

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.121



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



彩色石膏饰面砂浆的制备及其色彩特性

高德军^{a,b}, 刘咏^b, 刘冬梅^{a,b}, 庄昭霖^b, 黄世瑜^b

(三峡大学 a. 防灾减灾湖北省重点实验室; b. 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:为提高磷石膏的资源化利用率,并针对水泥基彩色饰面砂浆存在的泛碱、泛白及高碳排放等问题,提出采用磷高强石膏和磷建筑石膏为胶凝材料,结合氧化铁蓝(IOB)颜料及外加剂制备彩色石膏饰面砂浆。以砂浆的工作性能、力学性能及染色效果为评价指标,优化 IOB 颜料、植物蛋白缓凝剂(VPR)及羟丙基甲基纤维素(HPMC)的用量,确定其最佳掺量,并对硬化体微观结构进行观察。同时,采用 LAB 色空间中的色域平面图对砂浆的染色效果与色彩稳定性进行可视化与量化分析。结果表明,掺入 IOB 颜料会提高砂浆稠度、抗压和抗折强度,但保水率和拉伸黏结强度会降低;VPR 能延长凝结时间、增强颜料染色效果,但降低了力学强度;HPMC 能显著改善保水性能,但会减弱染色效果;石膏饰面砂浆中复掺 8%IOB 颜料、0.1%VPR 和 0.1%HPMC 的染色效果最佳;砂浆养护 14 d 时,ΔE 增幅逐渐减小。通过指数衰减模型预测,砂浆色彩在 41 d 时基本达到稳定状态。养护 28 d 时,砂浆中二水石膏晶体多呈块状或板状,晶体间搭接较为致密,密实度较高。

关键词:彩色石膏;饰面砂浆;力学性能;染色效果;色彩稳定性

中图分类号:TU56 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Preparation and color characteristics of color gypsum facing mortar

GAO Dejun^{a,b}, LIU Yong^b, LIU Dongmei^{a,b}, ZHUANG Zhaolin^b, HUANG Shiyu^b

(a. Hubei Provincial Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation; b. College of Civil Engineering and Architecture, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

Abstract: In order to improve the utilization rate of phosphogypsum resources, and to solve the problems of efflorescence, efflorescence and high carbon emissions in cement-based color decorative mortar, this paper proposes to use phosphorus high-strength gypsum and phosphorus building gypsum as cementitious materials, combined with iron oxide blue (IOB) pigments and admixtures to prepare color gypsum decorative mortar. The dosage of IOB pigment, vegetable protein retarder (VPR) and hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) was

收稿日期:2025-08-11

基金项目:国家级地方高校能源和环境材料化学学科创新引智基地项目(D20015);土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范基地项目(2021EJD026)

作者简介:高德军(1970-),男,博士,副教授,主要从事结构工程与岩土工程研究,E-mail:gdjsd@163.com。
刘冬梅(通信作者),女,博士,副教授,E-mail:58983701@qq.com。

Received: 2025-08-11

Foundation items: National Local University Energy and Environmental Materials Chemistry Discipline Innovation Intelligence Base Project (No. D20015); Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation Hubei Province Innovation Demonstration Base Project (No. 2021EJD026)

Author brief: GAO Dejun (1970-), PhD, associate professor, main research interests: structural engineering and geotechnical engineering, E-mail: gdjsd@163.com.

LIU Dongmei (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: 58983701@qq.com.

optimized by using the working performance, mechanical properties and dyeing effect of mortar as evaluation indexes, and the optimum dosage was determined. The microstructure of hardened body was observed. At the same time, the color gamut plan in LAB color space is used to visualize and quantify the dyeing effect and color stability of mortar. The results show that the addition of IOB pigment will increase the consistency, compressive and flexural strength of mortar, but the water retention rate and tensile bond strength will decrease. VPR can prolong the setting time and enhance the pigment dyeing effect, but reduce the mechanical strength. HPMC can significantly improve the water retention performance, but will weaken the dyeing effect. When 8% IOB pigment, 0.1% VPR and 0.1% HPMC were added to gypsum finishing mortar, the dyeing effect was the best. When the mortar was cured for 14 days, the increase of ΔE gradually decreased. Through the exponential decay model, it is predicted that the color of mortar basically reaches a stable state at 41 days. When cured for 28 days, the dihydrate gypsum crystals in the mortar are mostly blocky or plate-like, and the overlap between the crystals is dense and the compactness is high.

Keywords: color gypsum; facing mortar; mechanical properties; dyeing effect; color stability

彩色饰面砂浆是一种色彩丰富且装饰效果自然独特的绿色环保装饰材料,可代替瓷砖、涂料和壁纸等材料来装饰建筑物的内墙。然而,中国彩色饰面砂浆市场推广率不足,远低于发达国家平均水平。目前市面上常见的为水泥基彩色饰面砂浆,其研究较为广泛。Hatami等^[1]利用两种无机颜料和水泥生产彩色自密实砂浆,发现10%的FeO(OH)颜料掺量下可获得最佳的染色效果和最高的力学强度。Jin等^[2]使用氧化铁黄和氧化铁蓝作为3D打印白色硅酸盐水泥基材料中的着色颜料,研究其对抗压强度和着色性的影响,结果表明,氧化铁颜料提高了砂浆的抗压强度,砂浆的呈色能力随着颜料掺量的增加而增强。颜料掺量在3%时颜色达到饱和点,总色差较小。但水泥基饰面砂浆存在泛碱或泛白问题,严重影响美观^[3-4]。同时,水泥生产过程中二氧化碳排放量巨大,约占全球总排放量的7%~8%^[5]。

磷石膏作为湿法生产磷酸或磷肥时产生的副产品,每生产1 t磷酸会产生4.5~5.5吨磷石膏^[6]。因磷石膏含杂质,其制品性能较差,全球综合利用率不足30%,大多被堆存处理,造成严重环境问题^[7-8]。随着技术的进步,磷石膏经过适当的预处理后,其环境安全性得到有效保障,可以安全地用于磷建筑石膏和磷高强石膏等建筑材料的生产^[9-10]。由于石膏具有轻质、保温隔热等优点,许多研究利用磷建筑石膏和磷高强石膏作为胶凝材料制备石

膏砂浆^[11-12]。此外,石膏还具有装饰性好的优点,被广泛用于彩色石膏饰品的制作^[13-14]。然而,目前针对以石膏为胶凝材料的彩色饰面砂浆的制备及色彩调控相关研究仍较为有限。

作为绿色环保材料,彩色石膏饰面砂浆施工简单且装饰性好,可替代水泥基彩色饰面砂浆等墙体装饰材料,并可提高磷石膏利用率,解决磷石膏的大量堆存问题。笔者以磷建筑石膏和磷高强石膏为原料制备彩色石膏饰面砂浆,探究氧化铁蓝颜料、缓凝剂及保水剂对其工作性能、力学性能、染色效果及微观结构的影响,确定彩色石膏饰面砂浆的最佳配比,并利用CIE LAB色空间中的色域平面来探讨砂浆的色彩稳定性。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

