贵州省磷石膏综合利用现状

杜 赟，邹 璐，朱 红

（贵州工业职业技术学院，贵州 贵阳 551400）

［摘 要］贵州省磷石膏排放量位居全国第三，在“以渣定产”政策的推动下，全省的磷化工企业努力寻找磷石膏综合利用的出路。介绍贵州省磷石膏综合利用概况、政策、技术，分析贵州省磷石膏综合利用障碍。2023年贵州省磷石膏综合利用率达93.31%，远超全国平均水平。政府积极引导贵州省磷化工企业深化对磷石膏的资源化综合利用，给予磷石膏利废产品税收优惠政策。充填、建筑材料和水泥缓凝剂是目前磷石膏综合利用率最高的3个领域。磷石膏综合利用技术实施与推进的主要障碍来自于技术本身、市场利用和产品特点3个方面：能耗高、投资大的技术生产出的利废产品缺乏价格竞争优势；磷石膏基建材由于受房地产市场的影响，纷纷出现减产或停产的情况；磷石膏自身特点或其中含有的杂质，对利废产品的质量和市场接受度都产生了不同程度的影响。

［关键词］磷石膏；综合利用；技术；充填；磷石膏基建材；水泥缓凝剂；无水石膏母粒及包装箱

［中图分类号］TQ170.9；X781 ［文献标志码］A ［文章编号］2097-4566（2025）06-0094-08

Current status of phosphogypsum comprehensive utilization in Guizhou province

DU Yun, ZOU Lu, ZHU Hong

(*Guizhou Industry Polytechnic College, Guiyang* 551400, *China*)

Abstract: The emission of phosphogypsum in Guizhou province ranks third in China. Under the promotion of the “slag based production” policy, phosphate chemical enterprises in the province have found ways to comprehensively utilize phosphogypsum. The overview, policies, and technologies of comprehensive utilization of phosphogypsum in Guizhou province are introduced, and the obstacles to comprehensive utilization of phosphogypsum in Guizhou province are analyzed. In 2023, the comprehensive utilization rate of phosphogypsum in Guizhou province reaches 93.31%, far exceeding the national average level. The government actively guides phosphorus chemical enterprises in Guizhou province to deepen the comprehensive utilization of phosphogypsum resources and provides tax incentives for phosphogypsum waste products. Filling, building materials, and cement retarders are currently the three areas with the highest comprehensive utilization rate of phosphogypsum. The main obstacles to the implementation and promotion of phosphogypsum comprehensive utilization technology come from three aspects: The technology itself, market utilization, and product characteristics. The waste utilization products produced by technologies with high energy consumption and large investment lack price competitive advantages; Due to the impact of the real estate market, phosphogypsum based building materials have experienced production cuts or shutdowns; Due to the characteristics of phosphogypsum itself or the influence of impurities, it has varying degrees of impact on the quality and market acceptance of waste products.

Key words: phosphogypsum; comprehensive utilization; technology; backfilling; phosphogypsum-based building materials; cement retarder; anhydrous gypsum plaster granules and packaging boxes

0 引言

磷酸是一种重要的化工原料，主要用于制药、食品、肥料等工业。它的生产主要有热法和湿法两种，国内90%的磷酸由湿法工艺制备。湿法工艺每生产磷酸（以P_2O_5计）1 t，可以得到磷石膏4～5 t[1-3]。据统计，2023年我国磷石膏排放量为8 100万t（数据来源于中国磷复肥工业协会）。副产的磷石膏主要包括二水磷石膏（$CaSO_4·2H_2O$）、半水磷石膏（$CaSO_4·0.5H_2O$）和无水磷石膏[1]。无水磷石膏由于颗粒细小、过滤困难，未能实现工业化利用。在可工业化利用的磷石膏中，二水磷石膏占到90%。磷石膏组成复杂，除硫酸钙以外，还有

［收稿日期］2025-02-11

［作者简介］杜 赟(1984-)，女，贵州镇宁人，讲师，研究方向为“三废”处理利用。

［通信作者］邹 璐(1969-)，女，教授。

可溶性磷、可溶性氟、残留酸、有机杂质、微量重金属和放射性元素[4-5]。磷石膏作为一种不可忽视的石膏资源，如果不妥善处理处置，将会对生态环境造成严重的影响[6]（见表1）。因此，磷石膏的资源化综合利用成了限制磷化工企业实现可持续发展的瓶颈。

表1　磷石膏对环境的影响与危害

Table 1　Impact and hazards of phosphogypsum on the environment

杂质种类	主要危害
磷类杂质	进入地表水和土壤,影响植物生长,造成水体富营养化
残留酸	进入地表水和土壤,破坏自然生态系统的酸碱平衡
氟类杂质	进入地表水和土壤,抑制植物生长,危害人体健康
有机杂质(絮凝剂、有机催化剂)	影响磷石膏白度和磷石膏产品接受度
其他杂质(碱金属盐和放射性元素)	影响磷石膏产品性能,限制磷石膏下游利用

