

# 磷石膏-水泥基复合充填材料的综合性能和细观水化机理\*

毕颖<sup>1</sup>, 赵文斌<sup>2,3</sup>

(1. 郑州升达经贸管理学院 建筑工程学院, 河南 郑州 451191;

2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

3. 中铁十四局大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211899)

**摘要:**为提高矿山充填膏体的性能与环保效益,采用磷石膏-水泥复合胶凝剂制备了胶结充填膏体,分析了坍落度、干燥收缩率、渗透系数与强度等指标受胶凝剂配比和骨料性质的影响规律,并对充填膏体的细观水化机理进行了分析。结果表明:磷石膏-水泥胶凝剂对充填膏体流动性、收缩性和强度均有改良效果;磷石膏掺量是影响膏体性能的重要因素,当磷石膏掺量为20%时,充填膏体抗压、抗折强度最高,渗透率和收缩率最低,耐久性最好;一定比例的含钢渣粗骨料可以增加磷石膏-水泥基充填膏体的强度;磷石膏具有较好的化学活性,在反应过程中促进了絮凝状胶凝产物的形成,在细观上提高了膏体密实度,增强了矿山充填膏体的综合性能。利用磷石膏-水泥基充填膏体实施自流充填采矿工艺,不仅有利于节约开采成本,还实现了磷石膏的资源化利用,在绿色矿山建设中具有广阔的应用前景。

**关键词:** 充填膏体;磷石膏;综合性能;微观结构;水化机理

**中图分类号:** TD853.34 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-2763(2024)06-0089-06

## 0 引言

近年来,自流充填采矿工艺广泛用于深部采矿工程中<sup>[1]</sup>。高性能充填膏体的研制多采用无机胶凝材料(石灰、水泥,或粉煤灰、电石渣等)与无机激发剂(硫酸盐类、酸类和其他无机盐等)进行复配,以获得更好的经济性、适应性、稳定性和环境友好性<sup>[2]</sup>。胶凝剂是影响充填膏体性能的关键因素之一<sup>[3]</sup>。在“双碳”背景下,大量学者探究了工业固废在水泥基胶凝材料中的应用前景<sup>[4]</sup>。磷石膏是磷化肥生产过程中衍生出的一种工业固体废渣,我国每年的磷石膏排放量高达数百万吨<sup>[5]</sup>。当前,磷石膏的消纳和处置方法主要是粗放式的大面积堆存,造成大量资源浪费,增加处理成本,污染生态环境<sup>[6]</sup>。因此,采

用环保、经济的方法对磷石膏进行处置是目前的研究热点。现有研究表明经过激发处理后的磷石膏可以发挥较好的胶凝效应,有望代替水泥、石灰等成为低碳、环保的新型胶凝剂<sup>[6-10]</sup>,将磷石膏与水泥混合制备复合胶凝剂的研究已取得了一些进展<sup>[11]</sup>。然而,由于磷石膏-水泥复合胶凝剂组分较复杂,关于其在充填膏体中的应用效果尚未明确。

本研究采用磷石膏-水泥复合胶凝剂制备胶结充填膏体,通过开展试验分析料浆流动性、收缩率、强度与渗透率指标受胶凝剂配比和骨料类别的影响规律,结合微观测试分析复合胶凝剂水化机理。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

制备充填膏体的原材料包括水泥、磷石膏、细尾砂、钢渣粗骨料和减水剂等。

#### 1.1.1 骨料

采用全细尾砂和含钢渣粗骨料作为骨料制备充填膏体试件。全细尾砂粒径主要集中分布在0.05~1 mm范围内,含钢渣粗骨料粒径范围在1~5 mm之间。拌和时在自来水中添加聚羧酸型减水剂,以减少骨料形成胶结体的需水量。

#### 1.1.2 水泥

试验所用水泥为S·O 42.5 硫铝酸盐水泥,主要化学成分见表1。水泥颗粒的比表面积为325 m<sup>2</sup>/kg,初凝时间为45 min,终凝时间为250 min,具有高效早强的优点。

#### 1.1.3 磷石膏

试验所用磷石膏颗粒外观呈浅灰色,粉末表面干燥,含水率为5.6%,密度为2850 kg/m<sup>3</sup>,pH为2.1~5.2,颗粒直径一般为20 μm,比表面积为450