磷建筑石膏、磷高强石膏均来源于湖北宜化集团。磷建筑石膏与磷高强石膏的化学成分见表1。两种石膏的主要成分是CaSO₄·0.5H₂O。磷建筑石膏含有较多的SiO₂、P₂O₅,磷高强石膏中二者成分相对减少。磷建筑石膏粉呈灰白色,晶体形貌主要呈不规则块状、棒状,如图1所示。磷高强石膏粉呈白色,晶体形貌多为短柱状,如图2所示。

颜料采用上海一品公司生产的氧化铁蓝(Iron Oxide Blue, IOB)颜料,主要成分为Fe₂O₃,化学性质稳定,在正常使用条件下不会析出有害物质^[15-16]。

表1 磷建筑石膏、磷高强石膏的化学成分

Table 1 Chemical composition of phosphorus building gypsum and high strength gypsum

样品	SO ₃	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	其他
磷建筑石膏	50.52	37.67	8.24	1.54	0.65	0.48	0.28	0.09	0.53
磷高强石膏	53.67	44.89	0.04	0.01	0.62	0.35	0.12	0.05	0.25



图1 磷建筑石膏 SEM 图

Fig.1 SEM image of phosphorus building gypsum

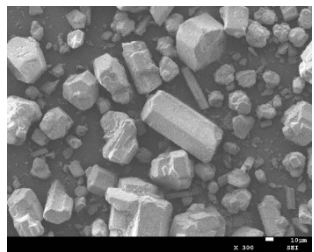


图2 磷高强石膏 SEM 图

Fig.2 SEM image of high strength gypsum

颜料的主要性能指标见表 2。

表 2 IOB 颜料的性能指标

Table. 2 Performance index of IOB pigment

主要成分	水分含量/%	密度/(g/cm ³)
Fe ₂ O ₃	1	0.5~0.9
细度	水溶物/%	着色力/%
≤0.3	≤0.5	100±5

重质碳酸钙选自河南铂润铸造材料有限公司,其碳酸钙含量≥98%,粒径≥400 目,白度为 95%。保水剂羟丙基甲基纤维素(HPMC)购自上海臣启化工科技有限公司,其黏度为 75 000 MPa·s。植物蛋白缓凝剂(VPR)购自上海臣启化工科技有限公司。可再分散乳胶粉采用上海臣启化工科技有限公司的德国瓦克 5010N 胶粉。淀粉醚购自上海臣启化工科技有限公司,化学成分为羟丙基淀粉醚,黏度 400~1 200 MPa·s。白色石英砂选用 40~80 目(即 0.18~0.38 mm)。

1.2 试验配比

磷建筑石膏具有工艺简单、成本低的优势,但存在强度低、耐水性差的缺陷,而磷高强石膏凭借致密短柱状晶体结构实现了高强度和良好耐水性。试验中石膏饰面砂浆的基准配比为:磷建筑石膏与磷高强石膏以 9:1 复掺,水胶比为 0.45,胶砂比为 1:1.5,内掺 1.2% 乳胶粉、3% 重质碳酸钙及 0.1% 淀粉醚。在此基础上,内掺 IOB 颜料,掺量分别为石膏用量的 2%、5% 和 8%。在确定最佳 IOB 颜料的基础上,外掺 0.03%、0.05%、0.07% 和 0.1% 的 VPR。在确定最优 IOB 和 VPR 掺量的基础上,外掺 0.1%、0.2% 和 0.3% 的 HPMC。

1.3 测试方法

1.3.1 物理力学性能测定

参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009),使用 SC-145 型稠度仪测量石膏饰面砂浆的稠度,使用维卡仪测定石膏饰面砂浆的凝结时间。保水率参照《抹灰石膏》(GB/T 28627—2023)进行测定。参照《墙体饰面砂浆》(JC/T 1024—2019),分别使用胶砂抗折试验机、胶砂抗压试验机(YAW-300 型)测定石膏饰面砂浆的抗折和抗压强度。参照《墙体饰面砂浆》(JC/T 1024—2019)以混凝土板块为基体,自制 80 mm×80 mm×5 mm 的亚克力板为成型框,用拉伸黏结仪测定石膏饰面砂浆的拉伸黏结强度。

1.3.2 微观结构测定

通过电子扫描显微镜(JSM-IT300 型,日本)观察彩色石膏饰面砂浆硬化体的微观结构。通过全自动压汞仪(MIP, AutoPore IV 9500)分析彩色石膏饰面砂浆的孔径分布,浸入角为 130°,汞压力范围为 0~420 MPa。

1.3.3 石膏饰面砂浆染色效果

分别制备不同配比的石膏饰面砂浆再均匀涂抹于混凝土板块上,厚度约 5 mm。待其凝结硬化后,在室内自然环境下养护 28 d。测量前,先对便携式色差仪(3nh NR10QC)进行校准,再测量色彩参数(采用 CIE LAB 色空间表征色彩,见图 3)。其中, L 为感知亮度,负值表示黑色偏暗,正值表示白色偏亮; a 为红绿色品,正值表示红色,负值表示绿色; b 为蓝黄色品,正值表示黄色,负值表示蓝色。色品指数绝对值越高,表明色彩往对应颜色偏移幅度大。

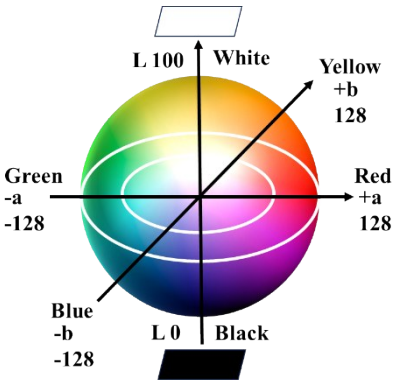


图3 CIELAB 色空间

Fig.3 CIELAB color space

在 MATLAB 中,利用色彩参数 L 、 a 和 b 绘制色域平面。固定亮度参数 L 构建以 a 为横轴、 b 为纵轴的网格坐标系,将每个网格点的 Lab 值转换为 RGB 值,其中超出显示范围的区域被掩膜处理为白色,

进而生成颜色渐变填充的色域平面图。将测量的色彩参数投影到该平面上并绘制标记点,使用色域平面图来直观展示不同配比下的石膏饰面砂浆色彩偏移的方向性特征和差异程度。

1.3.4 石膏饰面砂浆的色彩稳定性

研究设置的环境为自然室内环境,在该环境下将石膏饰面砂浆养护 28 d,分别在 3、7、14、28 d 时测量石膏饰面砂浆的色彩参数。根据《均匀色空间和色差公式》(GB/T 7921-2008)计算 ΔE ,计算公式为

