◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

磷石膏制备β型建筑石膏及自流平砂浆的全过程质量管控

谭国龙

（瓮福紫金化工股份有限公司，福建 龙岩 362400）

［摘 要］针对磷石膏基（P基）β型建筑石膏粉在自流平砂浆应用中易出现的泛碱、开裂及有机质析出等问题，提出1套从源头到施工端的全过程质量管控模式。通过分析磷矿石、制浆水等原料中钠、钾离子及有机质的迁移规律，确立了以“源头配矿—水洗净化—高温过烧—均化陈化”为核心的工艺控制策略。结果表明，采用195～210 ℃导热油煅烧及7 d以上陈化工艺，可有效稳定石膏三相组成（半水相占比>85%），使产品初凝、终凝时间差波动控制在120 s以内。经水洗净化后，磷石膏中水溶性磷、氟及盐分去除率达80%～90%，显著降低了施工后的泛碱风险。结合对施工环节中外加剂适配性及界面处理的严格管控，该模式在规模化应用中实现了无质量纠纷，为磷石膏高值化利用提供了可靠的技术范式。

［关键词］磷石膏；β型建筑石膏；全过程质量管控；水洗净化；施工性能；自流平砂浆

［中图分类号］X781 ［文献标志码］B ［文章编号］2097-4566（2026）06-0081-07

Quality control of the entire process of preparing β - building gypsum and self leveling mortar from phosphogypsum

TAN Guolong

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

Abstract: To address issues such as efflorescence, cracking, and organic matter precipitation in the application of phosphogypsum-based (P-based) β-building gypsum powder for self leveling mortars, a comprehensive quality control mode spanning from raw material sourcing to on-site construction is proposed. By analyzing the migration patterns of sodium, potassium, and organic matter in raw materials (phosphorus ore, slurry water, etc.), a core process control strategy featuring “source ore blending—water washing purification—high-temperature over-burning—homogenization aging” is established. The results indicate that using a conductive oil calcination process at 195 - 210 ℃ combined with over 7 days of aging, the three-phase composition of gypsum (the hemihydrate phase ratio exceeds 85%) is effectively stabilized, and the time difference fluctuation of initial and final setting times is limited within 120 seconds. After water washing purification, the removal rate of water-soluble phosphorus, fluorine, and salts is 80% - 90%, significantly mitigating efflorescence risks. Coupled with strict control over additive compatibility and interface treatment during construction, this model has no quality disputes across in large-scale applications, providing a reliable technical paradigm for the high-value utilization of phosphogypsum.

Key words: phosphogypsum; β-building gypsum; quality control of entire process; water washing purification; construction performance; self leveling mortar

自2018年石膏基建材逐步实现市场化应用以来，以半水硫酸钙为主要成分的磷石膏基β型建筑石膏粉（P基）与脱硫石膏基β型建筑石膏粉（S基）相比，在盐类杂质（钠离子、钾离子）、白度、有机质含量等方面存在明显短板。在同一区域市场中，同类石膏制品P基产品售价通常较S基产品低10～20元/t。采用磷石膏经煅烧制备β型建筑石膏粉并用于生产石膏自流平砂浆时，常出现以下

收稿日期：2025-08-12

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综合利用工作。

典型质量问题：（1）料浆收水完成后制品表层出现泛碱现象；（2）收水后表面开裂、水化不完全，制品强度偏低甚至无强度，且物料易结块；（3）制品表观质量差，有机质上浮溢出，表面出现黑色浮油，表层强度不足；（4）施工后出现脱底、空鼓缺陷。结合上述工程常见质量问题，系统分析其发生机制，总结生产与施工全过程管控经验，并提出针对性解决措施[1-4]。

1 典型质量问题成因分析

（1）表层泛碱现象。对制品表层结晶析出物成分检测分析表明，析出物质主要为钠盐、钾盐。建筑石膏粉水化过程中会释放水化热，制品经历升温、冷却阶段；若原料中钠离子、钾离子含量偏高，其溶解度随温度降低而下降，冷却过程中盐类离子便会在制品表面结晶析出，形成泛碱。

