磷石膏的综合利用及其在环境领域的应用研究进展

祝国亮

（湖北美辰环保股份有限公司，湖北 荆门 448000）

［摘 要］磷石膏是湿法磷酸生产过程中的副产物，产生量大，其本身具有吸水性，易与水反应形成酸溶液，造成环境污染，因此对磷石膏进行综合利用具有十分重要的意义。介绍磷石膏的性质、组成及危害，并概述其在建材、农业、化工领域的综合利用；除上述领域外，详细综述磷石膏在环境领域的应用，并展望磷石膏综合利用发展方向。磷石膏应用在环境领域，不仅能够缓解其大量堆存的现状，还能够达到“以废治废”的目的，为磷石膏的综合利用提供新思路。

［关键词］磷石膏；综合利用；环境领域；研究现状；发展趋势

［中图分类号］X781 ［文献标志码］A ［文章编号］2097-4566（2024）07-0065-06

Research progress on comprehensive utilization of phosphogypsum and its application in environment field

ZHU Guoliang

(*Hubei Meichen Environmental Protection Co., Ltd., Jingmen* 448000, *China*)

Abstract: Phosphogypsum is a by-product in the production of wet-process phosphoric acid, and its output is large. Due to its water absorption, it's easy to react with water to form acid solution, resulting in environmental pollution. Therefore, the comprehensive utilization of phosphogypsum is of great significance. The properties, composition and hazards of phosphogypsum are briefly introduced, and the comprehensive utilization of phosphogypsum in the fields of building materials, agriculture and chemical industry is briefly summarized. In addition to the above fields, the application of phosphogypsum in the environment field is reviewed in detail and the development trend is prospected. The application of phosphogypsum in the environment field can not only alleviate the current situation of large quantities of phosphogypsum, but also achieve the purpose of "treating waste with waste", and provide new ideas for the comprehensive utilization of phosphogypsum.

Key words: phosphogypsum; comprehensive utilization; environment field; research status; development trend

磷是生命的基本元素，其对自然生态系统和农业生产也至关重要。在农业领域，磷肥是一种重要的肥料，因有利于作物生长而被广泛应用，但同时，磷肥的需求量也不断增加。磷肥多以磷酸为原料，常见的磷酸制备方法有热法、湿法。现阶段湿法磷酸工艺在磷酸生产中占主导地位，应用最为广泛[1]。湿法磷酸工艺按生产过程中使用的无机酸不同，可分为硫酸法、硝酸法、盐酸法等，磷矿的分解反应式如下[2]：

$$Ca_5F(PO_4)_3+10HNO_3=3H_3PO_4+5Ca(NO_3)_2+HF\uparrow; \quad (1)$$

$$Ca_5F(PO_4)_3+10HCl=3H_3PO_4+5CaCl_2+HF\uparrow; \quad (2)$$

$$Ca_5F(PO_4)_3+5H_2SO_4+nH_2O=3H_3PO_4+5CaSO_4\cdot nH_2O+HF\uparrow。 \quad (3)$$

研究表明[3]，硫酸法每生产磷酸1 t就会产生磷石膏近5 t，其产生过程如图1所示。目前，全球的磷石膏堆存量已达60亿t，每年仍然以1.5亿t的速度增加，但全球磷石膏综合利用率仅25%左右。我国是全球第一大磷肥生产国，也是第一大磷石膏副产国，磷石膏堆存量已经达到4亿t，每年仍以

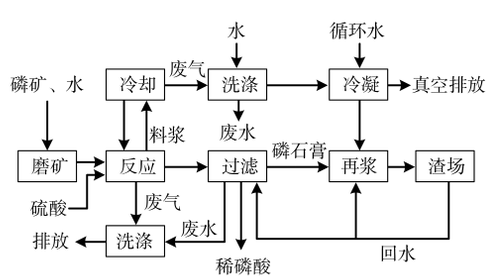


图1 磷石膏产生过程[4]

