◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

磷石膏湿法无害化处置与矿井充填技术工业化运用

谭国龙

（瓮福紫金化工股份公司，福建 龙岩 362400）

［摘　要］比较磷石膏湿法无害化处置的工艺，选择溶解–固化联合工艺进行工业化处置，介绍某企业年处理60万t磷石膏工艺流程、工业化布置、产品指标，并进行水平衡计算和成本核算。磷石膏无害化处置后与硅酸盐水泥、粉煤灰、尾矿砂、铜渣、胶凝剂按比例混合制备胶凝材料用于井下充填，介绍产品指标、成本核算及井下充填注意事项。优化配方后，无害化的磷石膏加入比例达到30%，7 d抗压强度为3.95 MPa，28 d抗压强度为4.34 MPa，且后期强度变化不大，无衰减现象，能满足充填强度要求，直接成本可降到50元/t左右。

［关键词］磷石膏；无害化处置；矿井充填；工业化运用；成本核算

［中图分类号］X781　　［文献标志码］B　　［文章编号］2097–4566（2025）12–0074–08

Wet harmless disposal of phosphogypsum and industrial application of mine filling technology

TAN Guolong

（*Wengfu Zijin Chemical Co., Ltd., Longyan* 362400, *China*）

Abstract: Comparing the processes of wet harmless disposal of phosphogypsum, the dissolution-solidification combined process is selected for industrial disposal. The process flow, industrial layout, product indicators of 600 kt/a phosphogypsum processing unit in a certain enterprise are introduced, and the water balance calculation and cost accounting are carried out. After harmless treatment, phosphogypsum is mixed with portland cement, fly ash, tailings sand, copper slag and gelling agent in proportion to prepare cementitious materials for underground filling. Product indicators, cost accounting and precautions for underground filling are introduced. After optimizing the formula, the proportion of harmless phosphogypsum added reaches 30%, the product has a compressive strength of 3.95 MPa at 7 days and 4.34 MPa at 28 days. The strength doesn't change significantly in the later stage, and there is no attenuation phenomenon, which can meet the requirements of filling strength. The direct cost can be reduced to 50 RMB Yuan for per ton product.

Key words: phosphogypsum; harmless disposal; mine filling; industrial application; cost accounting

磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的副产物。在二水法工艺中，生产磷酸（100%）1 t约副产干基磷石膏5 t，颜色一般为褐色，pH为2.6～3.5，其主要成分是二水硫酸钙，并含有其他杂质（见表1）。

表1　原料磷石膏指标

Table 1　Indicators of raw phosphogypsum

w(CaO)/%	w(SO_3)/%	w(结晶水)/%	w(游离水)/%	w(总磷)①/%
27.89～28.54	41.01～41.23	17.94～18.12	19.46	1.54

w(水溶磷)①/%	w(MgO)②/%	w(Fe_2O_3)②/%	w(Al_2O_3)②/%	w(SiO_2)②/%	w(F)②/%	w(Cl)②/%
1.11	0.15	0.1	0.39	4.82	0.31	0.014

注：①40 ℃干基，以P_2O_5计；②40 ℃干基。

根据指标判断，磷石膏属于第Ⅱ类一般工业固体废物。长期以来，磷石膏消纳方式是与生石灰混配制成水泥缓凝剂，按1%～3%的比例加入水泥熟料中，现在及将来水泥行业的产能发挥将长期受限，需在短时间内寻找缓解磷石膏堆存压力的措施。2025年以前，国内磷石膏综合利用标准以贵州、湖北、云南等地方性标准为主导，而磷石膏全国性综合利用无国标可参照执行，这导致在无磷资源的省、市推动磷石膏综合利用时，行政审批阻力大，难以推动[1]。

磷石膏综合利用标准《磷石膏的处理处置规

［收稿日期］2025–06–18

［作者简介］谭国龙（1976–），男，贵州安龙人，助理工程师，长期从事磷化工生产及磷石膏固废处置工作。

范》（GB/T 32124—2024）、《磷石膏利用和无害化贮存污染控制技术规范》（HJ 1415—2025）两项标准，分别于2025年4月、7月颁布实施，这为全国各省、市的磷石膏综合利用行政审评提供了可执行依据。

本文重点参照2项标准指标，结合实际运行案例、相关实验数据，对磷石膏进行无害化处置后，与尾矿砂、粉煤灰、铜渣、胶凝剂等其他物料配制成胶凝材料，并分析其用于矿井充填的工艺可行性。

1　磷石膏无害化处置工艺比较及原理

根据国家对一般废弃物的界定标准（GB 18599—2020、GB 8978—1996），如果要将磷石膏转化为一般固废，则其中的几种主要污染物应按照HJ 557—2010方法浸出，即先将样品研磨至粒径小于3 mm，再按干质量的10倍加水并震荡8 h，然后静置16 h，所得浸出液需要满足：pH=6～9、w(P)≤0.5 mg/kg、w(F)≤10 mg/kg[1]。

