

◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

磷石膏基轻质抹灰石膏开裂的影响因素探究

张 威, 王再骞, 刘顺建, 彭 超, 潘志权

(新洋丰农业科技股份有限公司, 湖北 荆门 448000)

[摘 要] 传统抹灰砂浆因体积密度大、环保性差难以满足现代室内装修需求。磷石膏基轻质抹灰石膏凭借轻质、便捷、环保等优势成为主流, 但施工中易出现开裂问题。为明确开裂关键影响因素, 采用控制变量法, 依据 GB/T 28627—2023《抹灰石膏》测定需水量、凝结时间、保水率等性能, 结合肉眼观察开裂情况, 探究石膏相组成(无水石膏、附着水)、灰钙掺量及凝结时间对磷石膏基轻质抹灰石膏开裂性能的影响。结果表明: 无水石膏是核心影响因素, 其质量分数 $>1\%$ 时开裂风险显著提高, 附着水可通过提升保水率($\geq 93\%$)协同降低开裂风险; 灰钙掺量通过调节 pH 影响开裂, 当掺量 $0.5\% \sim 1.0\%$ 时使 pH 达到 $11.8 \sim 12.1$ (强碱区间)时, 体系生成致密胶凝结构, 无开裂且凝结稳定; 凝结时间存在适配区间($90 \sim 150 \text{ min}$), 此区间内水化有序、应力均匀释放, 抗裂性最优, 低于 60 min 或高于 180 min 均会因水化紊乱或结构稳定性不足加剧开裂。研究明确了各因素对开裂的作用机制, 提出 w (无水石膏) $<1\%$ 、体系 pH 12 左右、凝结时间 $90 \sim 150 \text{ min}$ 的优化参数, 为磷石膏基轻质抹灰石膏抗裂性能提升提供理论依据。

[关键词] 抹灰石膏; 开裂影响因素; 无水石膏; 灰钙; 凝结时间; 保水率

[中图分类号] TQ177.3 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2026) 04-0071-06

Exploration of influencing factors of cracking in phosphogypsum-based lightweight gypsum plaster

ZHANG Wei, WANG Zaiqian, LIU Shunjian, PENG Chao, PAN Zhiquan

(Xinyangfeng Agricultural Technology Co., Ltd., Jingmen 448000, China)

Abstract: Traditional plastering mortar is difficult to meet the needs of modern interior decoration due to its high bulk density and poor environmental protection. Phosphogypsum-based lightweight gypsum plaster has become the mainstream due to its advantages of light weight, convenience and environmental protection, but it is prone to cracking during construction. To identify the key factors affecting cracking, adopting the control variable method, the water requirement, setting time, water retention rate and other properties are determined in accordance with GB/T 28627—2023 “Gypsum Plaster”, and the effects of gypsum components (anhydrous gypsum, attached water), calcium hydroxide content and setting time on the cracking performance of phosphogypsum-based lightweight gypsum plaster are explored by combining with visual observation of cracking. The results show that anhydrous gypsum is a core influencing factor: when its content is more than 1% , the cracking risk increases significantly, and attached water can synergistically reduce the cracking risk by improving the water retention rate ($\geq 93\%$). The content of calcium hydroxide affects cracking by regulating the pH of the system, when the content is $0.5\% - 1.0\%$, the pH reaches $11.8 - 12.1$ (strong alkali range), the system forms a dense cementitious structure without cracking and with stable setting. There is an “adaptation range” ($90 - 150 \text{ min}$) for the setting time, within this range, the hydration proceeds in an orderly manner and the stress is released evenly, resulting in the best crack resistance. If the setting time is less than 60 min or more than 180 min , the cracking risk will be increased due to hydration disorder or insufficient structural stability. This study clarifies the mechanism of each factor on cracking, and proposes optimized parameters: anhydrous gypsum content $<1\%$, system pH value around 12 , and setting time of $90 - 150 \text{ min}$, which provides a theoretical basis for improving the crack resistance of phosphogypsum-based lightweight gypsum plaster.

