

文章编号:1673-9469(2025)05-0039-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.05.005

磷石膏基发泡建筑石膏的制备与性能研究

薛凯喜^{1,2}, 严小婷^{1,2*}, 王天源^{1,2}, 蔡梦莹^{1,2}, 司鹏超^{1,2}, 胡艳香^{1,2}

(1. 东华理工大学 土木建筑工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 江西省地质环境与地下空间工程研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要: 为探究不同配合比对磷石膏基发泡建筑石膏物理力学性能的影响规律,提高磷石膏的资源化利用率,试验采用单因素试验分析和微观形貌检测方法,系统研究了三种不同配合比下的磷石膏基发泡建筑石膏的物理力学性能、热学性能和孔隙结构。利用扫描电镜(SEM)深入观察并分析了不同配合比下的磷石膏基发泡建筑石膏的微观形貌和各组分之间的相互作用机制,揭示了微观结构与宏观性能变化之间的内在联系。试验结果表明:磷石膏基发泡建筑石膏的表观密度和力学性能随发泡剂掺量的增加而减小;最佳配合比:磷石膏掺量为60%、水泥掺量为20%、矿渣粉掺量为10%、石膏晶须掺量为10%、缓凝剂掺量为胶凝材料的0.1%、水固比为0.5。与之对应的最优的十二烷基硫酸钠(K12)发泡剂掺量为12.5%,由其制备的磷石膏基发泡建筑石膏的绝干强度达到最优水平;SEM试验表明,石膏晶须填充了晶体搭接之间的孔隙,使试块的密实度提高,且石膏晶须在试块的微缝处形成搭接,阻碍了微裂缝的产生和扩张,改善了试块的内部孔隙结构,提高了磷石膏基发泡建筑石膏的综合性能。

关键词: 磷石膏; 发泡剂; 表观密度; 力学性能; 导热系数

中图分类号: TU55

文献标识码: A

Study on Preparation and Properties of Phosphogypsum-based Foamed Building Gypsum

XUE Kaixi^{1,2}, YAN Xiaoting^{1,2*}, WANG Tianyuan^{1,2}, CAI Mengying^{1,2}, SI Pengchao^{1,2}, HU Yanxiang^{1,2}

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013,

China; 2. Engineering Research Center for Geological Environment and Underground Space of Jiangxi

Province, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: To explore the influence laws of different mix ratios on the physical and mechanical properties of phosphogypsum-based foamed building gypsum, in order to improve the resource utilization rate of phosphogypsum, the experiment adopted single-factor experimental analysis and microscopic morphology detection methods to systematically study the physical and mechanical properties, thermal properties and pore structure of phosphogypsum-based foamed building gypsum under three different mix ratios. The microscopic morphology of phosphogypsum-based foamed building gypsum under different mix ratios and the interaction mechanism between each component were deeply observed and analyzed using scanning electron microscopy (SEM), revealing the intrinsic relationship between the microstructure and macroscopic performance changes. The test results showed that the apparent density and mechanical properties of phosphogypsum-based foamed building gypsum decreased with the increase of foaming admixture content; the optimal mix ratio was: phosphogypsum content of 60%, cement content of 20%, slag powder content of 10%, gypsum whisker content of 10%, retarder content of 0.1% of the cementi-

收稿日期: 2024-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42167024)

第一作者: 薛凯喜(1981—), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程相关领域的教学科研工作。

* 通信作者: 严小婷(2000—), 女, 广西玉林人, 硕士研究生, 主要从事土木工程材料相关领域的研究。

tious material, water-to-solid ratio of 0.5. Correspondingly, the optimal sodium dodecyl sulfate (K12) foaming agent content was 12.5%, and the phosphogypsum-based foamed building gypsum prepared with this foaming agent reached the optimal level of absolute dry strength; SEM tests indicated that gypsum whiskers filled the pores between crystal connections, increasing the density of the test block, and gypsum whiskers formed connections at the micro-fissures of the test block, preventing the generation and expansion of micro-cracks, improving the internal pore structure of the test block, and enhancing the comprehensive performance of phosphogypsum-based foamed building gypsum.