\* 收稿日期:2024-01-11

基金项目:河南省科技厅科技攻关计划项目(212102310284)。

作者简介:毕颖(1982—),女,河南濮阳人,硕士,高级工程师,主要研究方向为结构与施工,E-mail:biyingsu@126.com。

$\text{m}^2/\text{kg}$ 。水泥与磷石膏的物理性能指标见表 2。由表 1、表 2 可知,磷石膏与水泥的化学成分类别相似,但含量不同,磷石膏的  $\text{CaO}$  含量低于水泥,  $\text{SiO}_2$  含量高于水泥,说明二者的化学活性、胶凝性等均具有一定的差异。

表 1 水泥和磷石膏的化学组分

Table 1 Main chemical composition of cement and phosphogypsum %

材料	CaO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	MgO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	其他
水泥	61.2	6.2	23.2	3.8	1.1	4.5
磷石膏	37.1	22.2	28.1	5.0	2.1	5.5

表 2 水泥与磷石膏的物理性能指标

Table 2 Physical performance indexes of cement and phosphogypsum

材料	比表面积/ ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	初凝时间/ min	终凝时间/ min	标准稠度/ %
水泥	325	45	250	30.2
磷石膏	450	28	175	25.5

## 1.2 试验方法

不同充填膏体的物料配比见表 3,用于制备膏体的干燥物料质量分数是 75%,聚羧酸型减水剂浓度为 0.1%。胶凝剂采用 4 种不同的磷石膏-水泥质量比例,磷石膏掺量分别为 0%、10%、20% 和 30%。另外,本试验采用全细尾砂和含钢渣粗骨料两种材料制备膏体试件。充填膏体的制作工艺如下:首先将干燥物料倒入砂浆搅拌器中进行混合,干拌 180 s 后,将称量好的自来水和减水剂溶液倒入搅拌锅中进行 10 min 的快速搅拌;然后,将料浆倒入相应模具中,放在振动台上进行震动密实;最后,将样品放在养护室中进行恒温、恒湿条件的养护。本研究对表 3 中充填膏体的流动度、收缩率、抗压强度、抗折强度与渗透指标进行测定,综合测试结果确定料浆的最佳配比,结合微观形貌和矿物组分对充填膏体的微观结构进行分析,揭示其水化机理。

表 3 充填膏体的物料配比

Table 3 Material ratio of filling paste  $\text{kg}/\text{m}^3$

试验组	全细尾砂	含钢渣粗骨料	水泥	磷石膏	水
G1	1250	0	500	0	583
G2	1250	0	450	50	583
G3	1250	0	400	100	583
G4	1250	0	350	150	583
G5	1000	250	500	0	583
G6	1000	250	450	50	583
G7	1000	250	400	100	583
G8	1000	250	350	150	583

## 2 试验结果与分析

### 2.1 坍落度变化规律

图 1 为充填料浆的坍落度试验结果。从图 1 可以看出,全细尾砂充填料(G1 至 G4)和含钢渣粗骨料充填料(G5 至 G8)的坍落度差异较小,说明骨料配比对流动性指标的影响不大。以 G1 组和 G5 组为代表的无磷石膏料浆的平均坍落度为 168.9 mm 和 163.5 mm;随着磷石膏掺量增加,坍落度指标显著提高。当磷石膏掺量为 30% 时,含钢渣粗骨料充填料浆(G4 组)和尾砂充填料浆(G8 组)的坍落度指标达到最高,分别为 259.8 mm 和 255.1 mm。另外,当磷石膏掺量超过 20% 后,料浆坍落度的变化幅度明显减小,说明磷石膏有利于充填流动性的改良,但其效果随着磷石膏掺量达到一定值而趋于平稳。在磷石膏掺量为 0 的条件下,虽然尾砂料浆的流动性与含钢渣粗骨料充填砂浆差距不大,但尾砂拌合物的黏稠程度较高,拌合物容易黏附在搅拌锅底部。然而,随着磷石膏掺量的增加,尾砂充填料浆的坍落度随磷石膏掺量的增加而提高。究其原因,尾砂的细度模数高,颗粒规则度差,边缘锐利。为了提高料浆的流动性,尾砂和水泥发生水化反应需要更多水进行拌和。在磷石膏-水泥胶凝剂中,磷石膏的化学活性被充分激发,在膏体中起到润滑作用,增加了自由水的体积含量。因此,充填料浆的流动性在磷石膏改性条件下得以改善。