收稿日期: 2025-10-22

作者简介: 张 威(1998—), 男, 湖北荆门人, 硕士, 主要从事磷石膏综合利用工作。

通信作者: 潘志权(1958—), 博士生导师, 无机化学、磷化工专业。

Key words: gypsum plaster; factors influencing cracking; anhydrous gypsum; calcium hydroxide; setting time; water retention rate

0 引言

随着科技快速发展,传统的抹灰砂浆因其体积密度大、环保性差等缺点,已不能满足人们对室内装修舒适性和环保健康的要求,而轻质抹灰石膏具有质量轻、施工便捷、节能环保、黏结力强、成本经济等优点,适用于多种建筑室内抹灰场景。将磷石膏进行提纯除杂、煅烧后制成磷建筑石膏粉,再向磷建筑石膏粉中加入各种添加剂制成轻质抹灰石膏,已成为市场的一种主流方式。然而,磷石膏中残留的磷、氟、有机物及残酸等杂质,会导致抹灰石膏在硬化过程中易出现开裂现象,严重制约了产品的推广。

为解决此问题,学术界已围绕磷石膏基抹灰石膏开裂问题展开了部分研究。杨福成等^[1]发现,施工现场的温度和风速会影响抹灰石膏的塑性收缩,是引发抹灰石膏开裂的重要因素;通过控制石膏抹灰现场施工环境可在一定程度上缓解该问题,但未涉及碱环境的调控作用。郑利平等^[2]研究了外加剂对磷石膏基抹灰砂浆性能的影响,认为不同的缓凝剂和纤维素醚会对抹灰砂浆的强度和保水率造成影响,进而造成开裂。

现有研究尚未形成“相组分-碱环境-凝结特性-开裂行为”的系统性调控理论,针对多因素协同作用下的开裂机制及精准调控参数的研究仍存在空白。基于此,本文系统探究磷建筑石膏相组成、灰钙掺量(碱环境)及凝结时间对轻质抹灰石膏开裂的影响规律,明确各因素的优化参数、作用机制,为制备磷石膏基轻质抹灰石膏提供理论支撑与技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

建筑石膏,湖北新洋丰新型建材科技有限公司,无水石膏(AⅢ)质量分数3.78%,半水石膏(HH)质量分数75.72%,二水石膏(DH)质量分数3.73%,标准稠度用水量60%,初凝时间8 min,终凝时间11 min,2 h抗折强度3.2 MPa,2 h抗压强度6.2 MPa,比表面积325 m²/kg;轻集料,0.25 mm(60目)气路玻化微珠,智美堂新材料有限公司;缓凝剂,12-F蛋白类缓凝剂,苏州兴邦化学建材有限公司;减水剂,1050P聚羧酸类减水剂,苏州兴邦化学建材有限公司;触变剂,市售;纤维素

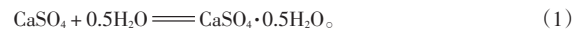
醚,4wHPMC,市售。

1.2 实验方法

1.2.1 石膏中可溶性无水石膏及附着水含量测定

建筑石膏粉的主要成分为半水硫酸钙,但因煅烧过程中存在过烧情况,因此其成分中会含有少量可溶性无水石膏(AⅢ),在后续的陈化过程中无水石膏(AⅢ)会逐渐吸收空气中的水进而转化为半水石膏(HH),当无水石膏(AⅢ)全部转化为半水石膏(HH)后,则会在后续的陈化过程中逐渐生成附着水。

可溶性无水石膏(AⅢ)与附着水不会同时存在于建筑石膏中,可溶性无水石膏(AⅢ)在95%的乙醇水溶液中能水化生成半水石膏,在同等条件下半水石膏(HH)不能水化成二水石膏(DH)。因此可通过测定可溶性无水石膏(AⅢ)在95%乙醇水溶液中水化的增量来计算其含量。其水化反应方程式如下:



按化学反应方程式可计算可溶性无水石膏(AⅢ)含量。

若样品中无可溶性无水石膏(AⅢ)存在时,样品烘干前质量大于烘干恒量后的质量,可算出附着水的质量分数^[3]。

1.2.2 抹灰石膏性能测试

轻质抹灰石膏需水量、凝结时间、保水率的测定参照GB/T 28627—2023《抹灰石膏》^[4]中的规定进行。

1.2.3 试件制备

将建筑石膏和缓凝剂等添加剂按照规定的比例配制成抹灰石膏,按照测定好的需水量加水搅拌,搅拌均匀后将其均匀抹在20 cm × 20 cm的纸面石膏板上,抹灰厚度控制在1 cm。

1.2.4 养护与开裂评价

养护条件:将成型试件置于恒温恒湿的养护箱中,养护温度为(20 ± 2) °C,相对湿度为(65 ± 5)%,养护时间为1 d。

开裂评价标准:采用三级评价体系,具体如下。(1)无开裂,试件表面无可见裂纹,记为0级。(2)轻微开裂,裂纹数量 ≤ 2条,单条裂纹长度 < 5 mm,宽度 < 0.1 mm,记为1级。(3)严重开裂,裂纹数量 > 2条,或单条裂纹长度 ≥ 5 mm,或

宽度 ≥ 0.1 mm, 记为2级。

评价过程采用5倍放大镜辅助观察, 记录各试件规定龄期的开裂等级及典型裂纹特征。

2 结果与分析

2.1 石膏相组成对开裂的影响

将实验用的磷建筑石膏采用自然晾晒的方法进行陈化, 得到不同无水石膏及附着水含量的磷建筑石膏, 进而探究抹灰石膏体系中无水石膏及附着水含量对其开裂性能的影响, 结果见图1。从图1可以看出, 随着无水石膏含量降低, 开裂风险呈现明显下降趋势。当无水石膏质量分数为3.78%和2.72%时, 抹灰石膏出现大量裂纹, 开裂等级为2级; 随着无水石膏质量分数逐渐降低到1.06%, 可以看到开裂情况有明显改善, 裂纹数变少, 开裂等级将为1级; 当无水石膏质量分数低至0.60%时, 达到无裂纹状态, 开裂等级降为0级。这一现象推测与无水石膏水化过程有关, 高含量无水石膏水化



图1 无水石膏及附着水质量分数对抹灰石膏开裂性能的影响
Fig. 1 The influence of anhydrous gypsum and attached water content on the cracking performance of gypsum plaster

时可能伴随结晶水转化等体积变化, 使体系内部产生较大应力, 进而引发开裂, 降低其含量可缓解应力集中, 减少开裂。

随着无水石膏含量降低, 石膏中逐渐开始产生附着水, 附着水的产生对开裂情况改善效果明显, w (附着水) 为1.47%和2.87%的组别, 均未出现开裂情况。这是由于附着水能够有效调节体系水分平衡, 一方面缓解无水石膏水化产生的应力问题, 另一方面降低浆体早期干燥速度, 避免因水分快速流失导致开裂, 提升了抹灰石膏体积稳定性^[5]。

抹灰石膏体系中无水石膏及附着水含量对其保水性能的影响见图2。结合图1和图2可以看出, 保水性能数据与开裂情况呈现了良好的协同性, 保水率随无水石膏含量降低、附着水含量升高而同步提升。无水石膏质量分数为3.78%时保水率为90.35%; 当无水石膏质量分数降低至0.60%时, 保水率提升至92.41%; 当含有附着水时, 保水率均在93%以上, 最高达95.36%。保水率高就意味着浆体水分流失缓慢, 干燥收缩过程更均匀, 从而降低了开裂风险, 这与开裂情况的变化趋势相契合, 进一步验证了水分调控对抹灰石膏开裂性能的影响机制。

