◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

硅酸盐水泥与高炉渣改性磷石膏基建筑石膏的防水性能研究

张传福[1]，邢冬娴[1]，向孟君[1]，白弘垚[1]，杨　松[1]，李俊晴[1]，刘　咏[1]，汤建伟[2,3]，王保明[2,3]，化全县[1]

（1. 郑州大学 化工学院，河南 郑州　450001；2. 郑州大学 生态与环境学院，河南 郑州　450001；
3. 河南省减污降碳协同工程技术研究中心，河南 郑州　450001）

［摘　要］磷石膏年排放量巨大且综合利用率偏低，其建材化应用面临耐水性不足（软化系数0.2～0.4）的瓶颈。本研究以磷石膏基建筑石膏粉为基体，考察分别添加硅酸盐水泥与高炉渣对石膏试块耐水性能及力学性能的影响，并结合X射线衍射仪（XRD）与扫描电镜（SEM）表征技术对石膏试块微观结构及防水机制进行深入研究。结果表明，单掺12.00%硅酸盐水泥用量下石膏试块的抗折与抗压软化系数分别为0.87和0.71，吸水率降至22.20%；单掺10.00%高炉渣用量下石膏试块的抗折与抗压软化系数为0.86和0.77，吸水率进一步降至20.32%。将磷石膏与硅酸盐水泥、高炉渣等工业固废复合制备建筑材料，可有效解决传统石膏制品软化系数低的工程瓶颈，为磷石膏资源化利用提供了一条可行的技术路径。

［关键词］磷石膏；建筑石膏；硅酸盐水泥；高炉渣；耐水性能；软化系数
［中图分类号］X781　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）07-0086-08

Study on water resistance of phosphogypsum-based building gypsum modified by Portland cement and blast furnace slag

ZHANG Chuanfu[1], XING Dongxian[1], XIANG Mengjun[1], BAI Hongyao[1], YANG Song[1], LI Junqing[1], LIU Yong[1], TANG Jianwei[2,3], WANG Baoming[2,3], HUA Quanxian[1]

(1. *School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450001, *China*; 2. *School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450001, *China*; 3. *Henan Provincial Collaborative Engineering Technology Research Center for Pollution Reduction and Carbon Reduction, Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract: Phosphogypsum has high emission and low comprehensive utilization rate, and its application in building materials is restricted by the bottleneck of insufficient water resistance, with a softening coefficient of only 0.2 - 0.4. Phosphogypsum-based building gypsum powder is used as the raw material. The effects of individual addition of Portland cement and blast furnace slag on the water resistance and mechanical strength of gypsum samples are investigated. The microstructure and water-resistant mechanism are further analyzed using XRD and SEM characterization. The results demonstrate that with the addition of 12.00% Portland cement, the flexural and compressive softening coefficients of the specimens are 0.87 and 0.71, respectively, and the water absorption is 22.20%. When 10.00% blast furnace slag is added alone, the flexural and compressive softening coefficients of the specimens are 0.86 and 0.77, with water absorption further reduced to 20.32%. The preparation of construction materials by compounding phosphogypsum with industrial solid wastes including Portland cement and blast furnace slag effectively addresses the bottleneck of low softening coefficient in conventional gypsum products, providing a feasible technical route for the resourceful utilization of phosphogypsum.

Key words: phosphogypsum; building gypsum; Portland cement; blast furnace slag; water resistance; softening coefficient

收稿日期：2026-06-09

作者简介：张传福（2001—　），男，江苏徐州人，在读硕士研究生，主要研究方向为磷资源加工与高效利用。
通信作者：刘　咏（1976—　），女，副教授，主要研究方向为磷化工与磷复肥技术研究。

基金项目：国家自然科学基金项目（21576246）；河南省高校科技创新团队项目（19IRTSTHN028）

0　引言

磷石膏是湿法磷酸生产中产生的大宗固废[1]，每生产1 t磷酸会副产磷石膏4.5～5.0 t，磷石膏的持续大量堆积已成为制约磷化工行业可持续发展的突出难题[2]。据统计，截至2024年全球磷石膏累计库存达到60亿t，且每年增长约2.15亿t，而综合利用率不足30%，我国的磷石膏产生量8 600万t，综合利用率61.6%。根据2024年工业和信息化部等七部门联合发布的《磷石膏综合利用行动方案》，到2026年磷石膏的综合利用率需达到65%，方案鼓励推动以磷石膏为原材料生产水泥缓凝剂、石膏砂浆、石膏板、Ⅱ型无水石膏及制品等产品[3]。