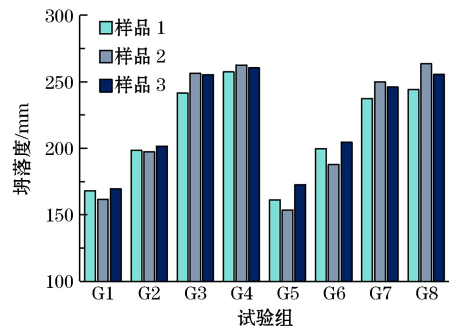


图 1 充填料浆的坍落度

Fig.1 Slump of filling slurry

### 2.2 干燥收缩率变化规律

图 2 为不同配合比充填料试样的干燥收缩率随养护龄期的变化趋势。从图中可以看出,样品的干燥收缩率随养护时间的增加呈上升趋势。充填膏体的干燥收缩过程可分为快速阶段、中期阶段和稳定阶段 3 个阶段。在充填后的初期,样品中含有大量

水分,在此阶段,材料表面水分的蒸发导致材料内部水分向外迁移,材料内微观结构发生改变,样品的干燥收缩率迅速增加。随着养护时间的延长,样品的水分蒸发过程减缓,材料内部的水分迁移趋于均匀,在这一中期阶段中,样品的干燥收缩率较快速阶段有所减小,但仍保持较高的增长趋势。当样品养护至 28 d 时,充填材料内部水分迁移和蒸发达到一定平衡状态,样品内部的微观结构稳定,干燥收缩率趋于平缓或呈微小增加。此外,相较于骨料,磷石膏掺量对充填膏体的干燥收缩率的影响更为显著。这归因于磷石膏的存在导致样品内部的水分迁移受限,在养护过程中材料内部的水分分布均匀,微观结构稳定,从而减小了膏体的干燥收缩。因此,磷石膏的加入减弱了样品的变形,避免了充填材料结构变形和产生裂缝等<sup>[12]</sup>。

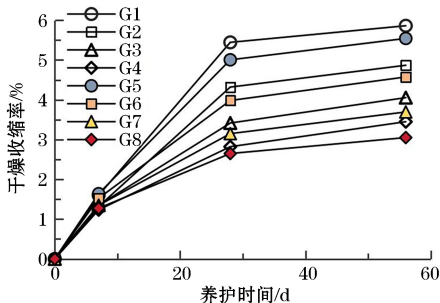


图 2 试件的干燥收缩率

Fig.2 Drying shrinkage rate of specimens

### 2.3 防渗性能

对 8 组不同配合比的充填膏体样品进行了渗透性试验,得到不同样品的渗透系数与养护时间的关系曲线,如图 3 所示。全细尾矿对样品的渗透性有促进作用,而磷石膏的掺入降低充填膏体的渗透系数。磷石膏颗粒可以有效填充材料内部的大孔隙,降低样品的孔隙率并减少水分的渗流通道。此外,磷石膏颗粒与材料基质的相互作用导致颗粒间的黏结,增加了颗粒间的接触<sup>[13]</sup>,从而阻碍水分的渗透,且料浆的致密程度随着养护时间的增加而增加。从图 3 中可以看出,随着养护时间的增加,样品的渗透系数呈下降趋势,相较于养护 7 d 的样品,养护至 28 d 的样品的渗透系数降低超过 18.6%,尤其当磷石膏掺量达到 20% 时,渗透系数降低最多,仅为不含磷石膏样品的 88.4%~90.1%。因此,磷石膏颗粒的填充效应和样品内部凝胶作用共同导致充填膏体渗透性的降低,激发磷石膏的活性是提供材料抗渗性的有效途径。