（2）施工收水后表面呈网状开裂、水化凝结不良、力学强度极低甚至无强度。主要原因为磷石膏煅烧过程中温度控制不稳定：一是严重过烧，导致产物中Ⅱ型无水石膏相占比过高，水化过程中发生体积膨胀、内部应力集中引发开裂；二是煅烧欠烧，二水石膏向半水石膏转化不完全，有效胶凝组分不足；三是施工单位片面追求施工效率，未按设计水胶比精准配料，加水量过大，造成硬化体结构疏松、强度丧失[5]。

（3）制品表面出现黑色浮油，主要成分为有机质（碳质组分）。搅拌、消泡施工工序中，有机质密度较小，易自然上浮至制品表面。其来源主要分为两类：一是磷矿石伴生碳质物质及磷矿浮选残留药剂；二是配方中添加的保水剂（高分子量纤维素醚）。施工时为缩短作业时间，搅拌反应时长不足，纤维素醚分解与反应不充分，易随浆体上浮并在表面析出；同时劣质纤维素醚类保水剂还会伴随产生刺激性异味。

（4）局部脱底、空鼓现象。经现场勘查确认：平面整体一次性浇筑成型的自流平砂浆整体成型效果良好，无起拱现象；与建设单位沟通并对脱底部位切割检查后发现，基层界面无有效界面处理痕迹，且残留浮灰。初步判定为基层界面处理工序施工不到位、存在漏项，导致自流平砂浆与基层黏结强度不足；同时基层内部水分蒸发速率不均，造成砂浆水化过程局部体积膨胀不一致，最终引发局部脱底、空鼓。

2 P基β型建筑石膏粉中钠、钾离子及有机质的来源

磷精矿与各类工艺废水调配为磷精矿浆，与硫酸在设定温度、搅拌条件下反应，反应产物再进行固液分离，液相为稀磷酸，固相通过滤盘洗涤，去除可溶性杂质与残留酸液，得到磷石膏成品。在该制备流程中，需重点跟踪原料体系内钠离子、钾离子及有机质（以碳计）的含量变化规律[6]。

（1）磷精矿：磷精矿中与建筑石膏性能密切相关的化学成分主要包括氧化铁、氧化镁、氧化铝、二氧化硅、氧化钙、有机碳、钾离子、钠离子、氯离子等。实际生产中，磷精矿中对建筑石膏粉性能影响显著的关键指标统计结果见表1。

表1 磷精矿指标

Table 1 Indicators of phosphorus ore

时间	w(有机碳)/%	w(总钾)/%	w(总钠)/%	w(氯离子)/%
1月	0.290	0.31	0.42	0.012
2月	0.180	0.35	0.46	0.014
3月	0.224	0.33	0.43	0.016
4月	0.224	0.37	0.45	0.017

注：数据取自2022年1—4月检测平均值。

通过为期4个月的数据跟踪监测，在磷矿矿源保持稳定不变的前提下，磷精矿中各项关键指标含量相对稳定，波动幅度较小，为后续磷石膏生产及石膏粉品质管控提供了稳定的原料基础。

（2）制浆用水：生产所用制浆用水主要来源于两类水体，第一类为磷石膏堆场导渗水，第二类为磷酸生产系统内各工艺装置产生的生产废水。上述两类废水统一汇入调均池，经充分混合、水质调节均匀后，作为制浆用水用于磷精矿浆调配，具体水质指标见表2。

表2 制浆水指标

Table 2 Indicators of slurry-making water

时间	w(水溶性K_2O)/%	w(水溶性Na_2O)/%
1月	0.061	0.170
2月	0.059	0.169
3月	0.060	0.174
4月	0.062	0.174

（3）滤盘洗水：滤盘洗水指标如表3所示。

表3 滤盘洗水指标

Table 3 Indicators of filter disc washing water

项目	w(水溶性K_2O)/%	w(水溶性Na_2O)/%
洗水1	0.092 1	0.115 6
洗水2	0.059 0	0.169 0
洗水3	0.011 5	0.027 4

（4）磷石膏指标：生成的磷石膏指标见表4。

表4　磷石膏指标

Table 4　Indicators of phosphogypsum

时间	w(总K_2O)/%	w(总Na_2O)/%	w(有机质)/%
1月	0.13	0.26	0.22
2月	0.19	0.28	0.20
3月	0.16	0.33	0.23
4月	0.14	0.24	0.21

