tan<sup>1,2,3\*</sup>, Guodong Li<sup>1,2,3</sup>, Xinghua Peng<sup>1,2,3</sup>, Dahai You<sup>1,2,3</sup>, Jin Zhang<sup>1,2,3</sup>,  
Chaohong Zhang<sup>1,2,3</sup>, Li Zhang<sup>1,2,3</sup>, Xiuquan Hu<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Hubei Institute of Metallurgical Geology (Central South Institute of Metallurgical Geology), Yichang Hubei

<sup>2</sup>Hubei Provincial Research Center of Mineral Materials and Applied Engineering Technologies, Yichang Hubei

<sup>3</sup>Yichang Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Yichang Hubei

Received: Oct. 3<sup>rd</sup>, 2024; accepted: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2024; published: Nov. 13<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The utilization of phosphogypsum (PG) is very important for environmental protection and resource

\*通讯作者。

文章引用: 谭靖, 李国栋, 彭兴华, 尤大海, 张晋, 张朝宏, 张立, 胡修权. 磷石膏除杂方法及综合利用研究进展[J]. 材料科学, 2024, 14(11): 1591-1598. DOI: 10.12677/ms.2024.1411172

conservation, in which impurities restrict the utilization of PG. The article analyzed the impurity removal process of PG, including physical, chemical, and heat treatment methods, and explored its application in construction, chemical, and agricultural fields. It is expected to provide a reference for the development of efficient impurity removal technology, the exploration of new applications of PG, and the promotion of green, safe utilization and sustainable development of PG.

## Keywords

Phosphogypsum, Comprehensive Utilization of Solid Waste, Impurity Removal, Materialization, High Added Value

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

磷石膏是湿法磷酸工艺中产生的固体废弃物，其成分主要是二水硫酸钙，工业中每生产 1 吨磷酸会产生 4~5 吨磷石膏，目前中国磷石膏堆存量超过 8 亿吨，并且每年新产生磷石膏约为 7000 万吨[1]。磷石膏中除了主要成分二水硫酸钙外，还有一定量的含磷、含氟和有机杂质，这些杂质造成环境污染的同时也限制了磷石膏的综合利用[2][3]。因此，对磷石膏的杂质去除工艺进行深入研究，不仅对降低环境风险至关重要，也对推动磷石膏向高附加值方向转化具有显著意义。

## 2. 磷石膏杂质种类

磷石膏综合利用时，其所含杂质会影响产物的作用效果和性能，从而降低磷石膏产物的应用价值，并限制其实际应用[4]。因此，清晰地认识磷石膏中各种杂质的性质、探究效率高、成本低的杂质去除方法，是磷石膏综合利用的关键[5]。

**Table 1.** The main existing forms of impurities in PG

**表 1.** 磷石膏中杂质主要存在形式

| 杂质种类 | 杂质   | 主要存在形式                                 |
|------|------|--|
| 磷杂质  | 可溶磷  | $H_3PO_4$ 、 $H_2PO_4^-$ 、 $HPO_4^{2-}$ |
|      | 难溶磷  | $Ca_3(PO_4)_2$                         |
|      | 共晶磷  | $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$                  |
| 氟杂质  | 可溶氟  | NaF、KF                                 |
|      | 难溶氟  | $Na_3AlF_6$ 、 $CaSiF_6$ 、 $CaF_2$      |
| 有机杂质 | 有机质  | 植物根茎、腐殖质                               |
|      | 化学试剂 | 乙二醇甲醚乙酸酯、异硫氰甲烷                         |
| 其他杂质 | 重金属类 | As、Hg、Pb、Cd                            |
|      | 放射性类 | Ra-226、Th-232、K-40                     |

磷石膏中杂质如表 1 所示，主要包括磷杂质、氟杂质、有机杂质等。磷杂质以可溶性磷、共晶磷和难溶性磷形式存在[6]。可溶性磷以离子形态存在于溶液中。共晶磷在磷石膏中以共晶形式存在，主要有  $Ca(H_2PO_4)_2$  和  $CaHPO_4$ 。而难溶性磷则相对稳定，分布较为集中。氟杂质分为可溶性氟和难溶性氟。可溶