1.1　生石灰中和工艺

磷石膏水洗过程中发现，其中可溶性的磷是硫酸钙晶间夹杂的磷酸及磷酸二氢盐，而可溶性的氟则主要是NaF、HF等。CaF_2沉淀物的溶度积为5.3×10^{-9}，实验发现，磷石膏多次洗涤后，其洗水中ρ(F)始终维持在30～50 mg/L，接近CaF_2沉淀物溶解的平衡浓度，而ρ(P)最多能降至3～4 mg/L。由此可见，磷石膏单靠水洗或加生石灰中和无法达到无害化处理的目标[2-3]。

1.2　溶解–固化联合工艺

磷酸及磷酸二氢盐可溶，在弱酸性条件下，借助搅拌，磷酸根与铁、铝及稀土元素等三价离子结合形成磷酸盐沉淀（如反应式（1）所示），可促使硫酸钙晶体表面夹杂的磷酸及磷酸二氢盐的固化；向磷石膏浆料中加入含钙、硅、铁、钛、铝、锆等元素的无机固化剂，并加石灰调pH至6～9，可加速磷石膏中CaF_2的溶解（见反应式（2）），进入溶液的氟离子被固化剂中的硅、铁、钛、铝、锆等吸附转化成碱式含氟沉淀物（如反应式（3）所示，其中b为N的价态），水中残留的F^-离子再与溶液中过剩的N^{b+}结合形成$N(OH)_aF_{(b-a)}$沉淀物（见反应式（4）），以实现可溶性氟的有效固化[2-3]。

$$Me^{3+}+PO_4^{3-}=MePO_4\downarrow，其中Me=Fe、Al及稀土； \quad (1)$$

$$3CaF_2+N^{b+}=3Ca^{2+}+NF_6^{(6-b)-}，其中N=Si、Ti、Fe、Al、Zr等； \quad (2)$$

$$NF_6^{(6-b)-}+aOH^-=N(OH)_aF_{(b-a)}\downarrow+(6-b+a)F^-； \quad (3)$$

$$N^{b+}+aOH^-+(b-a)F^-=N(OH)_aF_{(b-a)}\downarrow。 \quad (4)$$

依据以上原理，磷石膏固化剂选用磷石膏本身含有的钙、硅、铝、铁、钛、锆及某一稀土元素等化合物复配合成。实验及工业化应用证明，用复配固化剂可以在短时间内将磷石膏中的磷和氟深度固化，且处理过的磷石膏存放时间越长，其中磷和氟溶出的趋势越小。这是因为随陈化时间延长磷石膏中固化的磷和氟逐渐朝更稳定的磷、氟矿物结构转化。固化后的磷石膏化学性质稳定，能满足国家规定的一般固废的指标要求，且仍然能用作建材、水泥缓凝剂等的原料。

该工艺固化药剂以无机类为主，避免了使用有机类溶剂带来的环境风险。该工艺项目建设时在安评、环评等方面的等级要求较低，降低了风险管控等级，相关费用投入较低。

2　磷石膏湿法无害化处置工艺流程及成本核算

磷石膏湿法无害化处置工艺流程见图1。该工艺特点：对原料指标变动适应性强，指标稳定性好，已经过工业化生产应用，指标跟踪长达12个月以上，改性后磷石膏稳定，不产生磷、氟二次释放及返酸现象，原磷石膏改性后产品无需陈化，因此该工艺库房占地少，土地、资金投入不大，可即产即出，根本上解决了干法工艺中在pH高于9的条件下氟指标较高的问题，相对于干法无害化处置工艺，主要增加投入是增加脱水环节（陶瓷过滤机）。采用该过滤机优点是厂房投入小，产品水分可根据需要调整转速控制，可实现较低水分（$w(H_2O)\leq15\%$），使物流成本较低。根据需

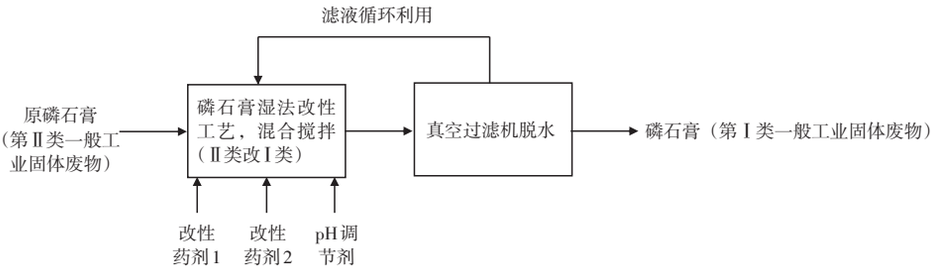

图1　磷石膏湿法改性工艺流程

Fig. 1　Wet modification process flow of phosphogypsum

要，提高滤盘转速，提升产能，控制滤饼$w(H_2O)$在15%～30%，做到水平衡可控。将第Ⅱ类一般工业固体废物改性为第Ⅰ类一般工业固体废物后，从原料源头降低了充填应用的环境污染风险。国内某企业60万t/a磷石膏湿法无害化改性工艺工业化布置情况见图2。