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_0)^2 + (a_1 - a_0)^2 + (b_1 - b_0)^2} \quad (1)$$

式中: L_0 、 a_0 、 b_0 为砂浆养护 3d 的色彩参数; L_1 、 a_1 、 b_1 为其他龄期下的色彩参数。 ΔE 为总色差值,代表两种颜色在三维空间中的距离,与人类的感知能力有关,当 ΔE 变化小于 1.5 时,表明砂浆的颜色趋于稳定,具体感知水平见表 3。

表 3 CIE LAB 中色差的感知水平^[17]

Table 3 Perceived levels of color difference in CIELAB^[17]

色差分级 ΔE	分类
<0.2	难以察觉
$0.2 \sim 0.5$	太小
$0.5 \sim 1.5$	小
$1.5 \sim 3.0$	可区分
$3.0 \sim 6.0$	易区分
$6.0 \sim 12.0$	大
>12.0	非常大

2 试验结果及分析

2.1 石膏饰面砂浆的工作性能

2.1.1 IOB 对石膏饰面砂浆工作性能的影响

IOB 颜料掺量对石膏饰面砂浆稠度和保水率的影响见图 4。砂浆的稠度随 IOB 颜料掺量的增加而增加,当颜料掺量为 8% 时,砂浆稠度为 66 mm。砂浆的保水率随 IOB 颜料掺量的增加呈先增后降的趋势,在 2% 掺量时保水率最大为 75.7%,8% 掺量时保水率为 74.2%,虽然高掺量时保水率有所下降,但 8% IOB 颜料掺量能够在保证基本工作性能

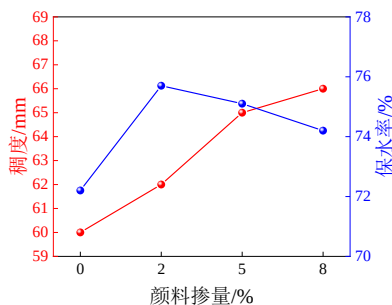


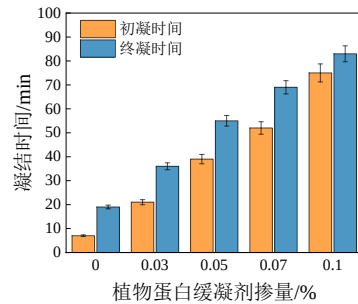
图 4 IOB 颜料掺量对石膏饰面砂浆稠度和保水率的影响

Fig.4 The effect of IOB pigment content on the consistency and water retention rate of decorative plaster

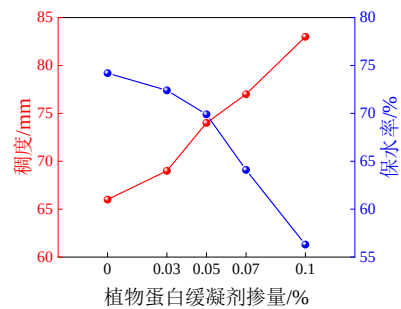
的前提下显著提升砂浆的染色和装饰效果,且稠度适中有利于施工操作。因此,综合考虑染色效果和施工性能,8% IOB 颜料掺量为较优选择。IOB 颜料中含有酞青蓝成分,具有较强的疏水性^[18]。在砂浆搅拌过程中,会带入一定量的空气,使得砂浆的稠度增大。

2.1.2 VPR 对石膏饰面砂浆工作性能的影响

石膏凝结时间短,难以满足施工要求,需掺入缓凝剂延长操作时间。当 IOB 颜料掺量为 8% (且保持其他材料为基准掺量) 时, VPR 对石膏饰面砂浆工作性能的影响见图 5。由图 5(a) 可知,随着 VPR 掺量的增加,砂浆的凝结时间不断增加。未添加 VPR 时,砂浆的初凝时间为 7 min,终凝时间为 19 min,无法满足施工需求。VPR 由蛋白质大分子和表面活性剂组成,官能团阻碍了石膏溶解,蛋白质包裹晶核,延长凝结时间。当掺量为 0.1% 时,初凝时间超过 60 min,且终凝时间小于 480 min,符合《抹灰石膏》(GB/T 28627—2023) 要求,可满足正常施工要求。



(a) 凝结时间



(b) 稠度、保水率

图 5 VPR 掺量对石膏饰面砂浆工作性能的影响

Fig.5 Effect of VPR content on the working performance of decorative plaster

由图 5(b) 可知,随 VPR 掺量增加,砂浆稠度增大,保水率下降。VPR 延缓了半水石膏水化和二水石膏结晶,增大了稠度。石膏水化反应被延缓,使得初期水分未充分参与反应,部分以自由水形式残留,增加了水分的蒸发和迁移,降低保水率。当缓凝剂掺量为 0.1% 时,保水率为 80.7%,符合《抹灰

石膏》(GB/T 28627—2023)要求。综合考虑工作性能,VPR最佳掺量为0.1%。

2.1.3 HPMC对石膏饰面砂浆工作性能的影响

在石膏饰面砂浆中加入VPR能延长其凝结时间,但保水率会下降,所以可在掺入8%IOB颜料和0.1%VPR的基础上,加入HPMC优化石膏饰面砂浆的保水效果。当IOB颜料掺量为8%、VPR掺量为0.1%(且保持其他材料为基准掺量)时,HPMC掺量对石膏饰面砂浆稠度和吸水率的影响见图6。由图6可见,随着HPMC掺量的增加,石膏饰面砂浆的稠度逐渐降低,而保水率显著提升。HPMC作为保水剂的工作机制取决于其吸水能力和聚合物缔合形成的网状结构。石膏饰面砂浆的孔隙溶液中含有硫酸盐,在HPMC低掺量下, SO_4^{2-} 会阻碍HPMC形成大的胶体缔合物,HPMC主要是通过分子内吸附水,随之膨胀来实现保水。随着HPMC掺量的增加,石膏饰面砂浆孔溶液的动态黏度增大,HPMC形成的网状结构更加密集,可填充中的孔隙^[19],导致石膏饰面砂浆稠度降低而保水率提高。

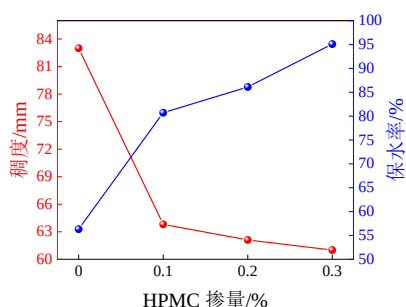


图6 HPMC掺量对石膏饰面砂浆稠度和保水率的影响

Fig.6 Effect of HPMC content on consistency and water retention rate of gypsum facing mortar