贵州省地处我国西南、云贵高原腹地，是全国主要的“三磷（磷矿、磷化工和磷石膏库）”集聚地，磷石膏排放量位居全国第三[7-8]。2018年，贵州省开始实施磷石膏“以渣定产”政策，在磷石膏资源综合利用方面取得了良好的成绩。2024年，贵州省人民政府出台了《关于全面加强磷石膏综合利用推动磷化工产业绿色发展的意见》，其中要求，“到2026年，全省新增磷石膏无害化处理率达100%，综合利用率达到国家规定要求，综合消纳量（包括综合利用量和无害化处理量）与产生量实现动态平衡”，“到2030年，磷石膏综合利用率保持全国前列，综合利用水平大幅提升，综合利用产品不断丰富，利用途径有效拓宽，构建起磷石膏综合利用产业链上下游协同发力、跨地区跨产业协同发展的良好格局”。笔者从政策、技术和障碍3个方面深入分析贵州省磷石膏综合利用的基本情况，探究其在综合利用过程中存在的问题与障碍，在此基础上，寻找技术可靠、经济可行的磷石膏综合利用途径。

1　贵州省磷石膏综合利用概况

2018—2023年，我国磷石膏产生量经历了“减-增-减-增”的波浪形变化（见图1），而磷石膏综合利用量和综合利用率均呈稳定上升趋势。2023年，磷石膏综合利用量为4 500万t，磷石膏综合利用率为55.56%（数据来源于中国磷复肥工业协会）。

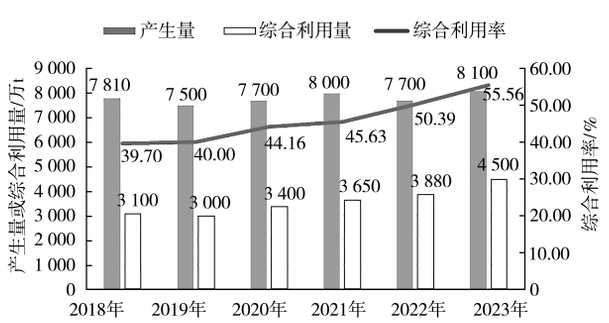

图1　2018—2023年我国磷石膏产生量、综合利用量和综合利用率

Fig. 1　Production, comprehensive utilization and utilization rate of phosphogypsum in China from 2018 to 2023

贵州省磷石膏产生量占全国的15%[8]（见图2），位居第三，然而，其磷石膏综合利用率远超全国平均水平（见表2）。这是由于自2018年贵州省开始对磷化工企业实施“以渣定产”政策，以副产磷石膏的排放量限制磷酸产量，该政策导致贵州省磷化工企业纷纷积极探寻磷石膏的各类综合利用技术，使得全省的磷石膏综合利用率由2018年的

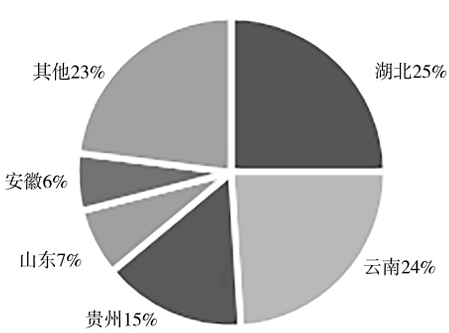

图2　全国主要省份磷石膏排放比例

Fig. 2　Proportion of phosphogypsum emissions in major provinces across the country

表2　全国及主要省份磷石膏综合利用率

Table 2　Comprehensive utilization rate of phosphogypsum in China and major provinces

年份	磷石膏综合利用率/%				
	全国	湖北	贵州	四川	云南
2018	39.70		67.00		
2019	40.00	23.84	91.80		
2020	44.16	29.30	104.40	46.40	
2021	45.63	39.30	85.24	102.80	20.60
2022	50.39	65.97	96.43	100.20	
2023	55.56		93.31		

67.00%提升至2023年的93.31%，并且在2020年达到了峰值104.40%。此外，贵州省政府和各级行政部门也出台了一系列鼓励磷石膏资源综合利用的文件和各种技术规范。这些文件从政策、经济以及技术等方面为磷石膏的资源化综合利用提供了有力保障。

