磷石膏提纯与利用研究现状及展望

张汉泉[1,2]，顾恒光[1]，郭　泽[1]，路漫漫[1,2]

（1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院，湖北 武汉　430205；
2. 磷矿及其共伴生资源绿色高效开发利用全国重点实验室，湖北 武汉　430073）

［摘　要］磷石膏作为湿法磷酸生产过程中产生的大宗固废，因含有磷、氟、有机质等杂质导致白度低、环境风险高，其综合利用面临技术瓶颈与成本挑战。系统综述磷石膏在建材、农业、化工等领域的应用现状，以及存在问题。针对杂质特性，重点分析浮选法、煅烧法、水洗法等提纯技术的机制与局限性，指出联合工艺可达到杂质深度去除的目的。

［关键词］磷石膏；资源化利用；提纯技术；浮选；煅烧；增白
［中图分类号］X781　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）06-0102-06

Current situation and prospect of research on purification and utilization of phosphogypsum

ZHANG Hanquan[1,2], GU Hengguang[1], GUO Ze[1], LU Manman[1,2]

(1. *School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan* 430205, *China*;
2. *State Key Laboratory of Green and Efficient Development of Phosphorus Resources, Wuhan* 430073, *China*)

Abstract: Phosphogypsum, as a major solid waste generated in the wet-process of phosphoric acid production, faces technical bottlenecks and cost challenges in its comprehensive utilization due to its low whiteness and high environmental risks caused by impurities such as phosphorus, fluorine, and organic matter. The current application status of phosphogypsum in building materials, agriculture, chemical industry and other fields are systematically summarized. Focusing on the characteristics of impurities, the mechanism and limitations of purification technologies such as flotation, calcination, and water washing are analyzed, and it is pointed out that combined processes can achieve the goal of the deep removal of impurities.

Key words: phosphogypsum; resource utilization; purification technology; flotation ; calcination; whitening

磷石膏是在湿法磷酸生产工艺中产生的大宗固废副产物，其主要成分为二水硫酸钙，含有磷、氟、硅、铁等无机类杂质和腐殖质等有机杂质[1]。目前，全球磷石膏的堆存量已达80亿t，我国堆存量已超过8亿t[2]。在造成土地资源浪费的同时，还会对周围大气、土壤、水资源造成污染，影响堆存地的生态环境。

磷石膏含有多种杂质，限制了其应用。现有多种对磷石膏进行除杂、脱色、增白的预处理方法，包括化学法、物理法、热处理法等[3]。化学除杂法是利用CaO、$Ca(OH)_2$等与磷石膏反应，使磷、氟等组成物质的活性和影响降低，但主要是对磷石膏进行一定程度的预处理除杂[4]。物理法是使用筛分和水洗等方式[5]去除可溶性杂质、部分有机物质和少量不可溶性杂质，但存在增加废水、除杂效果较差的缺点[6]。热处理法是对磷石膏进行高温或低温煅烧，此方法可降低和去除有机物中化学杂质和共晶磷对所需物料的影响，但能耗较高。

1　磷石膏的综合利用

1.1　磷石膏的利用情况

据统计，2023年我国磷石膏产生量为8 100万t，同比增长5.2%，而综合利用量为4 500万t，同比增长了16.0%；综合利用率达到55.6%，同比增长了5.2百分点[7]。2017—2023年我国磷石膏产量、利用量及综合利用率见图1。由图1可知，我国磷石膏的产生量呈现出上下起伏的状态，但波动较小；磷石膏利用量和利用率虽呈现出上升趋势，但与磷石膏

