

◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

磷石膏在建材领域的创新应用场景探析

刘先锋¹, 彭家惠², 瞿金东³, 范璞玥³, 钟刚华⁴

(1. 重庆科技大学 土木与水利工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045;
3. 重庆杰博思石膏有限公司, 重庆 400030; 4. 重庆鑫科新型建筑材料有限责任公司, 重庆 402767)

[摘要] 介绍磷石膏资源化利用现状和石膏建材性能特点及磷石膏提质技术路线, 解析磷石膏在建材领域的创新应用场景。聚焦建材领域创新应用, 深入剖析石膏材料外墙内保温系统、石膏材料楼板隔声保温系统、石膏模盒空心楼板、石膏基瓷砖胶4种典型场景, 从技术路线、产业体系、标准规范、经济效益及市场前景5个维度展开分析。结果表明, 这些应用场景充分发挥了石膏建材特性, 具有显著性价比优势, 市场前景广阔, 可实现环境效益和经济效益双赢。磷石膏在建材领域创新应用, 契合国家“双碳”目标, 促进了我国磷化工可持续发展。

[关键词] 磷石膏; 外墙内保温; 楼板隔声保温; 石膏模盒; 石膏基瓷砖胶

[中图分类号] X781 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2025) 11-0078-06

Analysis of innovative application scenarios of phosphogypsum in building materials field

LIU Xianfeng¹, PENG Jiahui², QU Jindong³, FAN Puyue³, ZHONG Ganghua⁴

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;
2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. Chongqing Jieboshi Gypsum Co., Ltd., Chongqing 400030, China;
4. Chongqing Xinke New Building Materials Co., Ltd., Chongqing 402767, China)

Abstract: The current status of phosphogypsum resource utilization, the performance characteristics of gypsum as building materials and the technical pathways for phosphogypsum quality enhancement are introduced, and the innovative application scenarios of phosphogypsum in the building materials field are analyzed. It provides an in-depth analysis of four representative scenarios in building materials field, which are interior thermal insulation system of gypsum on external walls, sound insulation and thermal insulation system of gypsum on floors, cast-in-situ concrete hollow slab with gypsum mode box filler, and gypsum adhesives for ceramic tiles. The study evaluates these applications through five dimensions: Technical approaches, industrial frameworks, standardization, economic benefits, and market potential. The results demonstrate that these application scenarios give full play to the characteristics of gypsum building materials, have significant cost performance advantages, broad market prospects, and can achieve a win-win situation of environmental and economic benefits. The innovative application of phosphogypsum in the building materials field is in line with the national dual carbon strategy and promotes the sustainable development of China's phosphorus chemical industry.

Key words: phosphogypsum; interior thermal insulation on external walls; sound insulation and thermal insulation on floors; gypsum mode box filler; gypsum adhesives for ceramic tiles

1 磷石膏资源化利用现状

磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的固体废弃物, 主要成分为二水硫酸钙, 含有游离磷酸、氟化物、五氧化二磷、磷酸盐及少量重金属等杂质, 产排量大, 利用率低。大量磷石膏露天堆存, 引发土壤污染、水体污染等环境风险持续积累。

2024年4月, 工业和信息化部、国家发展改革委等七部门联合印发《磷石膏综合利用行动方案》

(工信部联节〔2024〕58号), 提出到2026年, 磷石膏综合利用率达到65%, 综合消纳量(包括综合

[收稿日期] 2025-09-10

[作者简介] 刘先锋(1975-), 男, 湖北麻城人, 博士, 副教授, 主要从事石膏基材料、固体废弃物建材资源化、水泥混凝土材料及施工技术、建筑节能及绿色建筑、装配式建筑方面的教学科研及技术服务工作。

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(59708014); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX0518)

利用量和无害化处理量)与产生量实现动态平衡。2025年2月,国家发展改革委会同生态环境部等部门召开磷石膏综合治理工作电视电话会议,从国家层面大力支持磷石膏减量化、无害化、资源化,提升磷石膏综合利用水平,积极拓展磷石膏综合利用场景。