［收稿日期］2024-05-30

［作者简介］祝国亮(1976-)，男，湖北荆门人，工程师，主要从事固体废弃物处理与资源化利用研究。E-mail:272593556@qq.com

［基金项目］湖北省技术创新专项(重大项目)(2022BEC050)

约 5 000 万 t 的速度递增 [5]。我国磷石膏产地主要集中在湖北、云南、贵州、山东、安徽等地，这些地区磷石膏产生量占全国磷石膏总产生量的 85% 左右（如图 2 所示），但磷石膏综合利用率却不足 50% [6]。与其他国家磷石膏综合利用相比（如表 1 所示），我国存在不足，仍需不断探索。

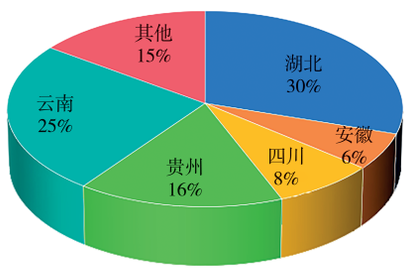


图 2　我国磷石膏主要产地产生量占比 [7]

表 1　其他国家磷石膏综合利用情况 [8]

国家	主要处置措施
巴西	主要用于农业，使用量已超过产生量
芬兰	堆存为主，少量用于农业、道路等试点
波兰	少量用于农业
菲律宾	部分用于水泥、农业，少量进行稀土元素回收试点
美国	堆存为主，少量用于农业
印度	约 45% 用于制造水泥，10% 用于农业
哈萨克斯坦	主要用于农业土壤改良
俄罗斯	农业、道路应用已实现商业化
日本	100% 用于石膏建材及水泥缓凝剂
加拿大	磷酸生产已停止，堆场表层“人造土”后复垦种植人造林
比利时	90% 用于石膏建材，8% 左右用于农业，少量临时堆存

磷石膏中含有复杂多样的杂质，导致其利用率低且大量堆积，这也直接导致了土地资源的大量浪费和一系列环境污染问题 [9]。因此，提高磷石膏综合利用率迫在眉睫。

1　磷石膏的性质及堆存危害

1.1　磷石膏的性质

磷石膏外观多呈灰白、灰、灰黄、浅黄以及浅绿等颜色，为膏状固体，颗粒直径为 5 ~ 150 μm，w（结晶水）为 20% ~ 25%，黏度较大，流动性差，呈酸性，新排放的磷石膏有异味 [10]。磷石膏主要物相是二水硫酸钙，晶体的晶型有针状、单分散板状、多晶核和密实 4 种形态，其中以板状晶体为主。磷石膏的胶凝性能低于天然石膏，胶结性能、黏滞性、流动性也比天然石膏差，磷石膏浆体凝结时间长，并具有一定的腐蚀性 [11]。磷石膏在水中的溶解度极小，随着温度升高溶解度下降，层间的透水性能优于水平层，是一种应变软化材料。磷石膏的粒径均匀，杂质的含量与晶体的形貌与磷矿石有很大的关系，磷石膏的晶型越规则，粒径就越大，杂质含量相对就越少 [12]。

磷石膏的主要成分如表 2 所示。

表 2　磷石膏主要成分质量分数 [13]　%

w(CaO)	w(MgO)	w(SO_2)	w(Al_2O_3)	w(Fe_2O_3)	w(SiO_2)	w(P_2O_5)	w(F)
32.14	0.4	43.38	0.18	0.04	9.45	1.18	0.08

1.2　堆存危害

目前，绝大部分磷化工企业都选择将磷石膏以固体废物的形式进行堆存，而未经处理的磷石膏堆存会对人类健康和环境造成危害。有研究表明，磷石膏排放到水体中，会引起水体中营养物质过量富集，导致水体的富营养化现象 [14]。这种现象会引发水藻爆发、溶解氧降低以及水生生物群落的改变。另外，人类长期暴露在含有磷石膏颗粒的空气中，可能导致呼吸道疾病和肺部疾病的发生。磷石膏中的重金属离子也可能通过食物链进入人体，对人体内脏器官和神经系统造成损害 [15]。