［收稿日期］2024-08-05；　　［修回日期］2025-05-14

［作者简介］张汉泉（1971-），男，湖北黄冈人，博士，教授，主要从事矿物加工与烧结球团研究。

［通信作者］路漫漫（1989-），男，安徽铜陵人，博士，研究方向为复杂矿物综合利用、固废资源化利用、矿山废水处理。

产生量仍有较大的差距。

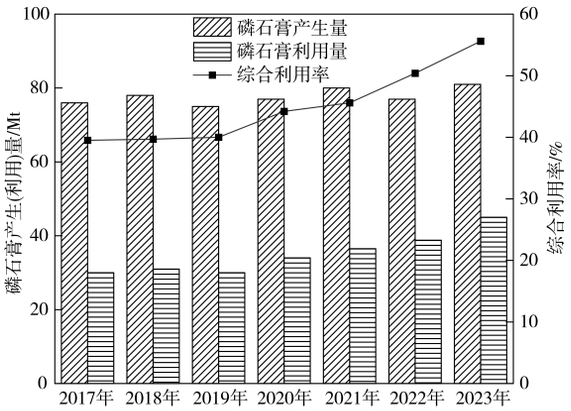

图1　2017—2023年我国磷石膏产量、利用量及综合利用率

Fig. 1　Phosphogypsum production, utilization and annual utilization rate from 2017 to 2023 in China

1.2　磷石膏综合利用方向和途径

天然石膏虽在我国利用范围广、用量大，但其中近95%用于水泥缓凝剂、石膏制品、墙体材料等领域，经济附加值低，并且过度采掘天然石膏矿对当地绿色生态发展影响深远。虽然磷石膏中的$CaSO_4·2H_2O$和其他杂质含量高于天然石膏，但若经过合理的处理，除杂后的磷石膏可以替代部分天然石膏使用。我国磷石膏的综合利用途径展现出全面化和多元化。2018—2023年我国磷石膏综合利用途径利用率占比如图2所示。

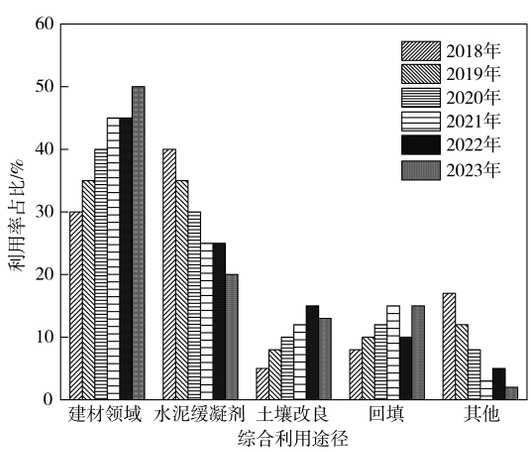

图2　2018—2023年我国磷石膏综合利用途径利用率占比

Fig. 2　Proportion of comprehensive utilization of phosphogypsum in China from 2018 to 2023

由图2可以看出，2018—2023年，我国磷石膏综合利用途径结构发生显著变化，综合利用率的提升向“以用定产”目标靠拢。建材领域取代水泥缓凝剂成为主导途径：2018年建材利用途径占比仅30%～35%，受益于石膏板、自流平砂浆等产品推广及政策补贴，2023年占比突破50%～55%，其中湖北、贵州等磷石膏大省建材化率超60%。水泥缓凝剂则因运输半径限制及高附加值替代技术发展，占比从40%～45%降至20%～25%，区域性集中于云南、四川等地。回填和土壤改良占比稳步增长，但前者依赖矿山集中区，后者受制于重金属管控和推广成本。政策驱动（如“无废城市”试点、“十四五”绿色规划）和技术创新是核心推动力，但区域不平衡（东部技术密集、西部堆存压力大）及部分低效利用统计争议仍是主要挑战[8]。

1.2.1　磷石膏基建材利用

建筑石膏的生产主要以天然石膏或工业副产石膏为原料，是加工抹灰、腻子等各类石膏基建粉材，以及加工砂浆、条板、砖、砌块[9]等基础型下游建材产品的基本原料。

建筑用石膏粉的质量由原始磷石膏的品质、预处理净化除杂方式及焙烧环节决定。我国磷石膏制备建筑石膏粉的工艺不统一，某些中小企业生产石膏粉时，为节省成本未设置净化除杂环节，所得产品杂质含量高于可用范围，致使使用过程不理想[9]。基于上述问题，湖北兴发化工集团有限公司采用浮选法对纯度90%、白度60%的磷石膏进行脱碳除杂处理，硫酸作为调整剂，使用自制WS-1型捕收剂，得到纯度99.12%和白度81%的磷石膏，提高了产品附加值。

