◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

磷石膏绿色资源化利用研究进展

罗大军，韩可欣，陈金硕，罗　颖，王淦鑫，张学亮

（贵州理工学院 材料与能源工程学院，贵州 贵阳　550025）

［摘　要］磷石膏作为磷化工行业产生的大宗固废，长期大规模堆存不仅占用土地资源，也因其含有的可溶性磷、氟化物等成分，对周边生态环境造成潜在的持久性污染，成为制约磷化工行业绿色发展的瓶颈。推动磷石膏绿色资源化利用的规模化和高值化是资源环境领域亟待解决的重大问题。本文系统梳理近年来国内外磷石膏资源化利用的研究进展，阐述磷石膏基本物理化学性质，综述其在建筑材料、路基填料、稳定土添加剂以及矿山充填领域的大规模应用原理及路线，并对未来磷石膏资源化技术发展趋势与产业化路径进行了展望。

［关键词］磷石膏；资源化利用；建筑材料；道路工程；矿山充填

［中图分类号］X781　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）05-0075-08

Research progress on green resource utilization of phosphogypsum

LUO Dajun, HAN Kexin, CHEN Jinshuo, LUO Ying, WANG Ganxin, ZHANG Xueliang

(*School of Materials and Energy Engineering*, *Guizhou Institute of Technology*, *Guiyang* 550025, *China*)

Abstract: Phosphogypsum, as a major solid waste generated by the phosphorus chemical industry, not only occupies land resources when stored on a large scale for a long time, but also causes potential and persistent pollution to the surrounding ecological environment due to its soluble phosphorus, fluoride and other components, becoming a bottle neck restricting the green development of the phosphorus chemical industry. The promotion of large-scale and high-value utilization of phosphogypsum is a major issue that urgently needs to be addressed in the field of resources and environment. The research achievements on the resource utilization of phosphogypsum at home and abroad in recent years are systematically reviewed in this work. The basic physical and chemical properties of phosphogypsum are described. The principles and routes for the large-scale application of phosphogypsum in the fields of building materials, subgrade fill materials, stabilizing soil additives, and mine filling are reviewed. The future development trends and industrialization paths of phosphogypsum resource utilization technologies are anticipated.

Key words: phosphogypsum; resources utilization; building materials; road works; filling of mine

磷石膏（phosphogypsum，PG）是磷化工产业中磷酸生产过程的副产物，每生产磷酸1 t会产生磷石膏4.5～5.0 t[1-2]。我国磷石膏产地主要集中在湖北、云南、贵州、四川等地，这些地区磷石膏产生量占全国总产生量的85%左右，但磷石膏综合利用率仅有61.6%，累计存量已达8亿t[3]。当前磷石膏资源化利用面临三大核心挑战：一是预处理瓶颈，磷石膏杂质种类多且交互作用复杂，预处理成本占总利用成本的30%～50%；二是高掺量短板，在建材、道路工程等应用领域，掺量超60%易出现强度下降、耐水性差等问题；三是环境安全长效性不足，长期服役可能出现磷、氟浸出反弹，潮湿环境下浸出浓度易超《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》（GB 36600—2018）限值。对应技术探索聚焦3个方面：开发水力空化-浮选协同除杂等绿色预处理技术；通过复合改性构建高性能材料体系，推动高掺量应用；跨领域协同消纳模式，结合区域磷化工产业与基建需求，建立“磷石膏-建筑-道路-矿山”一体化消纳体系。因此，本文系统梳理近年来国内外磷石膏资源化利用的研究进展，

收稿日期：2025-11-15

作者简介：罗大军（1991—　），男，贵州瓮安人，博士，副教授，研究方向为储能材料与固废资源化利用。

通信作者：张学亮。

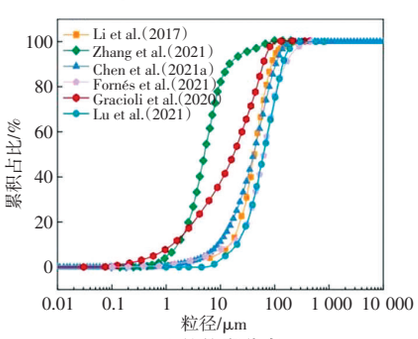
基金项目：贵州省科技计划项目（黔科合支撑［2023］一般427）；贵州省中央引导地方资金项目（黔科合中引地［2025］040）

结合磷石膏基本物理化学性质，分析其在建筑材料、路基填料、稳定土添加剂以及矿山充填领域的大规模应用原理及路线，并对未来磷石膏资源化技术发展趋势与产业化路径进行了展望。