磷石膏的化学组成与天然石膏相近，在建筑材料领域有着良好的应用前景[4-5]。然而磷石膏的软化系数一般仅为0.2～0.4，耐水性较差，所制石膏制品受潮后易泛霜、霉变，强度大幅度下降，严重限制了其在潮湿环境及外墙等场景的实际应用[6]。石膏材料防水性差的主要原因有以下两方面：一方面，二水石膏在水中溶解度较高，易受水分侵蚀破坏晶体间结合力，导致强度劣化；另一方面，在半水石膏水化过程中，为保证料浆的流动性，实际用水量远超理论需水量，多余的水分蒸发后会在材料内部形成大量孔隙和毛细管结构，加速水分渗透，最终表现为材料吸水率上升[7-8]。

目前改善石膏材料防水性的策略主要分为内防水和外防水。内防水通过添加无机矿物添加剂[9]或有机防水剂[10]来实现；外防水则通过表面涂覆防水物质[11]来实现，但其防护效果和耐久性存在局限。此外，一些研究[12]也关注通过工艺优化降低孔隙率来提升耐水性。

本研究以磷石膏原料经水洗除杂[13]、低温煅烧最优工艺条件下制备的建筑石膏粉[14-15]为基础，考察添加硅酸盐水泥和高炉渣对建筑石膏耐水性及力学性能的影响，旨在提升磷石膏基建筑石膏的耐水性能。

1　实验部分

1.1　实验原料

磷石膏，云南安宁某化肥厂；硅酸盐水泥，天瑞水泥集团有限公司；高炉渣，内蒙古某炼铁企业；粉煤灰，河南铂润铸造材料有限公司；三聚氰胺减水剂（$C_3N_3(NH_2)_3$）、聚丙烯纤维（$(C_3H_6)_n$），分析纯，上海臣启化工科技有限公司；三聚磷酸钠（$Na_5P_3O_{10}$），分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

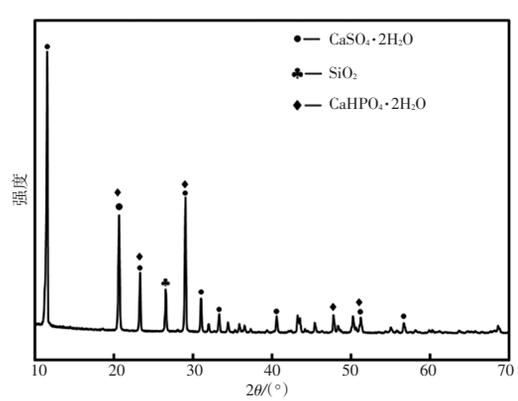
实验原料的主要化学组成如表1所示。

磷石膏pH为3.75，结晶水质量分数为18.00%，呈浅黄色粉末。磷石膏的X射线衍射（XRD）谱图及扫描电镜（SEM）图片如图1所示。由图1可知，磷石膏的主要物相为$CaSO_4·2H_2O$，还含有少量的SiO_2

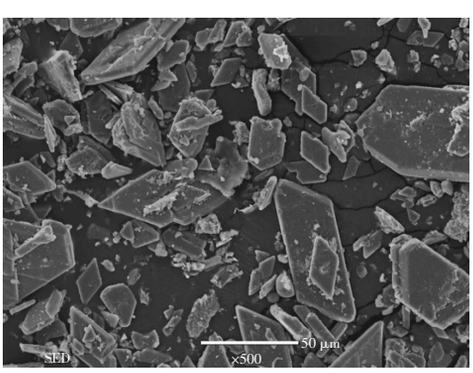
表1　实验原料主要化学成分的质量分数

Table 1　Mass fraction of main chemical components in experimental materials　%

原料	$w(CaO)$	$w(SiO_2)$	$w(SO_3)$	$w(P_2O_5)$	$w(Al_2O_3)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(MgO)$	$w(F)$	$w(Na_2O)$	$w(K_2O)$
磷石膏	35.10	13.13	48.71	1.13	0.81	0.18	0.20	0.33	0.13	0.22
粉煤灰	4.51	52.85	1.87	0.39	25.57	6.64	0.79		0.92	2.76
硅酸盐水泥	46.63	28.71	3.38	0.07	11.17	1.39	5.24		0.88	0.52
高炉渣	2.28	50.62			4.30		30.04			