截至2024年年底,我国磷石膏累计堆存量超9亿t,每年产生量约8000万t,主要集中在湖北、云南、贵州、四川、安徽5省的磷矿富集区。我国磷石膏综合利用途径有水泥缓凝剂、石膏建材、生态修复、矿井填充、筑路材料、土壤调理剂、制硫酸及其他。2024年我国磷石膏产生量8600万t,综合利用量5300万t,综合利用率61.6%,各种利用途径占比见图1。

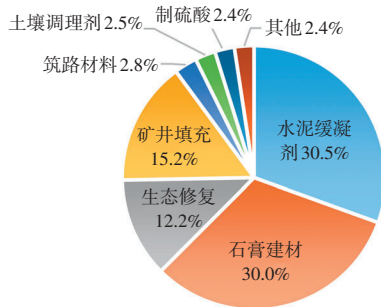


图1 2024年我国磷石膏利用途径及占比

Fig. 1 The utilization pathways and proportion of phosphogypsum in China in 2024

目前,磷石膏消纳量最高的仍是水泥缓凝剂和石膏建材。近年来,云南省在磷石膏生态修复、贵州省在磷石膏矿山填充、湖北省在磷石膏道路材料应用等领域开展了积极探索,为规模化消纳提供了有益经验。尽管当前在技术成熟度、经济效益及环境风险管控等方面仍存在提升空间,但相关实践已为后续优化积累了宝贵数据,展现了磷石膏资源化利用的积极前景。

2 石膏建材特点及磷石膏提质技术路线

2.1 石膏建材特点

石膏具有快硬早强、体积稳定性好、防火阻燃等优良性能;但由于是气硬性胶凝材料,耐水性是其短板。

石膏建材是国际公认的绿色低碳材料。①低碳。建筑石膏碳排放因子约为水泥的20%^[1-2],建筑室内非结构材料使用石膏替代水泥是建筑行业碳达峰、碳中和的重大举措,势在必行。②利废环保。脱硫石膏、磷石膏等工业副产石膏为大宗工业固废,将其建材资源化利用,具有资源节约和环境

效益。③健康舒适。处理后石膏接近中性,可近皮肤;具有与木材相似的暖性,表面触感细腻舒适;具有生物溶解性,人体亲和性佳。④独特“呼吸”效应。建筑石膏制品本身存在大量蜂窝状微孔结构和毛细孔道,在自然环境中能够随周围环境变化而吸湿或放湿,使室内湿度在适宜范围内维持着动态平衡,可改善室内微气候。⑤绿色可循环。石膏制品为二水石膏,经170℃低温煅烧即可成为半水石膏作为原材料循环再生利用,不会产生建筑垃圾。

2.2 磷石膏提质技术路线

磷石膏建材资源化利用的关键是消除或抑制可溶磷、氟、共晶磷、有机物等有害杂质对下游产品的影响。有害杂质消除与控制是高值化功能化利用的前提。

(1)磷石膏源头提质与净化处理。磷石膏源头提质与净化主要有水洗法、中和法、浮选法等,有较多研究和实际应用,关键是净化效果和净化成本之间的平衡。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;中和法、浮选法、酸碱处理法等方法磷氟去除率较高,但易引入新杂质;热分解法能源消耗过多;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^[3-6]。

值得注意的是,提质与净化应以降低有害杂质为目标,而不是简单追求纯度与白度;磷石膏净化程度应以下游产品的关键性能和净化成本为约束条件。

(2)中温煅烧。中温煅烧技术路线,指磷石膏经过700~800℃中温煅烧,制备Ⅱ型无水石膏胶结材,胶结材制备与除杂一体化,高度契合磷石膏杂质特性,从根本上解决了磷石膏高质化利用的杂质障碍。经过700~800℃中温煅烧,磷石膏中可溶磷转化为难溶杂质 $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$ 和 $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$,共晶磷完全析出,可溶氟分解后部分以HF挥发掉,部分转化为难溶杂质 CaF_2 和 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$,有机物全部分解挥发去除^[7]。

目前投产的有两条生产线,分别是2023年5月贵州磷化(集团)有限责任公司投产的30万t/aⅡ型无水石膏生产线,2024年5月湖北一夫金楚新材料有限公司投产的10万t/aⅡ型无水石膏示范项目。