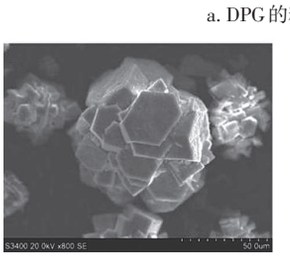
1　磷石膏基本性质与组成

1.1　物理性质

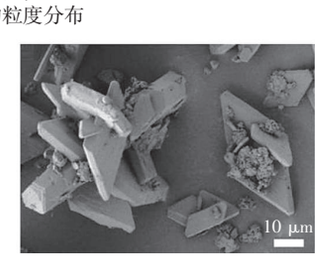
由于磷酸盐矿来源和磷酸生产过程不同导致磷石膏颜色不同（通常为灰白色），包含半水合物磷石膏（HPG）和二水合物磷石膏（DPG）两种形式，具体取决于湿法磷酸生产过程。图 1a.为 DPG 的粒径分布曲线，主要集中在 1 ~ 100 μm。由于细颗粒含量高，DPG 不利于填充浆料的脱水和快速硬化。相比之下，HPG 包含许多直径为 50 ~ 80 μm 的粗颗粒，这对填充浆料的保水性有害。较细的粒径可以增强胶凝材料中的反应活性和强度，而较粗的颗粒可能导致不同的凝结时间和机械强度 [7]。大多数 HPG 晶体是由许多片状和板状晶体组成的多边形聚集体，但 DPG 晶体通常为片状和粒状，如图 1b.和图 1c.所示。此外，磷石膏含有硫酸和磷酸等酸性物质，其 pH 通常为 1.5 ~ 5.5，属于酸性固体废物 [8]。磷石膏的堆积密度为 1 270 ~ 2 290 kg/m^3，相对密度为 2 350 ~ 3 272 kg/m^3，比表面积为 0.13 ~ 0.45 m^2/g。



a. DPG 的粒度分布



b. HPG 微观形态



c. DPG 的微观形态

图 1　DPG 的粒度分布以及 HPG 和 DPG 的微观形态 [4-6]

Fig. 1　Particle size distribution of DPG and the microscopic morphology of HPG and DPG

1.2　化学组成

磷石膏主要成分是二水硫酸钙（$CaSO_4·2H_2O$），占比达 90%以上，少量是半水硫酸钙（$CaSO_4·0.5H_2O$）和无水硫酸钙（$CaSO_4$），其余是磷酸钙（$Ca_3(PO_4)_2$）、二氧化硅（SiO_2）等各类杂质 [8-9]。因各地磷矿的特性和生产工艺不同，磷石膏中的杂质成分也有所差异，主要含磷、氟和有机物杂质，部分磷石膏还含有重金属和放射性杂质。其中，磷和氟杂质是影响磷石膏资源化利用的关键因素。磷主要以可溶磷（如 H_3PO_4、$Ca(H_2PO_4)_2$ 等）、共晶磷（以固溶体形式存在于 $CaSO_4$ 晶格中）和难溶磷（如 $Ca_3(PO_4)_2$ 等）的形式存在。氟主要以可溶氟（如 NaF、KF 等）和难溶氟（如 CaF_2 等）的形式存在 [10]。杂质的存在会对磷石膏基材料的性能产生负面影响，如延缓凝结、降低强度以及影响耐久性等。

2　磷石膏杂质处理及对材料性能的影响

2.1　杂质处理方法

2.1.1　物理处理

物理处理方法主要包括水洗、浮选、重力分离等。水洗可以去除磷石膏中的部分可溶性杂质，如可溶磷和可溶氟。LI 等 [11] 创新地应用水力空化预处理（HCP）结合泡沫浮选来净化磷石膏，通过流体动力学计算确定了空化管的最佳参数。在预处理阶段，HCP 在去除可溶性磷和氟方面明显优于搅拌水洗，其与浮选结合可进一步去除未溶解的硅，将磷石膏纯度从 81.00%提高到 97.27%，回收率为 83.81%。流体动力空化增强可溶性磷和氟的溶解并促进浮选分离的机制如图 2 所示。CHEN 等 [12] 利用十二烷基二甲基乙基苄基氯化铵（DDEA）作为反向浮选捕收剂对磷石膏进行浮选，在 pH 2.3 ~ 2.5、松油和 DDEA 用量为 300 g/t、矿浆 w（固）为 30%、充气量 0.20 m^3/h 的条件下，磷石膏中 SiO_2、有机物和氟离子含量显著降低，$CaSO_4·2H_2O$ 纯度达到 94.44%，满足建筑材料用磷石膏一级标准（GB/T 23456—2018）。此外，ZHANG 等 [13] 采用重力分离设备（填充柱跳汰机）对磷石膏进行处理，结合浮选工艺，使可溶性磷质量分数从 0.89%降低到 0.04%，白度从 39%提高到 87%，生产出适用于多种建筑用途的升级磷石膏。

2.1.2　化学处理

化学处理方法包括中和、沉淀、结晶以及氧化还原等，通过加入电石渣（CS，工业固废，主要成分为 $Ca(OH)_2$）、气化渣等中和剂可中和磷石膏中的酸性物质，减少杂质对磷石膏性能的影响 [14]。JIN 等 [15] 以电石渣作为碱性中和剂，用于 β–半水磷石膏（β-HPG）– 粒化高炉矿渣（GGBS）复合体系。CS 在水中释放大量 OH^-，可将原本弱酸性的 β-HPG 体系快速转化为碱性环境，直接中和 β-HPG