2023年，贵州省磷石膏产生量1 206.20万t，综合利用量1 125.49万t，综合利用率93.31%（数据来源于贵州磷化绿色环保产业有限公司）。贵州省境内磷化工企业一共有6家（见表3），分别是贵州西洋实业有限公司（以下简称西洋实业）、金正大诺泰尔化学有限公司（以下简称金正大诺泰尔）、贵州川恒化工股份有限公司（以下简称贵州川恒）、贵州胜威凯洋化工有限公司（以下简称胜威凯洋）、贵州磷化（集团）有限责任公司（以下简称磷化集团）和贵州润邦动物营养科技有限公司（以下简称润邦科技）。其中，磷石膏产生量最大的企业是磷化集团，为913.12万t。磷化集团于2019年由瓮福（集团）有限责任公司（以下简称瓮福集团）和贵州开磷控股（集团）有限责任公司（以下简称开磷集团）整合重组而成，它在磷化工行业全国排名第一、世界排名前三。贵州川恒和金正大诺泰尔的磷石膏产生量分别位居全省第二和第三，分别为118.89万、102.97万t。西洋实业和胜威凯洋是两家小型企业，磷石膏产生量均较低，而润邦科技处于停产状态。磷石膏综合利用率由高到低依次为：贵州川恒、西洋实业、胜威凯洋、金正大诺泰尔和磷化集团（见表3）。主要综合利用方式有建材产品、水泥缓凝剂、制硫酸联产水泥、矿山填充和肥料调理剂。各种利用途径的磷石膏利用量由高到低依次为：矿山充填>建材产品>水泥缓凝剂>肥料调理剂>制硫酸联产水泥（见表4），其中，利用量占比最高的是矿山充填，占52.30%，其次是建材产品和水泥缓凝剂，分别占25.29%和15.55%，利用量最低的是肥料调理剂和制硫酸联产水泥，分别只占4.60%和2.26%。

表3 2023年贵州省主要磷化工企业磷石膏综合利用情况

Table 3 Comprehensive utilization of phosphogypsum in major phosphorus chemical enterprises in Guizhou province in 2023

项目	产生量/万t	综合利用量/万t	综合利用率/%
全省	1 206.2	1 125.49	93.31
西洋实业	38.2	55.02	144.03
金正大诺泰尔	102.97	101.86	98.92
贵州川恒	118.89	197.28	165.93
胜威凯洋	33.02	34.22	103.63
磷化集团	913.12	737.12	80.73
润邦科技		停产	

表4 贵州省磷石膏各利用途径利用量及其占比

Table 4 Disposal volume and proportion of phosphogypsum through various utilization pathways in Guizhou province

项目	利用量/万t	利用量占比/%
综合利用	1 125.49	
建材产品	284.69	25.29
水泥缓凝剂	175.03	15.55
制硫酸联产水泥	25.44	2.26
矿山充填	588.60	52.30
肥料调理剂	51.74	4.60

2 贵州省磷石膏综合利用政策分析

贵州省关于磷石膏综合利用的政策主要有《贵州省“十四五”大宗工业固体废物综合利用规划》（2021）（以下简称《规划》）、《省人民政府关于全面加强磷石膏综合利用推动磷化工产业绿色发展的意见（黔府发〔2024〕5号）》（以下简称《意见》）和《贵州省工业固体废物资源综合利用评价管理实施细则》（以下简称《细则》）（黔工信〔2023〕43号）3个文件。

其中，《规划》是针对贵州省大宗工业固体废弃物（主要是工业副产磷石膏、粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、尾矿、酒糟、赤泥和电解锰渣）在“十四五”发展期间提出的规划性文件，它对贵州省的大宗工业固废的综合利用进行了全面的指导，特别是对大宗工业固废的利用方向和具体利用技术进行了全面的阐述。它指出：到2025年，大宗工业固体废弃物综合利用率要达到70%，技术标准健全完善，攻关技术取得重大突破，固废综合利用产业链融通互惠，创新能力显著提高。对于工业副产磷石膏，建立以磷石膏建材、井下充填和制硫酸为三大主攻方向的综合利用消解模式，实施一批建筑石膏、高强石膏、无水石膏、净化石膏等基础粉体材料项目，以及磷石膏制硫酸联产水泥和生态修复、土壤改良、填料助剂等项目。

《意见》是针对贵州省磷石膏综合利用的专项性文件，它主要从磷石膏综合利用技术和产业链协同发展两个方面明确了磷石膏资源综合利用的重点任务及发展方向。首先，针对磷石膏的绿色发展，在“富矿精开”的基础上，升级优化生产工艺，以

减少生产过程污染物排放，并提高磷石膏中氟、硅及稀土元素的回收利用，制定并完善磷石膏无害化处理技术规程及相关标准，推动磷石膏利废产品在建筑材料、工程建设和高分子材料领域的利用。另外，《意见》中特别提到，要加强对磷石膏综合利用技术及项目的金融支持力度，依法依规执行磷石膏综合利用相关税收优惠政策。

2023年，为了建立贵州省科学规范的工业固体废弃物资源综合利用评价机制，在《工业固体废弃物资源综合利用评价管理暂行办法》的基础上，贵州省工业和信息化厅和国家税务总局贵州省税务局共同发布了《细则》。该细则通过对企业所开展的工业固体废弃物综合利用活动进行定性定量评价，对综合利用技术条件和要求进行符合性判定。根据评价结果，企业可以向税务主管部门申请享受相关税收优惠政策。根据《关于资源综合利用增值税政策的公告》（财政部　税务总局公告2019年第90号）中的规定，自2019年9月1日起，纳税人销售自产磷石膏资源综合利用产品（产品原料40%以上来自磷石膏），可享受增值税即征即退政策，退税比例为70%。

