◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

磷石膏无害化与资源化研究现状

张瞿天[1]，梁处芳[1]，阮耀阳[1,2,3]，杨丙桥[1,3]，余军霞[2,3]，罗惠华[1,3]，池汝安[1,2,3]，周　芳[1,2,3]

（1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院，湖北 武汉　430000；2. 湖北省三峡实验室，湖北 宜昌　443000；
3. 绿色化工过程教育部重点实验室，湖北 宜昌　443000）

［摘　要］磷石膏是湿法磷酸生产的副产物，由于其杂质含量高、成分复杂，长期以来难以处理，多以堆存方式处理，对环境产生重大危害。介绍磷石膏的产生过程、主要杂质赋存形式及危害。重点阐述磷石膏无害化研究现状以及资源化利用现状，无害化研究主要包括物理法、化学法以及热分解法三大类，经无害化处理后的磷石膏主要可应用于建材、化工、农业三大领域。

［关键词］磷石膏；杂质；无害化；资源化

［中图分类号］TQ177.3+75　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）01-0084-07

Research status of phosphogypsum harmlessness and resource utilization

ZHANG Qutian[1], LIANG Chufang[1], RUAN Yaoyang[1,2,3], YANG Bingqiao[1,3],
YU Junxia[2,3], LUO Huihua[1,3], CHI Ru'an[1,2,3], ZHOU Fang[1,2,3]

(1. *School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan* 430000, *China*;
2. *Hubei Three Gorges Laboratory, Yichang* 443000, *China*;
3. *Key Laboratory of Green Chemical Process of Ministry of Education, Yichang* 443000, *China*)

Abstract: Phosphogypsum is a by-product of wet-process phosphoric acid, which is difficult to deal with for a long time due to excessive impurities and complex composition, and it is mainly stockpiled, which causes major harm to the environment. The production process, impurity types and storage status of phosphogypsum are introduced. The harmless research mainly includes three categories: physical method, chemical method and thermal decomposition method, and the phosphogypsum after harmless treatment can be mainly used in the three fields of building materials, chemical industry and agriculture.

Key words: phosphogypsum; impurity; harmless; resource utilization

0　引言

磷石膏是磷化工企业采用硫酸分解磷矿湿法生产磷酸过程中所产生的一种固体废弃物，通常每生产磷酸1 t会产生磷石膏4～5 t，其主要成分为二水硫酸钙（占比达90%），还含有少量半水硫酸钙、无水硫酸钙，以及各种含磷、氟化合物，有机杂质和其他难溶化合物。

磷石膏为粉末状固体，粉末直径约10 μm，呈弱酸性，能溶于酸、铵盐溶液及甘油，密度约2 g/cm^3。杂质的存在使得磷石膏表面光泽暗淡，呈灰白或黑灰色。

世界主要磷石膏产生国为中国、美国、摩洛哥等。2023年我国磷石膏产生量为8 100万t，利用量为4 500万t。我国排放磷石膏的企业大多集中在云南、贵州、湖北等主要产磷省份[1]。由于磷石膏成分复杂，产生量大，处理技术不成熟，利用率较低，因此多采用堆存的方式处理。我国湿法磷酸生产企业大多采用露天堆存方式处理磷石膏，磷石膏中存在的大量有害杂质经雨水冲刷进入土壤及地下水，最后进入人体，对环境和人体健康产生危害。近几十年来，有关磷石膏的研究论文数量迅速增长，这表明这一科学领域已成为研究热点，吸引了更多的研究人员。图1显示2014—2023年以“磷石膏”为题发表的论文数量。在美国等发达国家首先

［收稿日期］2024-07-05

［作者简介］张瞿天（2000-），男，江苏南通人，在读硕士研究生，从事磷石膏渗滤液的资源化无害化研究。

［通信作者］周　芳（1982-），女，湖北孝感人，教授，研究方向为化学工程。

［基金项目］湖北省技术创新计划项目重点研发专项公益事业类项目（2023BCB114）；湖北三峡实验室创新基金（SC211013）

对磷石膏进行除酸处理，然后再堆存。后来因磷石膏堆存依然给周边环境造成了污染，大部分企业被直接关停，并将磷酸生产线转移到发展中国家[2]。而一些资源匮乏、土地缺少的国家例如日本、马来西亚等，将磷石膏用于填海造陆或资源再利用。