Key words: phosphogypsum; foaming agent; apparent density; mechanical properties; thermal conductivity

磷石膏是湿法生产磷酸过程中产生的固体废物,其主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,每生产 1 t 磷酸会产生 4.8~5.0 t 磷石膏废渣^[1]。目前,我国堆存的磷石膏总量已经超过了 5 亿 t。磷石膏资源化利用成为国内外研究的热点领域^[2]。

Gencel 等^[3]通过将硅藻土与聚丙烯纤维混合,成功制备了一种新型的石膏基保温材料,并采用了 X 射线荧光光谱分析(X-ray Fluorescence, XRF)、X-射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)、热重分析(Thermogravimetric Analysis, TGA)和扫描电镜(Scanning Electronic Microscopy, SEM)等分析技术对材料的微观结构和热工性能进行了综合评估,结果表明,添加硅藻土可显著提高材料的孔隙率,降低表观密度和导热系数。李志博等^[4]研究了引气剂对轻质抹灰石膏砂浆含气量的影响,发现砂浆含气量随引气剂的增加而增大,适量的引气剂可优化轻质抹灰石膏的抗裂性。Capasso 等^[5]研究了植物蛋白发泡剂先制备泡沫再与浆体混合,以及直接与浆体混合两种工艺对导热系数、强度和孔隙结构的影响。何玉龙等^[6]在一定蒸压条件下,确定了外加剂料浆质量分数及转晶剂掺加量,制备出符合强度标准的 α 高强石膏,其抗压强度高达 34.7 MPa。因此,就石膏基保温材料而言,采用发泡方式将石膏处理成石膏保温材料最为可行。在一定程度上,发泡剂制备的石膏基保温材料保温隔热性优于其他工艺制备的石膏基保温材料。

当前,对于石膏基保温材料的研究取得了一定的进展,但关于磷石膏基发泡建筑石膏设计原则的研究尚不充分,需要更多的试验验证其可行

性。基于此,本文以磷石膏基发泡建筑石膏为研究对象,以表观密度、力学性能和导热系数为评价指标,研究胶凝材料(磷石膏、水泥、矿渣粉)的不同配比对磷石膏基发泡建筑石膏基本性能的影响规律。运用 SEM 技术深入解析了不同配比的磷石膏基发泡建筑石膏的微观形貌,探明水泥、矿渣粉和石膏晶须等组分对磷石膏基发泡建筑石膏微观层面的影响,揭示其性能差异的内在机理,为磷石膏基发泡建筑石膏生产提供微观理论基础和数据支撑。

1 试验概况

1.1 原材料

本次研究所用的磷石膏来自江西银泰建材有限公司,经过球磨、煅烧等精细化工工艺处理后,筛分得到外观为灰色的粉末;水泥采用江西南昌县华禹建材公司的 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,密度为 $1\ 200\ \text{kg}/\text{m}^3$,导热系数为 $0.5\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;矿渣粉购于巩义市龙泽净水材料有限公司,其外观为灰色粉末;石膏晶须购于长沙路石材料有限公司,外观呈纤维状;植物蛋白缓凝剂购于北京隆腾达化工有限公司,其外观为白色粉末;发泡剂采用上海美加净日化有限公司生产的十二烷基硫酸钠(Sodium dodecyl sulfate, K12),外观为白色粉末,具有刺激性气味。采用 XRF 分析技术测试高温处理后磷石膏、水泥、矿渣粉和植物蛋白缓凝剂化学成分含量,结果如表 1 所示,磷石膏物理力学性能见表 2。

表 1 原材料的化学成分含量

(单位:%)

Tab. 1 Chemical composition analysis of phosphogypsum

(unit: %)