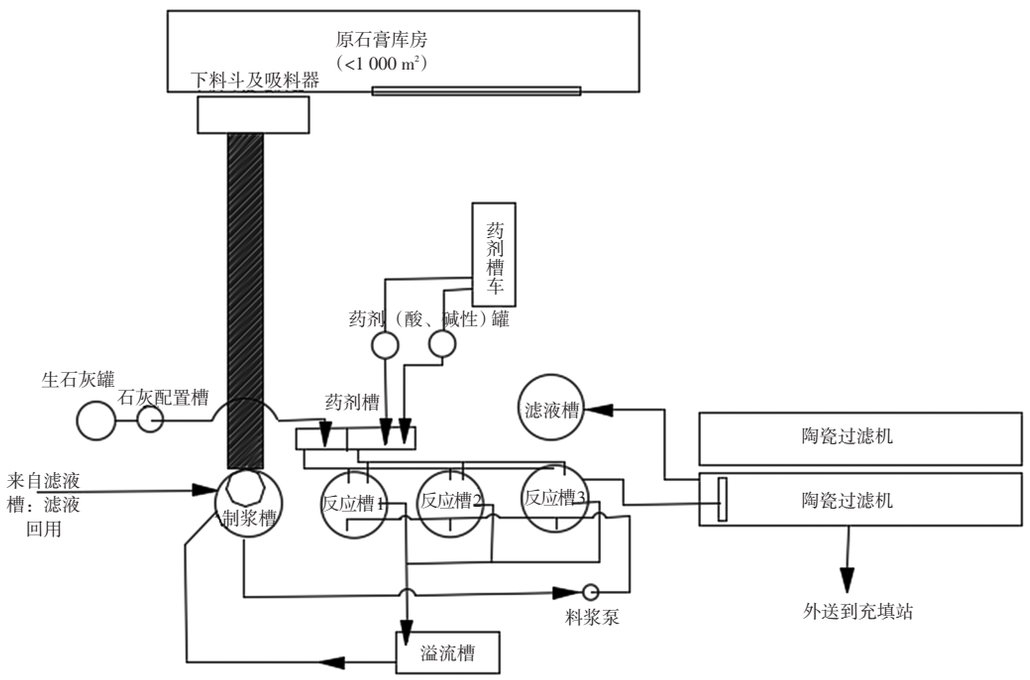

图2　国内某企业60万t/a磷石膏湿法无害化处置工艺工业化布置情况

Fig. 2　Industrial layout of 600 kt/a wet harmless disposal of phosphogypsum

2.1　分析标准及工业化生产指标随机现场取样情况

第三方工艺环评论证、分析结果及执行标准见表2[3-5]，工业化生产跟踪1个月，作为鉴定依据，这里以一组数据为例。2025年1—6月随机性现场下料抽检情况见表3。

项目运作及生产现场抽检情况说明：该工艺自2023年8月到12月完成工业化应用中试，2024年3月完成工艺环评第三方论证，4月工业化生产线开始连续性运行，至今已连续性运行一年多，日处理量2 000 t以上，改性指标稳定性好、抽检合格率可达100%。优点是固化过程中药剂可随机调整、搅拌反应停留时间可控，对于不合格品可通过3组反应槽在线循环处理，运行成本低，能有效面对地方行政执法部门随机抽检，做到合格一批，出厂一批。经过实际检验，适当调整加药量，该工艺$\rho(F)$可稳定在5 mg/kg以下，满足制备磷石膏土的标准

表2　第三方工艺环评论证、分析结果及执行标准

Table 2　Third-party technical environmental impact assessment verification，analysis results and implementation standards

分析项目	检测标准(方法)	检测结果/(mg·L⁻¹)	主要仪器	检出限/(mg·L⁻¹)
pH	《固体废物　腐蚀性测定　玻璃电极法》（GB/T 15555.12—1995）	7.58①	PHS-3C型精密pH计	0.01
ρ(磷酸盐)	《水和废水监测分析方法》	0.18	721型可见分光光度计	0.01
ρ(氟化物)	《固体废物　氟化物的测定　离子选择性电极法》（GB/T 15555.11—1995）	7.67	PHSJ-4A精密酸度计	0.05

注：①量纲为1。

表3　2025年1—6月生产现场下料口处随机抽检磷石膏指标情况

Table 3　Tracking of random on-site feeding sampling inspection indicators from January to June，2025

时间	pH	ρ(F)/(mg·kg⁻¹)	ρ(P)/(mg·kg⁻¹)
1月	6.00	3.2	0.23
2月	6.16	3.1	0.36
3月	7.65	4.0	0.19
4月	7.73	4.0	0.20
5月	7.65	3.0	0.15
6月	7.60	5.0	0.19