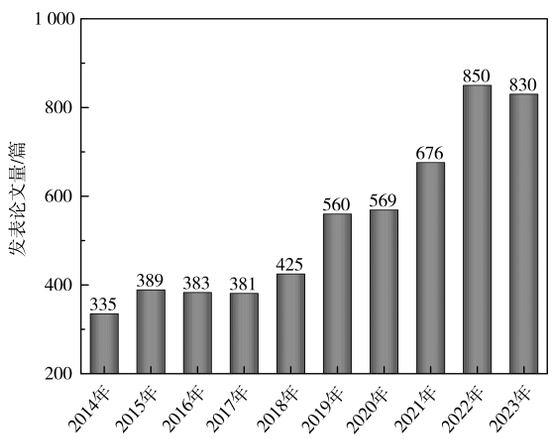


图1　2014—2023年磷石膏论文发表量

Fig. 1　Number of publications of phosphogypsum from 2014 to 2023

注：文献检索于Web of Science数据库。

1　磷石膏中主要杂质赋存形式及危害

1.1　磷杂质

磷是磷石膏中含量最多的杂质，根据化学性质的不同可分为水溶性磷、共晶磷和难溶性磷[3]。其中，水溶性磷以磷酸根（PO_4^{3-}）的形式存在，共晶磷以$CaHPO_4\cdot 2H_2O$的形式存在，难溶性磷以$CaPO_3(OH)\cdot 2H_2O$及$AlPO_4\cdot 2H_2O$的形式存在[4]。磷酸根会和钙离子生成惰性磷酸钙，延缓水化速度，降低建筑材料的强度[5]。制备高强石膏时，共晶磷的存在会影响石膏晶体的形貌，影响其使用性能[6]。

1.2　氟杂质

磷石膏中的氟主要分为可溶性氟和难溶性氟，可溶性氟主要以F^-、KF、NaF的形式存在，难溶性氟主要包含$Ca_5(PO_4)_3F$、CaF_2、Na_3AlF_6等[7-8]。氟杂质的含量与磷石膏的粒径成正比，粒径越大，氟含量越高[9]。可溶性氟会随雨水进入土壤，进而进入人体，造成骨质疏松等疾病，危害极大[10]。氟杂质的存在会缩短磷石膏凝固时间，导致石膏的硬度和密度减小[11]。

1.3　有机质杂质

磷矿选矿过程中作为浮选药剂加入的有机物，如乙二醇甲醚乙酸脂等，在湿法磷酸生产时附着在磷石膏颗粒表面[12]。其含量与磷石膏颗粒粒径成正比，粒径越大，含量越大[13]。有机质杂质的存在，严重影响磷石膏的白度，使其呈灰白色或黑灰色[14]。

1.4　重金属杂质

磷石膏中重金属杂质主要有Cr、Pb、Mn等，以磷酸盐或碳酸盐等可溶性盐存在[15]。重金属经过雨水的作用进入土壤、水体，最后进入人体。在人体中，重金属会和蛋白质以及各种酶相互作用，使其失去活性，最终使人体中毒；也会在人体器官中富集，从而引起心脏病、肝功能受损等一系列疾病[16]。

2　磷石膏无害化研究现状

2.1　物理法

物理法去除磷石膏中杂质主要包括水洗法与浮选法。水洗法就是用水反复冲洗磷石膏，通过改变水洗温度、时间来提高杂质的去除率，水洗法是目前最简洁有效的除杂方法，大部分的可溶性杂质可被有效除去[17]。曾明等[18]探索发现水洗法不仅可去除磷石膏中磷氟杂质，还可去除大部分有机杂质及重金属，磷去除率可达90%，氟去除率可达68%。浮选法是将水与磷石膏混合后投入浮选机，通过搅拌、沉淀、过滤等步骤去除有机质及可溶性杂质[19]。王进明等[20]通过反浮选–正浮选法达到磷石膏净化增白的目的，使磷石膏白度提高了25%，总磷去除率达到99%，二水石膏占比达到96%。

2.2　化学法

目前，化学法去除磷石膏中杂质的主要方法包括酸碱处理或沉淀法，使磷石膏中的杂质生成可溶性或难溶性杂质，再通过水洗、过滤方式去除[21]。最常见的添加物是石灰乳，其作用原理是石灰乳与磷酸盐及可溶性氟反应生成磷酸钙和氟化钙，实现磷石膏中可溶磷和可溶氟固化[22]。但化学法的缺点是最后产生的物质仍会影响磷石膏后续的应用。付全军等[23]采用添加硫酸的方法脱除磷石膏中的磷、氟等杂质，结果表明在反应温度85 ℃、反应时间45 min、硫酸质量分数为30%的条件下，磷、氟的脱除率都超过了90%，且处理后的磷石膏更加稳定，能达到建筑材料的要求。刘卫海[24]利用溶度积差异，将磷石膏与碳酸氢铵混合生成硫酸铵与碳酸钙。杨勇等[25]选择石灰、聚合氨化铝（PAC）、聚丙烯酰胺（PAM）、氯化钙、硫酸铝联用，通过强化混凝沉淀反应，可以有效去除磷石膏渗滤液中的磷酸盐和氟化物，其工艺流程如图2所示。