原材料	SO_3	CaO	SiO_2	P_2O_5	Fe_2O_3	Al_2O_3	F	K_2O	BaO	MgO	Na_2O	TiO_2
磷石膏	50.750	39.760	6.410	0.780	0.650	0.630	0.340	0.180	0.140	—	—	—
硅酸盐水泥	2.300	56.800	22.900	—	2.700	7.300	—	0.600	—	2.700	0.300	0.300
矿渣粉	1.640	34.000	34.500	—	1.030	17.700	—	—	—	6.010	—	—
植物蛋白缓凝剂	0.438	78.634	10.705	—	0.433	2.562	—	0.676	—	1.493	4.860	—

表2 磷石膏的物理力学性能

Tab.2 Physical and mechanical properties of phosphogypsum

容重/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	凝结时间/min		2 h 强度/MPa		绝干强度/MPa	
	初凝时间	终凝时间	抗折强度	抗压强度	抗折强度	抗压强度
1 302	4	9	3.7	7.1	5.5	12.5

1.2 试验方案

受自身性质的限制,磷石膏浆体存在凝结速度过快等问题,需加入缓凝剂延长其凝结时间^[7]。本次研究选用掺量为0.1%的植物蛋白缓凝剂,水固比为0.5,以K12为基础发泡剂,利用矿渣粉、石膏晶须对磷石膏基发泡建筑石膏进行增强处理,设计了3种配合比试验方案制备磷石膏基发泡建筑石膏试块。方案1,磷石膏:水泥:矿渣粉=7:2:1;方案2,磷石膏:水泥:矿渣粉=6:2:2;方案3,磷石膏:水泥:矿渣粉:石膏晶须=6:2:1:1,进而优选出较为经济、环保的磷石膏基发泡建筑石膏的胶凝材料(磷石膏、水泥、矿渣)占比。

1.3 测试方法

本试验中未掺入发泡剂的石膏浆体试块测试时,加载速率取1 000 N/s,掺入发泡剂的石膏浆体测试时,加载速率取500 N/s,试块的尺寸为40 mm×40 mm×160 mm,对每组3个试块进行测试,试验结果取3个试块测试值的平均值。

试验采用TC3000E+中温固体模块导热系数测定仪测定试块的导热系数,该仪器由夏溪电子科技有限公司生产。每组试块按照标准养护至龄期后测定其导热系数,为保证测定结果的准确性,测试过程中两个被测试块与传感片之间要紧密封合。

将养护到期的试件放入温度为40℃的电热鼓风恒温干燥箱干燥至恒重,用电子天平测量其质量,并计算其表观密度^[8]。试块的抗折强度和抗压强度按照《建筑石膏》(GB/T 9776—2022)中的方法进行测定。

2 结果分析

2.1 表观密度

不同试验方案的磷石膏基发泡建筑石膏表观密度随发泡剂掺量的变化趋势见图1。可以看出,3种方案试块的表观密度随发泡剂掺量的增加总体呈现下降趋势,一方面是因为矿渣粉的体积密度大于水泥,而石膏晶须体积密度较小,可以用作

轻质材料,在一定的掺量范围内,可以降低建筑材料的表观密度^[9];另一方面是因为随着发泡剂掺量的增加,胶凝材料占试块体积的比重逐渐减小,表观密度下降速率逐渐减小,因此,表观密度出现先减小再逐渐稳定的现象^[10]。按照《抹灰石膏》(GB/T 28627—2012)规范,表观密度要求低于1 000 kg/m^3 ,方案1表观密度不符合规范要求,而方案2在15%发泡剂掺量下、方案3在12.5%和15%发泡剂掺量下,其表观密度符合规范要求。

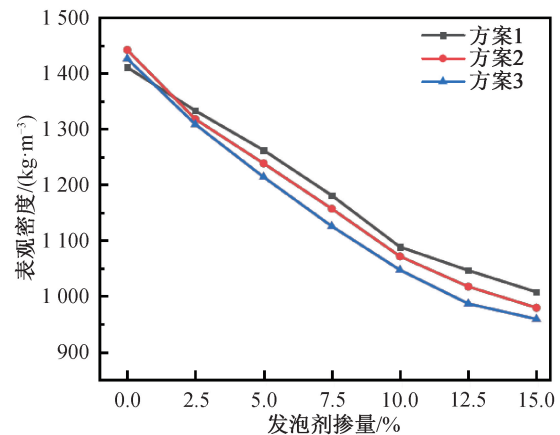


图1 不同配合比的磷石膏基发泡建筑石膏表观密度
Fig. 1 Apparent density of phosphogypsum-based foamed building gypsum with different material proportions

