

磷石膏基半水石膏制备无砂自流平砂浆研究

王前进, 阮运春, 颜 鹏, 胡 波, 林世俊, 薛绍秀, 张哲睿, 张 文

(瓮福(集团)有限责任公司, 贵州 福泉 550500)

[摘要] 以水洗预处理的磷石膏为原材料, 分别制备 α 型高强石膏与 β 型建筑石膏, 并系统研究二者配比、石膏掺水量及外加剂(减水剂、稳定剂、消泡剂、缓凝剂)掺量对自流平砂浆流动度、凝结时间和抗压强度的影响。实验结果表明: 在固定其他变量条件下, 砂浆流动度随 α 、 β 配比, 石膏掺水量及外加剂掺量的增加而增加(30 min 流动度范围87~180 mm); 抗压强度随 α 、 β 配比的增加而提升(绝干抗压强度范围12.47~39.53 MPa), 但随着石膏掺水量增大而降低; 凝结时间则可通过缓凝剂掺量有效调控(终凝时间106~328 min)。研究进一步验证了 α 型高强石膏与 β 型建筑石膏复配使用的经济性, 在满足标准(JC/T 1023—2021)性能要求的前提下, 可显著降低材料成本。

[关键词] 磷石膏; α 型高强石膏; β 型建筑石膏; 无砂自流平砂浆

[中图分类号] X781 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566(2025)05-0094-07

Study on sand free self-leveling mortar preparation from phosphogypsum based hemihydrate gypsum

WANG Qianjin, RUAN Yunchun, YAN Peng, HU Bo, LIN Shijun, XUE Shaoxiu, ZHANG Zherui, ZHANG Wen
(Wengfu (Group) Co., Ltd., Fuquan 550500, China)

Abstract: The α -type high strength gypsum and β -type building gypsum are prepared from pre-washed phosphogypsum, and the effects of the ratio of the two, the amount of water added and the amount of admixtures (water reducing agent, stabilizer, defoamer, retarder) on the fluidity, setting time and compressive strength of self-leveling mortar are systematically studied. The experimental results show that the mortar fluidity increases with the increase of α , β ratio, gypsum water content and admixture content (30 min fluidity range 87 - 180 mm) under fixed other variables. The compressive strength increases with the increase of α , β ratio (the absolute dry compressive strength ranges from 12.47 MPa to 39.53 MPa), but decreases with the increase of gypsum water content. The setting time can be effectively controlled by the dosage of retarder (the final setting time is 106 - 328 min). The study further verifies the economy of the combination of α -type high-strength gypsum and β -type building gypsum, and can significantly reduce the material cost under the premise of meeting the performance requirements of the standard (JC/T 1023—2021).

Key words: phosphogypsum; α -type high-strength gypsum; β -type building gypsum; sand free self-leveling mortar

0 引言

磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的副产物, 每生产磷酸1 t产生磷石膏4.5~5.5 t。我国磷石膏年排放量超7 500万t, 历史堆存量已逾8亿t, 尽管贵州等省通过建材化利用实现了磷石膏综合利用率100%^[1], 但全国范围内仍面临区域分布不均、高附加值产品开发不足等挑战, 其长期露天堆存不仅占用土地资源, 还易引发渗滤液污染地下水及扬尘问题^[2]。因此, 开发磷石膏高效资源化利用技术对实现“双碳”目标与循环经济发展具有重要意义。

近年来, 磷石膏建材化利用成为研究热点, 其

中制备建筑石膏粉是主要方向之一。通过转晶和煅烧工艺调控, 磷石膏可分别转化为 α 型高强石膏或 β 型建筑石膏, 分别适用于模具制造、墙体材料等领域^[3-4]。在此基础上, 石膏基自流平材料因其施工效率高、平整度优异等特点, 逐渐替代传统水泥

[收稿日期] 2025-01-08

[作者简介] 王前进(1996-), 男, 贵州思南人, 助理工程师, 主要从事磷石膏综合利用相关工作。

[通信作者] 阮运春(1990-), 男, 贵州福泉人, 工程师, 主要从事磷石膏综合利用相关工作; 颜 鹏(1975-), 男, 贵州湄潭人, 高级工程师, 主要从事磷化工及磷石膏综合利用相关工作。