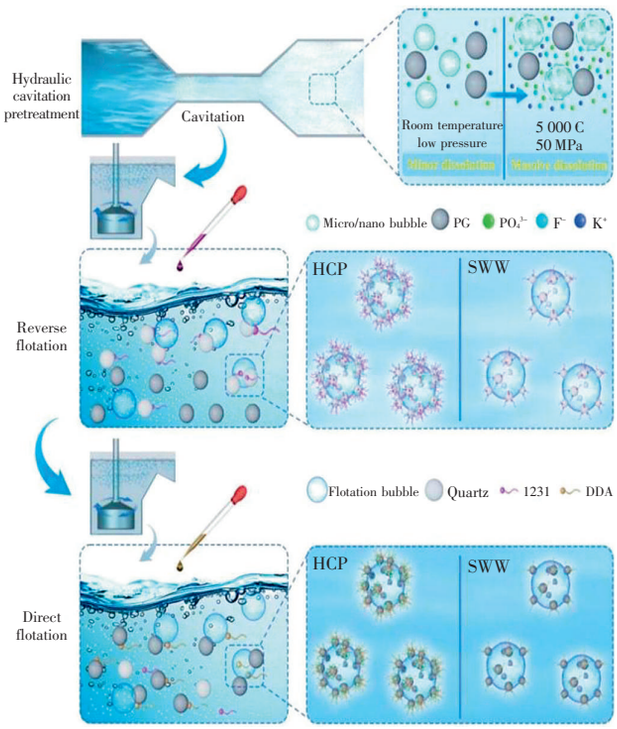


图2　流体动力空化增强可溶性磷和氟的溶解并促进浮选分离的机制[13]

Fig. 2　Mechanisum of fluid dynamic acvitation enhaucing solubility of phosphorus and fluorine and promoting flotation separation

中残留的酸性物质，抑制可溶性磷、氟杂质的溶出，为GGBS水化所需的碱性条件提供支撑，实现磷石膏与高炉矿渣、电石渣的协同资源化利用，进一步证实了电石渣作为中和剂的高效性。HU等[10]使用气化渣制备的Fe掺杂水化硅酸钙体系（Fe-C-S-H）对磷石膏渗滤液中的磷和氟杂质进行分步固定，通过控制渗滤液体系的pH，依次固定F^-、HPO_4^{2-}、PO_4^{3-}。当n(Ca)/n(Si)为1.5时，Fe-C-S-H对磷和氟的去除率分别达到98.7%和96.3%，有效降低了磷石膏渗滤液对土壤和水体的污染。MONDHE等[16]将磷石膏（pH 2.31）与市政垃圾焚烧底灰（BA，pH 9～11）混合，利用酸碱中和效应调节体系碱度，成功将浸出液pH调控至5.5～10.6，显著降低了砷、镉、铅和氟化物等目标污染物的迁移性，可有效将上述污染物的浸出风险控制在监管限值内，满足轻交通道路基层材料要求，为酸性磷石膏与碱性固废的协同利用提供了新思路。

2.1.3　热处理

热处理是将磷石膏在一定温度下煅烧，使其发生脱水、晶型转变等反应并去除部分杂质的过程。在600～800 ℃下煅烧磷石膏可将$CaSO_4·2H_2O$转化为半水石膏或无水石膏，提高其活性。通过控制煅烧温度和时间，可以有效去除磷石膏中有机物和部分氟杂质，改善其性能[17]。但热处理过程需要消耗大量能源，且可能产生有害气体，需要合理控制工艺条件和采取环保措施。两步结晶转化法是一种高效的热处理改性技术，通过硫酸溶液破坏磷石膏晶体的晶格，释放出包裹的磷、氟杂质，再在碱性条件下重新结晶形成纯净的硫酸钙晶体[18]。该方法可将磷石膏中的总P_2O_5质量分数降至0.02%，同时去除部分重金属杂质，改性后的磷石膏作为水泥缓凝剂使用时，对水泥的凝结时间和强度的影响与天然石膏相当。

2.2　杂质对材料性能的影响机制

磷石膏中磷、氟、有机物等杂质会通过多重路径影响材料性能，且以无害化为前提的杂质去除是实现资源化利用的关键。若磷、氟杂质无法有效去除，不仅会对磷石膏基材料的性能产生多方面的影响，还可能在应用过程中因浸出导致环境污染。

2.2.1　磷杂质的影响

磷杂质会延长水泥的凝结时间，其机制在于磷杂质中的可溶磷与水泥中的C3A反应生成难溶性的磷酸钙盐，包裹在水泥颗粒表面，阻碍水泥的水化反应。磷石膏中可溶磷质量分数为0.5%时，水泥初凝时间从180 min延长至300 min，终凝时间从240 min延长至420 min。共晶磷则会影响磷石膏晶体的生长和发育，导致晶体结构缺陷，降低材料的强度[19]。共晶磷质量分数达0.8%时，磷石膏基胶凝材料28 d抗压强度从35 MPa降至25 MPa，强度损失率达28.6%[4]。

2.2.2　氟杂质的影响

氟杂质会降低材料的密实度和强度，其机制在于氟杂质中的可溶氟会与水泥中的Ca^{2+}反应生成CaF_2沉淀，减少水泥水化产物的生成量，同时CaF_2沉淀会在材料内部形成孔隙，降低材料的密实度和强度。w(F) 0.3%时，磷石膏混凝土孔隙率从15%升至20%，抗渗等级从P6降至P4[10]。难溶氟如CaF_2虽然溶解度较小，但会影响材料的微观结构，降低材料的耐久性。以未处理磷石膏制备的道路基层材料，经50次冻融循环后，抗压强度损失率达35%，而以氟去除率90%的改性磷石膏所制材料强度损失率仅12%[14]。

2.2.3　有机物杂质的影响

有机物杂质的存在会降低磷石膏的白度和磷石

膏产品的强度[12]，降低材料的界面黏结性能，从而影响材料的整体强度和稳定性[10]。有机物会在磷石膏颗粒表面形成“疏水膜”，阻碍颗粒间的黏结与水化产物的生成。有机物质量分数为1%时，磷石膏–玻璃纤维复合板的界面黏结强度从1.2 MPa降至0.8 MPa，弯曲强度损失率达33.3%[20]。