(3)制备 α 高强石膏。以净化磷石膏为原料,制备 α 高强石膏,为高质化下游产品提供强度、耐水性及质量稳定性更好的优质石膏胶结材。制备高强石膏方法主要有蒸压法、水热法、常压盐溶液

法、醇水溶液法、微乳液法和微波法，其中水热法和常压盐溶液法特别适用于磷石膏，其中转晶剂技术至关重要。目前，磷石膏基 α 高强石膏应用主要集中在建筑材料、晶须材料，如石膏砌块、自流平材料、山体护坡材料、矿井填充材料与防火门芯板^[8-10]。

3 磷石膏建材资源化应用新场景

石膏的特性，决定了它适合作为室内非结构材料，不适合作为结构材料和室外非结构材料。新的应用场景应该技术体系和产业体系完整，具有功能性或高值化，进而具有较好价格优势和良好经济效益。

同时营造良好的竞争环境，避免低质低价恶性竞争。笔者深耕石膏基础应用研究和产业化实践数十年，积极促进石膏建材创新场景应用，研究和实践表明，石膏材料外墙内保温系统、石膏材料楼板隔声保温系统、石膏模盒空心楼盖系统、石膏基瓷砖胶4个应用场景特别契合石膏特性和上述要求。

3.1 石膏材料外墙内保温系统

石膏材料外墙内保温系统，是由石膏界面层、墙体保温石膏保温层、石膏抹面胶浆层和饰面层构成，设置在外墙内侧，起墙体保温的构造系统，如图2所示。



图2 石膏材料外墙内保温系统基本构造示意

Fig. 2 Schematic diagram of basic structure of interior thermal insulation system of gypsum on external walls

建筑外墙保温工程系统有外墙外保温、外墙内保温、外墙自保温、夹心保温系统、组合保温系统。内保温，工程质量、工期、安全性和耐久性优于外保温；工程综合造价明显优于外保温，适合于侧重隔热通风的夏热冬冷地区；外保温，效率优于内保温，适合于温差较大侧重防寒保温的严寒地区、寒冷地区。

石膏材料外墙内保温系统高度契合节能降碳、外墙外保温“禁限”和工业副产石膏环保压力的现状。随着建筑节能要求不断提升，要求能耗水平降低，节能率提高，碳排放强度降低。标准要求与2016年相比，能耗水平降低30%或20%，碳排放强度平均降低40%（降低CO₂排放量7 kg/(m²·a)），传热系数外墙不大于1.00 W/(m²·K)、分户墙不大于1.50 W/(m²·K)、楼板不大于1.80 W/(m²·K)^[11]。近年来，各地建筑外墙外保温系统开裂空鼓、剥落脱落、保温材料起火等事件屡有发生，引起社会高度关注；各地接连发文“禁限”使用外墙外保温系统，上海、重庆、河北、山西等都已发文禁限外墙外保温系统。在建筑节能降碳要求持续提升、外墙外保温技术受限以及工业副产石膏环保处置压力日益严峻的背景下，石膏基材料外墙内保温系统的技术优势和发展潜力正日益凸显。

石膏材料外墙内保温系统，具有较大市场空间和较强经济可行性。应用场景包括外墙内保温，也可供楼地面、内墙隔声保温。按2024年全国建筑业房屋竣工面积为34.37亿m²计，外墙内保温材料耗量 $3.44 \times 10^9 \text{ m}^2 \times (0.62 - 0.22) \times (0.04 \text{ m} \times 350 \text{ kg/m}^3 + 0.005 \text{ m} \times 1500 \text{ kg/m}^3) = 2958 \text{ 万 t}$ ，系统工程造造价比外墙外保温低约20元/m²，比常规石膏材料利润空间多500~800元/t。

相关标准规范逐步完善，工程应用效果较好。已发布实施标准有产品标准《石膏保温砂浆》(JC/T 2706—2022)，工程标准《轻质石膏楼板顶棚和墙体内保温工程技术标准》(BJ50/T 375—2020)、《外墙内保温工程技术规程》(GJ/T 261—2011)，建材行业标准《石膏材料墙体内保温工程技术规范》起草完成目前在征求意见阶段。目前主要在重庆市、浙江省推广，已完成节能设计图备案500余万平方米，已完成施工或正在施工250余万平方米。