基材料，成为建筑地面找平的主流选择^[5]。然而，现有研究多聚焦于含砂石膏基自流平体系，其骨料占比高可能导致收缩率增加及流动度下降^[6-7]。相比之下，无砂体系通过优化胶凝材料配比及添加剂协同作用，可进一步提升流变性能并简化施工工艺，但相关研究仍存在空白。

针对上述问题，本研究以磷石膏基半水石膏为核心原材料，系统探究无砂自流平材料的制备工艺与性能调控机制。通过分析 α 型高强石膏与 β 型建筑石膏配比(简称 α 、 β 配比)、石膏掺水量及外加剂掺量对自流平砂浆性能的影响规律，旨在构建高性能无砂自流平材料的制备技术体系。该研究结果不仅可为磷石膏高值化利用提供技术支撑，还将推动自流平材料向轻质化、低碳化方向升级^[8-9]。

1 原材料与实验方法

1.1 原材料

实验所用原材料有磷石膏(水洗石膏)、磷石膏基半水石膏(α 型高强石膏和 β 型建筑石膏)、外加剂(减水剂、稳定剂、消泡剂和缓凝剂)和水(工艺水)。

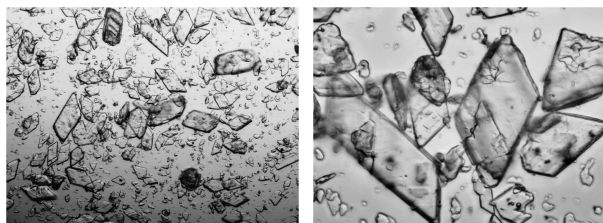
1.1.1 水洗石膏的制备

制备 α 型高强石膏与 β 型建筑石膏的原材料为经水洗预处理过的磷石膏(水洗石膏)，水洗石膏制备过程如下：磷石膏自堆场经汽车运输至40万t/a水洗石膏装置，按1份磷石膏加入1~2份的工艺水(pH 7~8)，将磷石膏制备成浆体，经洗涤、抽滤，去除表面黑色漂浮物、水溶性磷和氟等杂质，即成为制备 α 型高强石膏和 β 型建筑石膏的原材料(水洗石膏)，其性能指标见表1，晶型见图1。

表1 水洗石膏性能指标

Table 1 Performance index of washed gypsum

pH	w (附着水)/%	w (结晶水)/%	w (二水硫酸钙)/%	w (总磷)/%	w (水溶性磷)/%	w (水溶性氟)/%	粒径>0.074 mm 占比/%
5.8	15	19.5	93.18	0.30	0.05	0.02	75



a. 40倍镜下的磷石膏晶型 b. 100倍镜下的磷石膏晶型

图1 利用偏光显微镜观察到的水洗石膏晶型

Fig. 1 Crystal form of washed gypsum observed by polarizing light microscope

磷石膏(水洗石膏)晶型为片状，水溶磷、水溶氟含量低。

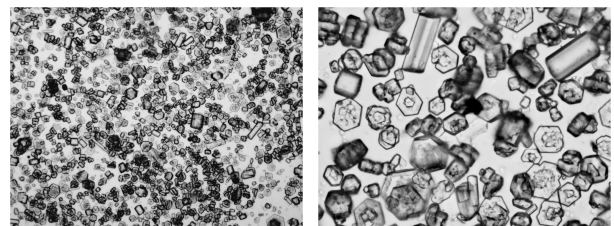
1.1.2 α 型高强石膏的制备

α 型高强石膏取自瓮福(集团)有限责任公司20万t/a α 型高强石膏装置(出厂价500~1000元/t)。 α 型高强石膏制备过程如下：水洗预处理过的磷石膏，经多级槽型皮带输送机进入转晶器中，密闭高温高压条件保持一定时间，水洗石膏从二水石膏形态转变为 α 型半水石膏形态，经二级干燥后粉磨，即得 α 型高强石膏，其性能指标见表2，晶型见图2。