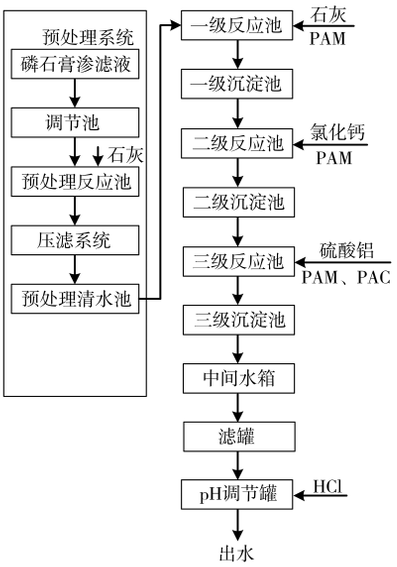


图2　磷石膏渗滤液沉淀工艺流程

Fig. 2　Process flow of phosphogypsum leachate precipitation

2.3　热分解法

热分解法主要包括添加催化剂或还原剂使磷石膏在高温条件下分解[26]。近年来热分解法的研究重点在两方面：一方面是寻找效率更高、成本更低的催化剂或还原剂；另一方面将催化剂及还原剂联合作用，达到更高的磷石膏分解率以及目标产物的产量[27]。

催化剂包括Ca基催化剂、Fe基催化剂、Al基催化剂等[28]。Ca基催化剂主要是CaF_2，其催化机制是在反应前期温度较低时，CaF_2与磷石膏反应生成氟硅酸盐，加快磷石膏分解；反应后期温度高于900 ℃时，CaF_2与磷石膏反应生成的氟、硫共熔物也会促进磷石膏的分解[29]。FENG等[30]研究发现，CaF_2加快了Ca_2SiO_4和$3Ca_2SiO_4 \cdot CaF_2$的形成，使得磷石膏在低温条件下更易分解，添加适量的CaF_2能提高磷石膏的分解率。Fe基催化剂主要有$FeCl_3$和Fe_2O_3，在加热条件下，$FeCl_3$与磷石膏发生离子交换反应，生成$Fe_2(SO_4)_3$和$CaCl_2$。ZHENG等[31]发现在Fe基催化剂作用下，磷石膏分解温度降低了300 ℃，分解率提高了14.3%。Al基催化剂主要为Al_2O_3，Al_2O_3与$CaSO_4$反应生成$CaAl_2O_4$。YANG等[32]通过计算分析磷石膏在Al_2O_3体系下热分解过程，推断出Al_2O_3的加入导致磷石膏分解温度降低。

还原剂主要包括焦炭、CO等。焦炭作为还原剂下主要使磷石膏发生式（1）、式（2）反应。

$$2CaSO_4 + C \longrightarrow 2CaO + 2SO_2\uparrow + CO_2\uparrow ; \quad (1)$$

$$CaSO_4 + 2C \longrightarrow CaS + 2CO_2\uparrow 。 \quad (2)$$

此外，焦炭的添加使磷石膏的分解温度显著降低，并且焦炭的种类、投入量及粒径是主要的影响因素。ZHENG等[33]研究发现磷石膏与焦炭的最佳质量比为1.0∶0.8，当投入量加大时，磷石膏的分解受到抑制。

CO作为磷石膏分解时候的还原剂，能显著降低反应温度并且提高分解率。NING等[34]通过研究磷石膏在纯CO，CO、N_2混合，纯N_2环境下反应的动力学过程，得出在各种环境下磷石膏分解的活化能大小分别为纯CO < CO、N_2混合 < 纯N_2。

2.4　其他

磷石膏现代处理方法中还有萃取法、超声波法等。李兵等[35]使用硫酸处理与萃取耦合的方法，考察温度、时间、硫酸浓度与固液比对除杂效果的影响。结果表明，除杂后的磷石膏杂质质量分数少于10%，白度大于90%。孔霞等[36]研究发现，将磷石膏浸于30%的硫酸溶液中充分搅拌，氟去除率可达84.5%。谭明洋等[37]以水洗为主、超声波为辅对磷石膏进行除杂，超声波所产生的高温使磷石膏晶体结构产生变化，使难溶性杂质得到释放，让杂质更有效地去除。