磷石膏在土木建筑材料领域中，可生产路基材料、水泥缓凝剂、石膏粉、石膏砌砖、水泥砂浆、吸附材料等产品。寻常石膏板的生产原料以天然石膏为主[10]，但随着国家相应环保的号召，石膏矿的采掘受到管制，生产纸面石膏板的原料逐渐以磷石膏、脱硫石膏为主。

建筑用石膏粉为石膏板的主要原料，与玻璃纤维、水泥和特定添加剂充分混匀后，连续浇注于二层的防护面罩纸上，然后成形、封边、固化、切割、晾干等。纸面石膏板具有质地较轻、防火且隔热能力优秀、人工成本低等优点，在建材装修和家庭装饰上有着许多应用，在国际市场中需求量也很大。黄迪等[11]使用石灰溶液洗涤磷石膏以除杂，之后添加黏合试剂用来改良护面纸与石膏芯间的贴合性，最终获得符合国家标准的纸面石膏板物料。

石膏砖和石膏砌块都是以磷石膏为主要胶凝材料，将其与水混合，浇筑成型，干燥后制成墙体材料。石膏砖和石膏砌块具有轻质、隔音、防火、低碳环保等特征[12]。朱大勇等[13]在磷石膏粉中，掺入丙烯酸酯、石蜡复合乳液、硬脂酸乳液、含氢硅

油乳液等制备磷石膏砌块，当丙烯酸酯–石蜡复合乳液、硬脂酸乳液、含氢硅油乳液、三乙醇胺、氯化钠、亚硝酸钠的用量分别为磷石膏质量的4.0%、1.0%、0.5%、0.2%、1.0%、1.0%时，对磷石膏制成砌块的耐水能力有一定提升。我国石膏砖和石膏砌块消耗磷石膏约占磷石膏总消耗量的4.0%。

1.2.2 磷石膏在农业领域的利用

磷石膏的农业用途包括配制化肥和土壤改良剂等。哈萨克斯坦、巴西、俄罗斯等国家的磷石膏在农业领域大规模应用已经取得进展，我国用于土壤改良的磷石膏约占磷石膏总用量的1.7%[14]。

磷石膏中含有S、Ca、Fe、Mn和Si等物质[15]，有助于提高农作物品质，增强其抗病、抗旱能力。MULLINS等[16]研究得出，加入磷石膏后的泥土微量元素含量有所上升，在花生、果树、玉米等作物的种植过程中施用磷石膏，会在一定程度上提高农作物产量。陈丽娜等[17]研究发现，磷石膏可以增加盐碱土的水含量和总孔隙度，降低土壤容重、pH值和电导率，从而改善土壤盐碱化。

1.2.3 磷石膏在化工领域的应用

以磷石膏为原材料生产H_2SO_4、$(NH_4)_2SO_4$、$CaCO_3$、硫脲等含硫或钙的产品，或是在除杂、增白后，生产高纯度石膏等高端材料。磷石膏生产H_2SO_4等产品，对改善我国磷化工工业造成的污染、缩减占地浪费和资源再回收利用有指导作用。我国磷石膏制硫酸装置主要工艺技术如表1所示。

表1 我国磷石膏制硫酸装置主要工艺技术对比

Table 1 Comparative of the main process technologies of sulfuric acid production from phosphogypsum in China

煅烧工艺	实际产量/(万t·a^{-1})	是否洗涤	磷石膏形态	烟气净化流程	制酸工艺	转化率/%	吸收率/%	水泥规格
单段回转窑	4.2+4.8	否	半水石膏	较长	一转一吸	≥93.0	99.85	325#
单段回转窑	6.8+8.1	是	无水石膏	长	一转一吸	≥90.0	99.85	325#
五级预热器—单段回转窑	11.0+11.8	是	半水石膏	较短	两转两吸	99.90	99.98	325#
四级预热器—单段回转窑	26.4+28.2	否	无水石膏	较短	两转两吸	99.50	99.95	325#