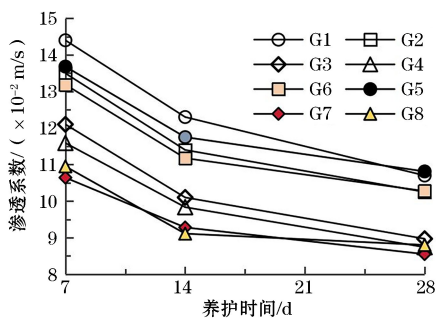
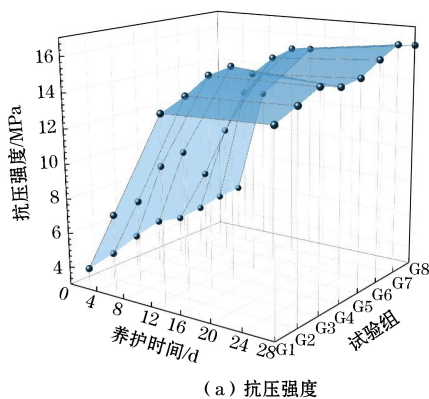


图 3 充填膏体的渗透系数

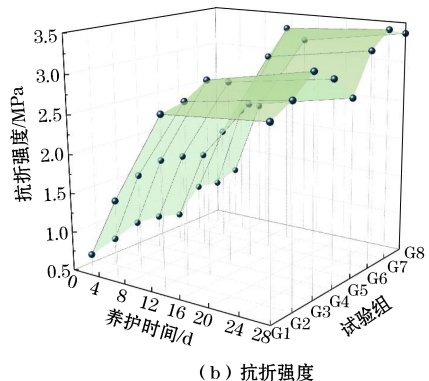
Fig.3 Permeability coefficient of filling paste

### 2.4 强度变化规律

图 4 为充填膏体的抗压和抗折强度测试结果。



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度

图 4 试件的抗压、抗折强度测试结果

Fig.4 Test results of compressive and flexural strength of specimens

由图 4 可知,当胶凝剂比例一致时,全细尾砂充填材料的强度低于含钢渣粗骨料充填材料,说明一定比例的含钢渣粗骨料有利于充填膏体强度的提升。随着养护时间的增加,充填膏体的抗压和抗折强度均呈先增加后稳定的变化趋势。相较于养护时间为 3 d 的样品,养护至 14 d 时,样品的抗压强度增加超过 152%,抗折强度增加超过 99%,继续养护至 28 d,抗压和抗折强度的增加仅分别为 6.8% 和

10%。因此,磷石膏的加入可能会对充填膏体的早期强度产生一定的促进作用,从而降低出现早期裂纹的危险性,提高充填膏体的质量。

然而,值得注意的是,磷石膏含量过高可能会影响充填材料的力学性能。相较于磷石膏含量为20%的充填样品,磷石膏含量为30%的样品的抗压和抗折强度降低了2.5%和5.2%。这归因于磷石膏本身并不具备胶凝能力,过多的磷石膏颗粒会影响水泥料浆的胶结效果,降低充填料的强度和耐久性。

### 3 水化反应机理

#### 3.1 矿物成分分析

为了探究磷石膏-水泥复合胶凝剂在全细尾砂充填体中的水化反应机理,对不同磷石膏掺量的试件开展 XRD 衍射试验。图 5 为充填材料的 XRD 衍射图谱。由图 5 可知,相较于不含磷石膏的充填材料,掺入磷石膏后的全细尾砂充填体中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量有所下降,且 C-S-H 凝胶含量随着磷石膏含量的增加而上升,说明磷石膏的化学活性有助于水泥发生二次水化反应,使  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  转化为 C-S-H 凝胶,进而提升材料的黏结强度<sup>[13]</sup>。磷石膏对充填材料强度的影响是多方面的,一方面磷石膏颗粒的填充效应增加了材料的密实性,有助于减少水分的流失,促进水泥的水化反应;另一方面,磷石膏中的氧化铝、硫酸钙等物质可能与水泥中的矿物反应,产生助矿作用,促进水泥颗粒的水化和硬化,加速充填料早期强度发展<sup>[14]</sup>。因此,采用磷石膏对水泥基胶结充填材料进行改性,能够促进更多絮凝状水化产物的形成,进而起到增加砂浆致密程度和改善微观结构的作用。在自流充填采矿过程中,充分利用磷石膏的化学活性有助于增强充填膏体材料在矿山开采中的适用性。