因此，由于磷石膏堆存量大且带来的危害严重，所以不仅要对磷石膏进行处理处置，更要考虑其资源化利用，变废为宝以支持我国可持续发展道路。与此同时，国家也颁布了许多政策 [16]，鼓励人们研究更多磷石膏资源化利用途径。例如，2021 年发布的《“十四五”循环经济发展规划》中明确进一步拓宽磷石膏等固废资源化利用渠道，尤其是扩大其在生态修复、绿色建材等应用领域的利用规模，用固废替代原生资源，减少对原生资源的开采利用。

2　磷石膏的综合利用

根据国内外研究，磷石膏主要应用于建材、农业以及化工领域。化工领域消耗量占比 5% 左右，农业领域消耗只占 2% 左右，除 22% 左右用于外供联营，其余磷石膏基本投入建筑材料领域 [17]。

2.1　建材领域

磷石膏在建材领域应用广泛，其应用主要包括制备水泥缓凝剂、建筑石膏、水泥、路基材料等。单俊鸿等 [18] 通过水洗去除磷石膏中的可溶性磷和氟，改性后作为水泥缓凝剂。研究结果表明，改性磷石膏作为缓凝剂可以在不同程度上缩短水泥的凝结时间，且磷石膏中可溶性磷和氟含量与水泥凝结时间呈正相关。CHEN 等 [19] 采用石灰对磷石膏进行稳定化处理，以提高磷石膏的力学性能、水稳定性和对有害物质的溶解性，研究结果表明，石灰稳定化磷石膏作为路基材料是可行的。综合考虑其力学性能、水稳定性和对有害物质的溶解性等，建议

在磷石膏中添加 6% ~ 8%的石灰作为公路路基填料。王锦等[20]研究了在干湿循环条件下磷建筑石膏的性能变化情况，同时他们采用硬石膏代替部分磷建筑石膏制备了复合石膏，并与磷建筑石膏进行对比。研究结果表明，在干湿循环条件下复合石膏的性能明显优于磷建筑石膏。

我国是基建大国，建筑材料需求量大，因此在建材领域大量使用磷石膏对减少磷石膏的堆存有着积极作用。但在磷石膏使用过程中，也应考虑成本以及其对环境造成的危害。

2.2　化工领域

除主要组分硫酸钙外，磷石膏中还含有氟化物、磷酸等。因此，在化工领域，主要是以磷石膏为原料，制备硫酸钙、硫酸铵等化工产品，从而提高磷石膏的资源化利用率，降低其对环境的污染。王艾文[21]以磷石膏为原料，利用常压盐溶液法制备硫酸钙晶须，研究结果表明在 $Ca(NO_3)_2$ 掺量为 30%、磷石膏掺量为 12%、pH 为 3、温度为 103 ℃的料浆中反应 4 h，能成功制备出均一性较好的硫酸钙晶须。徐丽等[22]以磷石膏为原料，通过常压酸化法制备粒状硫酸钙，研究结果表明：在反应温度为 100 ℃、反应时间为 4 h 条件下能够制备最佳粒状硫酸钙。然后研究人员利用硬脂酸对粒状硫酸钙进行改性，并探究了将该材料应用于聚氯乙烯的效果。结果显示，当其添加量为 2%时，聚氯乙烯复合材料的拉伸强度显著提高。ENNACIRI 等[23]利用磷石膏、氢氟酸、氨为原料得到了相对纯净的氟化钙纳米颗粒和硫酸铵。硫酸铵被推荐用作农业肥料，而获得的 CaF_2 可用于冶金工业。

磷石膏大多采用堆存处理，不仅占用土地资源，还容易对周边地区造成污染。因此，研究将磷石膏应用于化工行业至关重要。但磷石膏本身含有较多的杂质，导致其利用率不高，因此需要探究更多的技术对磷石膏进行改性，从而提高其利用率。