2.5　小结

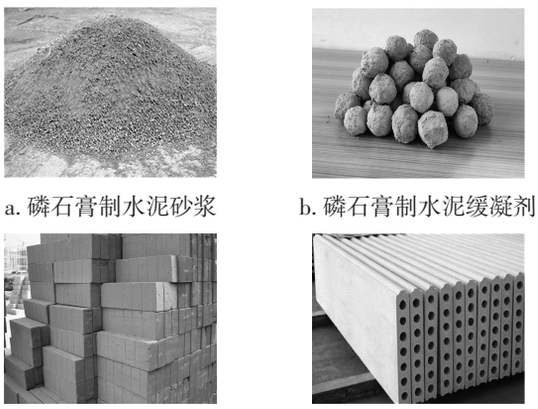
综上所述，水洗法等物理方法相较于其他方法操作简单，且不会引入新的杂质，但消耗水资源较多；酸碱处理法等方法磷氟去除率较高，但易引入新杂质；热分解法消耗能源过多；萃取法、超声波法等操作难度大，对设备要求过高，因此也未大范围应用。为将磷石膏做到无害化排放以及达到综合利用的条件，科研人员还需在实际条件下进一步探索磷石膏的除杂方法。

3　磷石膏资源化研究现状

近年来，随着我国践行“绿水青山就是金山银山”的环保理念，我国磷石膏的利用效率正在逐年提高，但是磷石膏的利用量与产生量仍有较大差距，加之早年的大量堆存，磷石膏的堆存量仍在逐年提高，且对磷石膏的处理问题仍未得到较好的解决方法。目前，磷石膏的资源化利用途径主要有以下几种：建材领域、化工领域、农业领域以及对外销售[38]。

3.1　磷石膏在建材领域的应用

磷石膏在建材领域的利用主要是生产水泥缓凝剂、建筑材料等，如图3所示。磷石膏应用于建材领域不仅缓解了磷石膏堆存造成的环境压力，降低了建设成本，还提高了建设速率[39]。



a. 磷石膏制水泥砂浆　b. 磷石膏制水泥缓凝剂
c. 磷石膏制石膏砌块　d. 磷石膏制隔板墙

图3　磷石膏在建材领域的应用

Fig. 3　Application of phosphogypsum in the field of building materials

磷石膏经处理后，即可代替天然石膏生产水泥缓凝剂，加入水泥中，其中的硫酸根与硫铝酸钙反应生成硫铝酸盐钙晶体，附着在水泥颗粒表面，减小了水泥与水的接触面积，进而减缓了水泥水化速度[40]。LI等[41]通过将磷石膏进行煅烧处理，得到改性磷石膏，制成水泥缓凝剂。经研究表明，改性磷石膏制成的水泥缓凝剂极大地减小了杂质对水泥品质的影响[42]。

磷石膏在建筑材料方面的应用主要体现在抹灰砂浆、隔板墙、石膏砌块等方面。磷石膏制成的抹灰砂浆比普通水泥抹灰砂浆更不易鼓包开裂，强度提升较快，更适应需抢工项目，此外，磷石膏抹灰砂浆防火保温性能更优异[43]。磷石膏隔板墙是由磷石膏、钢渣、粉煤灰等材料组成，施工使用预制组装方式连接成整体。磷石膏隔板墙的优势在于具有优良的抗震性、抗冲击性。磷石膏砌块是以磷石膏为主，辅以轻集料、填充材料制成的建筑砌块。磷石膏砌块因孔隙率高、容重低，保温防火性能较优，且具有环保、可再生等优点[44]。杨永等[45]通过控制磷石膏、水、填充材料的比例，制成了耐腐抗折的石膏砌块。GONG等[46]以磷石膏为原料，研究磷石膏与水泥混合作为胶凝材料的潜力，发现磷石膏质量占比为10%时，胶凝材料28 d抗压强度可达49.8 MPa。

实现磷石膏资源化利用另一个重要途径就是制备硫酸联产水泥。以磷石膏、焦炭、黏土为主要原料，在高温回转窑中加热，$CaSO_4$分解生成的SO_2用于生产硫酸，分解生成的CaO用于生产水泥。制备硫酸联产水泥消耗很大一部分磷石膏，改善了磷石膏大量堆积的问题，同时又生产出硫酸，可在湿法磷酸工艺中循环利用。但此法未普遍推广的原因在于各企业生产的磷石膏品质不同且水含量偏高，未形成一套有体系的理论基础。