利用磷石膏生产水泥联产硫酸技术虽然可以解决硫、钙资源的回收利用问题，但生产能耗高，CO_2排放量大[18]。因成本、技术和市场多重限制，2018—2023年磷石膏制硫酸占比始终低于5%。其发展依赖技术突破（如低温分解、杂质分离）、政策补贴（如碳税抵扣、硫酸定价保护）及区域产业协同（磷肥–硫酸–水泥产业链闭环）。未来若能在上述领域取得进展，该途径占比有望提升至10%以上。

1.3 *我国磷石膏综合利用存在的问题*

有关磷石膏的利用需要因地制宜。我国磷石膏的利用具有区域发展不平衡、企业间发展不平衡的特点，磷石膏的主要产生、堆存地为云、贵、川、鄂等磷制品产区，磷石膏回收利用率受地区环境和运送成本的影响较深。

我国磷石膏产品制造技术研究起步较晚，导致处理成本高且品质较差，其性能无法与天然石膏和脱硫石膏制品相比，市场认可度低。我国磷石膏综合利用缺乏绿色合适的预除杂工艺，存在着生产过程复杂、能耗高、投资大等难题。

2 磷石膏中的杂质类别和除杂增白技术

磷石膏pH为1.5～4.5，粒径在几十到几百微米，其主要成分为$CaSO_4·2H_2O$，并含有酸性不溶物、氟化物、碱金属盐、磷酸、磷酸盐、有机物、氧化铁、氧化铝和二氧化硅等杂质（见表2）。

表2 磷石膏主要化学成分

Table 2 Main chemical components of phosphogypsum

$w(SO_3)$/%	$w(CaO)$/%	$w(Al_2O_3)$/%	$w(MgO)$/%	$w(Fe_2O_3)$/%	$w(SiO_2)$/%	w(结晶水)/%
40.0～43.7	30～32	0.028～0.460	0.10～1.23	0.12～0.43	0.166～5.600	19.90～20.05
$w(P_2O_5)$/%	$w(P_2O_{5水溶})$/%	$w(F)$/%	$w(F_{水溶})$/%	w(有机质)/%	w(酸不溶物)/%	
0.93～3.23	0.10～1.76	0.22～0.87	0.11～0.76	0.12～0.16	0.001 3～0.810 0	

磷石膏中磷元素的赋存状态为可溶性磷、不溶性磷和共晶磷。可溶性磷对磷石膏的硬度影响最大并使其展现为酸性。并且磷石膏中的磷会渗透到周围的环境中，若处理不当会对当地土壤造成污染。

氟盐是由磷矿石中的氟磷酸钙与硫酸反应生成，以可溶性氟（KF、NaF等）和不可溶性氟（CaF_2、K_2SiF_6等）状态赋存于磷石膏中。不可溶性氟对环境影响较小，但可溶性氟会渗透到地下，造成水体、土壤等污染[19]。

硅元素杂质对磷石膏纯度影响较大，对磷石膏

板材的性能造成影响。以高硅钙为主要成分的磷矿生产磷酸过程中产生的磷石膏，硅质量分数在10%以上，造成性能降低[20-21]。

磷石膏中铅、铜、汞等重金属离子杂质含量较低，但仍具有一定的毒性[22]。而处理重金属离子，常采用吸附的方法。但如果吸附成本太高，会限制工业应用。因此，找寻一类成本较低和效果较好的吸附介质，已经成为亟须解决的问题。

磷石膏中的有机和无机杂质对其白度的影响最大。无机成分以碳为主，会使磷石膏呈现灰黑色或灰色。有机质多为黑色，严重影响了磷石膏的白度，造成其在工业生产利用上的不便。目前国内常用的磷石膏除杂方法有浮选法、煅烧法、球磨法、联合法等方法。