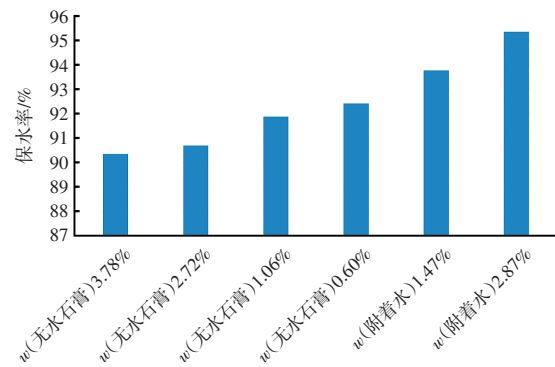


图2 无水石膏及附着水质量分数对其保水性能的影响
Fig. 2 The influence of anhydrous gypsum and attached water content on the water retention performance of gypsum plaster

在实验过程中, 石膏粉、玻化微珠、灰钙等其他组分掺量保持固定, 确保了实验单一变量控制的有效性, 使得无水石膏与附着水含量对抹灰石膏性能的影响规律清晰呈现。综上, 无水石膏是影响抹灰石膏开裂的关键因素, 高含量易引发开裂, 降低其比例可减少开裂风险; 附着水可通过补偿水分、优化水分环境, 协同降低开裂风险, 提高保水性能。

2.2 灰钙掺量对开裂的影响

通过控制变量法, 固定石膏、添加剂和水量,

探究灰钙掺量对抹灰石膏 pH、开裂性能的影响，结果见图3、图4。由图3、图4可知，随着灰钙掺量提高，体系 pH 呈梯度上升（6.0~12.1），开裂性能呈现显著阶段性差异：当灰钙掺量为0时 pH 为6.0，试件仅出现少量裂纹，开裂等级为1级；当灰钙掺量为0.1%时 pH 为8.2，灰钙掺量为0.3%时 pH 为10.1，均未达到适配区间，体系表现为长时间不凝固且严重开裂，开裂等级为2级；当灰钙掺量提升至0.5%时 pH 为11.8，当灰钙掺量为1.0%时 pH 为12.1，这时 pH 进入碱性适配范围，体系无开裂，开裂等级为0级。