3.2　磷石膏在化工领域的应用

磷石膏在化工领域的应用主要是回收磷石膏中的钙元素、硫元素以及稀土元素来二次利用，体现在制备硫酸钙晶须、硫酸铵和碳酸钙以及提取稀土元素等。以磷石膏为原料，经过一系列反应可制成硫酸钙晶须，硫酸钙晶须具有无毒性、耐高温耐腐蚀、高强度、高韧性等优点，因此多应用于造纸、环保材料等领域。但此利用途径存在耗水量大、易产生二次污染、工艺不完善等缺点，因此未被大规模应用[47]。磷石膏生产硫酸铵和碳酸钙的工艺是通过磷石膏与碳酸铵反应，另一方法是将磷石膏经过洗涤、过滤、除杂后，将其与氨和CO_2充分反应。磷石膏和磷尾矿联合制碳酸钙工艺流程见图4。ZDAH等[48]以磷石膏和LiOH为原材料，在常温常压下，在水溶液中反应3 h制得$Ca(OH)_2$和Li_2SO_4。磷石膏在化工领域的应用存在的问题是其所含杂质较多，其中的有害杂质去除成本较高，并且工艺条件并不成熟，因此并没有取得突破性的进展[49-50]。

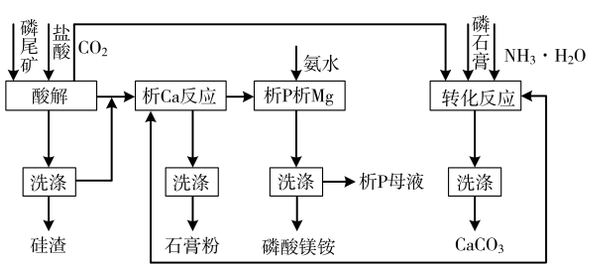


图4　磷石膏和磷尾矿联合制碳酸钙工艺流程

Fig. 4　Process flow of production of calcium carbonate from phosphogypsum and phosphate tailings

3.3　磷石膏在农业领域的应用

磷石膏中含有大量的钙、硫元素以及少量的磷、氟、铁等植物生长所必需的营养元素，其通过改变土壤的理化性质和元素含量，优化土壤中微生物群落的组成、生长和演替，从而改良土壤肥力，因此其可在农业领域制备堆肥。由于磷石膏自身的酸性，能有效改良盐碱地，降低土壤盐碱化对农作物产生的危害，也可改善土地的理化性质[51-52]，因此其在农业领域中最为重要的用途是作土壤改良剂。其原理是磷石膏中的钙离子与土壤中的碳酸根发生化学反应，生成碳酸钙沉淀，可把土壤中的Na^+置换出来，减少碳酸盐对农作物产生的危害。

平均每公顷盐碱地需3 000 kg的磷石膏才能有效改善土壤的碱性，增加土壤肥力。MELGAÇO等[52]将磷石膏当作基础材料，为硫酸盐还原细菌提供生长所必需的硫酸盐，从而提高土壤中还原细菌的活性、丰富性和多样性。SAGNA等[53]探究发现磷石膏与土壤改良剂混合使用，能有效降低土壤的盐碱度。但磷石膏中含有少量的重金属，若不经过处理，直接用于农业领域中会经过积累循环进入人体或环境，造成人体疾病或环境破坏。由于磷石膏中重金属难以完全处理干净，因此若想将磷石膏应用于农业领域，还需要更加完备的研究。

4 结语与展望

阐述磷石膏的产地、堆存情况，从物理法、化学法、热分解法等重点阐述了磷石膏无害化研究现状，从磷石膏在建材领域、化工领域、农业领域3个方面的应用说明磷石膏资源化研究现状。

节约资源、保护环境是我国可持续发展的重大举措。我国磷石膏资源利用起步较晚，方法落后，目前还是以堆存为主，我们应深入研究磷石膏除杂方法以及后期产品的发展，提高磷石膏品质。总而言之，磷石膏的综合利用不仅对环境起到了保护作用，也对国家经济做出了一份贡献。因此，对磷石膏无害化及资源化利用的深入研究迫在眉睫。

[参考文献]

[1] 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 R Z, BAI H D, GAO Y F, 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.

[2] 李光明,李霞,贾磊,等.国内外磷石膏处理和处置概况[J].无机盐工业,2012,44(10):11-13.
LI G M, LI X, JIA L, et al. General situation of treatment and disposal of phosphogypsum[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2012, 44(10):11-13.

[3] 刘梅,高利坤,何海洋,等.磷石膏杂质脱除、稀土回收及资源化利用研究进展[J].化工矿物与加工,2023,52(10):24-31.
LIU M, GAO L K, HE H Y, et al. Research progress in removal of impurities and recovery of rare earth from phosphogypsum and its resource utilization[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(10):24-31.

[4] 杨皓奇,武发德,朱干宇,等.天然陈化对磷石膏理化性质的影响及作用机理研究[J].新型建筑材料,2023,50(5):99-105.
YANG H Q, WU F D, ZHU G Y, et al. The effect and mechanism of natural aging procedure on the physicochemical properties of phosphogypsum[J]. New Building Materials, 2023, 50(5):99-105.