3 磷石膏在建筑材料中的应用

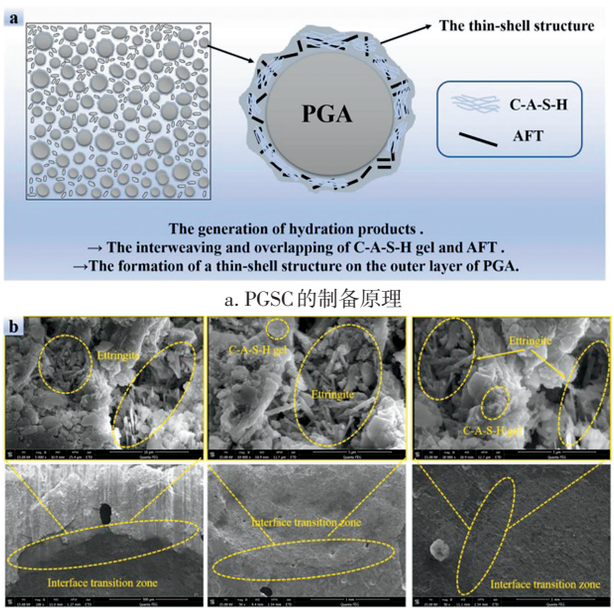
3.1 磷石膏基胶凝材料

高含量磷石膏胶凝材料（HPCM）开发是磷石膏在建筑材料中规模化应用的核心方向，是降低水泥用量、实现磷石膏大规模消纳的重要途径，如磷石膏砂浆材料等。YU等[21]提出一种基于颗粒堆积模型的HPCM设计方法，通过Box-Behnken试验设计优化了偏高岭土对磷石膏、辅助胶凝材料（SCMs）和水泥的堆积结构调控。发现当磷石膏掺量超过70%时，SCMs的颗粒级配对堆积密度起决定性作用，优化后的HPCM 28 d抗压强度可达传统水泥基材料的85%以上。ZHENG等[22]开发一种CO_2辅助碱激发磷石膏基胶凝材料的新方法，将材料抗压强度提高到49.3 MPa（提高了50.83%），并增强了材料耐水性（软化系数0.97）。碱为磷石膏的碳化创造了有利环境，形成了以磷石膏为核心，方解石和C-S-H分别为内层和外壳的核壳结构，有效缓解了碱激发过程中的硫酸盐浸出，增强了基体内部的化学键合，显著改善了材料的耐水性能。

3.2 磷石膏混凝土骨料

磷石膏主要通过制备磷石膏骨料（PGAS）和胶凝材料复合体系来实现在混凝土中的应用，胶凝材料是建筑材料的重要子类，主要承担黏结、凝结硬化等功能。LIU等[23]详细介绍了使用固废基硫铝酸盐功能材料和磷石膏骨料制备磷石膏基固废混凝土的过程，并评估了其力学性能、水化过程、水化产物、杂质稳定性和碳足迹，如图3所示。结果显示，制备的混凝土28 d抗压强度一般在60～100 MPa，PGAS含量增加时力学性能虽有所下降，但浸出性能合格。

SHA等[24]通过落锤冲击试验研究了桁架增强磷石膏混凝土板的动态响应，发现2%掺量的磷石膏可使裂缝扩展速度降低30%，破坏模式从径向断裂转变为局部损伤，验证了磷石膏对混凝土抗冲击性能的改善作用。此外，MA等[25]在确定粒化高炉矿渣、磷石膏和电石渣最佳混合比例的基础上，掺入硅灰制备了一种新的固废基胶凝复合材料。研究发现，硅灰的加入增加了浆体黏度，降低了体系碱



a. PGSC的制备原理

b. PGSC黏合剂在28 d时的SEM

图3 PGSC的制备原理及PGSC黏合剂在28 d时的SEM[23]

Fig. 3 Production principle of PGSC and SEM images of PGSC adhesive after 28 days

度，影响了前驱体颗粒的分散和水化产物的形成，导致早期强度降低。但后期硅灰消耗了过量电石渣，避免了水化产物的劣化和氢氧化钙晶体的析出与结构改变，防止了强度下降，同时填充内部孔隙，为水化产物提供额外成核位点，改善了内部结构。

3.3 磷石膏填充复合板

利用磷石膏质量轻、强度高、成本低、易加工及隔音隔热效果好等优点，可作为建筑内部隔墙[26]、轻质板[27]、建筑吊顶、装饰线条等复合板填充料。冷弯型钢在各种建筑物中广泛应用，但是由于缺乏护套板，其存在一定的安全风险。ZHAO等[20]提出了一种填充轻质磷石膏的新型玻璃纤维板护套冷弯钢复合板（GFRP-CFS板），创新性地利用玻璃纤维作为冷弯钢螺柱的护套板，防止冷弯钢杆在轴向压缩、循环作用下发生屈曲，同时准确地预测GFRP-CFS面板的弯曲能力和形变能力，为未来的研究方向提供了设计指南，也为磷石膏的回收利用提供了新思路。

3.4 磷石膏基砖

在砌体材料方面，WANG等[28]以磷石膏－高炉矿渣冷黏结骨料为骨料，β–半水磷石膏、高炉矿渣和磷尾矿为原料，聚羧酸减水剂和醋酸乙烯–乙烯共聚乳胶粉为外加剂制备了磷石膏－高炉矿渣－磷尾矿免烧砖。结果发现高炉矿渣和水泥中的CaO与水反应生成$Ca(OH)_2$，其与硅铝氧化物反应形成