在磷石膏综合利用具体实施层面，贵州省各行政部门也积极健全完善各种磷石膏利废产品技术规范规程，其中主要有：《磷石膏建筑材料应用统一技术规范》（DBJ52/T 093—2019）、《磷石膏砌块标准设计图集》（2部）、《磷石膏人工抹灰施工法》（5部）、《磷石膏模盒通用技术标准》（DB52/T 1657—2022）、《磷石膏基自流平砂浆通用技术标准》（DB52/T 1655—2022）、《磷石膏抹灰砂浆通用技术标准》（DB52/T 1656—2022）、《磷石膏砂浆喷筑复合墙标准图集第二部：PVC空腔内膜-磷石膏砂浆喷筑复合墙体》（2023）、《磷石膏抹灰砂浆应用技术规程》（2023）和《磷石膏自流平砂浆应用技术规程》（2023）。2021年，贵州省住房和城乡建设厅、贵州省市场监督管理局、贵州省工业和信息化厅、贵州省财政厅联合发布《关于进一步加强磷石膏建材产品基施工质量管理的通知》。2022年，贵州省住房和城乡建设厅、贵州省财政厅、贵州省发改委等印发通知，决定拓展磷石膏建材推广应用范围，明确在国有资产投资项目建设过程中，对磷石膏基建材做到应用应尽。

3　贵州省磷石膏综合利用技术分析

3.1　生态修复和矿山充填

磷石膏产量巨大，可以作为矿山充填的材料使用，既满足了矿山采空区的回填问题，又解决了磷石膏的堆存问题，实现双赢的局面。然而，磷石膏中含有磷、氟等杂质，用作矿山充填材料时，需要与水、粉煤灰、生石灰、氢氧化钠等物质按比例混合，形成磷石膏胶凝材料才可使用。磷石膏用作充填材料具有原料成本低、性能优越、工艺简单、需求量大的特点[9-10]。

贵州川恒于2015年提出“矿化一体”战略构想，利用半水磷石膏做胶凝材料，胶结二水磷石膏、尾矿等固体废弃物，回填采空区。不仅消除了磷石膏地表堆存带来的环保问题，也通过低成本填充，减少预防矿上地质灾害，实现“一废治两害”。2016年，与北京科技大学合作，成立“半水磷石膏改性胶凝材料及充填技术”项目组。2018年7月—2019年9月，团队在盛源磷矿完成2.6万m^3采空区的工业化充填试验，2019年，被中国石油和化学工业联合会评定为“国际领先水平”。该工艺具有技术简单、成本低、高效环保的特点，已成功运用在贵州川恒矿山的露天坑生态修复和矿井填充，其工艺流程如图3所示。

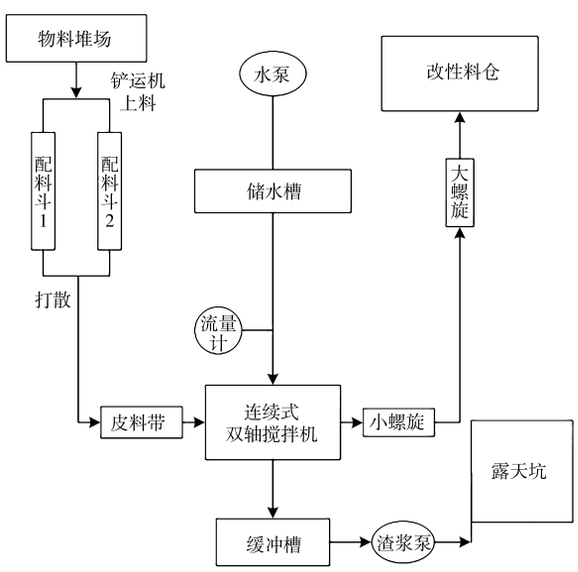

图3　贵州川恒利用磷石膏作矿山充填材料工艺流程

Fig. 3　Process flow of phosphogypsum as mine filling material of Guizhou Chuanheng

开磷集团于2005年实现了磷石膏充填技术的产业化，其充填系统包括石膏供料线、粉煤灰供料线、水泥输送线、供水线、充填料浆制备及输送线。制浆能力为50 m^3/h，充填能力为40 m^3/h[13]，该技术获得国家科技进步奖二等奖[11-13]。开磷集团和中国电力建设集团合作研发的“磷石膏基植生材料技术研发”完成室内室外模拟实验。2020年3

月，完成“穿岩洞矿区明采矿区废矿排土场顶部区域示范场地”试验，初步形成《磷石膏基植生材料生态复绿企业标准》，实施“瓮福磷矿穿岩洞边坡防护基绿化”项目，进行技术研究和工程化运用[11]。