测试了不同 pH 下，磷建筑石膏水化 2 h 及 7 d 硬化体的晶体形貌，结果如图5所示。

其中图5a、图5b.为无碱条件下磷建筑石膏水

化 2 h、7 d 的硬化体晶体形貌，可以看到在弱酸性环境中，磷建筑石膏能够正常水化硬化。其 2 h 晶

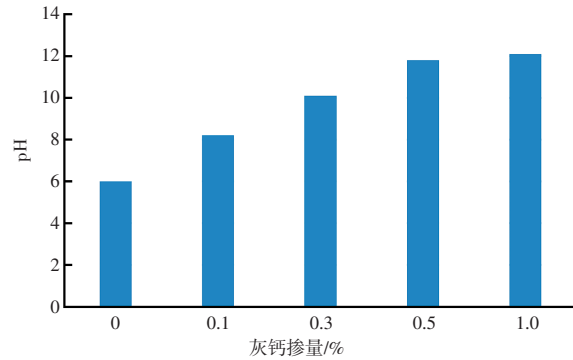


图3 抹灰石膏 pH 随灰钙掺量的变化

Fig. 3 Changes in pH of gypsum plaster with calcium hydroxide content

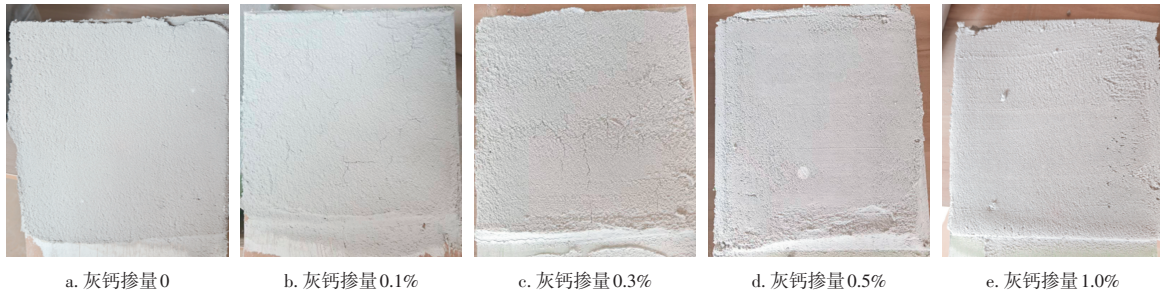


图4 不同灰钙掺量下抹灰石膏的开裂情况

Fig. 4 Cracking of gypsum plaster under different calcium hydroxide content

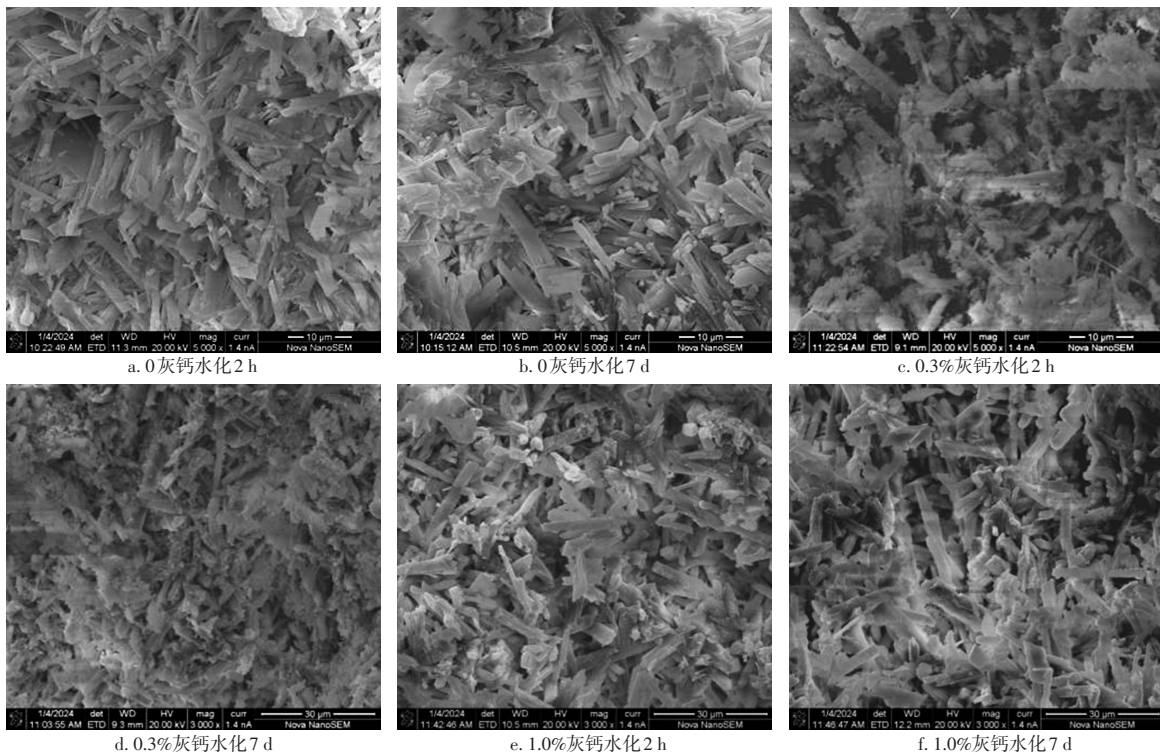


图5 灰钙掺量及水化时间对磷建筑石膏晶体形貌的影响

Fig. 5 The effect of calcium hydroxide content and hydration time on the crystal morphology of building gypsum

体已经发育较为良好，为长棒状晶体，晶体长度约为 $20\ \mu\text{m}$ ，晶体之间搭接紧密。图 5c、图 5d 为 0.3% 灰钙掺量下磷建筑石膏水化 2 h、7 d 的晶体形貌图。对比图 5a 和图 5c 可以看出，低灰钙掺量下磷建筑石膏的早期水化硬化受到了抑制，晶体生长较慢，水化 2 h 后晶体之间搭接极为疏松，晶体之间空隙较多。此外还可以看到晶体表面有少量颗粒状晶粒，推断其为磷酸钙。随着水化继续进行，晶体继续生长，水化 7 d 后可以看到晶体发育较 2 h 更好，晶体搭接较好，但差于空白组。随着灰钙掺量继续增加，磷建筑石膏的水化开始恢复。从图 5 可以看出，高碱组磷建筑石膏 2 h 晶体发育明显优于低碱组，晶体之间空隙较少，但晶体尺寸较小；水化 7 d 后晶体尺寸较 2 h 有明显增大。