要求，现主要用于生产高品质水泥缓凝剂。

2.2　成本核算

2.2.1　产量计算

根据现场测试，浆体w(固）为70%，16块滤盘滤饼厚度在1.0～1.5 cm，取平均值1.25 cm，过滤面积80 m^2，滤饼相对密度为1.2。

过滤机运行频率为40 Hz，每转一次时间为40 s，每分钟转动90次，每小时产量计算：

$$80 \times 0.012\,5 \times 90 \times 1.2\ t = 108\ t。$$

每12 h清洗滤盘一次，每天正常运行22 h，则每天产量为2 376 t，与当天实际过磅数据稳合。

考虑到设备维修故障、滤盘失效及技术难度等因素，全年按85%运行率考虑，按330 d计算，每年产量在666 468 t。

2.2.2　水平衡计算

原渣w(H_2O）平均按20%计算，压滤后滤饼w(H_2O）按15%～20%计算，全年循环增加水量为666 468 t × 5%=33 323 t。改性磷石膏水分高低对于充填应用不造成影响。同时考虑到运输成本，实际w(H_2O）控制在30%以下，通过这种系统内部水平衡调控方式，有效解决了系统水量增加问题。

2.2.3　成本核算

年生产时间按300 d计，所有固定投资按1年60万t进行折算，因此第一年吨处理成本较高（见表4），为27.01～29.13元/t。

表4　年处理60万t磷石膏成本测算

Table 4　Process operation costs for 600 kt/a phosphogypsum treatment plant

费用类别	总价/元	单价/(元·t^{-1})	备注
设备	3 000 000	5.00	皮带、搅拌器、泵、反应槽、平台、钢构、雨棚等(结合项目审批年限,按一年折旧)
过滤机	1 500 000	2.50	2台
人工	864 000	1.44	12人(三班两倒)
电耗	915 000	1.53	按0.7元/(kW·h)计算
装载机	288 000	0.48	1台,3人(三班两倒)
水(循环不计)		0	
管理人员	108 000	0.18	1人
装载机装车、堆存、维修		5.75	
固化药剂		8.00	
生石灰	1 275 000～2 550 000	2.13～4.25	w(CaO）75%,加入量0.5%～1.0%
合计		27.01～29.13	

3　磷石膏无害化处置后用于井下充填

3.1　用于井下充填项目的选址优化

结合磷石膏堆场管理要求及生产装置现状，按照就近原则，磷石膏改性、充填材料混配站应紧靠原石膏堆场或矿山充填站，但如果物流存在风险，最优方式是在原石膏堆场进行加工改性混配，同时可将w(H_2O）控制在15%以下，降低物流成本，多余压滤水可通过原石膏堆场导渗液收集池返回磷酸系统。在磷石膏干排磷酸生产工艺中，这种工艺较好，既能回收部分磷又增加系统补水，降低工艺取水量。

选址优化后优势：

（1）通过优化原磷石膏无害化工艺选址，尽可能利用原磷石膏场地，节约土地资金（5～10元/t）、物流费用、装载机装车上料、专职管理人员等费用，固定投资费用按一年全部折旧，第一年直接成本20.60～22.72元/t（见表5）。

表5　在堆场内进行无害化处理成本费用

Table 5　Cost schedule for harmless treatment conducted within the storage site

费用类别	总价/元	单价/(元·t^{-1})	备注
设备	3 000 000	5.00	皮带、搅拌器、泵、反应槽、平台、钢构、雨棚等(结合项目审批年限,按一年折旧)
过滤机	1 500 000	2.50	2台
人工	864 000	1.44	12人(三班两倒)
电耗	915 000	1.53	按0.7元/(kW·h)计算
装载机	0	0	
水(循环不计)		0	
管理人员	0	0	
装载机装车、堆存、维修		0	
固化药剂		8.00	
生石灰	1 275 000～2 550 000	2.13～4.25	w(CaO）75%,加入量0.5%～1.0%
合计		20.60～22.72	

（2）在原磷石膏场址进行无害化处置，充分利用原场地配套设施（磷石膏渗液收集池），对压滤后多余滤液进行收集。

（3）降低了无害化磷石膏水分，降低了到充填站的物流成本。

（4）回收少部分磷元素，因为该部分滤液为中性水（pH在6～9），可以部分改善磷酸反应系统洗水水质。

（5）解决了系统性清理、检修时排料问题，可利用原场地进行直接排料，不产生相应清理费用。

（6）通过选址优化，充分利用现有堆场条件，确保了生产过程环保风险可控、生产过程扬尘管控等问题。

3.2 磷石膏无害化处置后用于制备井下充填胶凝材料研究

当前国内磷石膏无害化处置后用于矿山采空区充填修复技术，主要应用于磷化工行业大省，如云南、湖北、贵州等地，多以地方性标准为主导，主要限用于磷矿山就地充填，而对于无磷资源省份的磷石膏充填在行政审批、环评批复、方案设计等方面，实际应用推动阻力较大。现在随着新的磷石膏充填应用国家标准颁布实施，从国家层面为磷石膏全国性应用推动创造了条件，做到了标准先行，为各地各类矿山修复的充填设计、胶凝原材料的选择及制备提供了环评、地方执法、第三方监理的各项法律执法标准，这为磷石膏多形式消纳应用的合法、合规可操作性提供了法律保障，特别是现在，国家层面已对企业、地方执法部门在磷石膏应用充填方面开展针对性的工作。企业面对高标准执法要求，其无害化工艺合理性选择、质量稳定性已成为磷石膏应用设计优先考虑的关键因素。