性氟的存在会削弱分子间的相互作用，从而降低磷石膏的抗压和抗折强度[7]。有机杂质以有机碳的形式存在，这些有机物质在磷矿的开采和加工过程中可能会转移到磷石膏中。此外，湿法磷酸生产过程中使用的有机物质，如磷酸萃取剂和其他化学添加剂，也可能成为磷石膏中有机杂质的来源。这些有机物质在磷酸生产过程中不完全反应或吸附在磷石膏颗粒上，降低磷石膏晶体间粘结力[8]。

### 3. 磷石膏除杂方法

磷石膏的除杂方法主要包括物理法、化学法以及热处理法[9]。磷石膏主要除杂方法的优缺点如表 2 所示。

Table 2. Common impurity removal methods of PG

表 2. 磷石膏常用除杂方法

| 除杂方法 | 去除杂质类别         | 优点                  | 缺点                      |
|------|----------------|---------------------|-------------------------|
| 物理法  | 可溶性杂质，有机杂质，重金属 | 可溶性杂质、有机杂质去除率高      | 不能去除难溶杂质，产生大量污水，易造成二次污染 |
| 化学法  | 微溶杂质，难溶杂质      | 工艺简单、成本低廉，能去除部分难溶杂质 | 需进行预均化处理，反应残渣处理难度大      |
| 热处理法 | 有机杂质，共晶磷       | 可以去除共晶磷             | 能耗高，酸性杂质腐蚀设备，产生有害气体     |

#### 3.1. 物理法

物理法主要为水洗法、浮选法和球磨法。水洗法根据磷石膏中杂质的溶解度差异，去除大部分可溶性杂质和部分有机杂质[10]。水洗法操作简单，杂质去除效果好，通过控制水洗过程中的液固质量比、水洗时间和水温可以去除磷石膏中全部的可溶性杂质[8]。方竹堇在传统水洗法的基础上进行了创新，引入了真空泵作为补充水源，并采用具有良好再生性能的滤布过滤器，开发了一种新型的高效水洗除杂技术，不仅实现了洗涤液的循环利用，降低了成本，而且能够有效去除共晶磷和二氧化硅之外的大部分杂质[11]。

浮选法根据磷石膏与杂质表面疏水性的不同，借助气泡浮力实现磷石膏与杂质的分离。浮选法适用于去除磷石膏中的细小杂质颗粒，通过调节浮选药剂的种类和用量，可以针对性地去除不同类型的杂质，从而提高磷石膏的纯度[12]。Zhang 等人在磷石膏杂质去除时添加了 TDBAC，在浮选过程中 TDBAC 与磷石膏颗粒表面的疏水区域相互作用，增加其亲水性，并通过泡沫形成将石英杂质从磷石膏中分离出来，从而提高磷石膏的纯度和加工性能[13]。沈维云等优化了浮选工艺，采用反浮选 - 粗选和正浮选 - 精选相结合的浮选工艺，对磷石膏进行预处理除杂，除杂后的磷石膏纯度达到 99.12% [10]。

球磨法可以使磷石膏粒径大小均匀，降低磷石膏孔隙率使其结构更加紧密，在磷石膏杂质含量较低，需要改变其粒径时可以选择球磨法对磷石膏进行预处理[14] [15]。

#### 3.2. 化学法

化学法主要包括中和法和浸出法两种技术。中和法通过酸碱中和反应去除磷石膏中的可溶性磷和氟杂质，实际应用中主要选用石灰进行中和。谢恩鑫等人研究发现，石灰石改性后的磷石膏能够提升水泥的抗压和抗折强度，满足使用标准[16]。

浸出法利用化学试剂与磷石膏中的杂质发生化学反应，从而实现杂质的分离和去除[17]。在浸出过程中，浸出剂能够选择性地与磷石膏中的特定杂质反应，形成可溶性或不溶性的化合物，这些化合物随后可以通过洗涤、过滤等物理方法从磷石膏中分离出去，进而获得纯度较高的磷石膏。浸出法通常使用的化学试剂主要包括酸类和络合剂。酸类试剂，如硫酸、盐酸等，可以溶解磷石膏中的杂质，如碳酸钙等