表2 α 型高强石膏性能指标

Table 2 Performance index of α -type high-strength gypsum

标准稠度石膏 用水量/%	凝结时间/min		强度/MPa		pH
	初凝	终凝	2 h抗折强度	干抗压强度	
35.5	9	12	7.2	49.2	5.3



a. 40倍镜下的 α 型高强石膏晶型 b. 100倍镜下的 α 型高强石膏晶型

图2 利用偏光显微镜观察到的 α 型高强石膏晶型

Fig. 2 Crystal form of α -type high strength gypsum observed by polarizing light microscope

α 型高强石膏晶型呈短柱状，标准稠度石膏用水量低，干抗压强度高。

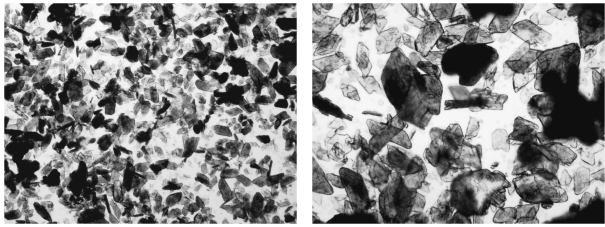
1.1.3 β 型建筑石膏的制备

β 型建筑石膏取自瓮福(集团)有限责任公司70万t/a β 型建筑石膏装置(出厂价180~300元/t)。 β 型建筑石膏制备过程如下：水洗预处理过的磷石膏，经多级槽型皮带输送机送入烘干机中，高温烘干脱除附着水后，经刮板式链运机和斗提机进入沸腾炉中，高温煅烧脱除结晶水，粉磨后进入料仓中陈化一定时间，即得 β 型建筑石膏，其性能指标见表3，晶型见图3。

表3 β 型建筑石膏性能指标

Table 3 Performance index of β -type building gypsum

标准稠度石膏 用水量/%	凝结时间/min		强度/MPa		pH
	初凝	终凝	2 h抗折强度	干抗压强度	
60	4	7	3.4	17.8	5.1



a. 40倍镜下的β型建筑石膏晶型 b. 100倍镜下的β型建筑石膏晶型

图3 利用偏光显微镜观察到的β型建筑石膏晶型

Fig. 3 Crystal form of β-type building gypsum observed by polarizing light microscope

β型建筑石膏晶型为片状，标准稠度石膏用水量高，干抗压强度低。

1.1.4 外加剂

实验制备石膏基无砂自流平砂浆所用外加剂有减水剂、缓凝剂、消泡剂、稳定剂，均为外购（瑞

士某一牌），各类外加剂主要成分见表4。

表4 石膏基无砂自流平砂浆外加剂主要成分

Table 4 Main ingredient of gypsum based sand free self-leveling mortar admixture

序号	外加剂	主要成分
1	减水剂	改性聚羧酸盐、萘系磺酸盐、木质素磺酸盐
2	消泡剂	有机硅化合物、聚醚改性硅氧烷、矿物油基消泡剂、聚醚类非离子表面活性剂
3	稳定剂	纤维素醚、多糖类生物聚合物、膨润土、聚乙烯醇
4	缓凝剂	葡萄糖酸钠、磷酸盐、柠檬酸/酒石酸

1.1.5 石膏基无砂自流平砂浆物理性能要求

石膏基无砂自流平砂浆物理性能要求，参照《石膏基自流平砂浆》(JC/T 1023—2021)标准，详见表5。

表5 石膏基无砂自流平砂浆物理性能要求

Table 5 Physical property requirements of gypsum based sand free self-leveling mortar

项目		30 min	24 h抗折	24 h抗压	绝干抗折	绝干抗压	28 d烘干拉伸	尺寸	抗冲击
		流动度/mm	强度/MPa	强度/MPa	强度/MPa	强度/MPa	黏结强度/MPa	变化率/%	性能
性能	G20	≥140	≥2.0	≥6.0	≥5.0	≥20.0	≥1.0	±0.05	无开裂或
指标	G25	≥140	≥2.0	≥6.0	≥7.0	≥25.0	≥1.0	±0.05	脱离底板