充填胶凝原材料选择及应用要求，按就近原则选择，充分利用当地企业产生的固废资源及专用胶凝剂[6]。

无害化处置后的磷石膏：用量 10% ~ 50%。在加入胶凝剂情况下，加入量还可以提升，需经过配比试验来确定；对不加入胶凝剂、抗压强度 2 MPa 以上的磷石膏，加入量 10% ~ 20%。由于水溶性磷、氟、有机质等相关杂质得到了有效控制，其强度指标在自然养护条件下，也能达到 2 MPa 以上，在不加入胶凝剂的情况下，其加入比例会受限制，具体需经过试验确定上限值。

425 硅酸盐水泥：用量 3% ~ 20%，可提高耐水性、强度、软化系数。若过量，会导致开裂等现象。用二水石膏与水泥掺混相对于半水石膏掺混方式，存在较大差异性，主要机制是利用水泥中的 C3A 与石膏生成钙钒石，如果两者用量不适宜，会导致过量钙钒石产生，体积膨胀，出现开裂，后期强度降低等问题。本实验中按 10%、5% 的量加入，从实验数据可以看出，初凝时间、终凝时间均满足实际充填作业时间，同时试块强度均能达到要求。在加入胶凝剂情况下，可考虑按 5% 加入或不加入。

粉煤灰：用量 0.3% ~ 30.0%。来自火力发电厂，未经任何处理，主要作用是与二水磷石膏、水泥碱性激发产生自硬性，作为活性材料，试验均采用自然养护方式，对其活性激发效果较差，对强度会有一定影响。

尾矿砂：用量 20% ~ 70%。作为骨料使用，该试验方案采用当地铜尾矿砂（主要成分二氧化硅，$w(SiO_2)$ 在 70% 以上），主要作用是增加流动性、强度，该尾矿砂未经粉磨，过 80 目（孔径 180 μm）筛，筛余量为 26.63%，过 230 目（孔径 62 μm）筛，筛余量为 65.78%。

铜渣：用量 5% ~ 10%。产自当地冶炼行业，可根据强度指标情况、费用成本选择性加入。

胶凝剂：用量 5% ~ 30%。在未加入情况下，7 d 强度也能达到 2.3 MPa。根据需要，选择性采购市场上针对铜尾矿砂的胶凝性材料，可根据强度指标调整磷石膏、水泥、胶凝剂三者的配比，降低费用，确定合理的配方比例。

磷石膏混配胶凝材料工艺流程见图 3。

磷石膏经湿法工艺无害化处置后，指标能稳定达到要求，在与相关集料组合时，改性磷石膏以 20% 比例加入，在不加入专用胶凝剂的情况，抗压强度也能达到 2 MPa 以上，达到充填要求。改性磷石膏以 10% 的加入量时，加入胶凝剂，28 d 强度可达到 19 MPa 以上，强度相对有所增加。该配比还

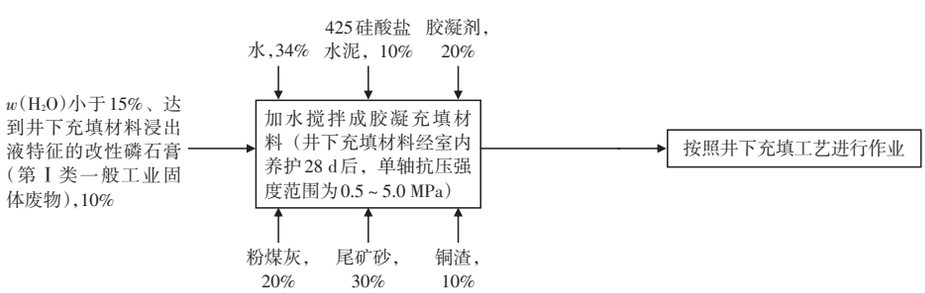

图 3 磷石膏混配胶凝材料工艺流程

Fig. 3 Process of phosphogypsum blended cementitious material

可以优化以降低成本，降低胶凝剂、425硅酸盐水泥的加入量，增大改性磷石膏的加入量。改性磷石膏不同配比强度指标见表6[3-7]。

通过优化配比后（见表7），可以在满足充填强度条件下，7 d抗压强度为3.95 MPa，28 d抗压强度为4.34 MPa，该配比后期强度变化不大，无衰减现象，能满足充填强度要求，同时大幅度降低充填成本。