2.2 力学性能

图2为不同配合比的磷石膏基发泡建筑石膏绝干抗折强度和绝干抗压强度的变化图。可以看出,初始绝干抗折强度和绝干抗压强度的关系均为方案3>方案1>方案2。这主要是方案2的矿渣含量为20%,是方案1和方案3的2倍,矿渣能与 CaSO_4 反应生成钙矾石等难溶物质,充当试块的承重结构,从而提高磷石膏基发泡建筑石膏试块的强度^[11]。但是,由于矿渣的颗粒粒径大于磷石膏,超过化学反应所需的矿渣粉反而会破坏试块原本的完整性,导致试块的强度降低^[12]。

当发泡剂掺量从0%增加到15%时,方案3的绝干抗折强度和绝干抗压强度均高于其他方案,但3种方案之间的强度差值随发泡剂的增加而逐渐减小。当发泡剂掺量达到10%之后,方案3与其他方案间的强度差异变化不再明显。分析其机

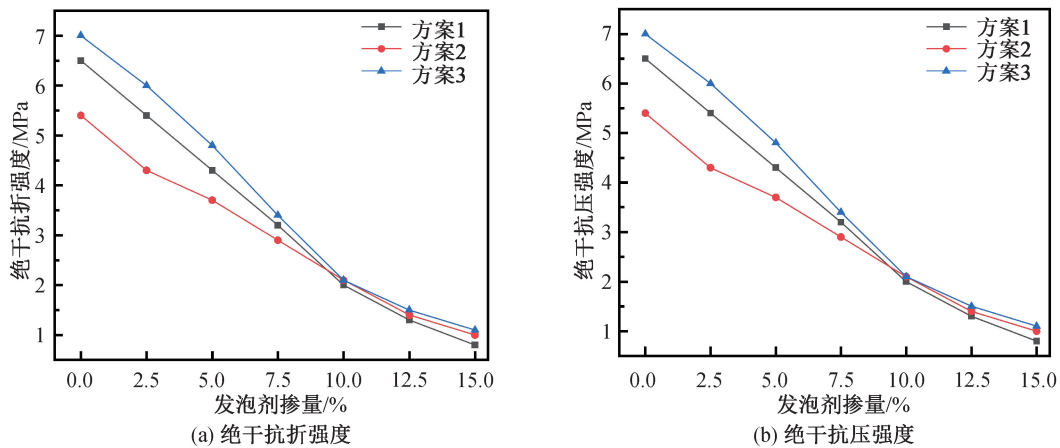


图2 不同物料配合比的磷石膏基发泡建筑石膏绝干强度

Fig. 2 Absolute dry strength of phosphogypsum-based foamed building gypsum with different material mixtures

理,试块绝干强度的下降主要源于磷石膏基发泡建筑石膏中胶凝材料的减少,进而导致水化生成的硬化浆体减少。由于硬化浆体是试块承重的唯一结构,随着发泡剂掺量的增多,胶凝材料的占比降低,硬化浆体含量随之减少,3种配合比的磷石膏基发泡建筑石膏间的绝干强度差距因此缩小。

在发泡剂掺量达到10%之前,方案1的绝干抗折强度和绝干抗压强度高于方案2,而当掺量超过10%后,方案2的绝干抗折强度和绝干抗压强度高于方案1。这主要是因为纯矿渣浆体制成的试块强度高于纯磷石膏浆体制成的试块强度。然而,随着发泡剂掺量的增加,单位体积内的矿渣占比降低,发泡剂为矿渣和 CaSO_4 反应提供了水分子,促进了矿渣的充分反应,生成更多的钙矾石^[13]。因此,方案2在较高发泡剂掺量下的绝干