传统磷化工行业，如不涉及氯碱化工，则系统内氯离子仅来自磷矿本身。经对P基建筑石膏粉多次分析可知，其w(Cl)一般在50～60 mg/kg，远低于S基建筑石膏粉0.05%的限值（参考标准为GB/T 9776—2022《建筑石膏》），因此氯离子的影响不考虑。

钠离子一般来自脱盐水再生（传统阴、阳树脂交换工艺或膜处理工艺）、脱色塔再生、尾气洗涤3个方面。

钾离子除了磷矿带入，其他主要来自磷酸下游磷酸盐类产品生产过程，系统洗涤过程产生的高含量钾离子废水会进入制浆水系统，但总量有限（因钾元素成本较高，一般生产线均会回收含钾废水进行二次利用）。

有机质主要来自原磷矿石伴生及磷矿浮选药剂残留，以及生产系统内部分有机介质形成的有机废水。有机废水单独处理工艺难度大、成本高，加之磷化工行业都执行零排放环保政策，主要处置方式是通过系统循环，随化工产品、磷石膏带走。

3　各影响因素源头控制方式

磷石膏作为磷化工行业的大宗副产物，其品质长期受上游生产装置与磷原矿品质制约，多处于被动管控状态。结合常规磷化工生产系统运行特点，可通过针对性管控手段，对磷石膏中钠离子、钾离子及有机质进行源头缓解与控制。

3.1　钾离子源头控制措施

磷酸盐类精细化工产品多按照食品级质量标准进行生产设计。对高浓度含钾系统进行清理作业时，采用脱盐水进行系统清洗；清洗后的高钾废水洁净度较高、未受严重污染，可直接回用于系统配浆工序，用于生产低养分精细磷酸盐产品。该方式既可减少钾离子进入磷酸主反应系统的总量，又能实现钾资源的回收利用，降低钾元素流失损耗。

3.2　钠离子源头控制措施

脱盐水系统阴离子树脂再生所用碱液质量分数通常为1%～3%，碱洗涤工艺碱液质量分数为5%～8%。针对高浓度含钠废水，可增设废水缓存调节槽，将其优先用于尾气洗涤工序，通过烟气吸收或产品夹带的方式带出部分钠离子，有效削减进入磷酸反应系统的钠离子总量。

3.3　有机质源头控制措施

针对生产系统内有机介质物料，可采用冷却、吸附、洗涤等工艺进行回收循环利用，提升有机介质循环使用率、降低物料损耗，减少有机质随废水进入磷酸反应系统的总量。

3.4　小结

各类有害杂质均以生产用水为载体进入磷酸反应系统，进而影响磷石膏品质。开展源头总量管控时，应通过高低品位原料调配、水质均衡混配等方式，稳定进入磷酸反应系统的各类水质，保证杂质含量均衡可控，实现磷石膏品质稳定，为后续净化处理提供基础条件。通过实施稳定配矿、水质均质调节等管控措施，保障磷酸反应系统平稳运行，从源头稳定磷石膏品质，为后续石膏煅烧、制品制备等工序的稳定生产创造有利条件。

4　磷石膏预处理

用于石膏建材生产的磷石膏，需满足GB/T 23456—2018《磷石膏》中一级或二级产品指标要求[7]。在保障磷酸反应系统稳定运行的前提下，所产出的原生磷石膏仍无法直接用于制备β型建筑石膏粉，必须开展针对性净化预处理。目前行业内主流净化处理方式主要包括自然堆存法、石灰中和法、水洗净化法3类。

（1）自然堆存法。将磷石膏自然堆存1年以上，依靠自然降水淋洗作用，降低物料中磷、氟、钠、钾等可溶性杂质含量，同时提升体系pH。但受当前环保政策管控，自然堆存场地需配套完善防渗设施并完成无害化处置，政策层面原则上不再审批新建磷石膏堆场；加之该工艺占地面积大、环境风险较高，仅适用于早期建成的磷化工企业。受自然气候条件、堆存时长等因素影响，经自然堆存后的磷石膏杂质指标稳定性较差，需在生产前逐批次检测分析，再根据检测结果择优取用。