[5] 杜明霞,王进明,董发勤,等.磷石膏资源化利用研究进展[J].矿产保护与利用,2020,40(3):121-126.
DU M X, WANG J M, DONG F Q, et al. Research Progress on Resource Utilization of Phosphogypsum[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(3):121-126.

[6] 李恒,张晖,钟晋,等.无水Ⅱ型石膏活性激发及应用研究现状[J].化工矿物与加工,2023,52(5):1-8.
LI H, ZHANG H, ZHONG J, et al. Research status on activation and application of Ⅱ-anhydrite gypsum[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(5):1-8.

[7] 郭志翔,王琴,张秋臣,等.氟化物对石膏基胶凝材料结构和性能的影响[J].硅酸盐通报,2023,42(9):3248-3257.
GUO Z X, WANG Q, ZHANG Q C, et al. Effect of Fluoride on Structure and Properties of Gypsum-Based Cementitious Materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(9):3248-3257.

[8] XIANG J C, QIU J P, SONG Y Y, et al. Synergistic removal of phosphorus and fluorine impurities in phosphogypsum by enzyme-induced modified microbially induced carbonate precipitation method[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 324:116300.

[9] MEHROTRA D K. Effect of deficiency of essential elements and toxicity of metals on human health[J]. Sustainable Solutions for Elemental Deficiency and Excess in Crop Plants, 2020:69-82.

[10] LEI Y, ZHU Q, CHEN H, et al. Development and Application of Phosphogypsum in Plasterboard[J]. Mater Sci, 2019(9):69-78.

[11] OUIKHALFAN M, LAKBITA O, DELHALI A, et al. Toward net-zero emission fertilizers industry: greenhouse gas emission analyses and decarbonization solutions[J]. Energy & Fuels, 2022,36(8):4198-4223.

[12] 宋青松.化工高盐度废水治理技术分析[J].资源节约与环保,2022(9):97-100.
SONG Q S. Analysis of chemical high salinity wastewater treatment technology[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2022(9):97-100.

[13] 张茹,李艳军,刘杰,等.磷石膏的综合利用及有害元素处理方法[J].矿产保护与利用,2015(2):50-54.
ZHANG R, LI Y J, LIU J, et al. Utilization of Phosphogypsum and Treatment of the Impure Elements[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2015(2):50-54.

[14] HASSOUNE H, LACHEHAB A, HAJJAJI K E, et al. Dynamic of Heavy Metals and Environmental Impact of Waste Phosphogypsum[J]. Fate and Transport of Subsurface Pollutants, 2020, 24:57-77.

[15] FU Z S, XI S H. The effects of heavy metals on human metabolism[J]. Toxicology Mechanisms and Methods,2020,30(3):167-176.

[16] LV X F, XIANG L. The generation process, impurity removal and high-value utilization of phosphogypsum material[J]. Nanomaterials, 2022, 12(17):3021.

[17] WANG J, DONG F, WANG Z, et al. A novel method for purification of phosphogypsum[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2020,56(5):975-983.

[18] 曾明,阮燕,陈晶,等.磷石膏不同预处理方法的效果比较[J].建材世界,2011,32(2):18-21.
ZENG M, RUAN Y, CHEN J, et al. Effects Comparison of

Different Pretreatment Methods to Phosphogypsum[J]. The World of Building Materials, 2011, 32(2):18-21.

[19] 田家新,彭伟军,苗毅恒,等.磷石膏漂白—煅烧增白工艺研究[J].矿产保护与利用,2021,41(3):76-80.
TIAN J X, PENG W J, MIAO Y H, et al. Study on Whitening of Phosphogypsum via Bleaching and Calcination[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(3):76-80.

[20] 王进明,董发勤,王肇嘉,等.磷石膏浮选增白净化新工艺研究[J].非金属矿,2019,42(5):1-5.
WANG J M, DONG F Q, WANG Z J, et al. Study on New Technology of Phosphogypsum Whitening and Purification by Flotation[J]. Non-Metallic Mines, 2019, 42(5):1-5.

[21] MURALI G, AZAB M. Recent research in utilization of phosphogypsum as building materials: review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023,25:960-987.

[22] XU P J, LI H, CHEN Y X. Experimental study on optimization of phosphogypsum suspension decomposition conditions under double catalysis[J]. Materials (Basel), 2021,14(5):1120.

[23] 付全军,罗蜀峰,马先林,等.浸取中和法脱除磷石膏中杂质的研究[J].无机盐工业,2015,47(7):44-47.
FU Q J, LUO S F, MA X L, et al. Impurities removal from phosphogypsum by leaching neutralization method[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2015, 47(7):44-47.