3.2 水泥缓凝剂

二水硫酸钙能够快速溶解，并迅速与水泥（铝酸三钙）水化产生的凝胶反应生成钙矾石，包裹在水泥（铝酸三钙）矿物颗粒的表面，起到隔离水的作用，从而延缓水泥（铝酸三钙）的进一步水化反应，达到缓凝目的。磷石膏中由于含有磷、氟等元素，它们会对水泥的性能产生较大的影响，所以，利用磷石膏作水泥缓凝剂时，需要对磷石膏进行改性处理。研究表明，经过化学处理后的改性磷石膏杂质相对减少，与天然石膏相比，水泥的凝结时间基本一致，强度略强，水泥安定性合格[12]。研究表明，当磷石膏用作水泥缓凝剂时，每吨水泥能够消纳磷石膏 30 ~ 50 kg[14]。

瓮福集团磷石膏制水泥缓凝剂装置于 2022 年 7 月建成投产，建设规模为 100 万 t/a，产量和工艺流程如表 5 和图 4 所示。瓮福集团与周边的水泥厂进行合作，给予消纳磷石膏的企业一定的补贴。根据调查，西南水泥厂利用瓮福集团产生的磷石膏作水泥缓凝剂，近 3 年磷石膏用量在水泥中的占比为 2% 左右[15]。

表 5 瓮福集团磷石膏制水泥缓凝剂生产情况

Table 5 Production situation cement retarder from phosphogypsum in Wengfu Group Co., Ltd.

项目	产量/万 t
2022 年	63.0
2023 年	103.2
2024 年 1—9 月	45.4
合计	211.6

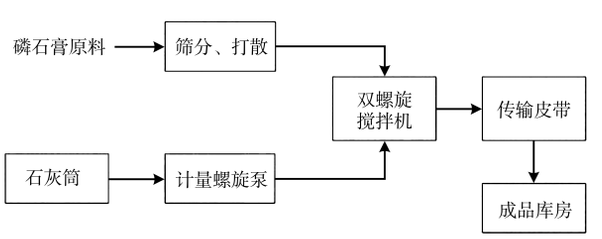

图 4 瓮福集团磷石膏生产水泥缓凝剂工艺流程

Fig. 4 Process flow of producing cement retarder from phosphogypsum in Wengfu Group Co., Ltd.

3.3 磷石膏基建材

在建筑材料上，磷石膏可以代替天然石膏生产建筑磷石膏粉、抹灰石膏砂浆、自流平石膏砂浆、高强石膏粉、石膏切块和石膏板材等。该类产品不但质地轻、收缩率低、强度高，而且还具有加工性能强和施工简单的优点，同时，对于室内湿度亦有一定的控制作用，隔声的能力也比较理想。该类技术已经发展成熟，其中石膏砌块和石膏板材市场应用最为广泛，需求量最大[9]。

1） 高强石膏粉 金正大诺泰尔开发的α-石膏法磷酸工艺可将二水磷石膏转晶为高强度的α半水石膏，然后经过烘干、粉磨、改性即可获得强度是普通石膏 3 倍以上的α高强石膏。它具有耐磨性好、流动性强和膨胀率低的特点。目前，α高强石膏运用广泛，可作为特种骨料复配用于石膏自流平砂浆的制备，也可用于建筑内墙或者低矮承重墙的墙体浇灌，还可以用于纸面石膏板和陶瓷模具石膏粉等多种石膏产品[9]。贵州磷化绿色环保产业有限公司在息烽小坝寨工业园区内已建成α型和β型半水石膏粉生产线。胜威凯洋于下属的贵州汇阳新材料科技有限公司正在建设 60 万 t/a 建筑石膏粉生产线，实现年消耗磷石膏 87 万 t。贵州川恒的半水磷石膏新型胶凝材料及膏体充填技术依托半水磷石膏工艺，对副产半水磷石膏改性处理，低温烘干去除游离水后，可得“类α型”半水石膏干粉，该石膏粉辅以企业自研专利技术，添加常规外加剂和砂浆辅料，即可满足 JC/T 1023—2021《石膏基自流平砂浆》的砂浆成品要求。这是一种绿色建材，具有找平性好，不空鼓，不开裂，施工效率高的特点。

2） 磷石膏砌块 开磷集团投产 135 万 m^2/a 生产线，瓮福集团投产 50 万 m^2/a 生产线[13]。

3） 磷石膏砖 开磷集团于 2007 年开发了高强耐水磷石膏砖“一步法”生产工艺及制备技术，分别建成年产 10 亿块高强耐水石膏砖、35 万 m^3 石膏砌块生产线[11]。但是近年来，由于房地产市场需求量急剧减小，“一步法”石膏砖生产线已经停产。