硅酸钙、铝酸钙和铝硅酸钙，增强了免烧砖的强度，使砖体抗压强度达到15.8 MPa，且生产能耗较传统烧结砖降低40%。ABOULOIFA等[29]探索磷石膏作为造孔剂在制造黏土砖中的应用，发现40%掺量时砖体热导率降低22%，同时保持抗压强度≥10 MPa，为磷石膏在节能砌体中的应用提供了数据支撑。

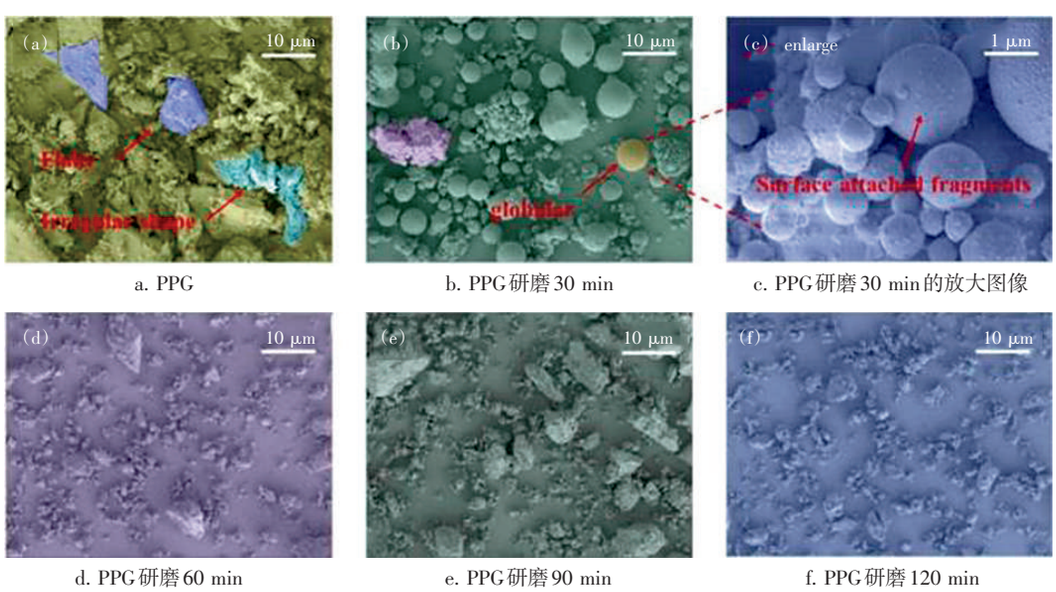
3.5　其他建筑材料

针对特殊工程需求，功能型磷石膏基材料的研究取得了多项突破。在多孔材料领域，CHENG等[30]以磷石膏改性碱激发煤矸石泡沫材料，发现适量磷石膏可促进钙矾石生成，优化孔隙分布，使材料导热系数低至0.12 W/（m·K），同时抗压强度保持在5.6 MPa，适用于建筑保温领域。张杰等[31]制备的半水磷石膏/聚合物复合材料表现出优异的耐腐蚀性能，在强酸、强碱浸泡后质量损失率均<0.03%，且环刚度达8.2 kN/m²，展现了在排水管道工程中的应用潜力。

4　磷石膏在道路工程中的应用

4.1　道路基层材料

磷石膏粒度细且含有胶凝材料水化硬化所需的二水硫酸钙，作为道路基层材料可起到骨料填充和胶凝固化作用。磷石膏与水泥、石灰等无机材料结合能有效提升基层材料的力学性能，尤其是在稳定土和水泥稳定碎石的应用中具有显著效果，对提高道路基层材料的体积稳定性具有积极意义。WANG等[14]通过实验研究了含80%磷石膏的道路基层材料的力学性能和破坏演化。结果表明，通过优化配合比，该材料在7 d的抗压强度可达9.37 MPa，具有良好的成本效益（60.44 元/m³）。碱激发剂与水泥的协同作用可促进C-S-H凝胶和钙矾石的生成，缓解了磷石膏材料的脆性破坏问题。DONG等[32]研究机械球磨改性磷石膏作为道路基层材料活性掺合料的效果，通过激光粒度测试、活性指数测试等手段分析了其颗粒组成、结构和化学活性，如图4所示。通过300 r/s球磨处理磷石膏60 min，使其中位粒径降至



a. PPG　b. PPG研磨30 min　c. PPG研磨30 min的放大图像

d. PPG研磨60 min　e. PPG研磨90 min　f. PPG研磨120 min

图4　PPG的SEM图像及研磨不同时间PPG的SEM图像[32]

Fig. 4　SEM images of PPG and SEM images of PPG after different grinding times

32.45 μm，比表面积增至5.27 m²/g，作为活性掺合料掺入基层材料后，可使早期强度提升15%～20%。

4.2　道路充填材料

在道路填充领域，YIN等[33]研究碱性激发条件下的水泥改性磷石膏填料，发现当水泥熟料掺量>7%时，填料在60 d浸泡期内无完整性破坏，且7 d强度达28 d的50%。微观分析表明，硫酸根诱导生成的钙矾石填充了材料中的中观孔隙，使软化系数提升至0.82，满足潮湿环境下的路基填充要求。HU等[10]利用气化渣制备的Fe掺杂C-S-H固定磷石膏渗滤液中的磷、氟杂质，通过分步沉淀法将F^-和PO_4^{3-}质量浓度分别降至1.2 mg/L和0.5 mg/L，为磷石膏填料的环境安全控制提供了技术支撑。