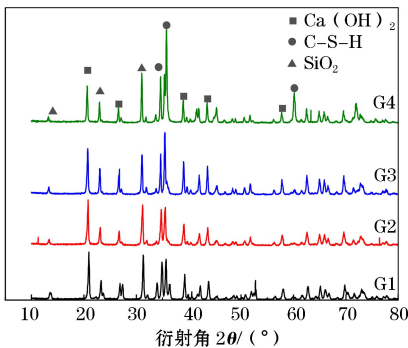
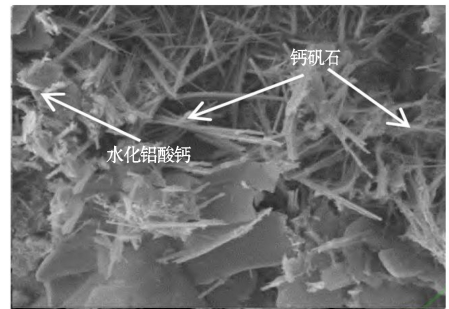


图 5 充填材料的 XRD 衍射图谱

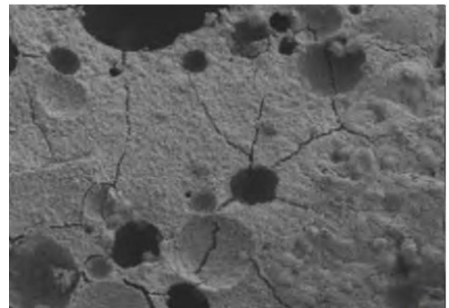
Fig.5 XRD diffraction pattern of filling material

#### 3.2 微观形貌分析

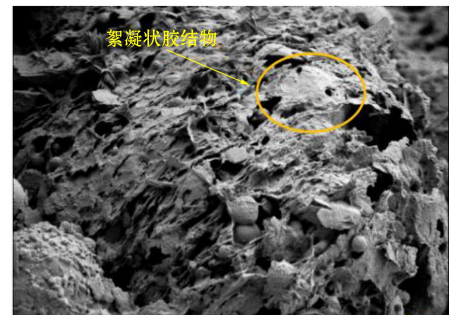
充填膏体微观结构如图 6 所示。



(a) 水化物



(b) 胶结体



(c) 膜结构

图 6 磷石膏-水泥基充填膏体的微观形貌

Fig.6 Microscopic morphology of phosphogypsum-cement-based filling paste

由图 6(a)可知,水泥基胶结充填膏体内部生成了大量针棒状的钙矾石晶体和片状水化铝酸钙。由图 6(b)可以看出,经过水泥-磷石膏胶凝剂的复合固化后,充填体内部形成蜂窝状的胶结体结构,密实度较高,充填体强度整体增加。由图 6(c)可以看到,在水泥-磷石膏胶凝剂作用下,充填膏体内部生成了絮凝结构并包裹尾砂颗粒,相互连接形成分布面积较大的片状结构,大量 C-S-H 水化凝胶填充于相邻尾砂颗粒之间的缝隙中,黏连了相邻颗粒,提升了膏体密实度。研究表明水泥-磷石膏胶凝剂固化充填膏体的主要机理为:部分未发生水化反应的磷石膏颗粒有效填充粗颗粒间的空隙,并黏结土体

颗粒,减少了孔隙率;水泥-磷石膏胶凝剂经过激发反应,产生了大量的网络状胶凝产物,覆盖在尾砂颗粒表面,骨料黏结作用增强,形成了更为致密的结构,提高了磷石膏-水泥基充填膏体的密实度。

结合文献,对磷石膏-水泥胶凝剂水化机理进行深入分析。在磷石膏和硫铝酸盐水泥胶凝剂复合作用下,水化物中的部分硅铝酸盐被溶解成硅铝四面体,并形成絮凝状的水化硅铝酸钙(C-A-S-H),可以强化尾砂颗粒的黏结效果。随着水化反应进行,硅铝四面体通过共享氧原子实现桥接,膏体中形成大量铝酸-硅酸盐类物质。水化凝胶发生重组、缩聚后的连通性增加,形成三维膜结构网络,进一步增强了磷石膏-水泥基充填材料的密实程度。