4） 纸面石膏板 由贵州泰福石膏有限公司设计、运行的 3 000 万 m^3/a 磷石膏制备纸面石膏板生产线于 2009 年在瓮福集团厂区内建成投产。该生产线经历了 2017—2021 年生产高峰后，从 2022 年开始，年产量以 40%~50% 的速度下降，下降的主要原因仍然是房地产市场的低迷与缩小，这直接导致建材需求量下降。其生产工艺流程如图 5 所示。

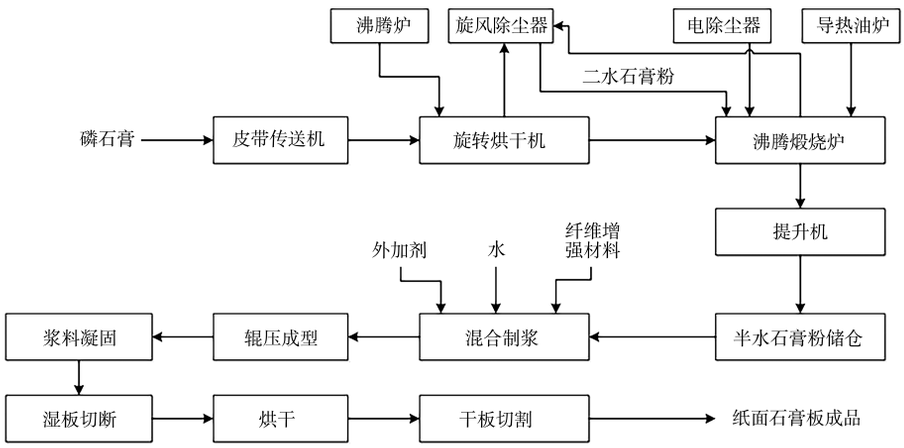

图5　磷石膏生产纸面石膏板工艺流程

Fig. 5　Process flow of using phosphogypsum to produce papered gypsum board

3.4　磷石膏制硫酸

在我国，硫酸生产的原材料主要是硫黄，而我国的硫黄基本都是进口，价格受制于国外，对我国硫酸的生产造成严重的挑战。而磷石膏制硫酸联产水泥技术能够用磷石膏替代硫黄制硫酸，其中的钙能够用于生产水泥，从而全面实现了磷石膏的资源化利用。

基本原理：磷石膏制硫酸联产水泥技术可以形成磷铵、硫酸和水泥共生模式。磷铵生产排放的废渣磷石膏可以代替天然石膏与钙、铝等原料烧制硫铝酸盐水泥熟料。在1 200 ℃时，硫酸钙分解生产SO_2和CaO，窑尾产生的高温SO_2溶于水可以制成硫酸。据统计，该工艺每生产硫酸1 t，可以消耗磷石膏3 t[9]。

金正大诺泰尔化学采用预热器回转窑工艺，先后建成30万t/a磷石膏制硫酸装置，联产45万t/a硅钙钾镁肥（水泥熟料）一、二期装置[16]。但是，磷石膏制硫酸联产水泥工艺投入成本高，能耗大，生产的硫酸缺乏成本优势，经济性较差[11]。其工艺流程如图6所示。

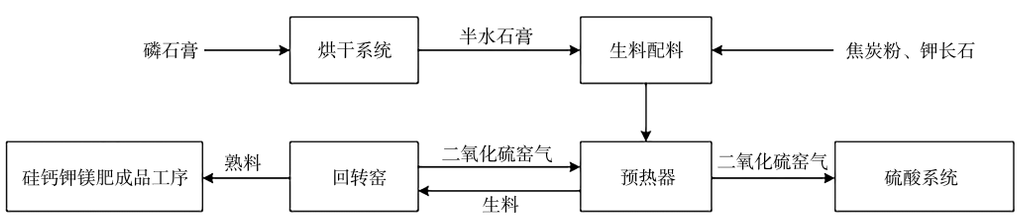

图6　磷石膏制硫酸联产水泥工艺流程

Fig. 6　Process flow of producing sulfuric acid and cement from phosphogypsum

2024年3月磷石膏制硫酸联产水泥装置（简称“1468项目”）在磷化集团投料试车成功，年消耗磷石膏140万t，生产硫酸60万t、水泥80万t，总投资13.14亿元。

3.5　磷石膏包装箱

2023年，磷化集团建成30万t/a无水石膏装置，实现了无水磷石膏的工业化量产。在此基础上，2024年3月，磷化集团年产2.5万t无水石膏母粒及包装箱装置项目试车投产成功[14,17]，这为磷石膏的产业化运用开辟了新的途径。