4.3　沥青改性材料

磷石膏衍生材料在沥青改性中的应用取得了显著进展。ZHANG等[34]将从磷石膏中制备的无水硫酸钙晶须（CSW），用硬脂酸和γ–氨丙基三乙氧基硅烷（KH–550）进行表面改性后添加到沥青中，

发现改性后的CSW能够有效填充沥青中的空隙，增强与沥青的相互作用，提高沥青的高温性能和抗老化性能。当改性CSW的掺量为9%时，使沥青的车辙因子提升35%，疲劳寿命延长2倍，且低温延度保持率≥85%。其中，KH–550改性CSW通过形成硅氧烷界面层，显著增强了与沥青的相容性。沥青中弹性成分比例增加，显著改善了沥青的高温性能和抗老化性能，且对低温性能影响较小。

5 磷石膏在矿山充填中的应用

近年来，由于浅层矿山资源日益枯竭，越来越多的矿山转向深度小于1 000 m的地下采矿，因此深部采矿面临着工程地质灾害和环境污染的问题[35]。用磷石膏填充采空区是解决磷石膏危害、实现资源化利用的理想解决方案，现已成为矿山充填研究的热点，也是未来采矿技术的发展趋势之一。

5.1 磷石膏回填材料性能影响因素

原始磷石膏废渣强度较低，难以满足高强度采矿回填的需求，在深部高应力矿区，未改性磷石膏回填体的抗压强度通常不足2 MPa，无法有效支撑围岩[36]。其性能会受到多种因素的制约和影响，主要包含物理性质因素和化学组成因素。物理性质因素涵盖材料级配与形状、水含量、容重与孔隙率等。颗粒的粗细分布直接影响磷石膏堆积的密实度，适合的级配可以使颗粒间相互填充，形成更密实的结构，从而提高抗压强度和降低渗透性。颗粒形状（如片状、棱角状）则会影响颗粒间的咬合力和流动性。水含量是影响磷石膏浆体流动性和最终强度的关键参数，过高的水含量会导致材料泌水与离析，降低材料强度，并增加材料收缩；过低的水含量则会使浆体过于黏稠，流动性差，不利于泵送和充填[37]。此外，较低的容重可以减轻对井下支护的压力。高孔隙率则意味着强度较低，渗透性较高。化学组成因素包含可溶性杂质、有机物杂质、残余酸等。磷石膏中以可溶性和不溶性形式存在的氟化物杂质质量高达磷石膏质量的3.6%，会抑制黏结剂的水合作用并破坏回填结构，从而降低回填体强度[38–39]。同时可溶性氟化物具有腐蚀性，可能腐蚀输送管道及设备。来自磷矿选矿过程的有机表面活性剂杂质等，会在颗粒表面形成薄膜，影响其与胶凝材料的黏结，从而降低强度。残余酸会延缓甚至阻止胶凝材料的水化反应，严重降低充填体的早期和后期强度，回填后会对土壤和地下水产生不利影响[40]。

5.2 磷石膏回填材料的改性及应用

磷石膏回填材料的改性主要是将磷石膏与水泥、生物炭、赤泥、电石渣、粉煤灰等胶凝或固废材料进行复合，通过水化反应形成充填体，或是通过离子交换、氢键吸附等机制固化氟离子，并提升抗压强度。WANG等[41]采用生物炭、赤泥和电石渣复合改性磷石膏回填材料，发现生物炭添加量、赤泥与电石渣比例会显著影响凝结时间。1%生物炭可促进细针状钙矾石生成，提升无侧限抗压强度（UCS）。生物炭占比超过1%则钙矾石呈短粗状导致强度下降。最优配比（w（磷石膏）70%、w（生物炭）1%）下，28 d UCS达5.28 MPa，氟离子浸出质量浓度<1 mg/L，周边地下水未受污染且材料体系耐水性良好，可支撑上覆岩层压力（最大应力3 MPa），实现月消纳磷石膏5 000 t。ZHOU等[42]研究电石渣对无水磷石膏回填材料（APB）的活化作用，针对APB活性低、凝结时间长的问题，利用高碱性电石渣调节性能。结果显示，电石渣含量增加使APB凝结时间先缩短后延长，通过微观分析证实其可促进水化产物生成，优化结构并为APB性能提升提供理论支撑。在煤矿采空区充填，要求初凝时间2～4 h、28 d UCS≥3 MPa、低碳排放。CHEN等[43]采用电石渣（12%）与偏铝酸钠（4%）复合激活磷渣和粉煤灰，制备的碱激发充填材料初凝时间可控在2～3 h，28 d UGS达32.5 MPa。碱激发充填材料可防止煤层自燃，碳排放量由传统水泥充填材料的200 kg/t降低至120 kg/t，年消纳磷石膏10万t。该体系通过“碱性环境–活性离子释放-AFt-C-(A)-S-H协同增强”机制，解决了单一电石渣充填材料工作性差的问题。