2.1　浮选法

浮选法是磷石膏脱杂增白常用的方法，可以除去磷石膏中的磷、氟元素及有机质。

韦家斌等[23]将磷石膏经反浮选脱除有机质后进入正浮选脱硅流程，经6次循环实验后，磷石膏纯度达到95%以上，$w(P_2O_{5总})$降到0.8%以下，两种水溶性杂质含量明显降低（见图3）。随着循环次数增加，由于循环多次后捕收剂的捕收能力减弱，使石膏产率变低。但根据图3可看出，循环6次以内得到的磷石膏精矿纯度和白度比较稳定。

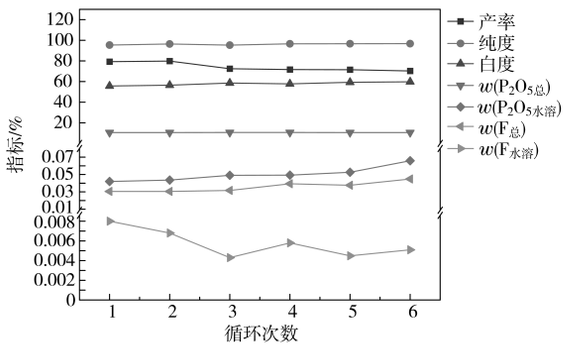

图3　某浮选闭路多循环次数实验磷石膏精矿分析结果

Fig. 3　Results of phosphogypsum concentrate analysis in a closed-circuit flotation multi-cycle experiment

浮选法工艺简单、效果明显、成本低廉，但该方法只能去除磷石膏表面的杂质，对磷石膏晶体内部的杂质的处理有一定的难度[24]。

2.2　热处理煅烧法

热处理煅烧法是利用高温或低温煅烧，脱除磷石膏中的可溶性盐、有机类杂质等[25]，从而提高磷石膏的白度和纯度。表3为磷石膏煅烧工业类型及其特点。不同有机杂质在持续加热被氧化的过程中具有不同程度的热效应特征。具有羟基、羧基官能团的有机质在350 ℃附近具有热效应；固定碳质在460～490 ℃具有氧化放热效应；低变形程度碳杂质在620～700 ℃被氧化[26]。虽然磷石膏中的有机物可以通过煅烧法去除，但是传统的烧结只能去除碳，而对铁这种杂质的影响很小。所以工业上常使用某些助剂来协助煅烧，如NaCl等。

表3　磷石膏煅烧工艺类型及其特点

Table 3　Phosphogypsum calcining process types and characteristics

影响因素	类型方式	优点	缺点	煅烧工艺设备
煅烧时间	低温慢烧	组成稳定，标准形态需水量少	温度低，脱水时间长，效率低，能耗高	间接式回转窑、炒锅
	高温快烧	设备成本低，生产效率高，脱杂稳定	工艺流程不易控制，成品质量波动较大	气流煅烧、直接式回转窑
	复合煅烧	降低物料温度，能源浪费较少	工艺条件控制难度较大	气流烘干煅烧组合间接加热式沸腾炉
加热方式	直接加热	设备成本低且结构简单	尾气温度高，能耗大	直热式回转窑
	间接加热	产品质量稳定，热转换效率高，外排空气温度低，可降低生产综合能耗	设备价值高，维护保养不便且复杂；流程长，占地面积大	内加热管式蒸汽回转窑或沸腾煅烧炉
出料方式	连续出料	质量稳定，生产效率高，能耗低	工艺流程较为复杂	沸腾炉、连续炒锅
	间歇出料	操作简单	成品质量波动大，效率低，能耗高	间歇式回转窑
物料特性	一步直接法	工艺流程短，操作简单	成品质量不稳定，易欠烧或过烧	回转窑、沸腾炉
	两步间接法	产品质量稳定	工艺控制较难	气流干燥器组合沸腾炉