1.2 实验方法

本研究依据《石膏基自流平砂浆》(JC/T 1023—2021)的技术要求，考察各实验变量对磷石膏基无砂自流平砂浆的流动度、凝结时间及抗压强度的影响。实验变量设计如下：胶凝材料配比，α、β配比（范围为0:100至100:0）；石膏掺水量，水与石膏的质量比（37%~45%）；外加剂掺量，减水剂0.20%~0.30%、稳定剂0.01%~0.05%、消泡剂0.01%~0.05%、缓凝剂0.18%~0.26%。

1.2.1 实验环境控制

所有实验均在恒温恒湿条件下进行，实验室温度控制在(20±5)℃，相对湿度维持在(65±10)%。实验前，原材料（包括水）需在标准环境中平衡24 h以上，以确保性能测试的稳定性。

1.2.2 性能测试方法

1) 流动度测定

将磷石膏基半水石膏与外加剂按预设比例混合后，加入定量水搅拌2~3 min至均匀。随后，将浆体缓慢注入内径30 mm（公差±0.1 mm）、高度50 mm（公差±0.1 mm）的金属环形模具中，模具置于300 mm×300 mm的洁净玻璃板上。匀速提起模具后，测量浆体自然流展形成的圆饼直径，记录初

始流动度。浆体静置(30±5) min后，再次搅拌30~60 s，重复上述步骤测定30 min流动度。

2) 凝结时间测定

参考建筑石膏净浆凝结时间测定方法，采用维卡仪进行测试，具体步骤为：将搅拌后的浆体倒入涂有脱模剂的圆模中并刮平，固定于维卡仪底座。通过控制试针自由下落接触浆面，记录试针沉入浆体至距底板1 mm所需时间（初凝时间），以及沉入深度不超过表面1 mm所需时间（终凝时间）。

3) 抗压强度测定

将浆体注入4 cm×4 cm×16 cm的三联试模中，静置6 h后脱模。试件养护至规定龄期后，采用水泥胶砂强度试验机（配备40 mm×40 mm抗压夹具）进行抗压强度测试，加载速率为(2 400±200) N/s，记录试件破坏时的最大荷载值。

2 实验与讨论

2.1 α、β配比对自流平砂浆流动度和抗压强度的影响

2.1.1 α、β配比对自流平砂浆流动度的影响

α、β配比对自流平砂浆流动度的影响见表6。

由表6可知，在固定其他变量条件下，随着α、β配比增加，石膏基无砂自流平砂浆的流动度逐渐增加。

表6 α 、 β 配比对自流平砂浆流动度的影响

Table 6 Effect of α 、 β ratio on fluidity of self-leveling mortar

w (掺水)/%	w (减水剂)/%	w (稳定剂)/%	w (消泡剂)/%	w (缓凝剂)/%	α 、 β 配比	初始流动度/mm	30 min 流动度/mm
45	0.22	0.04	0.04	0.24	0:100	140	133
45	0.22	0.04	0.04	0.24	20:80	145	136
45	0.22	0.04	0.04	0.24	25:75	151	138
45	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	155	145
45	0.22	0.04	0.04	0.24	35:65	158	147
45	0.22	0.04	0.04	0.24	40:60	164	152
45	0.22	0.04	0.04	0.24	50:50	169	158
45	0.22	0.04	0.04	0.24	100:0	191	180

当仅使用 β 型建筑石膏时（即 α 、 β 配比为0:100），石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度为133 mm，未达标。当仅使用 α 型高强石膏（即 α 、 β 配比为100:0）时，石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度为180 mm，达标。当 α 、 β 配比为30:70时，石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度为145 mm，