2.2 石膏饰面砂浆的力学性能

2.2.1 IOB对石膏饰面砂浆强度的影响

颜料掺量对石膏饰面砂浆力学性能的影响见图7。随着IOB颜料掺量的增加,砂浆的抗压、抗折强度及拉伸黏结强度均呈下降趋势。IOB颜料表面

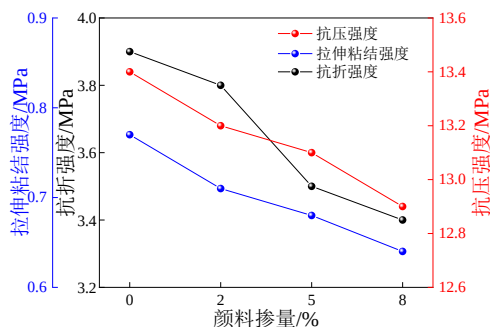


图7 IOB掺量对石膏饰面砂浆力学性能的影响

Fig.7 Effect of pigment content on mechanical properties of decorative plaster

的酞青蓝会吸附在砂浆上,阻碍石膏和水接触,从而阻碍和减少石膏的水化反应,且随IOB颜料加入,内部孔隙有所增加,微观结构变疏松,使得石膏饰面砂浆的抗压和抗折强度降低。随掺量增加,拉伸黏结强度下降是因为界面上颜料颗粒增多,界面上的石膏成分占比变小,石膏水化反应的产物也随之减少,界面处的化学结合力也减小。此外,砂浆的保水性能降低,与基层相连的石膏饰面砂浆水分散失,也会导致整体黏结强度降低。

2.2.2 VPR对石膏饰面砂浆强度的影响

当IOB颜料掺量为8%(保持其他材料为基准掺量)时,VPR掺量对石膏饰面砂浆力学性能的影响见图8。随着VPR掺量增加,砂浆的抗压、抗折强度逐渐减小,拉伸黏结强度先升后降,0.03%VPR掺量下拉伸黏结强度最大,可达0.65 MPa。其原因是,随VPR掺量增加,降低了石膏体系中 $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 的过饱和度^[20],减少了石膏硬化体中晶体数量,使得石膏硬化体中孔隙数量增多、孔径增大,孔隙结构恶化,进而强度降低。

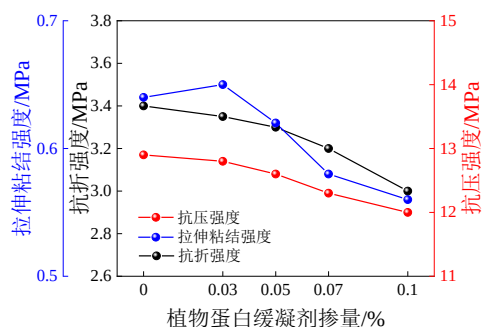


图8 VPR掺量对石膏饰面砂浆力学性能的影响

Fig.8 Effect of VPR content on mechanical properties of decorative plaster

2.2.3 HPMC对石膏饰面砂浆强度的影响

当IOB颜料掺量为8%、VPR掺量为0.1%(保持其他材料为基准掺量)时,HPMC掺量对石膏饰面砂浆力学性能的影响见图9。随着HPMC掺量的增加,砂浆的抗压、抗折及拉伸黏结强度呈先升后降的变化趋势,当HPMC掺量为0.2%时力学强度达到最大值,分别为14.1、4.5、0.73 MPa。HPMC的网状结构有助于水分子均匀分布,使石膏颗粒水化反应更充分,提高水化产物的数量和质量^[21]。因此,掺入适量的HPMC能增强石膏饰面砂浆的力学性能。

2.3 石膏饰面砂浆染色效果分析

2.3.1 IOB掺量的影响

不同IOB颜料掺量下石膏饰面砂浆LAB色空间中的色域平面图见图10。随颜料掺量从2%增至5%,L值降低了0.83,a值增加了2.26,b值降低了

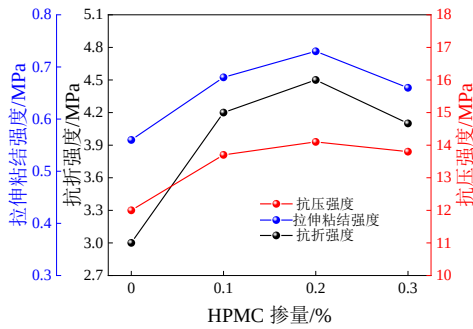


图9 HPMC 掺量对石膏饰面砂浆力学性能的影响

Fig.9 The effect of HPMC content on the mechanical properties of decorative plaster

4.2。当颜料掺量增至8%, L 值降低了0.38, a 值增加了0.89, b 值降低了0.44。该结果表明,随颜料掺量增加,砂浆颜色变暗,红绿色品逐渐向红色偏移,蓝黄色品逐渐向蓝色偏移,偏移幅度逐渐减小,颜

料染色效果逐渐达到饱和,当IOB 颜料掺量达到8%时,砂浆染色效果最佳。

2.3.2 VPR 掺量的影响

当IOB 颜料掺量为8%时,28 d时不同VPR 掺量下石膏饰面砂浆LAB 色空间中的色域平面见图11。由图11可知,当VPR 掺量由0.03%增至0.1%时,与不掺VPR 的试样相比, L 和 b 逐渐减小, a 呈增大趋势。当VPR 掺量为0.1%时, L 和 b 分别减小了6.3和1.84, a 增加了1.57。该结果表明,随着VPR 掺量的增加,砂浆颜色逐渐变暗,红绿色品逐渐向红色偏移,而蓝黄色品逐渐向蓝色偏移。当VPR 掺量为0.1%,IOB 颜料的染色效果最佳。VPR 属于大分子材料,掺入后能有效增加砂浆的稠度并延缓其凝结速度,从而使得IOB 颜料的分散性增强。VPR 掺量越大,IOB 颜料的分散性越好,染色效果也越好。

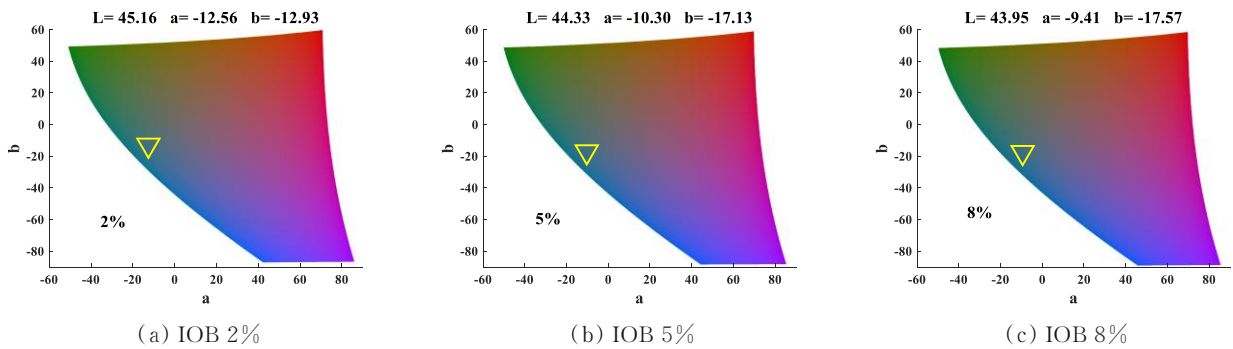


图10 不同IOB 颜料掺量下石膏饰面砂浆LAB 色空间中的色域平面图

Fig.10 Color gamut plan of decorative plaster LAB color space under different IOB pigment content