碱性物质。络合剂,如 EDTA (乙二胺四乙酸)等,可以与金属离子形成稳定的络合物,从而有效去除磷石膏中的重金属离子。这些化学试剂的选择和使用取决于磷石膏中杂质的种类和含量,以及除杂的具体要求[18]。Mashifana 在磷石膏预处理中使用柠檬酸作为浸出酸,成功去除了磷石膏中的磷杂质、放射性杂质[19]。

### 3.3. 热处理法

热处理法是唯一需要加热的除杂方法,通过加热煅烧磷石膏,其中的有机杂质和可挥发性氟杂质会挥发,同时可溶性磷和共晶磷杂质会转化为焦磷酸盐等更为稳定的惰性物质[20]。方官涛等人对磷石膏热处理工艺进行研究,发现煅烧中加入氯化铵处理后,磷石膏中铁和有机物杂质的去除率显著提高[21]。钟雯的研究表明,在 300℃~500℃下热处理法可以有效去除磷石膏中的水溶性磷杂质和氟杂质,杂质脱除率超过 60% [22]。

## 4. 磷石膏的综合利用

磷石膏的综合利用不仅能有效缓解磷石膏堆存所带来的环境问题,还能实现资源的再利用,创造经济价值,是解决磷石膏堆存问题的最佳途径。目前,磷石膏的应用已经扩展到多个领域,包括建筑业、化学工业和农业。

### 4.1. 建筑领域

磷石膏在建筑领域的主要应用形式包括水泥的生产、作为水泥缓凝剂,以及建筑石膏的制备[23]。

磷石膏经过工艺处理后能够制备出硅酸盐水泥、超硫酸盐水泥、钙硫铝酸盐水泥等多种水泥产品[24]。Chen 等在研究中将磷石膏与水泥、粉煤灰、生石灰和泡沫混合,制备出质地轻盈、力学性能和保温性能均优良的泡沫混凝土[25]。

在水泥缓凝剂领域,随着对磷石膏综合利用的重视,越来越多研究聚焦于使用磷石膏作为水泥缓凝剂的原料[26]。胡勇等人通过预处理去除掉磷石膏中的磷杂质、氟杂质,并将其用作水泥缓凝剂,测试结果发现其缓凝性能与天然石膏相当[27]。吴秀俊等人则利用石灰或石灰废渣改性磷石膏,提升了其作为缓凝剂的经济性[28]。Li 等人通过添加电石渣和粉煤灰对磷石膏进行改性,显著提高了其在硅酸盐水泥中的性能[29]。

**Table 3.** Application progress of PG in construction field

**表 3.** 磷石膏在建筑领域的应用进展

| 应用形式              | 研究进展                        | 优势               | 缺点         |
|-------------------|-----------------------------|------------------|------------|
| 水泥生产<br>[33]-[35] | 磷石膏能制备多种水泥产品,如硅酸盐水泥、超硫酸盐水泥等 | 质地轻盈、力学性能和保温性能优良 | 反应活性低、耗能高  |
| 缓凝剂<br>[28] [36]  | 磷石膏作为水泥缓凝剂,性能与天然石膏相当        | 经济性提升            | 质量不稳定、耐水性差 |
| 建筑石膏<br>[37]-[39] | 磷石膏制备的石膏板和砌块物理性能与天然石膏相当     | 耐火性好、环境友好        | 强度低、耐水性差   |

石膏板和石膏砌块作为建筑墙体材料,其物理性能与天然石膏生产的同类产品相当。Zhou 等人制备无纸、无纤维高强度石膏板使用的原材料只有磷石膏,得到的产品在耐火性方面表现优异,具有效益高且环境友好的特点[30]。然而,磷石膏在建筑石膏制备中也存在反应活性低、耗能高,质量不稳定、耐水