通过多组分试验，磷石膏经无害化处置后，与适当集料混配后，用于井下充填是一种较稳定、安全环保风险低的磷石膏处置方式，在加入专用胶凝剂后，强度远高于充填要求，因此磷石膏经无害化处理后，适量加入胶凝剂情况下，加入比例还可以增大。

配方优化后胶凝材料充填成本测算见表8。从表8可以看出，结合当地一般固废资源利用，优化配比后，达到设计要求，合理控制强度指标，直接成本最低可降到约50元/t，同时无害化磷石膏的加入比例达到30%，是较经济的配比方式。

表6　改性磷石膏不同配比强度指标

Table 6　Strength indicators for modified phosphogypsum with different proportions

序号	w(改性磷石膏)/%	w(尾矿砂)/%	w(粉煤灰)/%	w(425硅酸盐水泥)/%	w(铜渣)/%	w(胶凝剂)/%	标准稠度用水量/%	扩展度/mm	初凝时间/h	终凝时间/h	7 d抗折强度/MPa	7 d抗压强度/MPa	28 d抗折强度/MPa	28 d抗压强度/MPa
1	10	30	20	10	10	20	38	180	26.67	34	1.50	15.26	1.60	19.29
2	10	50	20	10	10	0	38	185	35	59	0.78	3.14	1.02	3.29
3	20	40	20	10	10	0	38	180	44	42	0.54	2.32	0.64	3.43

表7　配方优化后强度指标（以一组数据为例）

Table 7　Strength indicators after formula optimization

序号	w(改性磷石膏)/%	w(尾矿砂)/%	w(粉煤灰)/%	w(425硅酸盐水泥)/%	w(铜渣)/%	w(胶凝剂)/%	标准稠度用水量/%	扩展度/mm	初凝时间/h	终凝时间/h	7 d抗折强度/MPa	7 d抗压强度/MPa	28 d抗折强度/MPa	28 d抗压强度/MPa
1	30	50	5	5	0	10	32	185	23	29	0.68	3.95	0.69	4.34

表8　配方优化后胶凝材料充填成本测算

Table 8　Cost calculation of cementitious material filling after formula optimization

序号	项目	单价/(元·t^{-1})	成本/(元·t^{-1})	备注(设备含土建安装)
1	无害化处置后磷石膏	20.60～22.72(加入量30%)	6.18～6.82	见表5
2	425硅酸盐水泥	270(加入量5%)	13.50	2025年7月价格
3	粉煤灰	25(加入量5%)	1.25	根据当地火电厂外卖价
4	胶凝剂	200(加入量10%)	20.00	根据强度可考虑降低加入量或不加
5	铜渣	25(加入量0)	0	根据当地冶炼厂外卖价,根据强度可考虑加入量或不加
6	尾矿砂	0(加入量50%)	0	矿山利废,就地充填
7	人工	6 000①	1.44③	12人(三班两倒,参考当地粉磨站配置)
8	电耗	0.575②	1.15	同类工艺,参考无害化处置成本
9	装载机	8 000①	0.36	1台,3人(三班两倒)
10	水	2	0.80	
11	管理人员	10 000①	0.20③	1人
12	装载机装车、堆存、维修		5.75	
15	合计		50.63～51.27	

注:①单位为元/(月·人);②单位为元/(kW·h);③按产能60万t/a核算。

根据设计充填强度指标、工艺配方要求，结合当地可用固废资源及不同企业补贴政策及地方补贴具体情况，合理调配胶凝剂 、水泥、磷石膏三者加入量是降低充填成本、选择经济性合理配比的关键。一是争取地方政府政策性补贴，该政策目前主要在贵州、湖北、四川、云南等几省有实施；二是化工行业磷石膏产生地企业补贴，如湖北、云南两省磷化工企业补贴结合物流距离，达到20～100元/t；三是在当前水泥行业产能受限情况下，如粉煤灰、铜渣固废处置均是倒挂企业现象，因此应结合各当实际情况，争取企业补贴，从而降低项目处置综合成本。