抗折强度和绝干抗压强度高于方案1。

由于方案1的表观密度不符合《抹灰石膏》(GB/T 28627—2012)要求,现将方案2和方案3进行对比分析,如表3所示。可以看出,方案2在15.0%发泡剂掺量下和方案3在12.5%发泡剂掺量下的磷石膏基发泡建筑石膏试块的表观密度接近,分别为979.3、986.5 kg/m^3 。绝干抗折强度分别为1.0、1.5 MPa,绝干抗压强度分别为2.2、3.8 MPa,导热系数均为0.2 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。因此,在表观密度接近时,方案3的绝干强度优于方案2,二者的导热系数无差别。

2.3 导热系数

对泡沫保温材料而言,导热系数是重要的评价指标之一。图3为3种配合比方案试块的导热

表3 方案2与方案3的试验指标及结果

Tab. 3 Test indexes and results of scheme II and scheme III

方案	发泡剂掺量/ %	表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	绝干抗折强度/ MPa	绝干抗压强度/ MPa	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
方案2	2.5	1 317.7	4.3	12.7	0.34
	5.0	1 238.2	3.7	9.9	0.29
	7.5	1 157.0	2.9	7.8	0.25
	10.0	1 071.4	2.1	5.9	0.22
	12.5	1 017.1	1.4	3.6	0.21
	15.0	979.3	1.0	2.2	0.20
方案3	2.5	1 308.3	6.0	16.6	0.32
	5.0	1 213.8	4.8	12.8	0.27
	7.5	1 125.6	3.4	9.7	0.23
	10.0	1 046.9	2.1	6.4	0.21
	12.5	986.5	1.5	3.8	0.20
	15.0	958.8	1.1	2.5	0.19

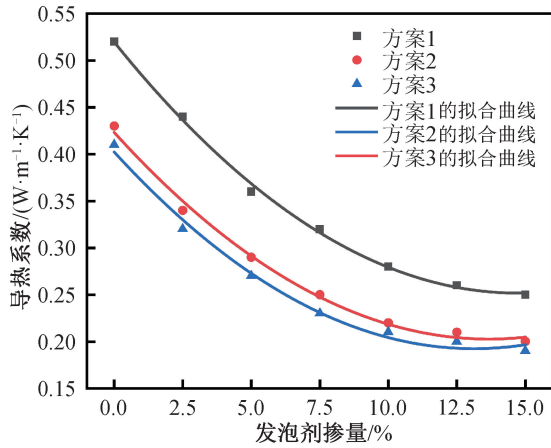


图 3 不同物料配合比的磷石膏基发泡建筑石膏导热系数及其拟合曲线

Fig. 3 Thermal conductivity and fitting curve of phosphogypsum-based foamed building gypsum with different material proportions

系数随发泡剂掺量的变化图,可以看出,3 种方案的导热系数均随发泡剂掺量的增加而减小^[14]。对导热系数进行了二次函数拟合,发现拟合后相关指数 R^2 均大于 0.99,拟合程度极高,方案 1、方案 2、方案 3 的拟合方程分别见式 (1)~式 (3)。

$$y = 0.52 - 0.04x + 9.13 \times 10^{-5}x^2 \quad (1)$$

$$y = 0.42 - 0.03x + 1.26 \times 10^{-4}x^2 \quad (2)$$

$$y = 0.40 - 0.03x + 1.50 \times 10^{-4}x^2 \quad (3)$$

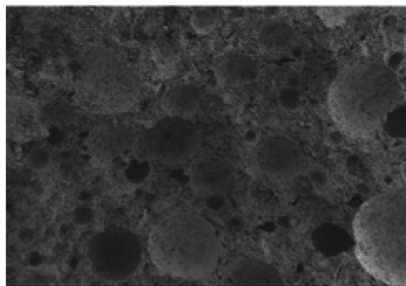
2.4 孔隙结构分析

在发泡剂掺量为 12.5% 条件下,3 种配合比的磷石膏基发泡建筑石膏试件标准养护 28 d,烘干后通过 100 倍 SEM 观察其孔隙结构特征,如图 4 所示。可以看出,不同配合比的试块在相同发泡剂掺量下呈现出孔径结构和孔隙的分布差异。