性差、强度低等问题。Wang 等人通过掺入硫铝酸钙水泥和磨粒高炉炉渣对磷石膏进行改性，提高了建筑石膏的强度和微观结构的致密性[31]。安娜娜等人使用磷石膏、水泥和竹纤维配制出孔隙率高、抗压强度好的磷石膏生态砖，该生态砖具有优良的强度和耐水性，重金属离子浸出少，符合环境质量标准，实现了磷石膏的资源化利用[32]。磷石膏在建筑领域的应用进展总结如表 3 所示。

## 4.2. 化工领域

磷石膏在化工领域的应用主要集中于回收利用其中的钙、硫和稀土元素等成分。磷石膏与氨水和 CO<sub>2</sub> 气体反应生成硫酸铵和碳酸钙，经过进一步的净化处理，可以从中制备出质地轻、纯度高的碳酸钙。Kandil 等人利用磷石膏与过量碳酸铵反应，成功制得了纯度高达 95% 的硫酸铵结晶[40]。

硫酸钙晶须作为一种优秀的材料合成添加剂，具有广泛的应用前景。目前，国内硫酸钙晶须的制备主要依赖于天然石膏，这给资源的可持续性带来了挑战。利用磷石膏制备硫酸钙晶须，不仅可以实现磷石膏的综合利用，还能在一定程度上缓解对天然石膏资源的依赖。杨红艳等利用磷石膏制备硫酸钙晶须，通过常压水热法制备了尺寸均匀、长径比高的半水硫酸钙晶须[41]。朱鹏程等人通过正交实验确定了水热法制备高品质硫酸钙晶须的最佳条件为料浆浓度 5%、硫酸镁加入量 0.04%、反应温度 140℃ [42]。黄旭等人利用磷石膏制得半水硫酸钙晶须，并用硬脂酸钠和油酸钠等进行表面改性，改性后的晶须具有优良的疏水效果[43]。Tan 等人在无高压水热体系中采用磷石膏制备了无水硫酸钙晶须，发现添加马来酸可以影响晶体的长径比和晶须数量[44]。

磷石膏中稀土元素的含量丰富，可以对磷石膏中稀土元素进行回收提取。Salo 等人采用酸浸法实现了磷石膏中稀土元素的高效回收[45]。Wu 等人采用磷酸浸取磷矿石中的稀土元素，实现了高浸出率和选择性沉淀，回收率达到 81.3% [46]。磷石膏在化工领域的应用进展总结如表 4 所示。

Table 4. Application progress of PG in chemical industry

表 4. 磷石膏在化工领域的应用进展

| 应用形式                        | 研究进展                               | 优势           | 缺点      |
|-----------------------------|------------------------------------|--------------|---------|
| 硫酸铵和碳酸钙制备<br>[40] [47] [48] | 通过与氨水和 CO <sub>2</sub> 反应生成硫酸铵和碳酸钙 | 纯度高，质地轻      | 净化处理复杂  |
| 硫酸钙晶须<br>[43] [44]          | 利用磷石膏制备硫酸钙晶须，尺寸均匀、长径比高             | 材料合成添加剂，应用广泛 | 制备条件控制  |
| 稀土元素回收<br>[46] [49] [50]    | 磷石膏中稀土元素的高效回收                      | 高浸出率和选择性沉淀   | 回收技术要求高 |

## 4.3. 农业领域

磷石膏在农业领域的应用日益受到重视。展争艳等研究了磷石膏对重度盐碱地的改良效果，研究中发现使用磷石膏能够明显降低盐碱地土壤的碱性和盐分含量，经过改良后的盐碱地种植玉米产量提升显著[51]。姜焕焕等人研究发现解磷菌能分解磷石膏，将解磷菌和磷石膏混合对土壤进行改良能够有效降低土壤酸性，并且为土壤农作物提供磷元素[52]。磷石膏中的硫酸根和钙离子可以提供给植物必需的营养，有助于改善土壤结构，增加土壤的保水保肥能力。同时，磷石膏中还含有硫、钙、硅、铁和磷等元素，可以作为生产肥料的原料。Vizirskaya 和 Efremova 等人的研究表明，将基本的矿物肥料与磷石膏共同施用，对提高农作物的产量和品质具有显著效果[53] [54]。磷石膏在农业领域的应用进展总结如表 5 所示。