（2）石灰中和法。通过投加石灰调节磷石膏体系pH，同时去除水溶性磷、氟杂质。但石灰的引入会显著干扰建筑石膏粉的凝结时间、力学强度等关键性能指标，对后续石膏制品质量造成不利影响，因此该工艺不适用于β型建筑石膏粉的生产制备。

（3）水洗净化法。采用足量清水对磷石膏进行水洗处理，使水溶性杂质充分溶解于水中，再经压滤、风干脱水等工序，可稳定将磷石膏品质提升至

国标一级或二级水平，满足β型建筑石膏粉的生产原料要求。磷石膏水洗净化流程见图1。需重点说明的是，在磷酸生产副产磷石膏的过程中，系统需持续补充制浆用水、洗涤用水以保障二水硫酸钙结晶生成；在干法排渣、二水法磷酸生产工艺中，全年系统水平衡多数时段处于负平衡状态（汛期堆场调洪除外）。尤其厂区及磷石膏堆场配套完善雨污分流设施时，生产系统的用水缺口进一步扩大，为磷石膏水洗净化工艺的稳定实施提供了充足的用水条件。

磷石膏水洗净化处理前后指标统计情况分别见表5、表6。

通过生产数据对比可得以下结论：（1）原磷石膏经水洗净化后，钠离子、水溶性磷、水溶性氟等指标均可达到GB/T 23456—2018中一级磷石膏要求（w（水溶性Na_2O）≤0.06%，w（水溶性P_2O_5）≤0.20%，w（水溶性F^-）≤0.10%），水洗后w（H_2O）14%～16%，经库存陈化可降至15%以下。工艺核心控制洗涤水pH≥10，且严禁石灰中和渣进入压滤系统，既可保证洗后石膏pH≥4、减少洗水用量与洗涤时间，又不影响压滤机产能，水溶性杂质去除率可达80%～90%。实际生产中，洗水循环至一定浓度后，需结合系统水平衡补充低浓度废水或进行工艺水置换，保障磷石膏品质，为后续石膏粉生产奠定基础。（2）单纯水洗、脱水工艺对磷石膏中有机质无明显去除效果。工业上去除有机质、提升白度多采用正反浮选、剥离药剂等工艺，本文不做详述。

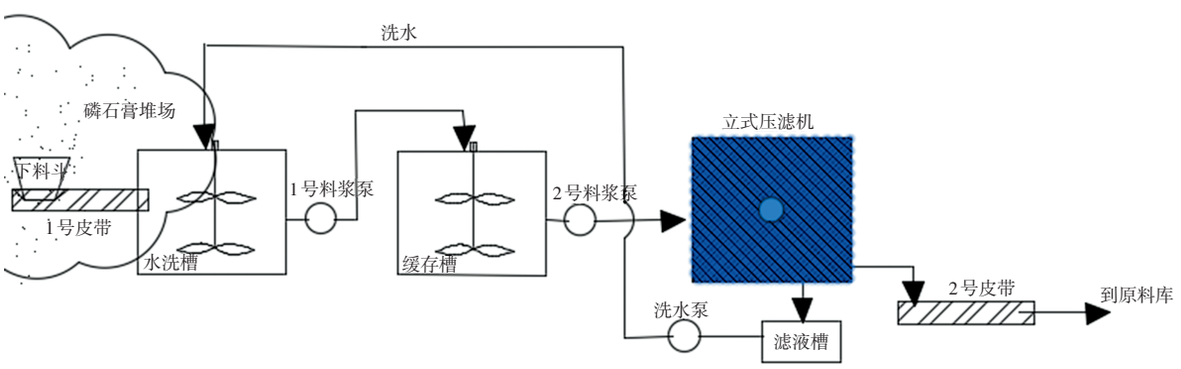

图1 磷石膏水洗净化流程

Fig. 1 Purification process of phosphogypsum water washing

表5 水洗净化前原磷石膏指标

Table 5 Indicators of raw phosphogypsum before water washing and purification

时间	pH	w(水溶性磷)/%	w(水溶性氟)/%	w(水溶性K_2O)/%	w(水溶性Na_2O)/%	w(有机质)/%
1月	2.62	0.35	0.28	0.050	0.070	0.22
2月	2.62	0.65	0.34	0.084	0.080	0.20
3月	2.69	0.40	0.28	0.060	0.060	0.23
4月	2.60	0.37	0.30	0.050	0.067	0.21