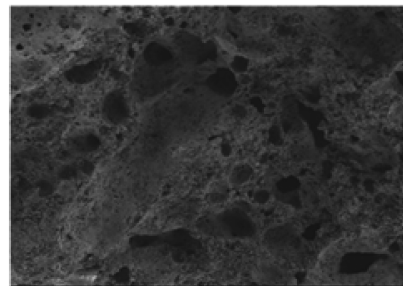
方案 1 试块内部孔隙数量较少,气泡多为独立的封闭球形气泡,孔壁较薄,少数接触的气泡通过胶体凝结硬化相互连通形成串孔,其孔径主要集中在 300~400 μm 和 100~200 μm 区间,分布较为分散。

方案 2 的试块内部孔隙数量多于方案 1,独立存在的气泡较少,大多数气泡以连通孔的形式存在,其孔径集中分布在 200~300 μm 范围内,分布较为均匀。这是由于过量的矿渣粉破坏了磷石膏基的整体性,导致试块结构疏松、孔隙增大,减小了气泡的生长阻力^[15],进而使气泡密度增大,孔壁变薄,并形成不规则的连通气泡和塌陷现象。

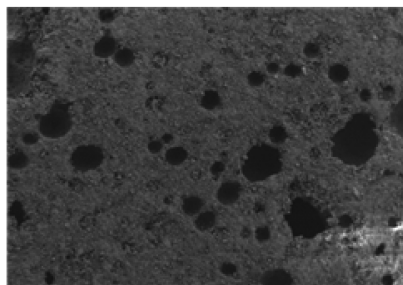
方案 3 的试块内部孔隙数量适中,没有出现串孔和塌陷现象,大多数气泡是独立存在的^[16],孔径集中在 100~200 μm 范围内,分布较为均匀。与方案 1 和方案 2 相比,方案 3 的孔径减小,孔壁增厚,气泡主要为球形封闭气泡,表现出良好的孔隙结构。这归因于适量的石膏晶须填充了磷石膏浆体的孔隙,增加了气泡生长阻力,从而有效抑制了气泡的大量生长^[17]。



(a) 12.5%发泡剂掺量下方案1泡沫磷石膏



(b) 12.5%发泡剂掺量下方案2泡沫磷石膏



(c) 12.5%发泡剂掺量下方案3泡沫磷石膏

图 4 不同配合比的磷石膏基发泡建筑石膏孔隙结构

Fig. 4 Pore structure of phosphogypsum-based foamed building gypsum with different mix proportions