吴磊等[27]研究煅烧温度对磷石膏白度的影响，发现随着煅烧温度升高，磷石膏的白度先升高后降低。在400～600 ℃时，磷石膏的白度由56.3%迅速增加到73.5%，然后逐渐下降。红外光谱分析结果显示，磷石膏中的有机物在400～900 ℃逐渐分解，样品的白度明显增加。吴长江等[28]向磷石膏中加入质量分数5%的NH_4Cl后，在800 ℃马弗炉中煅烧2 h，磷石膏白度由86.8%提升至96.2%。

虽然煅烧法可以显著提高磷石膏的白度，但由于高温煅烧所带来的高能耗问题，致使其成本激增，但煅烧联合工艺的发现，给单一煅烧带来了新的方向。某研究对已经过浮选脱硅处理的磷石膏进行煅烧–酸浸法联合处理，在煅烧温度600 ℃、煅

烧时间2 h、硫酸浓度1.5 mol/L、酸浸液固比5∶1、酸浸温度90 ℃的条件下，使磷石膏的白度由51.5%增至92.7%，效果显著且能耗降低，对煅烧联合法有一定的指导意义。

2.3 水洗法

水洗法是磷石膏在物理除杂中最有效的方法，可除去可溶性磷、氟、碱金属盐、硅砂和部分有机物等杂质[29]。

水洗法流程简便，水资源获取方便，且使用效果好。但水洗过程中会产生的大量废水，含有杂质的水不易被循环利用，若处置不当，会导致环境污染。所以使用后的洗水必经过严格检验后才可排放或回用，但这也使成本增加。

2.4 球磨法

磷石膏球磨后常用于制备胶凝材料。将适量的磷石膏加入球磨机中粉碎，由于钢球的重力和钢球之间的摩擦力作用，改变了磷石膏的晶型（由普通晶体改为柱状、板状、粒状糖等），降低了磷石膏粒级，增大了磷石膏比表面积。使用球磨法加工磷石膏，显著降低了胶凝材料制备过程中对水的需求量，因此提高了产物的流动性[30]。但球磨法并不能去除所有的杂质，所以一般不会独自使用，与其他方法联合使用为主流。

2.5 陈化法

陈化法是利用磷石膏本身的内部材料特性，在层压、自然干燥后挥发性物质自然蒸发，去除部分挥发性杂质。并且在陈化中，磷石膏的相变过程逐渐稳定，物相逐渐变得均质化，但陈化法的处理效果受时间的制约很大，只有将陈化时间延长，才能有效改善除杂效果，其固磷反应过程如下：

$$3Ca^{2+} + 2PO_4^{3-} \longrightarrow Ca_3(PO_4)_2\downarrow; \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + 2H_2PO_4^{-} \longrightarrow Ca(H_2PO_4)_2; \quad (2)$$

$$Ca^{2+} + HPO_4^{2-} \longrightarrow CaHPO_4。 \quad (3)$$

陈化法流程简单但所需时间较长，工业中主要采用机械陈化法和自然陈化法。自然陈化法是将磷石膏堆放在原料场地周围，根据厂址当地环境进行陈化的方法。而机械陈化法则是以自然陈化为主，辅以人工和机械搅混。自然陈化法虽然比机械陈化法周期长、效率低，但过程简单，被部分企业认可。

与新产生的磷石膏相比，经过1～3年以上自然陈化的磷石膏被证明可直接在纸面石膏板、复合胶凝材料、水泥缓凝剂[31]等领域进行使用且成本也有所降低。但是在自然陈化过程中，磷石膏中的部分有害性杂质会随着雨水渗漏至地下，造成地下水体污染，对周边环境与人类居住产生不利影响。