磷化集团与华南理工大学瞿金平教授签订了无水石膏高分子利用项目战略合作协议。经过研究发现，粒径为6.5～18.0 μm（过800～2 000目筛）的无水石膏可以作为高分子材料的填充剂，用于制作无水石膏包装箱、市政管道、电力和通信管道、复合树脂检查井盖、SPC地板（石塑复合地板）、油漆、涂料和可降解膜等多种产品。无水石膏与聚丙烯树脂混合制成母粒，经过拉板、印刷、模切、粘钉等工艺后制成包装箱。该包装箱具有防水、防虫、耐磨、抗老化、耐冲击、防油渍、可降解等特点。与传统包装箱相比，每生产无水石膏包装箱1 t，可以减少砍伐树木1 t左右，并且在生产过程中也不产生污水[14,17]。所以，它是一种经济又环保的新技术。

3.6 其他综合利用技术

用作道路基层材料：开磷集团建成60万t/a磷石膏路基稳定层材料生产装置，每年消耗磷石膏50万t左右[13]。

4 贵州省磷石膏综合利用障碍分析

影响贵州省磷石膏综合利用技术实施与推进的障碍主要有3个，分别是技术本身、市场利用和产品特点。磷石膏制硫酸联产水泥技术能耗高、投资大，并且生产出的水泥价格在市场上缺乏竞争优势。虽然它能够实现磷石膏的综合利用，但它本身就不是一种环保、节能的技术。目前国内，只有山东鲁北化工股份有限公司实现了该技术的连续运行与改扩建[18]。2024年，贵州磷化集团的“1468”项目投料试车成功，成为全球最大的磷石膏制硫酸联产水泥项目，但是它的运行情况，企业并未披露。目前的数据显示，制硫酸技术在磷石膏利用量占比中只有2.26%，所以，制硫酸技术是否能够成为消纳磷石膏的中坚力量仍有待商榷。另外，由于磷石膏酸性太强，用作水泥缓凝剂时必须进行改性处理，增加了成本，导致磷石膏用作缓凝剂时与电厂脱硫石膏相比缺乏市场竞争力[6]。

下游市场对磷石膏利废产品的接受和消纳能力是影响磷石膏综合利用技术实施的第二个因素。近年来，由于房地产市场下滑，建筑材料市场受到了严重的冲击。水泥销量下降直接影响了磷石膏作为水泥缓凝剂的使用。另外，纸面石膏板、磷石膏砌块、磷石膏砖的生产都受建材市场的影响，纷纷出现减产或停产的情况。同时，这些由磷石膏制成的建材产品，其价格在市场上缺乏竞争优势，也成了进一步阻碍磷石膏建材类综合利用技术实施的重要原因。

磷石膏利废产品的特点也决定了生产该利废产品技术的运行实施。磷石膏建材产品以磷建筑石膏和（或）α型高强磷石膏为主要胶凝材料，且总质量不得低于50%的磷石膏建材产品，主要包括磷石膏抹灰砂浆、磷石膏基自流平砂浆、嵌缝磷石膏、黏结磷石膏、磷石膏砌块、纸面磷石膏板。但是因为磷石膏是气硬性胶凝材料，软化系数低于《墙体材料应用统一技术规范》（GB 50574—2010）中规定的“块体材料物理性能要求中软化系数不应小于0.85”的要求[14]，只能用于建筑内墙等非承重墙体。磷石膏用作水泥缓凝剂时最常见的问题是各种杂质无法完全去除，导致水泥质量达不到普通水泥标号[6]。磷石膏和水泥共同用于路基材料时，普遍存在钙矾石问题，钙矾石在夏季高温条件下，会失去内部的结晶水，内部压力增大。而在雨季浸泡条件下，又会发生吸水现象，钙矾石重复吸水失水的过程会使路面凸凹不平，出现裂缝[6]。另外，磷石膏中残留的重金属和放射性元素直接影响了利废产品的接受度。中国农业科学院土壤肥料研究所曾通过田间试验，观察小麦生长，测定氟、汞、砷的含量变化，虽然结果显示，随着磷石膏肥料的施加，小麦中这3种元素的含量也有所增加，但含量均在国家允许范围之内[9]。但是，鉴于心理因素，消费者还是愿意选择传统工艺生产的同等产品。

5 结论

贵州省在磷石膏资源化综合利用技术途径方面取得了丰厚的成果，这主要归因于贵州省人民政府自2018年“以渣定产”政策的颁布与实施。该政策虽然在一定程度上限制了贵州省磷肥的生产量，但是却促进了磷化工企业积极寻找副产磷石膏的综合利用出路。近年来，贵州省磷化工企业不论是在旧技术的升级改造，还是在新技术的研发推广上都取得了不错的成绩，并且对副产磷石膏的综合利用也逐渐形成了产业链式的开发利用模式。

磷石膏基建材、井下充填材料和磷石膏制硫酸是贵州省磷石膏综合消解模式的三大主攻方向，结合技术实施情况可知，磷石膏基建材由于受房地产行业的制约，近年来出现了减产或停产的情况。而磷石膏制硫酸技术由于能耗高、投资大，生产出的水泥在市场上缺乏价格竞争优势而鲜被运用。所以，井下充填成为贵州省磷石膏综合利用切实可行的技术方向。同时，贵州省矿产资源丰富，磷石膏改性后可以用作矿产采空区的回填材料，这样既稳固了采空区的地质结构，又解决了磷石膏需要占用大量土地进行堆存的问题，因此是磷石膏利用率最高的方式。