表6 水洗净化后磷石膏指标

Table 6 Indicators of phosphogypsum after water washing and purification

时间	pH	w(水溶性磷)/%	w(水溶性氟)/%	w(水溶性K_2O)/%	w(水溶性Na_2O)/%	w(有机质)/%
1月	5.61	0.03	0.020	0.005	0.008	0.20
2月	5.50	0.05	0.040	0.006	0.007	0.26
3月	5.99	0.04	0.034	0.004	0.008	0.22
4月	5.70	0.03	0.030	0.005	0.007	0.23

5 水洗净化后的磷石膏生产β型建筑石膏粉

5.1 生产工艺及产品质量

生产工艺：水洗后的磷石膏经由上料皮带输送至锁风下料器，进入烘干破碎机脱去游离水；随后在引风机抽风、鼓风机送风形成的负压状态下，进入煅烧脱水机。导热油经链排炉加热后，在脱水机内与磷石膏进行换热煅烧，将二水石膏转化为半水石膏；物料经改性磨研磨后送入成品料仓，通过风冷均化实现石膏三相稳定转换，再经陈化处理，最终制得性能稳定的β型建筑石膏粉。

该工艺具备布局紧凑、占地面积小、固定投资低的特点，且导热油传热系数高、热容量大，系统热量波动时，短时间内不会对产品质量产生明显影响。本工艺对应生产线规模为20万t/a，经三年多实际运行，结合企业磷石膏原料特性，生产中采用过程过烧工艺：将煅烧脱水机进口油温控制在195～210 ℃，高于传统煅烧温度（175～185 ℃），出口油温控制在180～190℃，此参数下石膏三相合格率可达100%。

产品质量：物料经7 d以上均化处理，出仓料温控制在40 ℃以下，同一均化仓出库产品初凝、终凝时间差值不超过120 s；当水溶性磷、氟质量分数≤0.05%时，产品初凝时间为6～9 min，终凝时间为10～14 min，性能稳定性优异。2023年以来，自流平砂浆A/B料施工模式广泛应用，对石膏产品指标稳定性提出更高要求，该工艺生产的β型建筑石膏粉凭借出色的性能稳定性，获得A/B料市场高度认可。β型建筑石膏粉指标见表7、表8。

表7　2022年1—8月β型建筑石膏粉产品Na_2O、K_2O及有机碳含量

Table 7　Content of Na_2O, K_2O, and organic carbon in β-building gypsum from January to August 2022

取样日期	w(总Na_2O)/%	w(总K_2O)/%	w(有机碳)/%	取样日期	w(总Na_2O)/%	w(总K_2O)/%	w(有机碳)/%
2022-01-08	0.047 5	0.044 8	0.24	2022-05-07	0.045 0	0.050 0	0.21
2022-01-09	0.046 6	0.049 8	0.18	2022-05-09	0.046 0	0.040 0	0.19
2022-01-10	0.049 1	0.057 4	0.20	2022-07-25	0.043 7	0.044 3	0.21
2022-01-15	0.048 4	0.022 9	0.18	2022-07-26	0.040 1	0.046 9	0.19
2022-04-14	0.043 2	0.065 1	0.20	2022-07-27	0.040 8	0.038 4	0.21
2022-04-15	0.046 0	0.068 4	0.24	2022-07-29	0.043 1	0.057 6	0.18
2022-04-21	0.042 8	0.035 2	0.18	2022-08-04	0.040 0	0.030 0	0.22
2022-04-22	0.045 9	0.035 5	0.20	2022-08-05	0.048 0	0.030 0	0.21
2022-04-24	0.049 8	0.037 2	0.18	2022-08-06	0.049 0	0.040 0	0.18
2022-05-01	0.048 3	0.034 1	0.20	2022-08-07	0.050 0	0.030 0	0.20
2022-05-02	0.040 0	0.040 0	0.21				