石膏材料外墙内保温体系推广的核心在于构建良性产业生态，包括标准引领和市场培育及维护。特别是构建刚需场景，营造良性竞争环境，避免低价恶性竞争。

3.2 石膏材料楼板隔声保温系统

石膏基材料楼板隔声保温系统，是由楼板结构

层、隔声保温层、石膏自流平保护层等组成，具有隔声和保温功能的楼板构造系统。

2025年5月1日实施的《住宅项目规范》(GB 55038—2025)，要求卧室、起居室楼板的计权标准化撞击声压级不应大于65 dB，即楼板撞击隔声不应大于65 dB。这与《民用建筑隔声设计规范》(GB 50118—2010)楼板撞击隔声小于75 dB的要求相比提高了10 dB。楼板隔热保温遵循《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015—2021)要求，楼板传热系数 $\leq 1.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。楼板隔声要求的提高，给楼板隔声保温工程创新提供了市场空间。

目前工程中常用构造做法为从下往上“混凝土楼板结构层+隔声保温层+40 mm 细石混凝土钢板网保护层”，由于细石混凝土保护层与隔声保温层材料性质差异较大，空鼓开裂现象较普遍，另外钢板网使得成本增加较多。

笔者通过对现有技术分析和相关实验研究，建议两种构造的石膏材料楼板隔声保温系统。第一种构造为“结构层+15 mm 石墨 EPS 隔声保温板+30 mm G20 石膏自流平砂浆”，第二种构造为“结构层+30 mm 隔声保温 350 型石膏砂浆+30 mm G20 石膏自流平砂浆”。常僮宇等^[12]对江苏应用较成熟的楼板隔声保温系统“结构层+15 mm 石墨 EPS 保温隔声板+40 mm 细石混凝土(含 $\phi 4@100$ 双向钢丝网片)”，105个工程样本进行现场实测，撞击隔声实测均值为63.55 dB；笔者将该系统40 mm 细石混凝土保护层用30 mm G20 石膏自流平砂浆替代，即建议的第一种构造“结构层+15 mm 石墨 EPS 保温隔声板+30 mm G20 石膏自流平砂浆”，经过实验室检测和工程现场检测，撞击隔声实测值为64 dB，满足不大于65 dB的要求。笔者进一步研发全石膏基材料楼板隔声保温系统，即建议的第二种构造“结构层+30 mm 隔声保温 350 型石膏砂浆+30 mm G20 石膏自流平砂浆”，经过实验室检测和工程现场检测，撞击隔声实测值为63 dB。

石膏材料楼板隔声保温系统有一定标准基础和工程推广应用实例。相关标准有重庆市《建筑楼地面隔声保温工程应用技术标准》(DBJ50/T-330—2025)、四川省《四川省石膏复合材料建筑楼板隔声保温工程技术规程》(DBJ51/T 273—2024)、上海市《建筑浮筑楼板保温隔声系统应用技术标准》(DG/TJ08-2365—2021)、江苏省《居住建筑浮筑楼板保温隔声技术规程》(DB32/T 3921—2020)和

《石膏基自流平砂浆应用技术规程》(JC/T 60021—2024)，建材行业标准《建筑楼面用石膏复合材料隔声保温应用技术规范》已通过审查目前在报批阶段。该系统第一种构造在重庆市有部分工程采用，第二种构造在四川省有部分工程采用，用户接受度较高。

石膏材料楼板隔声保温系统，充分利用石膏材料微膨胀特性，回避了细石混凝土保护层易开裂风险，减少钢板网构造，降低了成本。另外，石膏自流平替代水泥细石混凝土，降低了碳排放，利用了工业固废。石膏基材料楼板隔声保温系统在技术、经济效益和环保方面具有较好可行性。

3.3 石膏模盒空心楼盖系统

石膏模盒空心楼盖系统是一种采用石膏模盒作为芯模材料的现浇混凝土空心楼盖结构，通过将模盒埋入混凝土中形成空腔，实现轻量化、高强度的建筑楼板体系。石膏模盒是以半水石膏、无水石膏单独或混合为主要原料，添加纤维增强材料等制成的、永久埋置于现浇混凝土楼板中的薄壁块状填充体。石膏模盒通常由脱硫石膏或磷石膏制成，具有快速成型、尺寸精准的特点。特别适用于大跨度、大空间的建筑，常用于多层的工业与民用建筑中，如车库、商场、厂房、仓库、宾馆、写字楼、剧院、水池顶盖、冷藏库和某些整板式基础。