[24] 刘卫海.铵法处理磷石膏制硫酸钾的研究[J].湖南化工,1999(4):26-28.
LIU W H. A Study on Preparation of Potassium Sulfate from Phosphogypsum by Ammonium Bicarbonate Process[J]. Hunan Chemical Industry, 1999(4):26-28.

[25] 杨勇,赵婧男.高效化学沉淀法处理磷石膏堆场渗滤液工程实例[J].工业安全与环保,2023,49(1):93-96.
YANG Y, ZHAO J N. Engineering example of high efficient chemical precipitation method for treating leachate of phosphogypsum yard [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(1):93-96.

[26] ZHANG W Y,ZHAO L Y,XUE M F,et al. Efficient precipitation of soluble phosphorus impurities in the recycling of phosphogypsum to produce hemihydrate gypsum[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 396:136455.

[27] YU M H, ZHU Z Y, LI H P, et al. Advanced preparation and processing techniques for high energy fuel AlH_3[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 421(P1):129753.

[28] BANKOVIĆ-ILIĆ I B, MILADINOVIĆ M R, STAMENKOVIĆ O S, et al. Application of nano CaO-based catalysts in biodiesel synthesis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72:746-760.

[29] 吴泳霖,张伟,奠波,等.磷石膏热分解研究现状[J].硅酸盐通报,2022,41(9):3129-3137.
WU Y L, ZHANG W, DIAN B, et al. Research Status of Phosphogypsum Pyrolysis [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(9):3129-3137.

[30] FENG H, XIE R S. Phosphogypsum pyrolysis with mineralization agent under weak reducing atmosphere [J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2019,295(5):052030.

[31] ZHENG D L, MA L P, WANG R M, et al. Research on thermal decomposing properties of phosphogypsum with Fe addition under multiatmosphere control[J]. Thermochimica Acta, 2018, 661:59-66.

[32] YANG J,ZHU B,MA L P,et al. Investigation of Al_2O_3 and Fe_2O_3 transmission and transformation during the decomposition of phosphogypsum [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(5):1125-1131.

[33] ZHENG S C, CHENG F X, WANG Z J. Production of SO_2 and lime from phosphogypsum reduced with lignite in a nitrogen atmosphere[J]. Advanced Materials Research,2013,803:94-98.

[34] NING P, ZHENG S C, MA L P, et al. Kinetics and thermodynamics studies on the decompositions of phosphogypsum in different atmospheres[J]. Advanced Materials Research, 2010 (160-162):842-848.

[35] 李兵,包炜军,郑义文,等.磷石膏净化预处理技术[J].磷肥与复肥,2018,33(3):28-31.
LI B, BAO W J, ZHENG Y W, et al. Pretreatment technology for phosphogypsum purification[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018, 33(3):28-31.

[36] 孔霞,罗康碧,李沪萍,等.硫酸酸浸法除磷石膏中杂质氟的研究[J].化学工程,2012,40(8):65-68.
KONG X, LUO K B, LI H P, et al. Removing impurity fluorine from phosphogypsum by sulfuric acid leaching method[J]. Chemical Engineering, 2012, 40(8):65-68.

[37] 谭明洋,相利学,李国龙.磷石膏净化处理及其对水泥性能的影响[J].水泥工程,2016,20(2):17-18.
TAN M Y, XIANG L X, LI G L. Phosphogypsum purification treatment and its effect on cement properties[J]. Cement Engineering, 2016, 20(2):17-18.

[38] 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.
ZHOU W, LI Y, FENG W G, et al. Research Progress on Comprehensive Utilization of Phosphogypsum and Its Application in the Field of Building Materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(2):534-542.

[39] 邓华,侯硕旻,李中军,等.磷石膏综合利用现状及展望[J].无机盐工业,2024,56(1):1-8.
DENG H, HOU S M, LI Z J, et al. Current situation and prospect of comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(1):1-8.

[40] POTGIETER J, POTGIETER S, MCCRINDLE R, et al. An investigation into the effect of various chemical and physical treatments of a South African phosphogypsum to render it suitable as a set retarder for cement[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(8):1223-1227.

[41] LI B X, LI L, CHEN X, et al. Modification of phosphogypsum using circulating fluidized bed fly ash and carbide slag for use as cement retarder[J]. Construction and Building Materials, 2022, 338:127630.

[42] ERGENÇ D,FORT R,VARAS-MURIEL M J,et al. Mortars and plasters—How to characterize aerial mortars and plasters [J]. Archaeological and Anthropological Sciences, 2021, 13 (11): 1-28.