达标。考虑到成本问题，选定 α 、 β 配比为30:70作为后续石膏掺水量、外加剂掺量实验的 α 、 β 配比。

2.1.2 α 、 β 配比对自流平砂浆抗压强度的影响

α 、 β 配比对自流平砂浆抗压强度的影响见表7。由表7可知，在固定其他变量条件下，随着 α 、 β 配比增加，石膏基无砂自流平砂浆抗压强度逐渐增加。

表7 α 、 β 配比对自流平砂浆抗压强度的影响

Table 7 Effect of α 、 β ratio on compressive strength of self-leveling mortar

w (掺水)/%	w (减水剂)/%	w (稳定剂)/%	w (消泡剂)/%	w (缓凝剂)/%	α 、 β 配比	24 h 抗压强度/MPa	绝干抗压强度/MPa
45	0.22	0.04	0.04	0.24	0:100	6.44	12.47
45	0.22	0.04	0.04	0.24	20:80	6.91	13.05
45	0.22	0.04	0.04	0.24	25:75	7.63	14.89
45	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	7.97	15.92
45	0.22	0.04	0.04	0.24	35:65	8.19	16.28
45	0.22	0.04	0.04	0.24	40:60	8.62	17.09
45	0.22	0.04	0.04	0.24	50:50	9.16	18.41
45	0.22	0.04	0.04	0.24	100:0	16.09	39.53

当仅使用 β 型建筑石膏时（即 α 、 β 配比为0:100），石膏基无砂自流平砂浆24 h抗压强度和绝干抗压强度分别为6.44 MPa（达标）和12.47 MPa（未达标）。

当仅使用 α 型高强石膏时（即 α 、 β 配比为100:0），石膏基无砂自流平砂浆24 h抗压强度和绝干抗压强度分别为16.09 MPa（达标）和39.53 MPa（达标）。

纯 β 型建筑石膏虽成本低，但其30 min流动度（133 mm）和绝干抗压强度（12.47 MPa）均低于G20标准。

当 α 、 β 配比为30:70时，30 min流动度为145 mm（达标），绝干抗压强度为15.92 MPa（未达标），需通过调整石膏掺水量以弥补强度不足，同时平衡成本。

2.2 石膏掺水量对自流平砂浆流动度及抗压强度的影响

通过市场调研发现石膏基自流平砂浆的石膏掺

水量与绝干抗压强度的大致关系参见表8。

表8 石膏掺水量与自流平砂浆绝干抗压强度的关系

Table 8 The relationship between the amount of gypsum water and the absolute dry compressive strength of self-leveling mortar

w (掺水)/%	绝干抗压强度/MPa
43~45	16
40~42	20
37~39	25
34~36	30
30~33	35

针对G20标准和G25标准，实验选取的石膏掺水量范围为37%~45%，石膏掺水量对自流平砂浆流动度及抗压强度的影响见表9。

由表9可知，在固定其他变量条件下，随着石膏掺水量增加，石膏基无砂自流平砂浆流动度逐渐增加，24 h抗压强度和绝干抗压强度逐渐降低。

表9 石膏掺水量对自流平砂浆流动度及抗压强度的影响

Table 9 Influence of gypsum water content on fluidity and compressive strength of self-leveling mortar

w(掺水)/%	w(减水剂)/%	w(稳定剂)/%	w(消泡剂)/%	w(缓凝剂)/%	α 、 β 配比	初始流动度/mm	30 min流动度/mm	24 h抗压强度/MPa	绝干抗压强度/MPa
37	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	154	139	12.79	25.87
38	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	156	141	12.31	24.42
39	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	159	144	12.05	23.40
40	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	160	145	11.21	21.91
41	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	162	147	10.8	19.93
42	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	164	149	9.88	18.83
43	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	165	150	8.36	17.41
44	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	168	153	8.14	16.83
45	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	172	157	7.97	15.92

当石膏掺水量为37%，石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度为139 mm（未达标），24 h抗压强度和绝干抗压强度分别12.79 MPa（达标）和25.87 MPa（达标）。

当石膏掺水量为45%，石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度为157 mm（达标），24 h抗压强度和绝干抗压强度分别7.97 MPa（达标）和15.92 MPa（未达标）。