空心楼盖技术可行性强，石膏模盒作为填充体低碳利废。楼板为受弯构件，由受压区的混凝土承受压力，受拉区的钢筋承受拉力；中性轴附近的应力非常小；为节约混凝土用量，减轻楼盖自重，将中性轴附近的混凝土抽去，留下连接上下两片使之共同受力及抗剪所需的混凝土肋，形成空心楼盖。空心楼盖既减轻了楼板40%~60%的质量，又保持了楼盖80%~90%的刚度以及90%以上承载力。石膏模盒作为一种国内推崇的绿色产品，给工业副产石膏提供了一条高值化应用技术路径，而且由于是埋入混凝土中，对磷石膏产品包容性较强。石膏模盒具有施工效率高、节约工期、无需抗浮处理等技术优势，克服传统填充材料的弊端，如叠合箱类产品、水泥砂浆制品、塑料类产品等，它们均存在施工进度慢、易上浮等缺点；另外，充分润湿的石膏模盒对混凝土可发挥内养护作用，提高混凝土强度及耐久性，增强混凝土与钢筋间的黏接力，提高建筑结构安全性。

石膏模盒空心楼盖系统具有较好经济效益和环保效益。石膏模盒空心楼盖与钢筋混凝土楼板比

较,混凝土用量减少20%~30%,钢筋用量降低15%~25%,综合造价下降10%~20%。另外,可大规模、高质量资源化利用工业副产石膏,促进建筑行业绿色、低碳、循环发展,凸显环境效益、经济效益。工程实施中,石膏模盒平均质量17 kg/块,1万m²空心楼盖使用石膏模盒3.5万块左右,可消纳工业固废石膏约600 t。

石膏模盒空心楼盖系统的标准体系逐步完善,在工程中逐渐得到推广。相关产品标准和工程标准有《现浇混凝土空心楼盖结构用石膏模盒》(JC/T 2472—2018)、重庆市工程地标《现浇混凝土空心楼盖结构技术标准》(DBJ50-359—2020)、贵州省工程地标《磷石膏模盒现浇混凝土空心楼盖结构技术标准》(DBJ52/T 111—2022)、云南省工程地标《磷石膏模盒现浇混凝土空心楼盖结构技术标准》(DBJ53/T—2023)等,建材行业标准《现浇混凝土空心结构用石膏模盒应用技术规程》已通过审查目前处在报批阶段。该系统在重庆、贵州、四川、云南、甘肃等地得到了大力推广,其中典型案例重庆大学B区操场兼公共停车库,该项目消纳磷石膏2 000 t,节省造价1 000万元,投入使用已有8年,其建设质量、使用效果广受社会好评;重庆涪陵新区电子信息产业园(华为)厂房,总面积16万m²,整体采用12 m×12 m大跨度空心楼盖结构形式,用石膏模盒(厚度350 mm)27万余套,单体工程消纳工业固废石膏10 000余吨。

3.4 石膏基瓷砖胶

瓷砖胶是一种现代装修材料,主要用于粘贴瓷砖、面砖、地砖等装饰材料。传统瓷砖胶以水泥基为主,广泛应用于外墙贴砖。随着外墙贴砖的禁限,瓷砖胶的产业格局面临调整,应用场景已由室外转向室内,为石膏基瓷砖胶的推出及应用创造了有利条件,推广前景广阔。

随着国家“双碳”目标的实施以及工业副产石膏规模化消纳的需要,室内非结构材料石膏代替水泥已成大势所趋,石膏基面需贴砖的工程日益增加。典型石膏基面工程有室内墙面抹灰石膏找平层和楼板隔声保温工程石膏基自流平砂浆保护层^[13-14]。目前,室内墙面抹灰工程采用抹灰石膏替代传统水泥砂浆、楼板隔声保温工程保护层采用石膏基自流平砂浆替代传统的细石混凝土已成为趋势,我国新建住宅项目中抹灰石膏砂浆使用率已达50%以上,全国自流平工程中石膏基自流平砂浆占比已达60%。瓷砖胶耗量5~10 kg/m²,市场需求