[43] VIJAYAN D S, MOHAN A, REVATHY J, et al. Evaluation of the impact of thermal performance on various building bricks and blocks: A review [J]. Environmental Technology & Innovation,

2021, 23:101577.

[44] 汤银浩.工业副产石膏(磷石膏)作为缓凝剂在水泥中的应用[J].江苏建材,2021(4):37-39.
TANG Y H. The application of industrial by-product gypsum (phosphogypsum) as a retarder in cement[J]. Jiangsu Building Materials, 2021(4):37-39.

[45] 杨永,王如峰,杨振.石膏基防火门芯板生产技术[J].建材发展导向,2019,17(20):68-69.
YANG Y, WANG R F, YANG Z. Production technology of gypsum-based fireproof door core panel[J]. Development Guide to Building Materials, 2019, 17(20):68-69.

[46] GONG X Q, LIU J S, SUN Z G, et al. Effects of phosphogypsum and calcined phosphogypsum content on the basic physical and mechanical properties of Portland cement mortar[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2020, 48(5):20180380.

[47] 赵晨阳,吴丰辉,瞿广飞,等.废石膏制备硫酸钙晶须的高附加值利用前景[J].环境化学,2022,41(3):1086-1096.
ZHAO C Y, WU F H, QU G F, et al. The high value-added utilization prospect of calcium sulfate whiskers prepared from waste gypsum[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(3):1086-1096.

[48] ZDAH I, AZIFA A, ENNACIRI Y, et al. Green method of phosphogypsum waste conversion to lithium sulfate monohydrate and calcium hydroxide[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2022, 30:100850.

[49] 郑河,吴俊虎,李珊,等.我国磷石膏全量治理策略与技术途径[J].磷肥与复肥,2024,39(1):27-31.
ZHENG H, WU J H, LI S, et al. Strategy and technical approach for total treatment of phosphogypsum in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2024, 39(1):27-31.

[50] 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.

[51] GORBOVSKIY K G, RYASHKO A I, KAZAKOV A I, et al. The influence of water-soluble impurities on thermal dehydration kinetics of phosphogypsum in self-generated atmosphere[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 133(3):1549-1562.

[52] MELGAÇO L A O, QUITES N C, LEÃO V A. Phosphogypsum as sulfate source for sulphate-reducing bacteria in a continuous fluidized-bed reactor[J]. Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2020, 25:157-165.

[53] SAGNA Y P, DIEDHIOU S, GOUDIABY A O K, et al. Do phosphogypsum combined with organic amendments improve rice growth in a saline environment?[J]. Current Journal of Applied Science and Technology, 2023, 42(35):52-61.

****

《生态产业科学与磷氟工程》入选“中国科技期刊卓越行动计划（二期）”集群化试点项目

近日，中国科协网站公布中国科技期刊卓越行动计划二期项目入选名单，《生态产业科学与磷氟工程》入选“中国科技期刊卓越行动计划（二期）”集群化试点项目，成为“中国高校科技期刊与中国工程院院刊集群”创始成员刊。

“中国科技期刊卓越行动计划”始于2019年，由中国科协、财政部、教育部、科学技术部、国家新闻出版署、中国科学院、中国工程院等七部委联合实施，旨在推动我国科技期刊高质量发展，服务科技强国建设，是中国在科技期刊领域实施的力度最大和范围最广的重大科技期刊发展支持专项。中国科技期刊卓越行动计划二期项目（2024—2028年）本次入选项目共计463项，其中包括英文领军期刊项目50项，英文梯队期刊项目150项，中文领军期刊项目100项，中文梯队期刊项目100项，高起点新刊项目50目，集群（集团）化试点项目13项。

《生态产业科学与磷氟工程》（英文：Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，月刊，CN 41-1471/TQ，ISSN 2097-4566）（原刊名《磷肥与复肥》，2024年6月更名）由郑州大学主管，郑州大学、中国磷复肥工业协会主办，郑州大学出版社有限公司出版，是中国磷复肥工业协会会刊，主编汤建伟教授。办刊宗旨为：刊载绿色低碳循环发展政策、技术体系创新成果，反映磷氟元素为代表的资源加工传统产业生态化转型动态，促进磷氟等资源产业耦合，加快生态产业学术技术交流和成果转化，推动资源产业绿色低碳高质量发展。

期刊的发展离不开一直关心和支持《生态产业科学与磷氟工程》的编委、审稿人、作者以及读者，在此向您致以最诚挚的感谢！本次入选为《生态产业科学与磷氟工程》提升办刊水平提供了新的发展契机，我们将充分利用“中国科技期刊卓越行动计划（二期）”集群化试点项目这一重要平台，通过深化合作、资源共享，积极探索创新发展新模式，持续提高期刊学术质量，加强学术传播力度，提升学术影响力！