当石膏掺水量从37%增至45%时，流动度由139 mm升至157 mm，但绝干抗压强度由25.87 MPa

降至15.92 MPa。为平衡流动度与强度要求，实际应用中宜控制石膏掺水量 $\leq 40\%$ 。

综上，当 α 、 β 配比为30:70时，通过调整石膏掺水量（如 $\leq 40\%$ ）可满足G20等级以上标准。

2.3 减水剂掺量对自流平砂浆流动度的影响

减水剂掺量对自流平砂浆流动度的影响详见表10。由表10可知，在固定其他变量条件下，随着减水剂掺量增加，石膏基无砂自流平砂浆的流动度逐渐增加。

当减水剂掺量为0.20%时，石膏基无砂自流平

表10 减水剂掺量对自流平砂浆流动度的影响

Table 10 Influence of water-reducing agent content on fluidity of self-leveling mortar

w(掺水)/%	w(减水剂)/%	w(稳定剂)/%	w(消泡剂)/%	w(缓凝剂)/%	α 、 β 配比	初始流动度/mm	30 min流动度/mm
40	0.20	0.04	0.04	0.24	30:70	139	91
40	0.22	0.04	0.04	0.24	30:70	141	96
40	0.23	0.04	0.04	0.24	30:70	146	121
40	0.24	0.04	0.04	0.24	30:70	152	129
40	0.26	0.04	0.04	0.24	30:70	156	144
40	0.27	0.04	0.04	0.24	30:70	165	147
40	0.28	0.04	0.04	0.24	30:70	170	153
40	0.29	0.04	0.04	0.24	30:70	175	156
40	0.30	0.04	0.04	0.24	30:70	178	159

砂浆30 min流动度为91 mm（未达标）。

当减水剂掺量为0.30%，石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度为159 mm（达标）。

当掺量从0.20%增加至0.30%，30 min流动度从91 mm提升至159 mm，实际应用中宜控制减水剂掺量 $\geq 0.26\%$ ，30 min流动度 ≥ 144 mm（达标）。

2.4 稳定剂掺量对自流平砂浆流动度的影响

稳定剂掺量对自流平砂浆流动度的影响详见表11。

根据表11所示，在固定其他变量条件下，随着稳定剂掺量增加，石膏基无砂自流平砂浆的流动

度逐渐增加，且流动度损失减小。

当稳定剂掺量为0.01%时，石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度为87 mm（未达标），流动度损失为30 mm。

当稳定剂掺量为0.05%，石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度为157 mm（达标），流动度损失为9 mm。

当掺量从0.01%增至0.05%，石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度从87 mm提升至157 mm，流动度损失从30 mm减小至9 mm。实际应用中宜控制稳定剂掺量 $\geq 0.035\%$ ，30 min流动度 ≥ 141 mm（达标）。

表 11 稳定剂掺量对自流平砂浆流动度的影响

Table 11 Influence of stabilizer content on fluidity of self-leveling mortar

w (掺水)/%	w (减水剂)/%	w (稳定剂)/%	w (消泡剂)/%	w (缓凝剂)/%	α, β 配比	初始流动度/mm	30 min 流动度/mm
40	0.26	0.010	0.04	0.24	30:70	117	87
40	0.26	0.015	0.04	0.24	30:70	118	96
40	0.26	0.020	0.04	0.24	30:70	125	103
40	0.26	0.025	0.04	0.24	30:70	131	119
40	0.26	0.030	0.04	0.24	30:70	139	132
40	0.26	0.035	0.04	0.24	30:70	151	141
40	0.26	0.040	0.04	0.24	30:70	159	149
40	0.26	0.045	0.04	0.24	30:70	162	156
40	0.26	0.050	0.04	0.24	30:70	165	157

2.5 消泡剂掺量对自流平砂浆流动度及表观的影响
消泡剂掺量对自流平砂浆流动度及表观的影响见表 12。

由表 12 可知, 在固定其他变量条件下, 随着消泡剂掺量增加, 石膏基无砂自流平砂浆的流动度逐渐增加, 表观气泡减少。

当消泡剂掺量为 0.01% 时, 石膏基无砂自流平砂浆 30 min 流动度为 98 mm (未达标)。

当消泡剂掺量为 0.05%, 石膏基无砂自流平砂浆 30 min 流动度为 161 mm (达标)。

当消泡剂掺量 $\geq 0.04\%$ 可消除表观气泡, 30 min 流动度 ≥ 145 mm (达标)。

表 12 消泡剂掺量对自流平砂浆流动度及表观的影响

Table 12 Influence of defoamer content on fluidity and appearance of self-leveling mortar