通过以上结果可知，灰钙的掺入不仅调节体系 pH，还能与磷石膏发生协同水化反应，生成特定水化产物优化微观结构。研究表明，在 pH 11.8 ~ 12.2 的碱性环境中，灰钙中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可与磷石膏中残留磷酸盐反应生成 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 沉淀^[6]，同时促进水化产物 C-S-H 胶凝和少量钙矾石 (Aft) 的生成^[7]。C-S-H 胶凝具有高胶结性和韧性，可填充二水石膏晶体间的空隙，而钙矾石的针状晶体能穿插在晶体网络中，增强结构整体性。

2.3 凝结时间对开裂的影响

通过控制变量法，只改变抹灰石膏中缓凝剂的掺量来控制体系的凝结时间，图 6 是不同凝结时间与开裂情况的对照图，可以看到，凝结时间与开裂性能呈现“先改善，后劣化”的非线性影响关系。当凝结时间为 40 min 时，体系开裂情况严重，裂纹数较多，开裂等级为 2 级；随着凝结时间延长至 60 min，开裂风险显著降低，但仍有少数裂纹，开裂等级为 1 级；当凝结时间处于 90 ~ 150 min 时，抹灰石膏无开裂现象，开裂等级为 0 级；当凝结时间继续升高到 180 min 时，又有少量裂纹产生，开裂等级为 1 级；当凝结时间继续延长到 240 min 以上时，又有大量裂纹产生，此时开裂等级为 2 级。

分析原因，凝结时间过短 (60 min 以内) 时，抹灰石膏水化进程快，浆体内部水分快速散失，收缩应力集中且未充分释放，易引发开裂；而当凝结时间处于 90 ~ 150 min 时，水化反应得以有序进行，浆体结构逐步致密，水分蒸发与应力释放趋于均匀，为抗干裂提供了良好的微观基础。然而，当凝结时间继续延长 (180 min 及以上)，开裂风险再度上升，180 min 时出现少量裂纹，300 min 时则有大量裂纹。这是由于过长的凝结时间导致浆体长时间处于高水含量、低强度状态，外界环境 (如湿度



图 6 不同凝结时间下的抹灰石膏开裂情况

Fig. 6 Cracking of gypsum plaster at different setting times

波动、轻微扰动)易破坏未完全固化的结构,引发二次收缩开裂,且长时间的水分滞留会加剧后期干燥收缩应力的累积^[8]。

综上,抹灰石膏的开裂性能与凝结时间密切相关,存在特定的适配区间(90~150 min)。在此区间内,水化进程、应力释放与结构形成达到动态平衡,可有效抑制开裂;当偏离此区间时,无论过短还是过长,都会因水化紊乱、应力集中或结构稳定性不足,导致开裂风险上升。

3 结论与展望

3.1 结论

(1) 综上所述,石膏相组成、体系保水率、配方中灰钙掺量和体系凝结时间都会对磷石膏基轻质抹灰的开裂性能造成显著影响。磷建筑石膏相组成成分中,无水石膏(AⅢ)含量是影响开裂的首要因素,当 w (无水石膏) $<1\%$ 时,可减少因相变带来的巨大体积变化,并且提高体系保水率,进而降低体系的开裂敏感性。

(2) 灰钙掺量通过调节体系的pH和水化产物组成影响抗裂性能,当 $\text{pH}\approx 12$ (对应灰钙掺量 $0.5\%\sim 1.0\%$)时,生成的C-S-H胶凝和钙矾石可优化微观结构,实现抗裂性和强度的平衡。