2.3.3 HPMC 掺量的影响

当IOB 颜料掺量为8%、VPR 掺量为0.1%时,28 d时不同HPMC 掺量下石膏饰面砂浆LAB 色空间中的色域平面图见图12。由图12可知,随着HPMC 掺量增加, L 和 b 呈增大趋势, a 先减小后增大。当HPMC 掺量为0.3%时, L 和 b 分别增加了13.06和7.7, a 减小了1.74。这表明,HPMC 掺量增加时,砂浆颜色由红绿色品向绿色小幅度偏移,蓝黄色品色则向黄色显著偏移。可见,HPMC 的掺入使砂浆颜色染色效果变差,且随掺量增加砂浆颜色逐渐变浅。当HPMC 掺量为0.1%时,砂浆染色效果最佳。故在保证砂浆合理施工性能的前提下,应选择低掺量的HPMC 来保证砂浆染色效果。

随着HPMC 的掺入,石膏晶体的长棒状结构逐渐转为板状结构(见图13(d)),砂浆的孔隙率减小^[21]。砂浆孔隙率的减少使得蓝色可见光在砂浆基体内部中的折射与反射减少。此外,孔结构变紧密,砂浆表面孔隙中的IOB 颜料部分被石膏晶体包裹,最终导致砂浆蓝色变浅^[22]。

综上所述,在8%IOB 颜料、0.1%VPR 和0.1%HPMC 掺量下的石膏饰面砂浆的工作性能较优,砂浆稠度为64 mm、初凝时间是71 min,保水率为80.7%,满足施工要求。此时砂浆抗压强度、抗折强度以及拉伸黏结强度分别为13.7、4.2、0.68 MPa,均满足《墙体饰面砂浆》(JC/T 1024—2019)中的强度要求且染色效果最佳。

2.4 石膏饰面砂浆的微观结构

2.4.1 微观形貌分析

不同IOB 颜料、VPR、HPMC 掺量,不同龄期下石膏饰面砂浆的微观结构如图13所示。养护28 d时,石膏砂浆中,二水石膏晶体呈长柱状,晶体间搭接节点多(见图13(a))。掺入8%IOB 后,块状晶体数量增多,长柱状晶体及块状晶体相互连接,晶体间搭接方式发生变化(见图13(b))。同时掺入8%IOB 颜料和0.1%VPR 后,不规则片状或块状晶体增多,晶体间搭接减弱,密实度降低(见图13(c))。砂浆中复掺8%IOB 颜料、0.1%VPR 和0.1%HPMC,养护3 d时,二水石膏晶体部分呈长

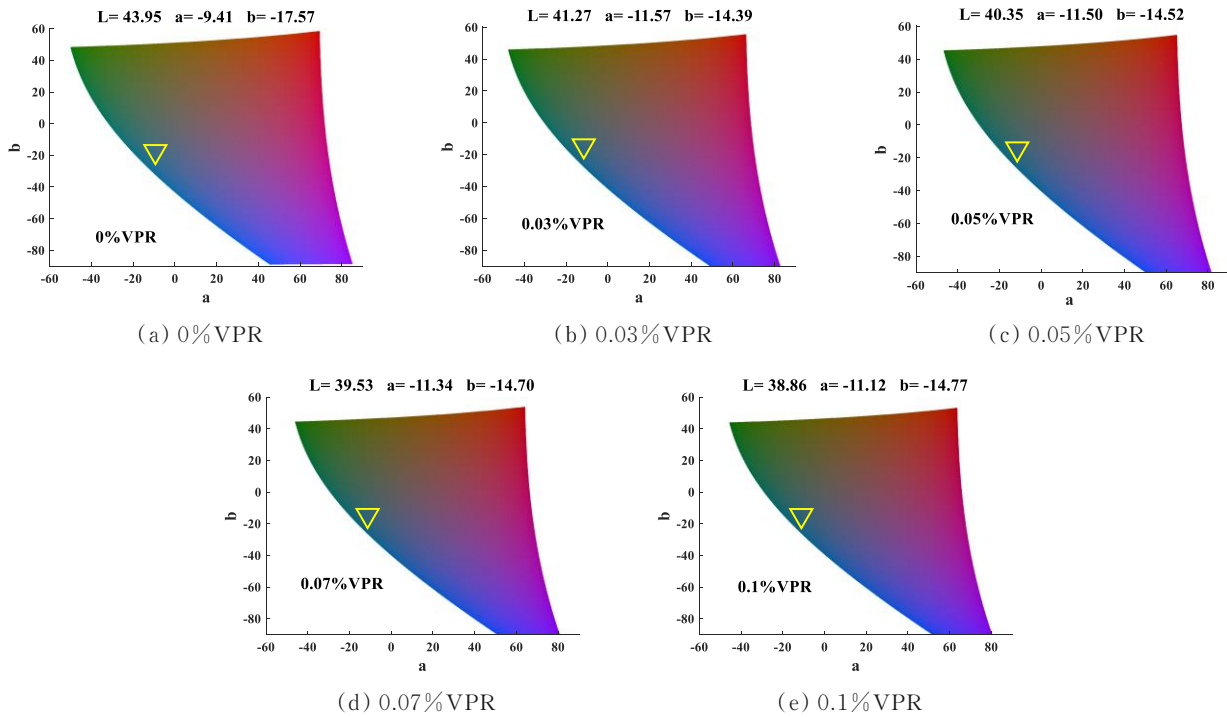


图 11 不同 VPR 掺量下石膏饰面砂浆 LAB 色空间中的色域平面图

Fig.11 Color gamut plan of decorative plaster LAB color space with different VPR content