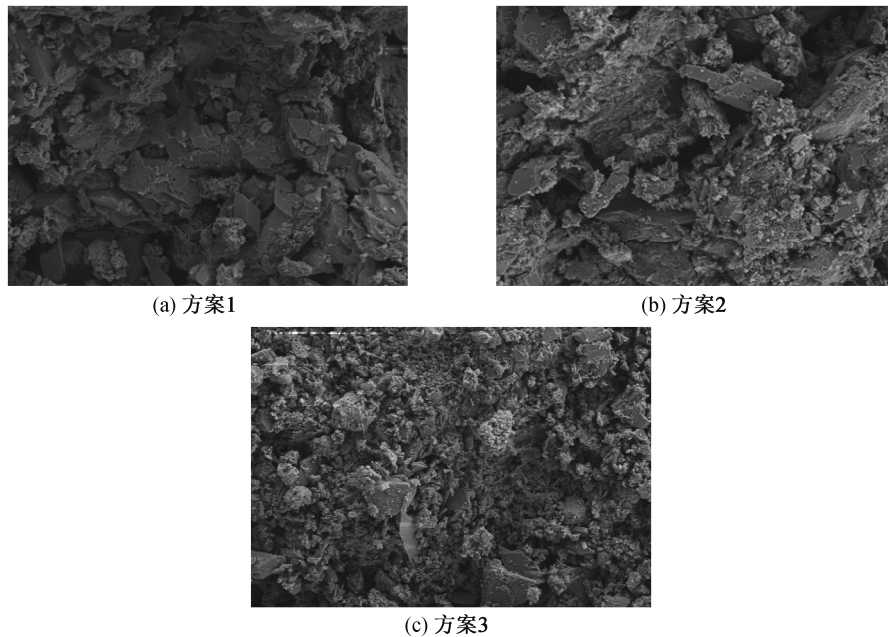


图5 不同配合比的磷石膏基发泡建筑石膏微观结构

Fig. 5 Microstructure of phosphogypsum-based foamed building gypsum with different mix proportions

2.5 微观形貌

为了更好地了解磷石膏基发泡建筑石膏的水化产物和内部结构,采用SEM技术对不同配合比的磷石膏基发泡建筑石膏进行微观形貌观察,并开展相应的机理分析。

相同发泡剂掺量下不同配合比的试块微观结构见图5。可以看出,磷石膏主要以板状二水石膏晶体的形式存在,硅酸盐水泥水化产生的大量C-S-H凝胶会包裹住二水石膏晶体;矿渣粉在特定环境下会生成表面光滑、无颗粒黏附的等径柱状钙矾石^[18]。具体分析,方案1中,钙矾石与C-S-H凝胶相互搭接形成渔网状结构,而部分磷石膏以轻集料的形式填充其中,其余则以独晶体的形式存在。晶体之间搭接不稳固^[19],导致整体结构较疏松,试块内部的空隙较大;方案2中,矿渣粉生成的钙矾石增多,独立存在的二水石膏晶体减少,形成了相对致密的结构,然而,过量的矿渣粉以独立晶体的形式存在,破坏了试块的整体性和密实性,导致试块的绝干强度降低;方案3中,采用10%的石膏晶须等量替代矿渣粉,石膏晶须以纤维状分散存在,石膏晶须能够填充在晶体之间的空隙中,减少了试块的空隙和孔隙率,提高了密实度,此外,石膏晶须能够在试块的微缝处形成搭接,抑制试块内部微裂缝的产生和扩张,发挥纤维增强作用,从而改善试块结构,提高其综合性能^[20]。

3 结论

1)磷石膏基发泡建筑石膏的表观密度和力学性能随着发泡剂掺量的增加而减小;磷石膏为60%、水泥为20%、矿渣粉为10%、石膏晶须为10%、缓凝剂掺量为0.1%、水固比为0.5,该配合比制备的磷石膏基发泡建筑石膏的基本性能最优。

2)磷石膏以二水石膏晶体形式存在,二水石膏晶体之间相互搭接,搭接点不牢靠,整体结构呈现疏松状态,试块内部的空隙较大;过量的矿渣粉没能参与反应,会以独立的晶体形式存在,破坏试块的整体性和密实性;石膏晶须填充在晶体搭接之间的空隙中,能提高试块的密实度,微集料效应显著,且石膏晶须在试块的微小缝隙处形成搭接,阻碍了试块内部的微小裂缝的产生和扩张,起到了纤维的作用,改善了试块的结构,提高了建筑石膏的各项综合性能。

参考文献:

- [1] 马丽萍. 磷石膏资源化综合利用现状及思考[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(7): 5-9.
MA L P. Current situation and consideration of comprehensive utilization of phosphogypsum resources [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2019, 34(7): 5-9.
- [2] 唐楷, 黄守斌, 缪建波, 等. 工业副产石膏基玻化微珠保温砂浆的开发应用[J]. 混凝土, 2013(2): 107-109.