a. XRD图



b. SEM图

图1　原料磷石膏的XRD谱图及SEM图

Fig. 1　The XRD pattern and SEM image of raw phosphogypsum

和 $CaHPO_4·2H_2O$；磷石膏的 SEM 微观形貌表明，其主要为片状及板状晶体，且表面覆盖部分杂质。

1.2 实验仪器

马弗炉，ZY-X 型，洛阳中苑实验电炉厂；电子天平，TLE204E 型，梅特勒托利多仪器有限公司；水泥胶砂搅拌机，JJ-5 型，无锡市迈方仪器设备有限公司；全自动水泥强度试验机，AEC-201 型，无锡市爱立康仪器设备有限公司；X 射线荧光光谱仪（XRF），Axios PW4400 X 型，荷兰帕纳科公司；X 射线衍射仪（XRD），Empyrean 型，荷兰帕纳科公司；扫描电镜（SEM），Helios G4 CX 型，Thermo Fisher（赛默飞世尔）公司。

1.3 实验方法

实验前对磷石膏进行净化预处理，以 3:1 的水灰质量比反复水洗 3 次，经 80 ℃干燥粉碎后，于 170 ℃低温煅烧 3 h 制得建筑石膏粉（β–$CaSO_4·0.5H_2O$ 质量分数 72.23%），该过程可有效去除磷、氟等有害杂质。按实验设计称取上述石膏粉、粉煤灰、聚丙烯纤维及无机矿物添加剂（硅酸盐水泥或高炉渣），于搅拌机中慢速混合 3 min 得到干粉料。另将三聚磷酸钠缓凝剂与三聚氰胺减水剂加水溶解，经超声分散 2 min 后倒入干粉料中，按慢搅 60 s、快搅 30 s、停歇 90 s、快搅 60 s 的顺序搅拌，形成均匀料浆。将料浆注入三联试模振荡成型，静置脱模后于养护箱中养护 7 d。养护结束后，试块于 40 ℃烘箱中烘干至恒重以测试干强度，同时在 20 ℃恒温水中浸泡 24 h 以测定吸水率及湿强度。

1.4 测试方法

采用 X 射线荧光光谱仪测定样品的化学组成；参照 GB/T 17669.3—1999《建筑石膏 力学性能的测定》方法，使用全自动水泥强度试验机测定改性建筑石膏试块的抗折强度和抗压强度；采用 X 射线衍射仪分析物相组成；通过扫描电镜分析微观形貌。建筑石膏吸水率根据式（1）计算：