3.3　井下充填工艺流程及注意事项

3.3.1　工艺流程

工艺流程见图4。

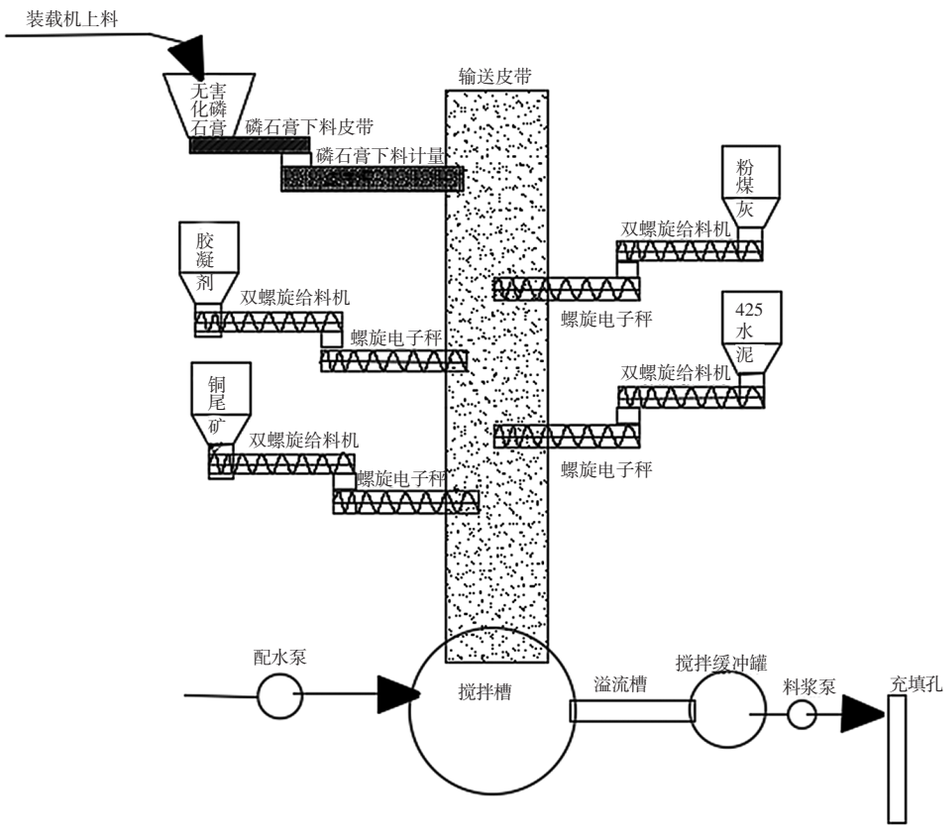

图 4　井下充填工艺流程

Fig. 4　Process flow of underground filling

某矿山采空区充填方案设计参照执行标准《金属非金属矿山充填工程技术标准》（GB/T 51450—2022）、《磷石膏的处理处置规范》（GB/T 32124—2024）、《磷石膏利用和无害化贮存污染控制技术规范》（HJ 1415—2025），其他指标满足 GB 18599—2020 中界定的第Ⅰ类一般工业固体废物标准要求。

3.3.2　注意事项

1）　胶凝材料配置注意事项

（1）无害化磷石膏根据工艺需求、物流经济性等综合情况，$w(H_2O)$ 控制在 14% ~ 30%，计量皮带秤要准确，严格按照计量精度要求配置、计量，输送安装长度需满足稳定性计量要求[7-8]。

（2）胶凝剂根据强度情况不加或适量加入，合理降低配方成本，建议加入 10%，确保强度。

（3）相关集料的螺旋电子秤精度等级需满足精准性配比要求，按计量误差允许范围内选择。

（4）配水泵应用变频调节控制，根据配料质量比按 38% 标准稠度用水量进行流量自动调节。

（5）搅拌槽物料通过溢流方式自流到搅拌缓冲槽，确保固含量稳定。

（6）料浆泵采取变频调节控制，根据充填情况合理控制充填量。

（7）配制过程中，严格取样分析强度，有条件建议考虑用标准恒温恒湿养护箱对试件进行养护分析。

（8）粉煤灰、425 硅酸盐水泥、尾矿砂、胶凝剂通过槽罐车气力输送到料仓内。

（9）由于磷石膏皮带输送存在一定误差，该输送量需与其他集料的输送量进行联锁，当磷石膏输送量出现波动时（如下料突然堵塞），其他集料下料量应能相应自动调节，同时配水泵流量（频率）也应相对应调节。

（10）确保无害化磷石膏分析各批次均达到标准，确保混配强度指标合格。

2）　井下充填注意事项

（1）整体项目设计需经环保部门审核，第三方环评论证，重点是确定充填物料及其理化特性、相关指标、充填工艺是否符合相关国标要求。

（2）每一段采空区应有专业资质设计院进行一对一充填方案设计，针对不同的采空区域情况，建立三维模型，计算出相关充填参数[7]。

（3）同一项目，结合地下矿道各段具体情况，需制定各段的具体充填施工方案，依据《项目充填统计方案》《充填体与围岩作用机理及合理充填强

度研究》等对不同采空区进行充填设计。施工方案包含以下相关内容[8]。

①该段设计应包含充填管道安装及位置选择，管道安装作业标准，因充填施工管道运行风险大、安全性要求高，设计需要详细注明具体参数要求，对应编制充填管道安装及拆卸危险源及应对措施。

②堵浆处理工艺，要考虑矿道充填段挡墙与岩体结合面，在充填实施前已采取喷浆堵漏方式，但仍存在喷浆不到位、顶板岩石裂隙发育等问题，会导致漏浆问题发生，因此在充填实施前须对该部位仔细检查，进行预堵漏，对应编制预堵漏危险源及应对措施。