2.3　农业领域

利用磷石膏改良土壤盐碱性是其在农业领域资源化利用的主要途径，磷石膏中含有的磷、硫、钙等是农作物生长所必需的营养成分，通过施加磷石膏可促进作物生长，提高产量，达到资源化利用的目的。吴洪生等[24]利用磷石膏进行盐（碱）土改良，发现施加磷石膏可以降低土壤 pH，增加小麦叶片中磷、钾的含量，从而促进小麦的生长。COSTA 等[25]将石灰和磷石膏联合施用于免耕地区，以改善土壤剖面沿线的土壤肥力并评估了施用石灰和磷石膏对土壤化学性质、土壤酶活性和作物产量的影响。研究结果表明，石灰和磷石膏联合施用，在土壤养分优化和化学成分改善方面效果最佳，土壤酶活性最高，作物产量最高。LU 等[26]研究了水稻单种和磷石膏联合施用对盐碱地土壤理化性质的影响。结果表明，在磷石膏的作用下土壤的理化性质得到了明显的改善，其不仅增强了土壤的营养结构，还显著降低了土壤盐度和碱度。此外，碳、氮和磷的利用率增加，真菌群落多样性也显著提高。

综上，磷石膏的独特性质使得其在农业领域具有广泛的应用。但磷石膏中也存在着大量有害物质，并不能够直接使用，需要经过适当的处理才可使用。随着科学技术的不断发展，磷石膏的综合利用也得到了更多的技术支持，如何低成本、高效率地利用磷石膏成为亟待解决的问题。

3　磷石膏在环境领域的应用

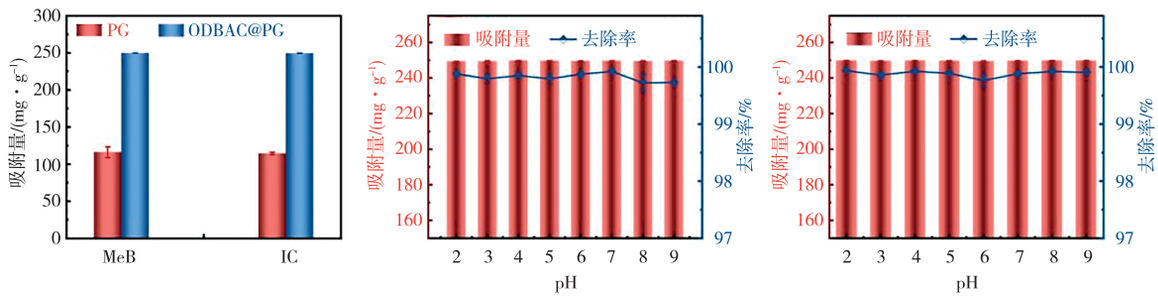
除上述领域外，磷石膏在环境领域也有着重要作用，其作为工业副产品，含有砷、镉等有害物质，对环境造成的影响不可忽视。将磷石膏应用在环境领域，不仅能够缓解其大量堆存的现状，还能够达到“以废治废”的目的。磷石膏在环境领域主要是作吸附剂处理污染物、作土壤重金属固化剂以及应用于生态修复方面。

3.1　吸附剂

随着工业的快速发展，各行业排放的重金属离子以及有害污染物造成的水体污染严重影响了生态环境和人类活动。在治理水体中重金属污染的方法中，吸附法是一种最有效、应用最广泛的方法。磷石膏在结晶过程中会形成大量细小的不规则孔隙，因此将其作为吸附剂可以对环境中的污染物进行去除，从而达到“以废治废”的目的。

李小庆[27]利用盐酸溶液对磷石膏进行改性，探究磷石膏对不同水体中铅、镉离子的吸附性能。研究结果表明，在改性磷石膏的投加量为 1.0 g，吸附 pH 为 5.0，吸附时间分别为 40 min 和 60 min，吸附温度分别为 40 ℃和 50 ℃的条件下，改性磷石膏对水中铅、镉离子具有良好的吸附性能，可以用于水中铅、镉离子的去除。LU 等[28]使用十八烷基二甲基苄基氯化铵（ODBAC）对磷石膏（PG）表面进行改性，然后研究了 ODBAC@PG 对甲基蓝（MeB）和间苯三酚酞（IC）的吸附行为和机制。研究结果表明，ODBAC@PG 对这两种有机染料的去除是可行的，过程是放热的和自发的。如图 3 所