表8　2022年1—8月出厂样指标

Table 8　Indicators of ex-factory samples from January to August 2022

序号	标准稠度/%	扩展度/mm	初凝时间/min	终凝时间/min	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	w(二水相)/%	w(半水相)/%	w(无水相)/%
1	65	180	7.23	12.19	6.6	3.1	1.18	85.37	0
2	65	180	6.97	12.02	6.5	3.1	0.08	89.02	0
3	65	185	6.83	11.10	6.3	3.1	1.62	82.48	0.89
4	65	180	6.45	11.30	6.2	3.1	1.39	87.33	0
5	67	185	7.33	13.52	6.2	3.1	1.28	87.32	0
6	67	185	7.53	13.35	6.2	3.1	0.03	85.18	0.89
7	65	185	7.90	13.59	6.7	3.1	0.69	87.85	0
8	67	180	5.95	10.20	7.0	3.1	0.10	88.81	0
9	65	185	7.98	13.54	6.4	3.1	0.27	86.54	0

5.2　装车出库管理

物料经风冷降温至70 ℃以下（超负荷运行时料温最高可达80 ℃）后送入成品料仓，为保障出厂产品质量稳定，需实施精细化出库管控。

（1）槽罐车散装出厂管控。出厂取样参照GB/T 9776—2022执行，标准规定每60 t为一个检验批次，本企业执行更严格的内控标准：槽罐车装车前、装车完成后分别取样，按32 t两次样品的指标对比开展质量管控。若指标偏差较大，及时同步下游客户，协同调整外加剂掺量，保障终端产品质量稳定。

（2）吨包装出厂管控。吨包装产品主要供应A/B料现场现配施工市场，对产品稳定性要求更高。实际管控中，每10袋（10～12 t）为一组取样检测，指标出现明显波动时立即进行抽包复检。

两种出库方式均要求β型建筑石膏粉温度低于40 ℃，物料需在料仓内均化7 d以上（具体时长根据料层高度调整）。吨包产品可先包装、冷却后出厂；槽罐车运输至下游后，可经空气输送至包装仓再次降温。需特别说明：开展小样试验时，料温必须降至40 ℃以下，常温状态最佳，试验数据才具

备代表性，可精准确定掺合料添加比例。

受全项分析检测周期限制，无法满足客户快速反馈需求，对于工艺成熟稳定的生产线，可仅检测标准稠度、初凝时间及终凝时间，即可快速判定产品质量。

实际生产中，槽罐车难以实现专车专用，常转运水泥、粉煤灰等物料。装车前必须确认罐体已彻底清理，否则残留杂质会造成石膏粉无标稠、速凝等异常现象。无缓凝剂条件下，粉煤灰与β型建筑石膏粉直接接触水化会快速激发速凝，易引发质量误判，需重点防控。

6 β型建筑石膏粉配制自流平砂浆

采用磷石膏基β型建筑石膏粉制备石膏自流平砂浆，主要分为有砂型与无砂型两大体系，本文以工程应用更广泛的有砂型石膏自流平砂浆作为研究对象。在保证石膏粉三相组成、标准稠度、凝结时间、流动扩展度等核心指标稳定可控的前提下，添加外加剂能够显著降低自流平砂浆在现场施工中出现开裂、泛碱、空鼓、强度不足等质量问题的概率。受磷矿矿源、磷酸生产工艺、水洗净化及煅烧制度差异影响，不同批次磷石膏基β型建筑石膏粉的水化活性、杂质含量、凝结特性波动较大，需通过系统的外加剂配比试验确定最佳掺配方案。

目前国内外加剂生产企业众多，产品品质、价格、与磷石膏体系的适配性存在明显差异，并非高价产品性能更优，需结合本企业磷石膏原料特性进行反复试配与筛选，优先选用行业内应用成熟、口碑稳定的外加剂体系。同一批次β型建筑石膏粉搭配不同厂家的纤维素醚在相同条件下进行试配，砂浆表观状态、保水效果、表面浮油及强度表现差异十分显著，具体试验结果如图 2 所示。