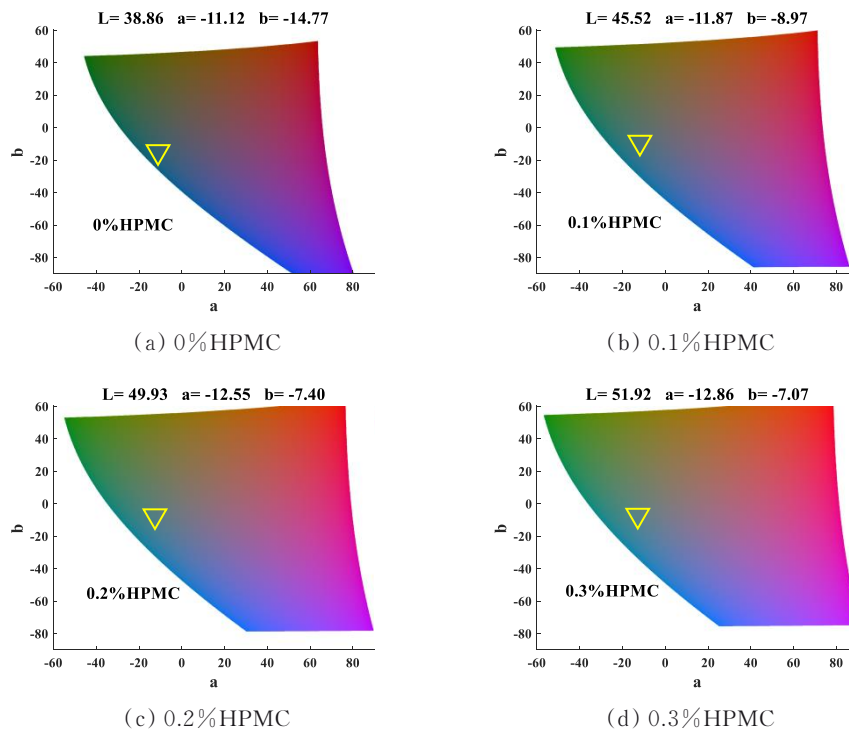


图 12 不同 HPMC 掺量下石膏饰面砂浆 LAB 色空间中的色域平面图

Fig.12 Color gamut plan of decorative plaster LAB color space with different HPMC content

棒状,部分呈薄片状,晶体间的搭接较弱(见图 13(d))。当养护时间延长到 28 d 时,块状及板状晶体增多,晶体间搭接较为致密,晶体堆积更加有序,整体密实度有所提高(见图 13(e))。

根据溶解析晶理论,半水石膏溶解产生的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 形成过饱和溶液,二水石膏晶核生成并连

接形成结晶网络。IOB 颜料作为成核场所降低成核位垒,加速水化进程,增加晶体生成量,提高石膏密实性。缓凝剂降低过饱和度,减少晶核数量,延长晶体生长时间,导致结晶颗粒增大、接触点减少、连接疏松^[23]。HPMC 增加石膏饰面砂浆的黏度,降低离子移动速率,其羟基选择性吸附在二水石膏晶体

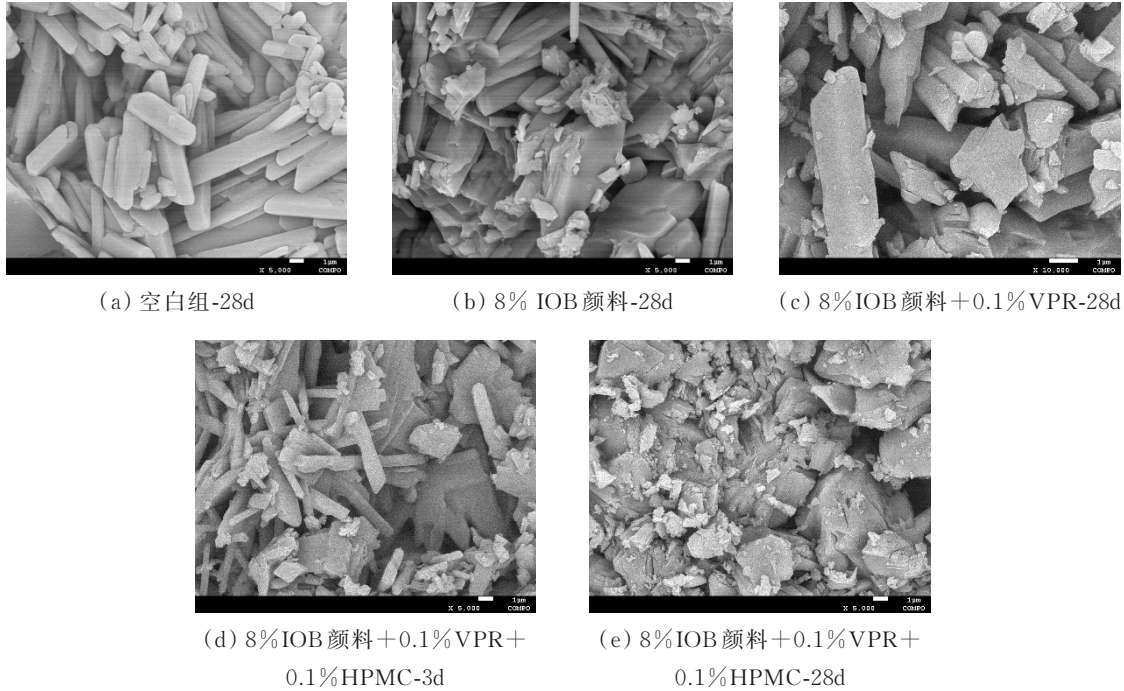


图 13 石膏饰面砂浆的 SEM 图

Fig.13 SEM image of decorative plaster

C轴上,阻碍晶体轴向生长,使晶体长径比减小。

2.4.2 孔结构分析

各组砂浆的 MIP 测试结果见表 4 和图 14。由表 4 和图 14 可见,空白组砂浆养护 28 d 时孔隙率较低,中值孔径较小,孔径分布相对集中。掺入 8%IOB 颜料后,砂浆的孔隙率增加,中值孔径增大,孔径分布范围向大孔方向扩展,IOB 颜料的加入增加了砂浆内部孔隙,孔径变大。当复掺 8%IOB 颜料、0.1%VPR 和 0.1%HPMC 后,养护 3 d 时的砂浆孔隙率和中值孔径处于较高水平,孔径分布较宽。随着养护时间延长至 28 d,孔隙率和中值孔径降低,孔径分布更加集中,说明砂浆孔结构随养护时间有所优化。IOB 颜料使晶体由长柱状向块状转变,块状晶体堆积效率低,晶体间孔隙空间增大,同时 IOB 颗粒占据空间但不参与水化,导致孔隙率增加。复掺 VPR 后,晶体形态向片状和块状发展,晶体间搭接减少。而 HPMC 的加入改善了水分分布,

促进水化反应,使得水化产物均匀填充孔隙。随养护时间延长,水化产物逐渐填充大孔隙,内部结构更为致密,但由于 IOB 和 VPR 对晶体形态的影响,复掺组孔隙率仍略高于空白组。