2.6 化学浸提法

化学浸提法常用的浸出酸有H_2SO_4、HCl、柠檬酸等，常用的浸出碱有石灰、Na_2CO_3、$NaHCO_3$等，常用的浸出盐有Na_2SO_4、NaCl等。酸浸是应用广泛的除杂方法，是利用酸性溶液将嵌入矿物表面或晶格的杂质转化为可溶性物质，然后通过过滤器过滤除去。在这些浸出酸中，因为硫酸引入的杂质离子少、净化效果好，所以应用最为广泛。如先用硫酸处理一定量的磷石膏样品，再用过氧化氢进行氧化增白，在硫酸质量分数为20%，过氧化氢质量分数为20%的条件下，磷石膏样品的白度可从33.7%提升至64.3%。化学浸提法对金属氧化物和磷酸络合物的效果明显，且工艺简单、成本低、污染较小，但其缺点是不能有效分解有机质或提高磷石膏白度。

3 结语

在碳达峰、碳中和的时代背景下，磷石膏经过净化除杂后是一种重要的可再生资源。经过处理的磷石膏在众多领域都有所利用，比如化工、建材、农业领域等。但部分磷石膏预处理方法成本高、资源利用流程复杂、没有统一的行业标准，且因地理原因造成的产品运输问题尚未得到根本解决。客观来讲，我国磷石膏资源化利用起步较晚，磷石膏预处理方法未完全成熟，目前，剩余磷石膏仍大量堆积，政府、企业、科研机构和市场应共同联合，为磷石膏产业发展营造良好的政策环境，完善磷石膏利用标准体系，攻克磷石膏的资源化利用。

磷石膏的脱色增白技术是提高磷石膏附加值的瓶颈技术之一，虽然处理磷石膏的方法有很多，但每个方法都或多或少有一定的不便和缺点。但联合工艺能充分发挥不同工艺的优势，使磷石膏表面和内部晶体杂质得到有效去除，达到增白的目的。

[参考文献]

[1] 李恒，张晖.磷石膏增白净化技术研究现状[J].磷肥与复肥，2022，37(6)：31-34.
LI H，ZHANG H. Research status of phosphogypsum whitening and purification technology[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2022，37(6)：31-34.

[2] 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)：5-6，28.
SHEN W Y，ZHEN G M，SUN H L. Experimental study on purification and whitening of phosphogypsum[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2022，37(2)：5-6，28.

[3] 杨敏，庞英.化学预处理磷石膏用于水泥缓凝剂的研究[J].兰州理工大学学报，2007(6)：58-60.

YANG M, PANG Y. lnvestigation of cement retarder made of chemically pretreated phosphogypsum [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2007(6): 58-60.

[4] 徐爱叶，李沪萍，罗康碧.磷石膏中杂质及除杂方法研究综述[J].化工科技，2010，18(6)：59-64.
XU A Y, LI H P, LUO K B. An overview of the study on the impurities and the method of eliminating the impurity in the phosphogypsum[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2010, 18(6): 59-64.

[5] 龚家竹，周桂民，吴宁兰，等.无机盐工业面临碳达峰碳中和的挑战与创新发展机遇[J].无机盐工业，2022，54(4)：46-54.
GONG J Z, ZHOU G M, WU N L, et al. Challenges and innovative development opportunities of carbon peak and carbon neutralization faced by inorganic salt industry [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(4): 46-54.

[6] 黄照昊，罗康碧，李沪萍.磷石膏中杂质种类及除杂方法研究综述[J].硅酸盐通报，2016，35(5)：1504-1508.
HUANG Z H, LUO K N, LI H P. Types of Impurity in Phosphogypsum and the Method of Removing Impurity Research Review [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35 (5): 1504-1508.

[7] 崔荣政，王臣，修学峰.2023年我国磷石膏综合利用情况及产业发展现状分析[J].生态产业科学与磷氟工程，2024，39(11)：1-6.
CUI R Z, WANG C, XIU X F. Analysis of comprehensive utilization and industrial development status of phosphogypsum in China in 2023 [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine, 2024, 39(11): 1-6.

[8] 周云刚，何宾宾.我国磷石膏综合利用现状与建议[J].磷肥与复肥，2023，38(5)：11-16.
ZHOU Y G, HE B B. Current situation and suggestions of comprehensive utilization of phosphogypsum in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(5): 11-16.