示，ODBAC@PG 在不同 pH 下去除染料的广泛适用性证实了其在实际环境中去除染料污染的应用潜力。这项工作为利用工业废弃物 PG 提供了一种新的方法，有助于实现废物处理和水污染控制的双重目标。LI 等 [29] 研究利用磷石膏改性生物炭对水溶液中的 Sb（V）进行去除，发现改性生物炭的最大 Sb（V）吸附量为 8 123 mg/kg。同时，这种改性生物炭还可以用作酸性矿井水的 pH 缓冲剂，下一步将使用这种改性生物炭在自然矿井水中进行锑酸盐去除。



a. PG 和 ODBAC@PG 对 300 mg/L MeB 和 IC 的吸附能力　b. pH 对 MeB 吸附能力的影响　c. pH 对 IC 吸附能力的影响

图 3　十八烷基二甲基苄氯化铵改性磷石膏的吸附性能

除了对磷石膏进行改性并将改性后的磷石膏作吸附剂去除水体中的污染物，还可以将磷石膏与其他材料混合形成一种复合材料，从而达到更有效的重金属离子去除效果。

夏雪等 [30] 以磷石膏和固硫灰渣（SFA）作为原料，制备了 PG/SFA 复合吸附材料，并研究了该复合吸附材料对铀（Ⅵ）的吸附性能。实验结果表明，在一定条件下，该复合吸附材料对铀的吸附量能够达到 84.6 mg/g。此外，还研究了将该材料应用于铀矿开采过程中产生的铀矿坑水的深度净化处理，吸附率达 99.8%，如图 4 所示，复合吸附材料对铀有着较好的去除效果。吕晨阳等 [31] 使用机械球磨法将磷石膏（PG）和还原铁粉混合制备吸附材料（m–PG–Fe），并研究了该材料对模拟废水中 As（Ⅲ）的吸附性能。研究结果表明，在 PG 配比 60%、球磨转速 500 r/min、球磨时间为 2 h 的条件下制备的 m–PG–Fe 对废水中 As（Ⅲ）的吸附量为 29.86 mg/g；研究还发现，在机械力作用下磷石膏中的结晶水逸出产生羟基自由基，并与铁粉在球磨作用下结合生成 FeO(OH)，有利于对 As（Ⅲ）的吸附。

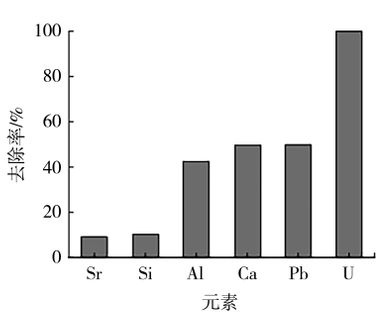


图 4　PG/SFA 复合吸附材料对铀矿坑水的处理效果 [30]

磷石膏不仅能去除水中的重金属离子，还可以除去水中其他污染物。YELATONTSEV [32] 研究了磷石膏在焦化废水中苯酚去除方面的利用，发现在生物处理之前，可以利用大量存在于磷酸厂废料堆中的原始磷石膏对苯酚废水进行预处理。JIANG 等 [33] 将磷石膏改性生物炭复合材料（PMBC）用于水中磺胺类抗生素的去除。研究发现，PMBC 对磺胺类抗生素的吸附效果受溶液 pH 和离子强度的影响。这项研究为高效去除水中磺胺类抗生素新型材料开发提供了重要参考。LU 等 [34] 将合成的针铁矿浸渍在磷石膏（PG）表面，开发了一种新型针铁矿改性磷石膏（GPG）复合材料，并将该材料应用于去除水中多西环素。研究结果表明，在 pH 4 ~ 11 的范围内 GPG 具有较好的吸附效率。本研究开发了一种方便的合成有效吸附剂的技术，可用于去除废水中的多西环素，为工业废物的高效利用提供了新的视角。