6 结论与展望

6.1 结论

自磷石膏作为磷化工行业大宗固废被关注以来，其绿色资源化利用的技术开发、应用拓展及产业化探索一直是资源环境领域的重点方向。在杂质处理方面，目前物理处理、化学处理及热处理是主流技术，其中水力空化预处理结合浮选、Fe掺杂C-S-H分步固定、两步结晶转化等方法已能有效提升磷石膏纯度，但物理处理对难溶杂质去除有限，化学处理易产生二次污染，热处理则存在能耗高与成本大等问题。同时，磷、氟及有机物等杂质会通过影响水化反应、晶体结构及界面性能等，对磷石膏基材料的凝结时间、强度及耐久性等产生负面影响，仍是制约其高效利用的关键障碍。

在应用领域，建筑材料方向已实现磷石膏在胶凝材料、混凝土、复合板及免烧砖等产品中的应

用，但磷石膏高掺量时颗粒级配优化、耐水性能提升仍需突破。道路工程中，磷石膏作为基层材料、充填材料及沥青改性材料的技术日趋成熟，如机械球磨改性可使早期强度提升15%～20%，但材料的长期水稳定性、氟离子浸出控制等环境安全问题尚未完全解决。矿山充填领域，磷石膏作为回填材料通过生物炭、赤泥、电石渣等复合改性，在强度提升、氟离子控制及耐水性改善等方面取得突破，碱激发技术的应用也为低碳充填体系提供了思路，但材料在潮湿环境下的稳定性差、酸性及低强度等固有问题仍需解决。

6.2 展望

一是聚焦低成本、低能耗的绿色杂质净化技术研发，如优化水力空化预处理工艺、开发新型高效环保中和剂。重点突破高掺量、高性能磷石膏基材料的制备技术，提升材料的强度、耐久性和水稳定性，构建磷石膏杂质长效固定与浸出控制体系。二是推动磷石膏与其他固废的协同利用技术研发，构建“多固废协同消纳”的模式，拓展磷石膏在高端建材、环保材料等领域的高值化应用路径。三是探索磷石膏在新能源、环保等领域的创新应用技术研发，如制备储能材料、纳米材料等。开展磷石膏基材料的长期性能演变规律研究，利用数字化或智能化技术实现磷石膏处理工艺和材料配比模拟，为工程应用提供理论与技术支撑。

[参考文献]

[1] EZZEDDINE S, NAZIHA G, CHOKRI R B, et al. Phosphogypsum: potential uses and problems—a review[J]. International Journal of Environmental Studies, 2017, 74(4): 558-567.

[2] 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.

[3] 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 Environment Engineering, 2024, 31(1): 260-270.

[4] 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.

[5] JIANG G Z, WU A X, WANG Y M, et al. The rheological behavior of paste prepared from hemihydrate phosphogypsum and tailing[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 116870.

[6] LI J, PENG X Q, ZHENG J Y, et al. Simultaneous removal of phosphorus and organic contaminants from phosphogypsum using hydrothermal method for gypsum resource regeneration [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(5): 108441.

[7] LIU Y K, WANG Y M, CHEN Q S. Using cemented paste backfill to tackle the phosphogypsum stockpile in China: A down-to-earth technology with new vitalities in pollutant retention and CO_2 abatement [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(7): 1480-1499.

[8] JIA R Q, WANG Q, FENG P. A comprehensive overview of fibre-reinforced gypsum-based composites (FRGCs) in the construction field[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 205: 108540.

[9] GU K, CHEN B. Loess stabilization using cement, waste phosphogypsum, fly ash and quicklime for self-compacting rammed earth construction [J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117195.

[10] HU Q W, XU H X, XIA Q G, et al. Analysis of the stepwise immobilization of phosphorous and fluoride in PG leachate using Fe-doped C-S-H (Fe-C-S-H) prepared with gasification slag and the application of the solidified product [J]. Construction and Building Materials, 2025, 481: 141396.

[11] LI K Y, SHI C Y, ZENG Y Q, et al. A high-efficiency purification method of waste phosphogypsum via hydrodynamic cavitation pretreatment and froth flotation [J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 512: 145685.

[12] CHEN X H, YU Y, LIU Y, et al. Utilization ethylbenzyl quaternary ammonium salt as a selective collector for co-reverse flotation removal of silica, organic matter, and fluoride from phosphogypsum[J]. Minerals Engineering, 2025, 228: 109354.

[13] ZHANG P, MEDLEY A, XIAO W D, et al. Innovative Gravity Separation for Sustainable Utilization of Mineral Resources[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2025, 42(3): 1-10.

[14] WANG L, LU Q Y, LIU J, et al. Insight into mechanical properties and damaging evolution of base materials incorporating 80% phosphogypsum for pavement application [J]. Construction and Building Materials, 2025, 488: 142032.

[15] JIN Z H, CHEN S Q, HE X Y, et al. Enhancing the mechanical properties of hemihydrate phosphogypsum-ground granulated blast-furnace slag composite binder by incorporating carbide slag as an alkaline modifier [J]. Materials Today Communications, 2025, 48: 113509.

[16] MONDHE S, WEIKSNAR K D, LAUX S J, et al. Chemical performance of phosphogypsum and municipal solid waste incineration bottom ash blends for potential use as road base[J]. Chemosphere, 2025, 380: 144463.

[17] ZENG L, WANG W T, ZHU J Y, et al. Conversion mechanisms of fluorine and phosphorus impurities during the preparation of phosphorus-anhydrite Ⅱ via low-temperature calcination method[J]. Construction and Building Materials, 2025, 476: 141176.

[18] HE S K, YANG L, HU G T, et al. Deep removal of phosphate impurities in phosphogypsum by two-step crystal transformation for use as Portland cement retarder [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 79: 107831.