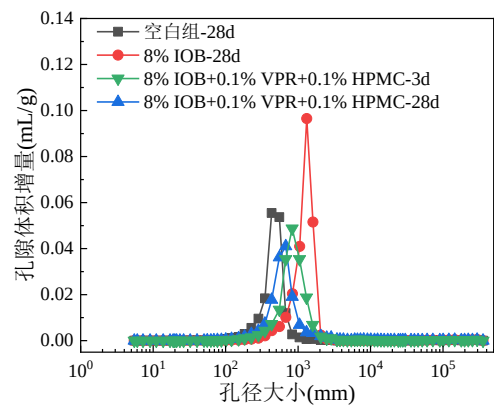


图 14 各组砂浆内部孔结构分析结果

Fig.14 Analysis results of internal pore structure of different color gypsum mortars

表 4 各组砂浆的 MIP 测试结果

Table 4 MIP test results of mortar in each group

试样名称	孔隙率/%	中值孔径/nm	总孔体积/(mL/g)
空白组-28d	26.88	550.99	0.103 4
8% IOB-28d	35.34	1 317.70	0.183 5
8% IOB+0.1% VPR+0.1% HPMC-3d	29.53	892.35	0.145 0
8% IOB+0.1% VPR+0.1% HPMC-28d	28.09	675.42	0.122 8

2.5 石膏饰面砂浆的色彩稳定性

当 IOB 颜料掺量为 8%、VPR 掺量为 0.1%、

HPMC 掺量为 0.1% 时,不同龄期下石膏饰面砂浆 LAB 色空间中的色域平面图见图 15。以自然养护

3 d 的砂浆色彩($\Delta E=0$)为基准,从 3 d 增至 28 d 时, L 呈减小趋势, a 先增后降, b 和 ΔE 呈增大趋势。不同养护时间下砂浆的 ΔE 增幅分别为 2.87、1.44、0.82。这表明,随时间增长,砂浆颜色由红绿色品先向绿色偏移,再向红色偏移,蓝黄色品则逐渐向

黄色偏移,砂浆颜色逐渐变浅。但砂浆的色差显著减小,色彩趋于稳定。砂浆 28 d 时的 ΔE 比 14 d 时小 0.82,人眼已无法感知该色差。此时色彩均匀,满足《建筑装饰装修工程质量验收标准》(GB 50210—2018)的要求,且养护 14 d 后色彩逐渐趋于稳定。

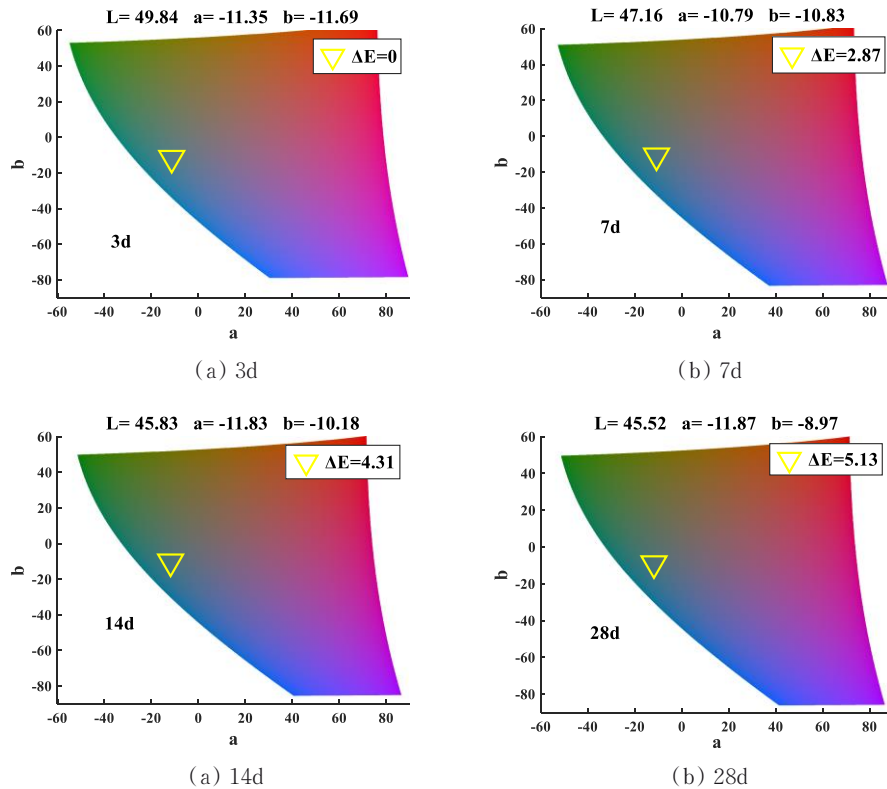


图 15 不同龄期下石膏饰面砂浆 LAB 色空间中的色域平面图

Fig.15 Color gamut plan of decorative plaster in LAB color space at different ages

为考虑其长期的色彩稳定性,采用模型预测的方法来研究其色彩变化。采用的模型为指数衰减经验模型^[24-25],能较好描述砂浆色彩变化规律,模型公式见式(2)。

$$\Delta E(t) = A \times (1 - \exp(-t/\tau)) \quad (2)$$

式中: $\Delta E(t)$ 为养护 t 天后的总色差; A 为饱和 ΔE 值; τ 为时间常数。

基于 28 天 ΔE 值数据,采用最小二乘法拟合得到, $A=6.093$, $\tau=13.52$ 和 $R^2=0.8807$ (见图 16)。该模型预测结果表明,砂浆色彩 28 d 后每周的 ΔE 增长率仅为 0.86%,41 d 时基本达到稳定状态,50 d 后能够保持长期稳定状态。

在养护初期,砂浆内部晶体多为长棒状,孔隙多且孔径大(见图 13(d)),使得入射光在孔隙界面发生多次反射和折射,增强了蓝光可见光波长的选择性反射,砂浆呈现出较为明显的蓝色^[26]。随着养护时间延长,砂浆水化较为充分,28 d 时砂浆内部的孔隙减小,结构更加致密(见图 13(e)),砂浆表面的颜料被砂浆晶体包裹,使得砂浆蓝色变浅^[27]。

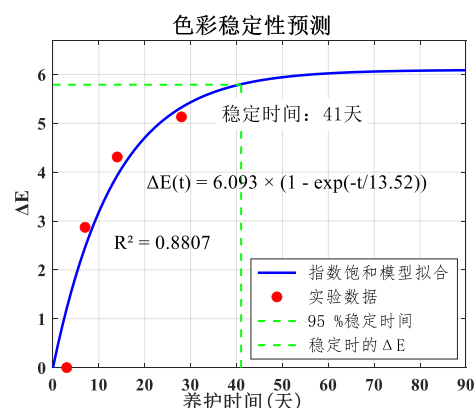


图 16 彩色石膏饰面砂浆长期色彩稳定性预测

Fig. 16 Prediction of long-term color stability of color gypsum facing mortar

3 结论

1) 石膏饰面砂浆的稠度随 IOB 颜料掺量的增加而增大,凝结时间随 VPR 掺量的增大而显著延长,HPMC 掺量的增加使砂浆的稠度降低,但保水率显著提高。

2)当IOB颜料和VPR掺量增加时,石膏饰面砂浆抗压、抗折强度均呈降低趋势,拉伸黏结强度则先增大后降低。HPMC掺量增加时,石膏饰面砂浆力学性能呈先升后降的变化趋势。