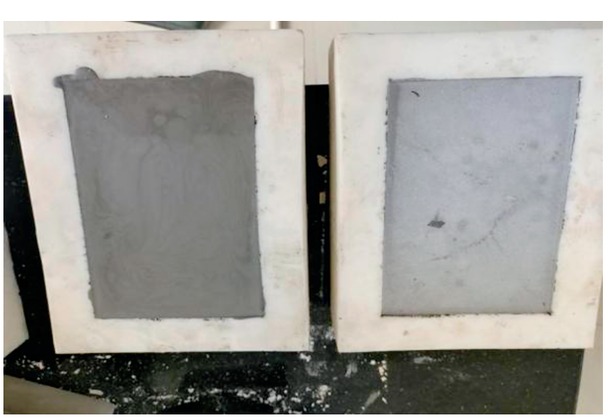

图 2　不同厂家纤维素醚小样试验结果

Fig. 2　Test results of cellulose ether samples from different manufacturers

常用外加剂选型及掺量控制如下。

（1）硅酸盐水泥。选用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥，掺量控制在 3% ~ 10%，本研究确定掺量为 5%。水泥水化可生成钙矾石等水化产物，有效提升自流平硬化体的结构密实度、力学强度及耐水性能；但水泥掺量过高易导致体系水化膨胀应力增大，引发后期开裂、变形等问题，需严格控制掺量范围。

（2）骨料。选用洁净建设用砂，严格控制含泥质量分数≤4%，优先采用经水洗、筛分处理的级配砂，掺量范围 20% ~ 70%，本研究采用 25%。级配合理的骨料可显著提升砂浆流动性、抗压抗折强度，同时改善浆体和易性，减少泌水、离析现象，保障施工成型质量。

（3）缓凝剂。主要用于调节自流平砂浆的可施工时间窗口。石膏体系凝结时间受原料品位、煅烧工艺、陈化均化效果、加水量、搅拌制度及可溶性杂质影响显著。磷石膏中残留的水溶性磷具有天然缓凝作用，而钠盐、钾盐则表现为促凝效果，需根据原料实际状态针对性选择缓凝剂种类与掺量。缓凝剂过量会大幅度降低硬化体早期及后期强度，本体系缓凝剂掺量取 1%，控制初凝时间为 80 ~ 150 min、终凝时间为 90 ~ 160 min，初终凝时间差控制在 3 ~ 10 min，兼顾施工可操作性与早期强度发展。

（4）减水剂。采用高效复合型减水剂，保障砂浆 30 min 流动度≥140 mm，同时具备低泌水、强度不衰减的特点，掺量区间 0.1% ~ 5.0%，本研究选用掺量 3%。减水剂可在低水胶比条件下提升浆体流动性，优化内部孔隙结构，提高硬化体密实度与强度。

（5）保水剂（纤维素醚）。主要作用为体系保水、抑制水分过快散失，分为高黏度与低黏度两类。磷石膏基石膏粉对纤维素醚较为敏感，需根据原料有机质含量、杂质水平精准确定掺量，并保证充足搅拌时间。本体系掺量为 0.1% ~ 0.2%，搅拌时间不低于 5 min，避免纤维素醚水解不充分而在表面析出，产生黑色浮油与刺激性异味。

（6）消泡剂。用于消除砂浆水化放热、搅拌过程中产生的气泡，避免制品内部形成孔隙、表面出现针孔与麻面，防止因应力集中导致开裂、表层强度不足等缺陷，可与机械振捣配合使用，掺量一般不超过 1%，本研究取 0.6%。

7 石膏自流平施工环节管控

2018—2022 年石膏基建材规模化推广应用初

期，多数现场施工班组仍沿用水泥基自流平粗放式施工管理模式，普遍存在基层界面处理不到位、加水量随意调整、搅拌工艺管控不严、设备清洗不及时等问题，极易引发制品开裂、强度偏低、管道堵塞、空鼓脱层等质量纠纷。2023年以后，随着行业施工技术日趋成熟、标准化施工规范逐步普及，石膏自流平施工类质量事故显著下降。2023—2024年，瓮福紫金化工股份有限公司累计对外销售磷石膏基β型建筑石膏粉21万余吨，通过派驻技术人员现场对接、施工问题联合诊断、全过程技术跟踪，未发生因产品本身导致的质量赔偿事故。