(3) 通过控制缓凝剂加入量控制体系凝结时间在90~150 min时,既能满足施工需求,又能保证水化反应充分进行,形成致密的晶体网络,抑制开裂。

(4) 轻质抹灰石膏开裂的本质是“相组成缺陷-碱环境失衡-水化不充分”导致的微观结构疏松与应力集中,通过多因素协同调控可实现抗裂性能显著提升。

3.2 工业应用展望

本文提出的优化参数(无水石膏质量分数 $<1\%$ 、 $\text{pH}\approx 12$ 、凝结时间90~150 min)在工业生产中具有较强可行性,但需关注以下控制难点。

(1) 无水石膏含量控制:市面上常见的煅烧装置均存在轻微过烧的情况,即刚生产出来的石膏粉无水石膏质量分数一般都大于 1% ,因此在生产抹灰石膏时,须先将石膏粉经闷罐、倒罐或吨包堆存等方式进行陈化处理。

(2) pH精准调节:灰钙易吸潮结块,须优化存储条件并采用计量精度 $\leq 0.01\%$ 的投料设备,确

保灰钙掺量准确性。

(3) 凝结时间稳定性:在磷石膏基抹灰石膏中,应尽量采用蛋白类缓凝剂,该类缓凝剂在磷石膏基的砂浆产品中线性增长长度较好,不会出现因缓凝剂掺量轻微变化而导致凝结时间大幅度变化的情况。并且工业生产应建立完善的出厂检测机制,对生产的每一锅抹灰石膏取样进行凝结时间检测。

[参考文献]

- [1] 杨福成,李永鑫,朱海霞,等.抹灰石膏早期塑性收缩与膨胀的研究[C]//中国硅酸盐学会房屋建筑材料分会,中国建筑学会建筑材料分会,中国硅酸盐学会水泥分会.第七届全国商品砂浆学术交流会(7th NCCM)论文集.广州:美巢集团股份有限公司,2017:48-56.
- [2] 郑利平,陈军,王泽渊,等.外加剂对磷石膏基抹灰砂浆基本性能影响[J].硫磷设计与粉体工程,2024(5):24-26.
ZHENG L P, CHEN J, WANG Z Y, et al. Effect of Admixtures on the Basic Properties of Phosphogypsum-based Plastering Mortar [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2024(5):24-26.
- [3] 全国轻质与装饰装修建筑材料标准化技术委员会.建筑石膏相组成分析方法:GB/T 36141—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国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.
- [5] 李志博,蔡鲁宏,吴金明,等.陈化对建筑石膏及石膏砂浆性能的影响研究[J].混凝土世界,2023(2):60-63.
LI Z B, CAI L H, WU J M, et al. Study on the Effect of Aging on the Properties of Calcined Gypsum and Gypsum Mortar [J]. China Concrete, 2023(2):60-63.
- [6] 肖刘飞,朱教群,周卫兵,等.碱性剂对磷建筑石膏凝结硬化性能的影响[J].非金属矿,2021,44(6):26-29.
XIAO L F, ZHU J Q, ZHOU W B, et al. Effect of Alkaline Agent on the Setting and Hardening Characters of Phosphorus Building Gypsum [J]. Non-Metallic Mines, 2021, 44(6):26-29.
- [7] 谢建海,雷航州,李明泽,等.磷石膏基胶凝材料的制备及其混凝土性能研究[J].混凝土与水泥制品,2025(8):6-9.
XIE J H, LEI H Z, LI M Z, et al. Preparation of phosphogypsum-based cementitious materials and its concrete performance study [J]. China Concrete and Cement Products, 2025(8):6-9.
- [8] 苑庆涛,梁少岗,卢明刚,等.基于石膏板墙基层的砂浆收缩开裂性能研究[J].工程质量,2024,42(2):101-103.
YUAN Q T, LIANG S G, LU M G, et al. Research on Shrinkage Cracking Performance of Dry-Mix Plastering Mortar Based on Gypsum Board Wall Base [J]. Construction Quality, 2024, 42(2):101-103.