综上，磷石膏作为吸附剂应用于废水处理领域有着良好的应用前景。但磷石膏成分复杂，导致其预处理过程复杂，成本高，并且在应用过程中也可能产生对环境有害的物质。因此降低其预处理成本以及创造一种环境友好型磷石膏是提高磷石膏资源化利用的重要途径。

3.2　固化剂

随着工农业不断发展，土壤重金属污染日益严重，而土壤重金属污染具有持久性、无法自然降解、处理难度大等特点，对工农业生产和人类健康造成了巨大威胁 [35]。治理土壤重金属污染的技术中应用较为广泛的是固化技术，选择一个合适的固

化剂能够高效除去污染物。水泥、碱性材料、黏土矿物质等传统固化材料应用广泛，但其成本较高且会对环境产生一定的污染。在此基础上，国内外学者研究了以磷石膏为原料制备固化材料，将其运用在治理土壤重金属污染，取得了不错的效果。

HUANG 等[36]研究了一种新型改性β–半水石膏胶结材料（MPG），用于固化铅污染土壤，并对比了 MPG 和硅酸盐水泥（PC）作为固化剂对污染土中铅的固化效果。研究结果表明，这种新型改性 MPG 的固化效果比 PC 要好，且 MPG 固化体的铅浸出浓度随养护时间不断降低，养护 7 d 后已低于我国标准中规定的危险废物含量限值。该项研究对于铅污染土壤的治理和废弃磷石膏的资源化利用是一项有价值的应用开发研究。同样，PHANIJA 等[37]利用磷石膏固化/稳定化铜污染土壤，研究人员通过查阅文献选取铜的 2 个浓度（630 mg/kg 和 20 000 mg/kg），综合配制污染土壤，对磷石膏处理的未污染和污染土壤进行了测试。研究结果表明，土壤中铜具有良好保留性以及微小浸出特性的硫酸铜基矿物的形成表明了 PG 的有效性。总体而言，磷石膏可用于铜污染土壤的有效处理。

曹家玮等[38]以水泥、赤泥、电石渣、磷石膏为原料制备了镉污染土壤固化剂。实验结果表明，在水泥掺量为 9%、赤泥掺量为 5%、电石渣掺量为 1%和磷石膏掺量为 1%的条件下，固化土的力学性能、渗透性能、浸出特性均较好。REN 等[39]以磷石膏、矿渣和石灰为原料制备了磷石膏渣基胶凝材料，并研究该材料固定重金属镉（Cd）的效果。结果表明，在 50%矿渣、45%磷石膏和 5%石灰混合的条件下该材料中性能最佳，对 Cd 的协同固化性能最好，试样强度为 37.3 MPa，金属浸出浓度为 0.133 μg/L。

但实际上，对于某些严重污染地区，固化剂很难将该地区重金属含量降到安全范围内，并且磷石膏还可能会对土壤造成其他污染，所以需要以磷石膏为原料研发一种高效、稳定和绿色的土壤重金属固化材料，既能治理土壤重金属污染，又能够资源化利用磷石膏。

3.3　生态修复

对磷石膏进行改性，利用改性后的磷石膏制备生态修复材料，不仅积极响应了国家固废利用的政策，还能在生态修复方面取得良好的效果。

陈谦等[40]对磷石膏进行改性并将改性后的磷石膏应用于高羊茅的生长以及生态修复。研究结果表明，与普通化肥相比，改性后的磷石膏有利于促进高羊茅的生长，能够使得牧草更加优质，改善草原环境，减少了草场沙漠化，保护了高原生态环境。杨晓攀[41]通过药剂改性的方法改善磷石膏的性能，并利用改性后的磷石膏制备废弃矿山修复生态填充料。研究结果表明，该材料能够充填废弃矿区，并对其进行修复。该项研究不仅找到了一种合适的修复材料，还资源化利用了工业固体废物磷石膏，减少了生态修复成本。