量大。

传统的水泥基瓷砖胶已经无法满足当前盛行的石膏基材面层贴砖需要,体系存在严重的兼容性问题。在石膏基材上采用传统水泥基瓷砖胶粘贴面砖时,因石膏微溶、易迁移,对水泥造成严重的硫酸盐侵蚀破坏,即硫酸钙与水化铝酸钙产物进一步反应生成钙矾石膨胀类物质,体积增大约1.5倍,极易引起瓷砖空鼓、脱落等质量问题,现已成为石膏建材推广应用的主要障碍之一。

石膏基瓷砖胶是一种以半水石膏或Ⅱ无水石膏为主要胶凝材料,添加骨料、聚合物改性剂及功能助剂制成的预拌干粉砂浆。石膏胶凝材料具有凝结硬化快、体积微膨胀、优异黏结力等特点,其性能高度契合室内瓷砖胶的指标要求,且构建出瓷砖胶/基材纯石膏体系,两者具有良好兼容性。石膏基瓷砖胶有较好的黏结强度和抗变形能力,能较好满足室内墙面地面瓷砖粘贴要求。

瓷砖胶现有标准依据《预拌砂浆》(GB/T 25181—2019)、《陶瓷砖胶粘剂》(JC/T 547—2017),石膏基瓷砖胶标准体系正在逐步完善。笔者所在的石膏建材团队已完成大量石膏基瓷砖胶基础研究,研发了石膏基瓷砖胶系列产品与成套技术,相关产品已进行工程试用,编写的贵州省土木建筑工程学会团体标准《石膏基瓷砖胶》已通过审查目前处在报批阶段,建材行业标准《石膏基瓷砖胶》目前处在立项阶段。

石膏基瓷砖胶替代水泥基瓷砖胶是解决现存石膏基材面层贴砖的技术瓶颈,打造完整的石膏建材产业链的有效技术途径。同时可助推工业副产石膏高值化利用,创造显著的环境、经济以及社会效益。

4 结语

(1) 石膏建材具有绿色低碳属性,属朝阳行业。建材资源化利用是磷石膏消纳利用的重要途径。磷石膏建材资源化应用应以技术创新、消除抑制有害杂质的影响,提升磷石膏产品质量和稳定性为基础和前提。

(2) 石膏材料外墙内保温系统、石膏材料楼板隔声保温系统、石膏模盒空心楼盖系统、石膏基瓷砖胶4个应用场景充分发挥石膏建材特点,有明显优势,市场前景广阔。

(3) 磷石膏建材资源化应用,应构建良性产业生态,包括磷石膏应用场景工程标准、高质化技术路线、产业链、市场门槛、定价权与行业自律、政策支持等生态,使磷石膏特色产业健康、有序发