**Table 5.** Application progress of PG in agricultural field  
**表 5.** 磷石膏在农业领域的应用进展

| 应用形式               | 研究进展                 | 优势            | 缺点           |
|--------------------|----------------------|---------------|--------------|
| 盐碱地改良<br>[55] [56] | 使用磷石膏降低盐碱地土壤的碱性和盐分含量 | 作物产量提升显著      | 土壤改良效果不稳定    |
| 土壤改良<br>[57]-[59]  | 解磷菌分解磷石膏, 降低土壤酸性     | 提供磷元素, 改善土壤结构 | 受微生物活性影响     |
| 肥料原料<br>[60] [61]  | 磷石膏中含硫、钙、硅、铁和磷等元素再利用 | 提供农作物生长所需元素   | 肥料配比和施用技术要求高 |

## 5. 总结

磷石膏的杂质去除是实现其资源化利用的关键步骤, 通过深入探讨磷石膏的化学成分和杂质特性, 不仅为磷石膏的提纯和性能改善提供了多种有效方法, 而且为磷石膏在建筑、化工和农业等多个领域的应用提供了科学依据和创新思路。面对进一步提升磷石膏除杂效率和成本效益的需求, 以及磷石膏高附加值转化途径和环境风险管理策略的深入研究, 未来的工作应聚焦于开发更高效的除杂技术、探索磷石膏在新兴领域的应用潜力、加强环境影响评估, 并推动跨学科合作, 以实现磷石膏的绿色、安全利用和循环经济和可持续发展的目标。

## 基金项目

湖北省科技发展专项(42000023205T000000218)。

## 参考文献

- [1] 叶学东. 踔厉奋发勇毅前行坚定不移推进磷石膏利用高质量发展[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(5): 1-3.
- [2] 吴浩, 韩超南, 汤昱. 我国磷石膏资源化利用研究进展[J]. 现代化工, 2023, 43(3): 18-21.
- [3] 刘珊, 吴丰辉, 瞿广飞, 等. 磷石膏堆存过程中重金属的迁移转化及其生态效应[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(4): 302-314.
- [4] Lv, X. and Xiang, L. (2022) The Generation Process, Impurity Removal and High-Value Utilization of Phosphogypsum Material. *Nanomaterials*, **12**, Article No. 3021. <https://doi.org/10.3390/nano12173021>
- [5] Silva, L.F.O., Oliveira, M.L.S., Crissien, T.J., Santosh, M., Bolivar, J., Shao, L., *et al.* (2022) A Review on the Environmental Impact of Phosphogypsum and Potential Health Impacts through the Release of Nanoparticles. *Chemosphere*, **286**, Article ID: 131513. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131513>
- [6] Cao, W., Yi, W., Peng, J., Li, G. and Yin, S. (2022) Preparation of Anhydrite from Phosphogypsum: Influence of Phosphorus and Fluorine Impurities on the Performances. *Construction and Building Materials*, **318**, Article ID: 126021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126021>
- [7] Cui, S., Fu, Y., Zhou, B., Li, J., He, W., Yu, Y., *et al.* (2021) Transfer Characteristic of Fluorine from Atmospheric Dry Deposition, Fertilizers, Pesticides, and Phosphogypsum into Soil. *Chemosphere*, **278**, Article ID: 130432. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130432>
- [8] 严超, 彭秋桂, 朱淼, 等. 磷石膏综合利用及除杂方法综述[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(2): 27-33.
- [9] Wang, J., Dong, F., Wang, Z., Yang, F., Du, M., Fu, K., *et al.* (2020) A Novel Method for Purification of Phosphogypsum. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, **56**, 975-983. <https://doi.org/10.37190/ppmp/127854>
- [10] 沈维云, 郑光明, 孙桦林, 等. 磷石膏提纯增白实验研究[J]. 磷肥与复肥, 2022, 37(2): 5-6.
- [11] 方竹堃. 磷石膏高效水洗净化处理技术[J]. 云南化工, 2023, 50(2): 114-116.
- [12] Fang, J., Ge, Y., Chen, Z., Xing, B., Bao, S., Yong, Q., *et al.* (2022) Flotation Purification of Waste High-Silica Phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*, **320**, Article ID: 115824. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115824>
- [13] Zhang, H., Chai, W. and Cao, Y. (2022) Flotation Separation of Quartz from Gypsum Using Benzyl Quaternary Ammonium