#### 4 应用效益评价

将本文研究研制的磷石膏-水泥复合胶凝剂应用于豫西铝土矿某矿井工作面的自流充填采矿平台。通过采用水泥和磷石膏复合胶凝剂,硫铝酸盐水泥质量分数从15%左右下降到11%左右,即水泥熟料用量减少至原来的68%~79%。磷石膏购置费用约为180元/t,硫铝酸盐水泥价格约为382元/t。相较于传统的水泥基充填膏体,磷石膏的掺入不仅节约了胶凝剂的使用成本,同时也消纳了大量废弃磷石膏。因此,采用水泥-磷石膏胶凝剂制备充填料浆既可满足人工充填采矿的要求,又具有一定的经济效益,在绿色矿山建设中具有广阔的应用前景。

#### 5 结论

(1) 通过采用水泥和磷石膏组成的胶凝剂对充填材料进行复合改性,充填料浆的坍落度显著提高,同时养护完成后,充填膏体的干燥收缩率和渗透系数大幅降低。当磷石膏掺量为20%时,充填材料的流动性、收缩性和抗渗特性均达到最佳状态。

(2) 全细尾砂充填材料的强度略低于含钢渣粗骨料充填材料,说明一定比例的粗骨料能够增强充填体的强度。另外,抗压和抗折强度均随磷石膏掺量的提高先增大后减小,磷石膏掺量为20%时达到了最佳强度性能。养护龄期达到14d后,充填体的强度基本稳定。

(3) 磷石膏的化学活性促进了水泥的二次水化反应,提高了磷石膏-水泥基充填膏体内的水化凝胶含量,形成了絮凝状的膜结构,在细观上提升了材料的黏结强度和密实度。

(4) 利用磷石膏-水泥基充填膏体实施自流充

填采矿工艺,不仅有利于节约开采成本,还实现了对磷石膏的资源化利用,在绿色矿山建设中具有广阔的应用前景。

#### 参考文献(References):

- [1] 吴立波,王贻明,陈威,等.基于正交实验的赤泥粉煤灰膏体充填材料配比优化[J].矿业研究与开发,2020,40(5):45-49. WU Libo, WANG Yiming, CHEN Wei, et al. Ratio optimization of red mud-fly ash paste filling material based on orthogonal experiment [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(5): 45-49.
- [2] 曾文旭,李鹏程.某矿全尾砂膏体充填自流输送可靠性分析[J].现代矿业,2022,38(7):201-204. ZENG Wenxu, LI Pengcheng. Reliability analysis of gravity conveying of full tailings paste filling in a mine[J]. Modern Mining, 2022, 38(7): 201-204.
- [3] 马成龙.赤泥-硫铝酸盐水泥高水充填材料性能及对环境的影响[J].新型建筑材料,2020,47(4):60-64. MA Chenglong. Properties of red mud-sulfoaluminate cement high water filling material and its impact on the environment[J]. New Building Materials, 2019, 47(4): 60-64.
- [4] 诸利一,吕文生,杨鹏,等.超声波对全尾砂浆流变特性的影响[J].材料导报,2020,34(6):6088-6094. ZHU Liyi, LYU Wensheng, YANG Peng, et al. Effect of ultrasonic wave on rheological properties of all-tailing mortar [J]. Materials Reports, 2020, 34(6): 6088-6094.
- [5] 罗晓洪,张世俊,郭荣鑫,等.电石渣替代水泥作碱激发剂对过硫磷石膏胶凝材料性能和微观结构的影响[J].材料导报,2023,37(增刊2):298-304. LUO Xiaohong, ZHANG Shijun, GUO Rongxin, et al. Effect of carbide slag instead of cement as alkali activator on properties and microstructure of excess-sulphate phosphogypsum cementitious material[J]. Materials Reports, 2023, 37(S2): 298-304.
- [6] 赵静,段晓牧,刘佳佳,等.磷石膏复合胶凝材料配比优化及浸出机制[J].矿业研究与开发,2023,43(4):30-36. ZHAO Jing, DUAN Xiaomu, LIU Jiajia, et al. Ratio optimization and leaching mechanism of phosphogypsum composite cementitious material[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(4): 30-36.
- [7] 何良玉,譙理格,赵日照,等.钢渣作胶凝材料和细集料制备高性能砂浆的研究[J].矿产综合利用,2019(6):94-100. HE Liangyu, QIAO Lige, ZHAO Rixu, et al. Study on preparation of high performance mortar using steel slag as cementitious material and fine aggregate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6): 94-100.
- [8] 章求才,贺桂成,黄炳香,等.浅埋石膏矿顶板破断机理及应用研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):773-779. ZHANG Qiucui, HE Guicheng, HUANG Bingxiang, et al. Investigation on the fracture mechanism of the immediate roof in shallow buried gypsum mine and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 773-779.