展,避免低质低价恶性竞争。

【参考文献】

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [2] 厦门市市场监督管理局,厦门市建设局.建筑碳排放核算标准:DB 3502/Z5053—2019[S].厦门:[出版者不详],2019.
- [3] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.磷石膏处理处置规范:GB/T 32124—2024[S].北京:中国标准出版社,2024.
- [4] 生态环境部.磷石膏利用和无害化贮存污染控制技术规范:HJ 1415—2025[S].北京:中国环境出版社,2025.
- [5] 张瞿天,梁处芳,阮耀阳,等.磷石膏无害化与资源化研究现状[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(1):84-90.
ZHANG Q T, LIANG C F, RUAN Y Y, et al. Research status of phosphogypsum harmlessness and resource utilization [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(1):84-90.
- [6] 张汉泉,顾恒光,郭泽,等.磷石膏提纯与利用研究现状及展望[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(6):102-107,125.
ZHANG H Q, GU H G, GUO Z, et al. Current situation and prospect of research on purification and utilization of phosphogypsum [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(6):102-107, 125.
- [7] 曹文湘.有害杂质在磷石膏煅烧过程中的演变及其对脱水相性能的影响[D].广州:华南理工大学,2022.
CAO W X. Evolution of harmful impurities in phosphogypsum during calcination and their effect on properties of dehydrated phase [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [8] 杨希凡,李源,王珺婷,等.磷石膏制备 α 半水石膏的工艺及其应用研究进展[J].新型建筑材料,2024,51(7):32-38.
YANG X F, LI Y, WANG J T, et al. Progress in preparation of α -hemihydrated gypsum from phosphogypsum and its application [J]. New Building Materials, 2024, 51 (7) : 32-38.
- [9] 罗福平,曾映,田仁道,等.磷石膏基 α 型高强石膏的制备研究进展[J].磷肥与复肥,2022,37(8):31-33.
LUO F P, ZENG Y, TIAN R D, et al. Research progress on preparation of phosphogypsum-based α high-strength gypsum [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37 (8) : 31-33.
- [10] 李莹.工业副产石膏蒸压微晶法制备 α 型高强石膏及机理研究[D].北京:北京科技大学,2023.
LI Y. Study on preparation and mechanism of α high-strength gypsum from industrial by-product gypsum by autoclaved microcrystalline method [J]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.建筑节能与可再生能源利用通用规范:GB 55015—2021[S].北京:中国建筑出版传媒有限公司,2021.
- [12] 常僊宇,张孝鼎,贡太瑞.常用居住建筑隔声保温系统隔声效果研究[J].工程质量,2021,39(3):57-61.
CHANG X Y, ZHANG X D, GONG T R, et al. Study on Sound Insulation Effect of Sound Insulation System in Residential Buildings [J]. Construction Quality, 2021, 39 (3) : 57-61.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部.石膏基自流平砂浆应用技术规程:JC/T 60021—2024[S].北京:[出版者不详],2024.
- [14] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.抹灰石膏:GB/T 28627—2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [15] 杨华明,邱冠周,王淀佐.滑石粉超细粉碎过程物理化学性质的变化[J].硅酸盐学报,2002(1):91-93.
YANG H M, QIU G Z, WANG D Z. Changes in physicochemical properties of talc powder during ultrafine grinding [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002 (1) :91-93.
- [16] 何芋崎,李显波,杜亚文,等.粉磨细度对磷石膏物相转变速率和力学强度的影响研究[J].矿产综合利用,2022(6):36-41.
HE Y Q, LI X B, DU Y W, et al. Study on effect of grinding fineness on phase transformation rate and mechanical strength of phosphogypsum [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6):36-41.
- [17] 彭家惠,董素芬,黄智德.水泥基自流平砂浆流动性与保水性的试验研究[J].混凝土与水泥制品,2009(1):4-6,19.
PENG J H, DONG S F, HUANG Z D. Experimental study of fluidity and water retention of cement-based self-leveling mortar [J]. China Concrete and Cement Products, 2009(1):4-6,19.
- [18] 张君,张明华,郭自力.自流平砂浆地面收缩应力的计算及其影响因素[J].建筑材料学报,2008(4):379-385.
ZHANG J, ZHANG M H, GUO Z L. Calculation and analyses of shrinkage induced stresses in self-leveling floor layer [J]. Journal of Building Materials, 2008(4):379-385.
- [19] 王文杰,曾翠云,万德刚.可再分散乳胶粉在自流平砂浆中的应用研究[J].新型建筑材料,2019,46(11):106-107,118.
LI W J, ZENG C Y, WAN D G. Study on application of redispersible emulsion powder in high-strength self-leveling mortar [J]. New Building Materials, 2019,46(11):106-107,118.
- [20] 逢鲁峰,贾广贺,孙立刚.石膏基自流平砂浆流动性研究与应用[J].混凝土与水泥制品,2023(7):31-34,38.
PANG L F, JIA G H, SUN L G. Study and application of fluidity of gypsum based self-leveling mortar [J]. China Concrete and Cement Products, 2023(7):31-34,38.
- [21] 张君,张明华,郭自力.自流平砂浆地面收缩应力的计算及其影响因素[J].建筑材料学报,2008(4):379-385.

(上接第32页)

performance of calcined FGD gypsum [J]. Non-Metallic Mines, 2016,39(1):21-23.