- TANG K, HUANG S B, MIU J B, et al. Development and application of industrial by-product gypsum vetrified microsphere thermal insulation mortar [J]. *Concrete*, 2013 (2): 107-109.
- [3] GENCEL O, DIAZ J J D C, SUTCU M, et al. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 113: 732-740.
- [4] 李志博, 蔡鲁宏, 田胜利, 等. 引气剂对轻质抹灰石膏性能的影响研究 [J]. *新型建筑材料*, 2022, 49 (7): 115-117+155.
- LI Z B, CAI L H, TIAN S L, et al. The research on the effect of air entraining agent on properties of lightweight gypsum plaster [J]. *New Building Materials*, 2022, 49 (7): 115-117+155.
- [5] CAPASSO I, IUCOLANO F. Production of lightweight gypsum using a vegetal protein as foaming agent [J]. *Materials and Structures*, 2020, 53(2): 35.
- [6] 何玉龙, 陈德玉, 刘路珍, 等. 磷石膏制备高强石膏工艺研究 [J]. *非金属矿*, 2015, 38(2): 1-4.
- HE Y L, CHEN D Y, LIU L Z, et al. Study on preparation technology of high strength gypsum from phosphogypsum [J]. *Non-Metallic Mines*, 2015, 38(2): 1-4.
- [7] 王银, 向丛阳, 段亚军, 等. 改性磷石膏作水泥缓凝剂的应用研究 [J]. *水泥工程*, 2022(3): 11-13.
- WANG Y, XIANG C Y, DUAN Y J, et al. Application of modified phosphogypsum as cement retarder [J]. *Cement Engineering*, 2022(3): 11-13.
- [8] 薛凯喜, 司鹏超, 王天源, 等. 磷石膏基发泡建筑石膏的热传导与强度特性研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(12): 4416-4426.
- XUE K X, SI P C, WANG T Y, et al. Heat conduction and strength characteristics of phosphogypsum-based foamed building gypsum [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(12): 4416-4426.
- [9] ØVERLI J A. A density-dependent failure criterion for concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 124: 566-574.
- [10] PAN P, YANG W W, ZHANG Y, et al. Optimized strength modelling of foamed concrete using principal component analysis featurized regressors [J]. *Structures*, 2023, 48: 1730-1745.
- [11] ZHANG S F, NIU D, LUO D. Enhanced hydration and mechanical properties of cement-based materials with steel slag modified by water glass [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 1830-1842.
- [12] MO J X, REN F M, TIAN S Y, et al. Impact of crumb rubber particle size on the mechanical and microstructure properties of rubberized concrete [J]. *Structural Concrete*, 2023, 24(3): 4077-4092.
- [13] YANG G, LI G X, LI C J, et al. Effect of temperature and slag powder on the cement-based ternary system [J]. *Emerging Materials Research*, 2021, 10(4): 342-347.
- [14] 丰土根, 杨航, 张箭. 水灰比对泡沫混凝土性能的影响研究 [J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2024, 41(2): 1-6.
- FENG T G, YANG H, ZHANG J, et al. Study on the effect of water/cement ratio on the performance of foamed concrete [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2024, 41(2): 1-6.
- [15] HOU L, LI J, LU Z Y, et al. Influence of foaming agent on cement and foam concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 280: 122399.
- [16] SAHU S S, IUDU S R G. Studies on influence of characteristics of surfactant and foam on foam concrete behaviour [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 40: 102333.
- [17] XIE Y, LI J, LU Z Y, et al. Effects of bentonite slurry on air-void structure and properties of foamed concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 207-219.
- [18] LI P P, ZHANG X X, ZHONG M F, et al. Phosphogypsum-based ultra-low basicity cementing material [J]. *Materials*, 2022, 15(19): 6601.
- [19] LIU S H, WANG L, YU B Y. Effect of modified phosphogypsum on the hydration properties of the phosphogypsum-based supersulfated cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 214: 9-16.
- [20] 张毅, 赵志曼, 全思臣, 等. 硫酸钙晶须对磷建筑石膏性能影响 [J]. *非金属矿*, 2020, 43(2): 103-106.
- ZHANG Y, ZHAO Z M, QUAN S C, et al. Study on the effect of calcium sulfate whiskers on the performance of phosphorus building gypsum [J]. *Non-Metallic Mines*, 2020, 43(2): 103-106.

(责任编辑 张爱丽)