w (掺水)/%	w (减水剂)/%	w (稳定剂)/%	w (消泡剂)/%	w (缓凝剂)/%	α, β 配比	30 min 流动度/mm	砂浆表观	
							初始搅拌后	搅拌后 30 min
40	0.026	0.035	0.010	0.24	30:70	98	气泡密集	气泡密集
40	0.026	0.035	0.015	0.24	30:70	103	气泡密集	气泡密集
40	0.026	0.035	0.020	0.24	30:70	117	气泡密集	气泡密集
40	0.026	0.035	0.025	0.24	30:70	126	大面积气泡	大面积气泡
40	0.026	0.035	0.030	0.24	30:70	133	少量气泡	少量气泡
40	0.026	0.035	0.035	0.24	30:70	138	少量气泡	微量气泡
40	0.026	0.035	0.040	0.24	30:70	145	少量气泡	无气泡
40	0.026	0.035	0.045	0.24	30:70	157	微量气泡	无气泡
40	0.026	0.035	0.050	0.24	30:70	161	微量气泡	无气泡

2.6 缓凝剂掺量对自流平砂浆流动度和凝结时间的影响
缓凝剂掺量对自流平砂浆流动度和凝结时间的影响

影响详见表 13。

由表 13 可知, 在固定其他变量条件下, 随着缓凝剂掺量增加, 石膏基无砂自流平砂浆的流动度

表 13 缓凝剂掺量对自流平砂浆流动度和凝结时间的影响

Table 13 Influence of retarder content on fluidity and setting time of self-leveling mortar

w (掺水)/%	w (减水剂)/%	w (稳定剂)/%	w (消泡剂)/%	w (缓凝剂)/%	α, β 配比	30 min 流动度/mm	初凝时间/min	终凝时间/min
40	0.26	0.035	0.04	0.18	30:70	143	75	106
40	0.26	0.035	0.04	0.19	30:70	145	91	123
40	0.26	0.035	0.04	0.20	30:70	147	112	143
40	0.26	0.035	0.04	0.21	30:70	147	145	114
40	0.26	0.035	0.04	0.22	30:70	149	170	197
40	0.26	0.035	0.04	0.23	30:70	152	200	232
40	0.26	0.035	0.04	0.24	30:70	155	226	254
40	0.26	0.035	0.04	0.25	30:70	156	269	297
40	0.26	0.035	0.04	0.26	30:70	161	299	328

和凝结时间均逐渐增加。

当缓凝剂掺量为0.18%时，石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度143 mm（达标），初凝时间75 min，终凝时间106 min。

当缓凝剂掺量为0.26%，石膏基无砂自流平砂浆30 min流动度为161 mm（达标），初凝时间299 min，终凝时间328 min。

当缓凝剂掺量从0.18%增加至0.26%，凝结时间可实现有效调控。

3 结论

(1) α型高强石膏占比增加可同步提升石膏基无砂自流平砂浆流动度与抗压强度，α、β配比30:70为经济性最优配比。

(2) 石膏掺水量宜控制≤40%，以避免石膏基无砂自流平砂浆抗压强度大幅衰减。

(3) 减水剂（掺量≥0.26%）、消泡剂（掺量≥0.040%）与稳定剂（掺量≥0.035%）的协同作用可确保砂浆高流动度及表观质量，稳定剂掺量增加有助于减小流动度损失。

(4) 缓凝剂掺量（0.18%~0.26%）可有效调控凝结时间（初凝75~299 min，终凝106~328 min）。

本研究通过复配磷石膏基半水石膏（α、β），调节石膏掺水量和外加剂掺量优化自流平砂浆性能，为磷石膏基无砂自流平砂浆的配方设计与工业化生产提供了科学参照，具有工程和商业应用价值，对推动磷石膏资源化利用及绿色建材发展具有重要意义。

[参考文献]