[19] CALDERÓN-MORALES B R S, GARCÍA-MARTÍNEZ A, PINEDA P, et al. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: Limits and potential in eco-efficient construction[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102506.

[20] ZHAO D P, LI K, FAN J J, et al. Flexural performance of GFRP-sheathed cold-formed steel composite panel filled with lightweight phosphogypsum[J]. Structures, 2024, 65: 106731.

[21] YU Z K, LIU Z J, WU C Q, et al. A new design concept for high-content phosphogypsum cementitious materials: From packing model to microstructural optimization[J]. Construction and Building Materials, 2025, 489: 142165.

[22] ZHENG Y, CUI K, ZHAO Y L, et al. Development of high-performance phosphogypsum-based cementitious materials through CO_2-assisted alkali activation[J]. Cement and Concrete Composites, 2025, 162: 106144.

[23] LIU X, WU C Q, LV W, et al. Stepping into the era of all-solid waste and low carbon: Phosphogypsum and other solid wastes cooperatively construct green buildings[J]. Construction and Building Materials, 2025, 486: 141926.

[24] SHA L R, HAN Y, ZHANG L J. Dynamic Response and Computational Modeling of Truss-Reinforced Phosphogypsum-Concrete Composite Slabs Subjected to Impact Loading: A Parametric Finite Element Analysis[J]. Buildings, 2025, 15(11): 1948.

[25] MA B H, LI Y Q, LAN T, et al. Hydration mechanism and mechanical properties of slag-phosphogypsum solid waste-based cementitious composite incorporated silica fume[J]. Construction and Building Materials, 2025, 485: 141923.

[26] WU Q, ZHANG H G, JIA X F, et al. Optimizing compressive capacity: A comprehensive study on cast-in-situ phosphogypsum walls with varied high-thickness ratios and eccentricity distances[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e03025.

[27] MUTHUKUMAR P, SHEWALE M, ASALKAR S, et al. Experimental study on light weight panel using phosphogypsum[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 49(D5): 1852-1856.

[28] WANG J L, WANG S Q, TUO B Y. Study on optimization of compressive properties of phosphorus gypsum-blast furnace slag-phosphorus tailings unburned brick[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 17257.

[29] ABOULOIFA W, ETTAKI M, FAIZ Z, et al. Optimizing thermal efficiency and environmental sustainability of fired clay bricks through Moroccan phosphogypsum incorporation[J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2025, 10(6): 1-19.

[30] CHENG G W, ZHANG Z J, MAO R Y, et al. Experimental investigation on thermal and mechanical performance of alkali-activated coal gangue foam materials doped with phosphogypsum[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2025, 25(3): 164.

[31] 张杰,赵冲,韦超,等.半水磷石膏聚合物复合材料制备及性能研究[J].复合材料学报,2026,43(2):1033-1044.
ZHANG J, ZHAO C, WEI C, et al. Preparation and Properties of hemihydrate phosphogypsam polymer composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2026, 43(2): 1033-1044.

[32] DONG Y Q, ZOU N C, LAN J R, et al. Ball milling modified phosphogypsum as active admixture: Milling kinetics and activation mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2025, 488: 142158.

[33] YIN Y, CHENG S F, LIN K, et al. Preparation of cement-modified phosphogypsum filler under alkaline excitation conditions[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3005(1): 012027.

[34] ZHANG X Q, ZHANG J, LI J, et al. Rheological and anti-aging properties of modified asphalt with surface-modified calcium sulfate whiskers[J]. Construction and Building Materials, 2025, 489: 142205.

[35] DU X H, XUE J H, YU L, et al. Coal damage and energy characteristics during shallow mining to deep mining[J]. Energy, 2024, 291: 130375.

[36] SHI Y, SONG Y M, MIN C D, et al. Phosphogypsum pretreatment with $CaCO_3$ to improve the backfill performance[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01954.

[37] WU F H, HE M J, QU G F, et al. Synergistic densification treatment technology of phosphogypsum and aluminum ash[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 173: 847-858.

[38] CHEN Q S, ZHANG Q, WANG Y M, et al. Highly-efficient fluoride retention in on-site solidification/stabilization of phosphogypsum: Cemented paste backfill synergizes with poly-aluminum chloride activation[J]. Chemosphere, 2022, 309(92): 136652.

[39] LI X B, ZHOU Y, SHI Y, et al. Fluoride immobilization and release in cemented PG backfill and its influence on the environment[J]. Science of the Total Environment, 2023, 869: 161548.

[40] ZHANG W Y, ZHAO L Y, XUE M F, et al. Effect of oxalic acid pretreatment on the mechanical properties and microstructure of phosphogypsum[J]. Construction and Building Materials, 2023, 362: 129631.

[41] WANG C Q, CHEN S, HUANG D M, et al. Safe environmentally friendly reuse of red mud modified phosphogypsum composite cementitious material[J]. Construction and Building Materials, 2023, 368: 130348.

[42] ZHOU X H, ZHAO Y H, ZHU H Y, et al. Performance activation and strength evolution mechanism of carbide slag on anhydrous phosphogypsum backfill material[J]. Construction and Building Materials, 2024, 419: 135503.

[43] CHEN L, LIU T T, CHENG M Q, et al. Enhanced strength and fluoride ion solidification/stabilization mechanism of modified phosphogypsum backfill material[J]. Construction and Building Materials, 2024, 449: 138572.