③编制充填作业（地表）工作内容要求及危险源及应对措施。

④编制充填作业（井下）工作内容要求及危险源及应对措施。

⑤每一次充填施工前，都需对作业班组进行一次充填安全、技术交底。交底人、接底人都需签字认可。

⑥编制应急措施。应包含不局限于作业过程突发停电、设备故障、管道堵塞等。

⑦附图。各段充填设计图需注明出图设计依据、充填各项工艺参数，包括标高、充填量、各段面强度要求、浆体固含量、各集料用量、混凝土标号、挡墙工程量、浆体收缩率、疏水设施等。

4　结论

随着水泥行业的去产能化，目前脱硫石膏、氟石膏、磷石膏的消纳已成为影响各自行业发展的首要问题，而其中磷石膏在本体特性、政策及行业性补贴等方面不具有优势，导致磷化工行业磷石膏处置难度加大、处置成本呈持续上升趋势，随着磷石膏固废处理工艺的进步，国家层面应用标准的实施，给磷化工行业的发展创造了一个良好的局面。磷石膏经无害化工艺处置后，用于矿山采空区回填，可有效进行矿山修复，同时解决了磷石膏大量化、低成本消纳的问题，预计在相当长的一段时间内，该方式是确保磷化工长远稳定发展的最佳模式，在此过程中，通过湿法新工艺无害化处置，磷石膏本质环境安全性得到保障，又降低了现有矿山采空修复的成本，是符合当前及相当一段时期内国家固废处理政策发展趋势的。

［参考文献］

［1］ 杨冬蕾，何涛，唐正，等.石膏建筑材料标准汇编［M］.北京：中国建筑材料联合会石膏建材分会，2023.

［2］ 湖北省生态环保有限公司.一种磷石膏的浸洗剂和一种磷石膏的无害化处理方法：CN115893885B［P］.2023-07-14.

［3］ 中南大学，龙岩鑫亿豪环保科技有限公司.一种活化赤泥固化磷石膏中可溶性磷和氟的方法：CN118063124A［P］.2024-05-24.

［4］ 陈燕，岳文海，董若兰.石膏建筑材料［M］.2版.北京：中国建材工业出版社，2012：288-339.

［5］ 孙铁石，徐洛屹，赵云龙，等.石膏建筑材料生产与质量控制［M］.6版.北京：中国建筑材料联合会石膏建材分会，2022.

［6］ 姬成岗，谭娟，叶珊，等.基于矿坑（井）生态修复的磷石膏无害化改性研究［J］.环境科技，2024，37（6）：1-5.
JI C G，TAN J，YE S，et al. Research on Harmless Modification of Phosphogypsum Based on Ecological Restoration of Mining Pits［J］. Environmental Science and Technology，2024，37（6）：1-5.

［7］ 丁锐，陈玉琦，刘清顺，等.固废胶凝材料协同尾砂制备胶结充填材料的研究进展［J］.北方建筑，2024，9（5）：40-43.
DING R，CHEN Y Q，LIU Q S，et al. Research Progress on the Preparation of Cementitious Filling MaterialsUsing Solid Waste Cementitious Materials in Collaboration with Tailing［J］. Northern Building，2024，9（5）：40-43.

［8］ 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.金属非金属矿山充填工程技术标准：GB/T 51450—2022［S］.北京：中国计划出版社有限公司，2022.

（上接第56页）

LI W Y，ZHANG G Z，LI X L，et al. Production process of industrial grade monoammonium phosphate and influence of sulfate ions on its production process［J］. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2025，40（9）：32-36.

［17］ 冯孟黎，张笑盈，杨利仙，等.萃取法净化磷酸精脱硫工艺研究［J］.云南化工，2019，46（8）：107-109.
FENG M L，ZHANG X Y，YANG L X，et al. Study on desulphurization process of purified phosphate by extraction method［J］. Yunnan Chemical Technology，2019，46（8）：107-109.

［18］ 黄燕，傅亚男，胡健，等.湿法磷酸的脱硫研究［J］.贵州工业大学学报（自然科学版），2001，30（3）：68-74.
HUANG Y，FU Y N，HU J，et al. Investigation on Desulfation of Wet Process Phosphoric Acid［J］. Journal of Guizhou University of Technology（Natural Science Edition），2001，30（3）：68-74.

［19］ 刘正东，谭顺仓.降低湿法磷酸中硫酸含量的工艺技术［J］.磷肥与复肥，2016，36（8）：39-40，42.
LIU Z D，TAN S C. Technology of reducing sulfuric acid content in wet-process phosphoric acid［J］. Phosphate & Compound Fertilizer，2016，36（8）：39-40，42.

［20］ 张胜.湿法磷酸萃取反应条件对磷石膏结晶的影响［J］.硫磷设计与粉体工程，2025（1）：22-26.
ZHANG S. Effect of Wet Phosphoric Acid Extraction Reaction Conditions on Phosphogypsum Crystallization［J］. S P & BMH Related Engineering，2025（1）：22-26.