[1] 华经情报网.2022年中国磷石膏行业综合利用现状分析,贵州连续多年综合利用率实现100% [EB/OL]. [2023-01-24]. <https://www.huaon.com/channel/trend/865429.html>.
Huating Intelligence Network.Comprehensive Utilization Status Analysis of China's Phosphogypsum Industry in 2022, Guizhou Achieves 100% Utilization Rate for Multiple Consecutive Years [EB/OL]. [2023-01-24]. <https://www.huaon.com/channel/trend/>

(上接18页)

[8] 李强,宋宪生,惠争卜,等.我国磷矿资源特点及开发利用建议[J].内蒙古煤炭经济,2017(18):46-49.
LI Q, SONG X S, HUI Z B, et al. Characteristics of Phosphate Rock Resources in Our Country and Suggestions for Development and Utilization[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2017(18):46-49.

[9] 夏学惠,郝尔宏.中国磷矿床成因分类[J].化工矿产地质,2012,34(1):1-14.

865429.html.

[2] 白海丹.2019年我国磷石膏利用现状、问题及建议[J].硫酸工业,2020(12):7-10.
BAI H D. Current situation, problems and suggestions of phosphogypsum utilization of 2019 in China [J].Sulfuric Acid Industry, 2020(12):7-10.

[3] 董秀芹,刘孝柱,苏英.α型高强石膏的生产工艺、性能与应用[J].建材世界,2016,37(3):6-9.
DONG X Q, LIU X Z, SU Y. preparation Technologies, Properties and Application of α-type High-strength Hemihydrate Gypsum[J].Building Materials World,2016,37(3):6-9.

[4] 吴照洋,张永兴,张利珍,等.磷石膏一步法制备β型建筑石膏粉试验研究[J].化工矿物与加工,2021,50(6):36-40.
WU Z Y, ZHANG Y X, ZHANG L Z, et al. Experimental study on preparation of β-building gypsum powder with phosphogypsum by one-step method [J].Industrial Minerals & Processing, 2021,50(6):36-40.

[5] 何玉鑫,瞿县,华苏东,等.工业副产石膏自流平材料的研究进展[J].材料导报,2014,28(S1):345-347.
HE Y X, QU X, HUA S D, et al. esearch Progress on Industrial By-product Gypsum Self-leveling Material [J]. Materials Review, 2014, 28(S1):345-347.

[6] 冯洋,杨林,曹建新,等.磷石膏煅烧改性制备自流平砂浆的研究[J].硅酸盐通报,2020,39(9):2891-2897.
FENG Y, YANG L, CAO J X, et al. Calcining Modification of Phosphogypsum to Prepare Self-Leveling Mortar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(9):2891-2897.

[7] 李晶辉,刘兆爽,赵文杰.石膏基自流平地面材料的研究进展[J].硅酸盐通报,2016,35(11):3587-3593.
LI J H, LIU Z S, ZHAO W J. Research Development of Gypsum Based Self-leveling Materials of Floor [J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016,35(11):3587-3593.

[8] 黎力,吴芳.自流平材料的应用发展综述[J].新型建筑材料,2006(4):7-11.
LI L, WU F. Review on the Application and Development of Self-leveling Materials) [J].New Building Materials, 2006(4):7-11.

[9] 张波,万郁楠.灰砂比对无水泥砂浆性能的影响[J].建筑节能,2018,46(6):57-60.
ZHANG B, WAN Y N. Effect of Cementitious Material and Sand Ratio on Properties of Mortar Without Cement [J].Building Energy Efficiency, 2018,46(6):57-60.

XIA X H, HAO E H. Classification of the Genesis of Phosphate Deposits in China [J]. Chemical Industry and Mineral Resources Geology, 2012,34(1):1-14.

[10] 陈慧,郑光明,刘鑫,等.湖北某低品位硅钙质胶磷矿同步反浮选工艺研究[J].化工矿物与加工,2022,51(12):12-15.
CHEN H, ZHENG G M, LIU X, et al. Research on the synchronous flotation process of low-grade silicate-calcium phosphate ore in Hubei [J]. Chemical Minerals and Processing, 2022,51(12):12-15.