$$w=\frac{m_2-m_1}{m_1}\times 100\%。\tag{1}$$

式中 w——吸水率，%；

m_1——浸泡在水中之前的试样质量，g；

m_2——试样浸水后的质量，g。

软化系数则根据 JC/T 698—2010《石膏砌块》测定试样的湿强度和干强度，再按式（2）计算：

$$k=\frac{f}{F}。\tag{2}$$

式中 k——软化系数；

f——试样的湿强度，MPa；

F——试样的干强度，MPa。

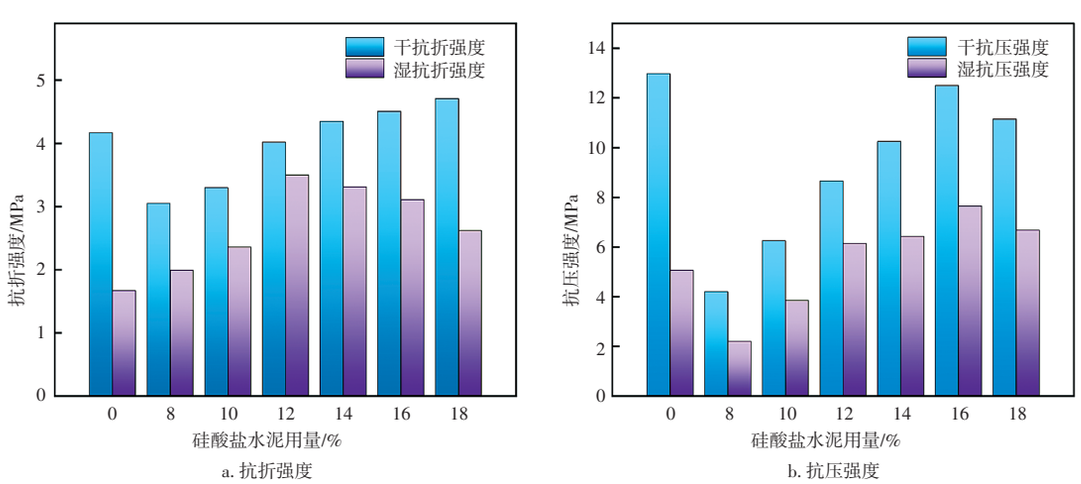
2 结果与讨论

2.1 硅酸盐水泥对建筑石膏的防水改性研究

2.1.1 硅酸盐水泥用量对建筑石膏试块力学性能的影响

硅酸盐水泥用量对石膏试块力学性能的影响如图 2 所示。

图 2a.为硅酸盐水泥用量对建筑石膏试块抗折强度的影响，分析可知，石膏试块的干抗折强度随硅酸盐水泥用量增加而逐渐提升；硅酸盐水泥用量低于 12.00%时，建筑石膏试块的干抗折强度低于空白组的 4.17 MPa，这是由于硅酸盐水泥水化生成的水化铝酸钙与石膏溶出的 SO_4^{2-} 反应生成钙矾石附着在石膏晶体表面，阻碍了半水石膏中的 Ca^{2+} 进一步溶出与水化；随着硅酸盐水泥掺量继续增加，试块的干抗折强度较空白组有所提高，可能是



a. 抗折强度　　b. 抗压强度

图 2　硅酸盐水泥用量对建筑石膏试块抗折强度和抗压强度的影响

Fig. 2　Effects of Portland cement content on the flexural strength and compressive strength of building gypsum test blocks

因为硅酸盐水泥与石膏发生了水化反应生成水化产物使结构更加致密。湿抗折强度随硅酸盐水泥用量的增加先升高后降低，并在用量12.00%时达到最大值3.50 MPa，这说明适量硅酸盐水泥水化产物可提高石膏试块的湿强度，而过量掺加则会产生不利影响。

图2b.则反映了硅酸盐水泥用量对建筑石膏试块抗压强度的影响。由结果可知，石膏试块的干抗压强度和湿抗压强度均呈现随硅酸盐水泥用量增加先增加后降低的趋势，并在用量16.00%时分别达到最大值12.50 MPa和7.63 MPa；但掺加硅酸盐水泥的试块干抗压强度均低于空白组的12.97 MPa，这表明硅酸盐水泥的添加对建筑石膏试块的干抗压强度存在负面影响，其主要原因是硅酸盐水泥的掺入阻碍了石膏晶体之间的搭接，导致石膏试块干抗压强度下降[16]。当硅酸盐水泥用量超过12.00%时，试块的湿抗压强度高于空白组的5.06 MPa，因为硅酸盐水泥作为水硬性胶凝材料，其在水中持续水化一定程度上会减缓石膏试块强度降低的幅度。

2.1.2　硅酸盐水泥用量对建筑石膏试块吸水率及软化系数的影响

吸水率和软化系数是评价固体材料防水性能的指标。实验首先考察了不同硅酸盐水泥用量对建筑石膏试块吸水率的影响，结果如图3所示。由图3可以看出，建筑石膏试块的吸水率随着硅酸盐水泥用量的增加而显著降低。空白组石膏试块的吸水率为34.89%，当硅酸盐水泥用量为12.00%时，石膏试块的吸水率降低到最小值22.20%，当硅酸盐水泥用量大于12.00%后对石膏试块的吸水率的影响不大。

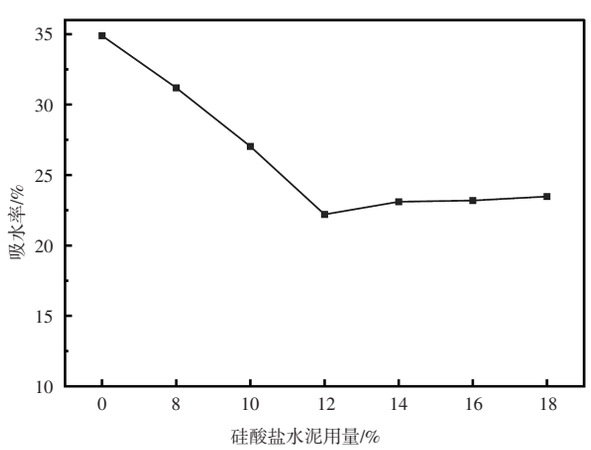


图3　硅酸盐水泥用量对建筑石膏试块吸水率的影响

Fig. 3　Effects of Portland cement content on water absorption rate of building gypsum test blocks