但实际上，将磷石膏应用于在生态修复领域的研究相对较少，磷石膏本身存在的对生态有危害的物质是一个不可忽视的问题。

4　总结与展望

随着环保政策的收紧以及工业化进程加快，磷石膏的综合利用受到越来越多的关注。目前，磷石膏主要应用于建材领域、化工领域以及农业领域，但是，磷石膏的应用领域不断拓宽，其在环境领域也具有重要作用。在环境领域，可以通过对磷石膏进行改性并将改性后的材料用作吸附剂，能够对水中污染物质进行有效去除，且效果良好；也可以将磷石膏与其他材料混合形成复合材料，固化土壤重金属物质；同时，磷石膏还对生态修复起着间接作用。然而，磷石膏的应用也存在一些问题与挑战。首先，磷石膏的产量大但利用率低；其次，磷石膏在使用过程中可能会对环境造成污染；最后，磷石膏的应用技术还不够完善，仅在部分领域进行利用。

综上，针对磷石膏的综合利用问题，未来可以从以下几个方面进行探索：（1）加大对磷石膏综合利用技术的研发，提高其利用率，减少资源浪费；（2）拓宽其运用领域，增大磷石膏消耗，缓解堆存问题；（3）提倡磷石膏环境友好型利用，运用各类技术手段，减少磷石膏中造成环境污染的物质。