- [9] 刘娟红,马翼,王祖琦,等.石膏种类对富水充填材料凝结硬化性能与机理的影响[J].工程科学学报,2015,37(12):1557-1563.  
LIU Juanhong, MA Yi, WANG Zuqi, et al. Impact of gypsum type on the setting and hardening performance and mechanism of water-rich filling materials [J]. Chinese Journal of Engineering,2015,37(12):1557-1563.
- [10] 杨帆,刘亚美,陈圣滢,等.磷石膏地质聚合物泡沫轻质土制备及性能研究[J].新型建筑材料,2023,50(11):80-85.  
YANG Fan, LIU Yamei, CHEN Shengying, et al. Preparation and performance of phosphogypsum-based polymer foam lightweight soil[J]. New Building Materials, 2023,50(11):80-85.
- [11] 邢军,胡竞文,李翠,等.石膏对氧化钙激发高炉矿渣胶凝性能的影响[J].中国矿业,2019,28(3):166-171.  
XING Jun, HU Jingwen, LI Cui, et al. The effect of gypsum on the cementitious performance of blast furnace slag stimulated by calcium oxide [J]. China Mining Magazine,2019,28(3):166-171.
- [12] 陈伟,袁森森,袁波.赤泥激发粉煤灰充填材料设计及激发机理研究[J].武汉理工大学学报,2019,41(3):20-23+32.  
CHEN Wei, YUAN Sensen, YUAN Bo. Development of red mud activated fly ash-based backfilling material and its activation mechanism[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2019,41(3):20-23+32.
- [13] 张国胜,高谦,郭斌,等.全尾砂胶凝材料开发及泡沫砂浆充填试验研究[J].金属矿山,2020(12):74-80.  
ZHANG Guosheng, GAO Qiang, GUO Bin, et al. Development of whole tailings cementitious material and experimental study on foam mortar filling[J]. Metal Mine, 2020(12):74-80.
- [14] 王东星,王宏伟,邹维列,等.碱激发粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):3197-3205.  
WANG Dongxing, WANG Hongwei, ZOU Weilie, et al. Research on micro-mechanisms of dredged sludge solidified with alkali-activatedfly ash[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(S1):3197-3205.

## Comprehensive Performance and Microscopic Hydration Mechanism of Phosphogypsum-Cement Based Composite Filling Material

BI Ying<sup>1</sup>, ZHAO Wenbin<sup>2,3</sup>

(1.School of Architectural Engineering, Zhengzhou Shengda University, Zhengzhou, Henan 451191, China;

2.School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

3.China Railway 14th Bureau Group Shield Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211899, China)

**Abstract:** In order to improve the performance and environmental benefits of mine filling paste, the cemented filling paste was prepared by using phosphogypsum-cement composite gelling agent. The influences of gelling agent ratio and aggregate properties on slump, drying shrinkage, permeability coefficient and strength were analyzed. The microscopic hydration mechanism of filling paste was analyzed. The results show that the phosphogypsum-cement gelling agent has an improved effect on the fluidity, shrinkage and strength of the filling paste. The content of phosphogypsum is an important factor affecting the performance of the paste. When the content of phosphogypsum is 20%, the compressive strength and flexural strength of the filling paste are the highest, the permeability and shrinkage are the lowest, and the durability is the best. A certain proportion of coarse aggregate containing steel slag can increase the strength of phosphogypsum-cement based filling paste. Phosphogypsum has a good chemical activity, which promotes the formation of flocculated gelling products during the reaction process, improves the density of paste at the meso level, and enhances the comprehensive performance of mine filling paste. Using phosphogypsum-cement based filling paste to implement gravity filling mining technology is not only conducive to saving mining costs, but also realizes the resource utilization of phosphogypsum, which has broad application prospects in the construction of green mines.

**Key words:** Filling paste, Phosphogypsum, Comprehensive performance, Microstructure, Hydration mechanism