- Salt as Collector. *Applied Surface Science*, **576**, Article ID: 151834. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151834>
- [14] 许晴莹, 杨鼎宜, 吕伟, 等. 球磨时间对磷石膏基胶凝材料性能影响研究[J]. 无机盐工业, 2022, 54(5): 101-108.
- [15] Wu, L., Tao, Z., Zhao, Z., Ghafar, W.A., Tao, Y., Liao, S., *et al.* (2022) Effect of Ball Milling Time on the Performance of Phosphorous Building Gypsum. *Advances in Civil Engineering*, **2022**, Article ID: 7670057. <https://doi.org/10.1155/2022/7670057>
- [16] 谢恩鑫, 苏宏东, 邓辉. 改性磷石膏在普通硅酸盐水泥中的应用[J]. 水泥技术, 2023(2): 93-96.
- [17] Zhang, W., Zhao, L., Xue, M., Duan, X., Feng, C. and Zhu, J. (2023) Effect of Oxalic Acid Pretreatment on the Mechanical Properties and Microstructure of Phosphogypsum. *Construction and Building Materials*, **362**, Article ID: 129631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129631>
- [18] 周武, 李杨, 冯伟光, 等. 磷石膏的综合利用及其在建筑材料领域的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(2): 534-542.
- [19] Mashifana, T.P. (2019) Chemical Treatment of Phosphogypsum and Its Potential Application for Building and Construction. *Procedia Manufacturing*, **35**, 641-648. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.007>
- [20] 顾青山, 林喜华, 赵士豪, 等. 不同预处理工艺对磷石膏性能的影响[J]. 无机盐工业, 2022, 54(4): 17-23.
- [21] 方官涛, 敖先权, 刘境, 等. 磷石膏煅烧过程中添加剂对其杂质和白度影响[J]. 非金属矿, 2019, 42(4): 10-12.
- [22] 钟雯. 不同预处理方式对磷石膏中残留的磷和氟的影响[J]. 居业, 2021(8): 203-204.
- [23] 夏举佩. 磷石膏用作建筑材料的瓶颈与关键技术[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(11): 6.
- [24] Liu, S., Wang, L. and Yu, B. (2019) Effect of Modified Phosphogypsum on the Hydration Properties of the Phosphogypsum-Based Supersulfated Cement. *Construction and Building Materials*, **214**, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.052>
- [25] Chen, M., Liu, P., Kong, D., Wang, Y., Wang, J., Huang, Y., *et al.* (2022) Influencing Factors of Mechanical and Thermal Conductivity of Foamed Phosphogypsum-Based Composite Cementitious Materials. *Construction and Building Materials*, **346**, Article ID: 128462. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128462>
- [26] 欧志兵, 杨文娟, 何宾宾. 国内外磷石膏综合利用现状[J]. 云南化工, 2021, 48(11): 6-9.
- [27] 胡勇, 龚小梅, 张豪, 等. 蒸压改性磷石膏作为水泥缓凝剂的研究[J]. 建材发展导向, 2021, 19(16): 9-11.
- [28] 吴秀俊, 武汉凌, 谭桂蓉, 等. 磷石膏水泥缓凝剂的试验与应用(二) [J]. 建材发展导向, 2020, 18(20): 18-22.