［参考文献］

［1］ 齐亚兵，张思敬.湿法磷酸净化技术研究新进展及应用现状[J].应用化工，2022，51(9)：2798–2804.
［2］ 周开雄.工业湿法磷酸中的渣酸利用研究[D].昆明：昆明理工大学，2023.
［3］ HAK S A，SRAIDI A，KHALESS K，et al. Two steps leaching process for recovery of rare earths from moroccan phosphogypsum [J]. Journal of Cleaner Production，2023，427：138976.
［4］ 蒋建亚，张苏花，付旭东，等.磷化工废渣磷石膏的特性及其资源化利用[J].山西建筑，2021，47(9)：1–4.
［5］ 中国磷复肥工业协会.磷肥行业“十四五”发展思路[R].北京：CPFIA，2020.
［6］ 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.
[7] 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.
[8] 王童.利用磷石膏制备硫铝酸盐水泥的研究[D].大连:大连理工大学,2022.
[9] GUAN Q J, WANG Z, ZHOU F J, et al. The Impurity Removal and Comprehensive Utilization of Phosphogypsum: A Review[J]. Materials, 2024, 17(9): 2067.
[10] QI J, ZHU H, ZHOU P, et al. Application of phosphogypsum in soilization: a review[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20(9): 10449-10464.
[11] 张占彦.磷石膏制备相变储能基体材料工艺研究[D].郑州:郑州大学,2019.
[12] SUN T, LI W M, XU F, et al. A new eco-friendly concrete made of high content phosphogypsum based aggregates and binder: Mechanical properties and environmental benefits[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 400: 136555.
[13] 杨应伦,夏举佩.磷石膏原位稳定污染物研究[J].磷肥与复肥,2023,38(12):9-13,36.
[14] 王静云,李丽,张然,等.磷石膏资源化利用研究进展[J].磷肥与复肥,2024,39(1):32-35.
[15] 许金辉,邵龙义,侯海海,等.磷石膏综合利用背景下的环境影响研究现状[J].矿业科学学报,2023,8(1):115-126.
[16] 谷守玉,苗俊艳,侯翠红,等.磷石膏综合利用途径及关键共性技术创新研究建议[J].矿产保护与利用,2020,40(3):115-120.
[17] 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.
[18] 单俊鸿,宋旸,周明凯,等.改性磷石膏作水泥缓凝剂的研究[J].新型建筑材料,2024,51(1):119-123.
[19] CHEN Y, JI X P, CUI Z F, et al. Investigation on Engineering Characteristics of Lime-Stabilized Phosphogypsum Subgrade Filler[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(4): 04024028.
[20] 王锦,王思骅,何兆聆,等.干湿循环条件下磷建筑石膏复合材料耐水性能研究[J].新型建筑材料,2023,50(12):30-33.
[21] 王艾文.磷石膏常压无氯盐溶液法制备硫酸钙晶须[D].绵阳:西南科技大学,2021.
[22] 徐丽,房可能,毕永香,等.改性粒状硫酸钙制备及其在聚氯乙烯中的应用[J].无机盐工业,2023,55(3):104-112.
[23] ENNACIRI Y, BETTACH M, El ALAOUI-BELGHITI H. Obtaining nano calcium fluoride and ammonium sulfate from phosphogypsum [J]. Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements, 2024, 199(2): 178-186.
[24] 吴洪生,陈小青,马文舟,等.磷石膏改良滨海盐土效果及对小麦生长的影响[J/OL].土壤学报.http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20240305.1620.006.html.
[25] COSTA R F, FIRMANO R F, BOSSOLANI J W, et al. Soil chemical properties, enzyme activity and soybean and corn yields in atropical soil under no-till amended with lime and phosphogypsum [J]. International Journal of Plant Production, 2023, 17(2): 235-250.
[26] LU G R, FENG Z H, XU Y, et al. Impact of Phosphogypsum Application on Fungal Community Structure and Soil Health in Saline-Alkali-Affected Paddy Fields[J]. Agronomy, 2023, 13(11): 2726.
[27] 李小庆.改性磷石膏对水中铅、镉离子吸附性能研究[J].精细化工中间体,2024,54(1):70-74.
[28] LU M, WANG Y, YU J X, et al. treating waste with waste: Adsorption of anionic dyes in wastewater with surfactant-modified phosphogypsum [J]. Environmental Research, 2023, 237(P1): 116963.
[29] LI L, LIAO L, WANG B, et al. Effective Sb(V) removal from aqueous solution using phosphogypsum-modified biochar [J]. Environmental pollution, 2022, 301: 119032.
[30] 夏雪,周磊,杨国辉,等.磷石膏/固硫灰渣复合材料对铀(Ⅵ)的吸附行为及机理研究[J].金属矿山,2023(11):81-90.
[31] 吕晨阳,许向群,宋云杰,等.磷石膏基复合吸附材料的制备及其对废水中As(Ⅲ)的吸附性能研究[J].湿法冶金,2023,42(2):163-171.
[32] YELATONTSEV D. Utilization of phosphogypsum in phenol removal from coking wastewater [J]. Journal of Hazardous Materials Letters, 2023, 4: 100089.
[33] JIANG Z H, CHEN M, LEE X Q, et al. Enhanced removal of sulfonamide antibiotics from water by phosphogypsum modified biochar composite[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 130(8): 174-186.
[34] LU M, WANG Y, JIAO W X, et al. Eliminating waste with waste: Removal of doxycycline in water by goethite modified phosphogypsum[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 63: 105411.
[35] 简彦涛,齐劭乾,靳潇锐,等.国内重金属污染土壤修复技术研究进展[J].中国金属通报,2022(3):176-178.
[36] HUANG X Q, WANG R T, ZHAO X R, et al. the curing performances of lead-contaminated soil conditioned with modified phosphorus β-hemihydrate gypsum cemented materials [J]. Discover Environment, 2024, 2(1): 29.
[37] PHANIJA N, CHAVALI R V P. Solidification/stabilization of copper-contaminated soil using phosphogypsum [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 6(3): 145.
[38] 曹家玮,曹洪雨,索崇娴,等.水泥-赤泥-电石渣-磷石膏固化镉污染土壤[J].化工环保,2022,42(4):435-441.
[39] REN Z S, WANG L, WANG H, et al. Synergistic solidification/stabilization mechanism of cadmium in phosphogypsum slag-based cementitious material [J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132802.
[40] 陈谦,陈利轩.磷石膏的改性及生态修复应用实验研究[J].高原农业,2023,7(6):658-669.
[41] 杨晓攀.磷石膏作为矿坑新型生态修复填充材料的研究[J].工程技术研究,2023,8(6):108-110.