3)彩色石膏饰面砂浆的染色效果随IOB颜料掺量和VPR掺量的增加而增强,随HPMC掺量的增加而变差。综合考虑石膏饰面砂浆的工作性能、力学性能及染色效果,确定出颜料与外加剂的最佳掺量为8%IOB颜料、0.1%VPR和0.1%HPMC。

4)石膏饰面砂浆中掺8%IOB颜料、0.1%VPR和0.1%HPMC,养护3d时,二水石膏晶体部分呈长棒状,部分呈薄片状,晶体间的搭接较弱,结构内部孔隙较多。养护延长到28d时,块状及板状晶体增多,晶体间搭接较为致密,孔隙明显减小,整体密实度显著提高。

5)石膏饰面砂浆的养护时间延长时, ΔE 逐渐增大,但 ΔE 增幅逐渐减小,养护时间从14d延长到28d时, ΔE 仅增大了0.82,该色彩变化人眼已无法感知,砂浆色彩在14d时逐渐趋于稳定。根据模型预测结果,砂浆色彩在41d时基本达到稳定状态,在50d后能够保持长期稳定状态。

参考文献

- [1] HATAMI L, JAMSHIDI M. Effects of type and duration of pigment milling on mechanical and colorimetric properties of colored self compacting mortars (CSCM) [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35: 102006.
- [2] JIN Y, XU J B, LI Y L, et al. Rheological properties, shape stability and compressive strength of 3D printed colored cement composites modified by needle-like pigment [J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 57: 102965.
- [3] MA H E, WANG R, XI Z Y, et al. Regulation and inhibition of early whitening of calcium aluminate cement/hemihydrate gypsum decorative mortar by polymer emulsion [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 393: 132023.
- [4] 张国防,王聪,王肇嘉,等.聚羧酸减水剂对水泥基饰面砂浆泛碱性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(1): 1-6.
ZHANG G F, WANG C, WANG Z J, et al. Effects of polycarboxylate superplasticizer on efflorescence of cement-based decorative mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(1): 1-6. (in Chinese)
- [5] BARBHUIYA S, KANAVARIS F, DAS B B, et al. Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 86: 108861.
- [6] GUAN Q J, WANG Z, ZHOU F J, et al. The impurity removal and comprehensive utilization of phosphogypsum: A review [J]. *Materials*, 2024, 17(9): 2067.
- [7] 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, 22.
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, 22. (in Chinese)
- [8] SHI X, ZENG A, DUAN H B, et al. Status and development trends of phosphogypsum utilization in China [J]. *Circular Economy*, 2024, 3(4): 100116.
- [9] 徐长忠,於金浩,李义连.磷石膏的预处理和综合利用研究进展[J]. *安全与环境工程*, 2024, 31(1): 260-270.
XU C Z, YU J H, LI Y L. Research progress of pre-treatment and comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(1): 260-270. (in Chinese)
- [10] JIANG Z Y, SUN X P, LUO Y Q, et al. Recycling, re-using and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 432: 136609.
- [11] WANG C Q, YING Y, WANG T, et al. Highly efficient modified phosphogypsum building gypsum powder and environmentally friendly utilisation in self-levelling mortar [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2024, 24(2): 118.
- [12] 成俊辰,赵志曼,张晖,等.稻壳磷建筑石膏抹灰砂浆技术性能研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(增刊1): 257-261.
CHENG J C, ZHAO Z M, ZHANG H, et al. Study on technical performance of rice husk phosphate building gypsum plastering mortar [J]. *Materials Reports*, 2022, 36(Sup 1): 257-261. (in Chinese)
- [13] LIANG M Q, LIU S, QIN H. The application of 3D printing technology in the formation of wide gypsum-based reliefs [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2902(1): 012003.
- [14] SÁEZ-PÉREZ M P, DURÁN-SUÁREZ J A, VERDÚ-VÁZQUEZ A, et al. Characterization and chromatic evaluation of gypsum-based pastes for construction and heritage restoration [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 307: 124981.
- [15] STEFENON F L, JAERGER S, SCHNEIDER R, et al. Synthesis and characterisation of iron oxides: Effect of calcination temperature and their application as inorganic pigment [J]. *Coloration Technology*, 2025: 12826.
- [16] LEMOS M Z, JAERGER S, BALABA N, et al. Synthesis and characterization of iron oxides and their application as inorganic pigments in white paint [J]. *Coloration Technology*, 2024, 140(5): 769-781.
- [17] LÓPEZ A, PITTORI A, DI SARLI A R. Architectur-

- al self-compacting concretes and their color stability for 10 years [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 451: 138650.
- [18] LÓPEZ A, TOBES J M, GIACCIO G, et al. Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(10): 754-761.
- [19] BÜLICHEN D, PLANK J. Water retention capacity and working mechanism of methyl hydroxypropyl cellulose (MHPC) in gypsum plaster: Which impact has sulfate [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 46: 66-72.
- [20] ZHI Z Z, HUANG J, GUO Y F, et al. Effect of chemical admixtures on setting time, fluidity and mechanical properties of phosphorus gypsum based self-leveling mortar [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(5): 1836-1843.
- [21] MUCHA M, MRÓZ P, WRONA D, et al. Microstructural formation of gypsum by setting in the presence of hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022, 147(2): 1107-1113.
- [22] LU P T, AHN D, YUNIS R, et al. Wavelength-selective light-matter interactions in polymer science [J]. *Matter*, 2021, 4(7): 2172-2229.
- [23] 汪才峰, 蹇守卫, 李宝栋, 等. 凹凸棒土对石膏 3D 打印材料基本性能和可打印性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(5): 1748-1755.
- WANG C F, JIAN S W, LI B D, et al. Influence of attapulgite clay on basic properties and printability of gypsum 3D printing materials [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(5): 1748-1755. (in Chinese)
- [24] WARNER R M. *Applied statistics II : Multivariable and multivariate techniques* [M]. Sage Publications, 2020.
- [25] DETTE H, LOPEZ I M, ORTIZ RODRIGUEZ I M, et al. Maximin efficient design of experiment for exponential regression models [J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2006, 136(12): 4397-4418.
- [26] MALINKA A V. Light scattering in porous materials: Geometrical optics and stereological approach [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 141: 14-23.
- [27] 杨林, 焦媛, 况栋梁, 等. 颜料对聚合物水泥砂浆性能影响的实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(6): 321-325.
- YANG L, JIAO Y, KUANG D L, et al. Experimental investigation on the effect of pigments on properties of polymer cement mortar [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(6): 321-325. (in Chinese)
- (编辑 XXX)