[9] 刘林程，左海滨，许志强.工业石膏的资源化利用途径与展望[J].无机盐工业，2021，53(10)：1-9.
LIU L C, ZUO H B, XU Z Q. Resource utilization approach of industrial gypsum and its prospect[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2021, 53(10): 1-9.

[10] 潘伟，吴帅，曾庆友.磷石膏的资源化利用进展[J].云南化工，2019，46(4)：16-19，22.
PAN W, WU S, ZENG Y Q. Progress in resource utilization of phosphogypsum[J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46 (4): 16-19, 22.

[11] 黄迪，宗世荣，马航，等.磷石膏资源化利用技术研究及应用进展[J].磷肥与复肥，2023，38(5)：17-22.
HUANG D, ZONG S R, MA H, et al. Research and application progress of resource utilization technology of phosphogypsum [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(5): 17-22.

[12] 宗炜，张厚记，林小玉，等.磷石膏在公路建设中的循环利用研究现状[J].建材世界，2022，43(1)：10-12，22.
ZONG W, ZHANG H J, LIN X Y, et al. Research Status of Phosphogypsum Recycling in Highway Construction [J]. The World of Building Materials, 2022, 43(1): 10-12, 22.

[13] 朱大勇，王君，金旭，等.耐水型磷石膏砌块的制备及其防水机理的研究[J].新型建筑材料，2017，44(1)：68-70，99.
ZHU D Y, WANG J, JIN X, et al. The preparation of water resistant phosphogypsum block and the research on waterproof mechanism[J]. New Building Materials, 2017, 44(1): 68-70, 99.

[14] 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.

[15] 许敬敬，张乃明.磷石膏的农业利用研究进展[J].磷肥与复肥，2017，32(9)：34-38.
XU J J, ZHANG N M. Research progress for applications of phosphogypsum in agriculture[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017, 32(9): 34-38.

[16] MULLINS G L, MITCHELL JR C C. Use of phosphogypsum to increase yield and quality of annual forages[J]. Agricultural and Food Sciences, 1990(1): 48-84.

[17] 陈丽娜.嗜盐/耐盐微生物在苏打盐碱土改良中的作用及机制研究[D].长春：吉林大学，2020.
CHEN L N. Study on the role and mechanism of halophilic/halotolerant microorganisms in soda-saline-alkali soil improvement [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[18] 徐振华，黄绪泉，刘立明.磷石膏制硫酸联产水泥过程中的碳排放核算[J].磷肥与复肥，2022，37(2)：46-48.
XU Z H, HUANG X Q, LIU L M. Carbon emission assessment in the process of production of sulfuric acid integrated with cement from phosphogypsum[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(2): 46-48.

[19] 王现顺.磷石膏中着色物质的鉴定与脱除[D].合肥：合肥工业大学，2021.
WANG X S. Identification and removal of coloring substances in phosphogypsum[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.

[20] PANG Y, YANG L, YANG M, et al. Study on Existing Form and Distribution of the Impurities in Phosphogypsum[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science Edition), 2009, 26 (3): 95-99.

[21] 陈嘉懿.预处理工艺对磷石膏性能的影响及作用机理研究[D].武汉：武汉理工大学，2012.
CHEN J Y. Study on the influence of pretreatment process on the properties of phosphogypsum and its mechanism[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.

[22] 李江丽，郭永杰，李海兵，等.磷石膏除杂增白研究进展[J].磷肥与复肥，2022，37(9)：30-33.
LI J L, GUO Y J, LI H B, et al. Research progress on impurity removal and whitening of phosphogypsum[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(9): 30-33.

[23] 韦家斌，吉永海，陈晓庆，等.磷石膏浮选提纯除杂工艺研究[J].非金属矿，2022，45(5)：5760.
WEI J B, JI Y H, CHEN X Q, et al. Study on Purification and Impurity Removal of Phosphogypsum by Flotation[J]. Non-Metallic Mines, 2022, 45(5): 57-60.

[24] WANG J, DONG F, WANG Z, et al. A novel method for purification of phosphogypsum[J]. Physicochemical Problems of

（下转第125页）