新技术不断涌现，为磷石膏的综合利用开辟了新途径。2023年，磷化集团无水石膏装置投产运行，标志着无水磷石膏实现了工业化量产。在此基础上，磷化集团很快研发出无水石膏母粒包装箱生产线，这既满足了我国快递行业包装材料大幅度增长的现状需求，也实现了磷石膏资源化利用的要求，更加缓解了传统包装箱需要以树木作为原材料的环境压力，可谓是一举三得的新技术。

磷石膏综合利用技术在实施过程中存在诸多阻碍因素，这些因素可以归纳为技术本身、市场利用和产品特点3个范畴。若技术本身能耗高、投资

大、运行不稳定，会造成生产的利废产品价格高于传统工艺生产的同类产品，缺乏市场竞争力。磷石膏基建材产品由于受房地产市场的制约，纷纷处于减产或者停产状态。且磷石膏属于气硬性胶凝材料，它自身的性能和其中含有的杂质都会影响其生产的利废产品的使用。

［参考文献］

［1］ 杨林，曹建新，刘亚明. 半水磷石膏的矿物学特征[J]. 岩石矿物学杂志，2015，34(6)：827-834.
YANG L，CAO J X，LIU Y M. Mineralogical characteristics of hemi-hydrate phosphogypsum [J]. Acta Petrologica et Mineralogica，2015，34(6)：827-834.

［2］ 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，2020，37(2)：46-48.

［3］ 李剑秋，李子军，王佳才，等. 半水磷石膏充填材料在某露天采坑充填治理中的应用[J]. 现代矿业，2021，37(9)：250-255.
LI J Q，LI Z J，WANG J C，et al. Application of Hemihydrate Phosphogypsum Filling Material in Filling Treatment of an Open-pit Mine[J]. Modern Mining，2021，37(9)：250-255.

［4］ 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.
SHAN J H，SONG Y，ZHOU M K，et al. Study on modification of phosphogypsum as cement retarder [J]. New Building Materials，2024，51(1)：119-123.

［5］ 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 Process 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.

［6］ 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.

［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.
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.

［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.
WANG T. Synthesis of Sulfoaluminate Cement with Phosphogypsum [D]. Dalian：Dalian University of Technology，2022.

［9］ 付强强，沈彦辉，陈宏坤，等. 磷石膏综合利用现状及建议[J]. 磷肥与复肥，2020，35(8)：44-46.
FU Q Q，SHEN Y H，CHEN H K，et al. Present situation and suggestions of comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2020，35(8)：44-46.

［10］ 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.
GU S Y，MIAO J Y，HOU C H，et al. Comprehensive Utilization of Phosphogypsum and Research Suggestions on Key Common Technology Innovation[J]. Conversation and Utilization of Mineral Resources，2020，40(3)：115-120.

［11］ 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.

［12］ 欧志兵，杨文娟，何宾宾. 国内外磷石膏综合利用现状[J]. 云南化工，2021，48(11)：6-9.
OU Z B，YANG W J，HE B B. The General Introduction of Phosphogypsum Comprehensive Utilization Technology in China [J]. Yunnan Chemical Technology，2021，48(11)：6-9.

［13］ 张利珍，张永兴，张秀峰，等. 中国磷石膏资源化综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用，2019，39(4)：14-18.
ZHANG L Z，ZHANG Y X，ZHANG X F，et al. Research Progress on Resource Utilization of Phosphogypsum in China [J]. Conversation and Utilization of Mineral Resources，2019，39(4)：14-18.

［14］ 张玉杰，徐立彬，王转. 磷石膏综合利用现状及贵州消解模式探析[J]. 生态文明新时代，2024(1)：99-103.

［15］ 刘露，练川，李星和，等. 贵州省磷石膏综合利用现状[J]. 科技风，2019(1)：171，179.

［16］ 姚华龙，孟昭颂. 磷石膏制酸联产硅钙钾镁肥技术的生产实践[J]. 硫酸工业，2018(1)：41-44.
YAO H L，MENG Z S. Production practice of sulphuric acid production from phosphogypsum cogeneration calcium silicon potassium magnesium fertilizer technology [J]. Sulphuric Acid Industry，2018(1)：41-44.

［17］ 李中迪，刘娟，罗丹. 环保包装箱背后的科创故事[N]. 2024，贵州日报，2024-04-25(9).

［18］ 高强. “双碳”背景下磷石膏制硫酸联产水泥技术面临的机遇与挑战及发展建议[J].磷肥与复肥，2023，38(3)：25-28.
GAO Q. Opportunities，challenges and development suggestions of co-production of sulfuric acid and cement from phosphogypsum under the background of “double carbon” [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2023，38(3)：25-28.