7.1　基层处理与界面剂施工

界面剂可显著提升自流平砂浆与基层界面的黏结强度，有效预防后期空鼓、脱底问题，同时隔离基层内部多余水分，避免水分迁移引发泛碱。施工前基层表面必须坚实、洁净、无浮灰、油污、空鼓及疏松结构，存在破损部位需提前修补找平。界面剂宜采用两遍薄涂施工工艺，严格控制涂刷时间间隔，待界面剂完全实干、形成封闭薄膜后方可开展自流平浇筑施工。

7.2　加水量、纤维素醚掺量及搅拌制度控制

受磷石膏原料特性影响，不同批次β型建筑石膏粉的加水量敏感性差异较大，同时纤维素醚作为关键外加剂，其掺量控制尤为重要：一是纤维素醚原料成本占比较高，过量掺配会大幅度增加生产成本；二是掺量过高易导致砂浆表面泌黑、保水过强、表层强度下降；三是必须保证搅拌时间≥5 min，确保纤维素醚充分水解分散，避免局部团聚上浮。

7.3　初凝、终凝时间管控

机械化泵送施工对砂浆凝结时间要求严苛。初凝时间过短易造成管道堵塞、施工中断；初凝、时间过长则会延缓强度发展，降低施工效率。初终、凝时间差宜控制在5～10 min，差值过小易导致水化反应不充分、强度偏低；差值过大则体系内部水分迁移加剧，更易引发制品表面泛碱。

7.4　施工后设备与管线清理

单次施工结束后，必须对搅拌设备、输送管道、泵送系统进行及时彻底冲洗，防止残留砂浆硬化结块，造成设备堵塞、管路损坏，同时避免残留硬化体混入下一批次砂浆，引发浆体异常结块、水化失效、强度骤降等质量问题。

8　结论

基于企业实际磷石膏生产与应用体系，系统梳理了从磷石膏源头管控、水洗净化、煅烧制备β型建筑石膏粉，再到自流平砂浆配方设计与现场施工的全流程关键控制点，可为同类磷石膏建材企业提供工程参考。

（1）通过稳定磷酸工段配矿制度、优化制浆用水与滤盘洗水水质，从源头稳定磷石膏中钠、钾离子及有机质含量，保障原料品质波动可控。

（2）水洗净化工艺需配套高效压滤设备与合理洗涤制度，精准控制洗涤水pH与循环置换节奏，使磷石膏达到建筑石膏原料使用要求。

（3）煅烧工段采用适度过烧工艺，严格控制导热油进出口温度，强化成品风冷均化与长期陈化，严控出料温度，保障石膏三相组成稳定。

（4）执行严于国家标准的出厂检验制度，建立与下游客户的提前沟通机制，针对A/B料现配施工体系，及时同步产品指标波动信息，指导客户动态调整外加剂掺量。

（5）根据磷石膏杂质特性优选适配外加剂体系与供应商，精准控制纤维素醚等敏感外加剂掺量，明确现场施工核心工艺参数。

（6）建立常态化客户技术沟通与施工全过程跟踪机制，提前预判潜在质量风险，及时处置现场异常问题，有效降低质量纠纷与赔付风险。

［参考文献］

［1］ 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.

［2］ 孙铁石，徐洛屹，赵云龙.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.

［3］ 滕朝辉，王文战，赵云龙.工业副产石膏应用研究及问题解析［M］.北京：中国建材工业出版社，2020.

［4］ 焦艺.石膏基自流平的应用及施工［J］.砂浆&保温，2025（8）：42-46.

［5］ 何勤，张琼琼，陈勇，等.磷石膏煅烧建筑石膏技术及应注意的问题［J］.新型建筑材料，2018，45（10）：49-52.
HE Q，ZHANG Q Q，CHEN Y，et al.The phosphogypsum calcining technology for building gypsum production and the problems should be paid attention to［J］. New Building Materials，2018，45（10）：49-52.

［6］ 彭家惠.磷石膏建材资源化关键共性问题［C］//第二十五届全国磷复肥行业年会论文集.郑州：［出版者不详］，2018：342-357.

［7］ 国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会.磷石膏：GB/T 23456—2018［J］.北京：中国标准出版社，2018.