- [29] Li, B., Li, L., Chen, X., Ma, Y. and Zhou, M. (2022) Modification of Phosphogypsum Using Circulating Fluidized Bed Fly Ash and Carbide Slag for Use as Cement Retarder. *Construction and Building Materials*, **338**, Article ID: 127630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127630>
- [30] Zhou, J., Li, X., Zhao, Y., Shu, Z., Wang, Y., Zhang, Y., *et al.* (2020) Preparation of Paper-Free and Fiber-Free Plasterboard with High Strength Using Phosphogypsum. *Construction and Building Materials*, **243**, Article ID: 118091. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118091>
- [31] Wang, Q. and Jia, R. (2019) A Novel Gypsum-Based Self-Leveling Mortar Produced by Phosphorus Building Gypsum. *Construction and Building Materials*, **226**, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.289>
- [32] 安娜娜, 刘方, 朱健, 等. 竹材对磷石膏型生态砖性能的影响及评价[J]. 应用化工, 2023, 52(5): 1441-1446.
- [33] 吴超, 杨林, 李玮, 等. 轻质抹灰磷建筑石膏性能影响机制研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(2): 565-572.
- [34] Tian, T., Zhang, C., Zhu, F., Yuan, S., Guo, Y. and Xue, S. (2021) Effect of Phosphogypsum on Saline-Alkalinity and Aggregate Stability of Bauxite Residue. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **31**, 1484-1495. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(21\)65592-9](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(21)65592-9)
- [35] Gong, X., Liu, J., Sun, Z. and Li, F. (2020) Effects of Phosphogypsum and Calcined Phosphogypsum Content on the Basic Physical and Mechanical Properties of Portland Cement Mortar. *Journal of Testing and Evaluation*, **48**, 3539-3549. <https://doi.org/10.1520/jte20180380>
- [36] 马瑜, 李北星, 杨洋. 改性磷石膏球作缓凝剂对水泥性能的影响[J]. 水泥, 2020(5): 9-14.
- [37] Wu, F., Jin, C., Qu, G., Liu, Y., Wang, C., Chen, B., *et al.* (2022) Enhancement of Phosphogypsum Mechanical Block with the Addition of Iron and Aluminum Salts. *Journal of Building Engineering*, **52**, Article ID: 104397. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104397>
- [38] Oubaha, S., Hakkou, R., Taha, Y., Mghazli, M.O. and Benzaazoua, M. (2022) Elaboration of Compressed Earth Blocks Based on Phosphogypsum and Phosphate Mining By-Products. *Journal of Building Engineering*, **62**, Article ID: 105423. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105423>
- [39] Wang, Q., Cui, Y. and Xue, J. (2020) Study on the Improvement of the Waterproof and Mechanical Properties of Hemihydrate Phosphogypsum-Based Foam Insulation Materials. *Construction and Building Materials*, **230**, Article ID:

117014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117014>
- [40] Kandil, A.T., Cheira, M.F., Gado, H.S., Soliman, M.H. and Akl, H.M. (2017) Ammonium Sulfate Preparation from Phosphogypsum Waste. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, **10**, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2016.11.001>
- [41] 杨红艳, 欧阳俊瑶, 夏蝶, 等. 添加  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  为晶种制备磷石膏半水硫酸钙晶须[J]. 人工晶体学报, 2022, 51(2): 309-315.
- [42] 朱鹏程, 彭操. 磷石膏水热法制备硫酸钙晶须试验研究[J]. 云南化工, 2021, 48(3): 49-51.
- [43] 黄旭, 黄健, 牛韵雅, 等. 磷石膏制备的耐热半水硫酸钙晶须表面疏水改性研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2021-2027.
- [44] Tan, H., Dong, F., Bian, L., He, X. and Liu, J. (2017) Preparation of Anhydrous Calcium Sulfate Whiskers from Phosphogypsum in  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$  Autoclave-Free Hydrothermal System. *Materials Transactions*, **58**, 1111-1117. <https://doi.org/10.2320/matertrans.m2017042>
- [45] Salo, M., Knauf, O., Mäkinen, J., Yang, X. and Koukkari, P. (2020) Integrated Acid Leaching and Biological Sulfate Reduction of Phosphogypsum for REE Recovery. *Minerals Engineering*, **155**, Article ID: 106408. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106408>
- [46] Wu, S., Zhao, L., Wang, L., Huang, X., Zhang, Y., Feng, Z., *et al.* (2019) Simultaneous Recovery of Rare Earth Elements and Phosphorus from Phosphate Rock by Phosphoric Acid Leaching and Selective Precipitation: Towards Green Process. *Journal of Rare Earths*, **37**, 652-658. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.09.012>
- [47] Ding, W., Chen, Q., Sun, H. and Peng, T. (2019) Modified Mineral Carbonation of Phosphogypsum for  $\text{CO}_2$  Sequestration. *Journal of  $\text{CO}_2$  Utilization*, **34**, 507-515. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.08.002>
- [48] 张天毅, 胡宏, 何兵兵, 等. 磷石膏制硫酸铵与副产碳酸钙工艺研究[J]. 化工矿物与加工, 2017, 46(2): 31-34.
- [49] Li, S., Malik, M. and Azimi, G. (2022) Leaching of Rare Earth Elements from Phosphogypsum Using Mineral Acids. In: Lazou, A., *et al.*, Eds., *REWAS 2022: Developing Tomorrow's Technical Cycles (Volume 1)*, Springer International Publishing, 267-274. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92563-5\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92563-5_28)
- [50] Mukaba, J., Eze, C.P., Perea, O. and Petrik, L.F. (2021) Rare Earths' Recovery from Phosphogypsum: An Overview on Direct and Indirect Leaching Techniques. *Minerals*, **11**, Article No. 1051. <https://doi.org/10.3390/min11101051>
- [51] 展争艳, 顾生芳, 展成业. 施用磷石膏对甘肃引黄灌区重度盐碱地改良效果研究[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(3): 61-64.
- [52] 姜焕焕, 李嘉钦, 陈刚, 等. 解磷微生物及其在盐碱土中的应用研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1125-1131.
- [53] Vizirskaya, M., Sheyden, A., Akanova, N., Zhdanov, V., Tihonova, M. and Buzylev, A. (2020) Agroecological Efficiency of Periodic Use of Neutralized Phosphogypsum in Rice Crops. *E3S Web of Conferences*, **175**, Article No. 07004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017507004>
- [54] Efremova, S.Y., Akanova, N.I., Sharkov, T.A. and Yakhkind, M.I. (2020) Efficiency of the Use of Neutralized Phosphogypsum, Phosphorite Processing Waste, in Agriculture. *Environmental Quality Management*, **30**, 5-11. <https://doi.org/10.1002/tqem.21707>
- [55] Sagna, Y.P., Diedhiou, S., Goudiaby, A.O.K., Diatta, Y., Diallo, M.D., Ndoye, I., *et al.* (2023) Do Phosphogypsum Combined with Organic Amendments Improve Rice Growth in a Saline Environment? *Current Journal of Applied Science and Technology*, **42**, 52-61. <https://doi.org/10.9734/cjast/2023/v42i354236>
- [56] 韩科峰, 李火良, 斯林林, 等. 生物有机肥对葡萄产量及经济效益的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(8): 1782-1784.
- [57] Panda, L., Kumar, M. and Pradhan, A. (2022) Leaching of Sulphate from Biochar and Phosphogypsum-Biochar for the Treatment of Acidic Red Soil. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, **19**, 23-29. <https://doi.org/10.3233/ajw220035>
- [58] 严建立, 章明奎, 王道泽. 磷石膏与石灰石粉配施对新垦红壤耕地的改良效果[J]. 农学学报, 2022, 12(7): 33-37.
- [59] Melgaço, L.A.d.O., Quites, N.C. and Leão, V.A. (2020) Phosphogypsum as Sulfate Source for Sulphate-Reducing Bacteria in a Continuous Fluidized-Bed Reactor. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, **25**, 157-165. <https://doi.org/10.1590/s1413-4152202020180007>
- [60] Zhantasov, K., Ziyat, A., Sarypbekova, N., Kirgizbayeva, K., Iztleuov, G., Zhantasov, M., *et al.* (2022) Ecologically Friendly, Slow-Release Granular Fertilizers with Phosphogypsum. *Polish Journal of Environmental Studies*, **31**, 2935-2942. <https://doi.org/10.15244/pjoes/144099>
- [61] Samet, M., Karray, F., Mhiri, N., Kamoun, L., Sayadi, S. and Gargouri-Bouzi, R. (2019) Effect of Phosphogypsum Addition in the Composting Process on the Physico-Chemical Properties and the Microbial Diversity of the Resulting Compost Tea. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 21404-21415. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05327-3>