接着考察了硅酸盐水泥用量对石膏试块软化系数的影响，结果见图4。由图4可知，石膏试块的抗折软化系数和抗压软化系数随硅酸盐水泥用量增加均呈现先增加后降低的趋势。未掺加硅酸盐水泥时，试块的软化系数处于较低水平，这是因为石膏试块遇水时，水分通过表面孔隙向内部渗透，促使石膏晶体发生溶蚀，与此同时，当试块承受外力时，孔隙中存留的水分子产生“楔入”作用[17]，加剧了内部微裂纹的扩展。硅酸盐水泥用量在12.00%之前石膏试块的软化系数随硅酸盐用量增加逐渐增加，是因为随着硅酸盐水泥用量的增加，越来越多的水化产物填充在石膏孔隙中使石膏结构更加致密同时覆盖在二水石膏晶体表面，阻碍了外界水分的溶蚀。而当硅酸盐水泥用量超过12.00%后石膏试块的软化系数逐渐下降，表明硅酸盐水泥用量进一步增大时过多水化产物的产生会将石膏硬化体中的气孔撑开，试样内部因较大的膨胀力而产生细微裂纹[18]。当硅酸盐水泥用量为12.00%时，石膏试块的抗折软化系数和抗压软化系数均达到最大值，分别为0.87、0.71，均满足建筑防水的要求（0.6以上）。此时石膏试块对应的干抗折强度与湿抗折强度分别为4.02 MPa和3.50 MPa，干抗压强度和湿抗压强度分别为8.65 MPa和6.14 MPa。

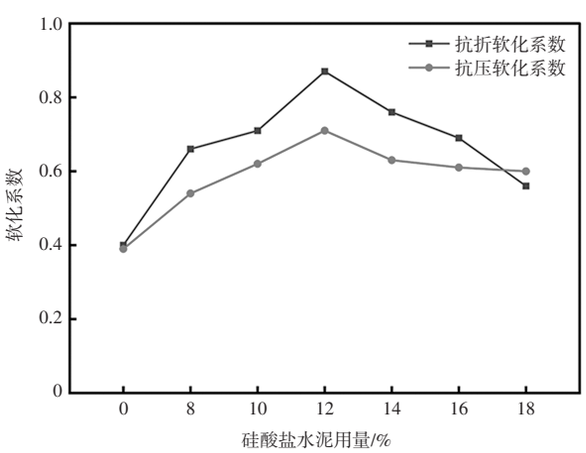


图4　硅酸盐水泥用量对建筑石膏试块软化系数的影响

Fig. 4　Effect of Portland cement content on softening coefficient of building gypsum test blocks

2.1.3　XRD表征结果

为探明硅酸盐水泥掺加比例对磷建筑石膏水化产物物相演变的作用，对不同硅酸盐水泥用量下建筑石膏试块进行了XRD分析，结果见图5。由图5

可知，通过硅酸盐水泥的改性处理，石膏试块的XRD图谱出现了$CaSO_4·2H_2O$、$CaSO_4·0.5H_2O$、SiO_2和钙矾石（AFt）的特征衍射峰。在硅酸盐水泥用量小于12.00%时，图谱检测到$CaSO_4·0.5H_2O$的衍射峰，这表明硅酸盐水泥的引入延缓了半水石膏的充分水化进程，与图2a. 中该掺量范围内干抗折强度低于空白组的结果相符。随着硅酸盐水泥掺量进一步增加，$CaSO_4·0.5H_2O$衍射峰逐渐消失，钙矾石衍射峰强度减弱，同时水化硅酸钙凝胶生成量显著增多，这种由水化硅酸钙凝胶、石膏晶体及钙矾石晶体共同构建的复合结构，通过物理阻隔作用限制了水分与石膏晶体的直接接触而抑制了石膏的溶蚀过程，从而提升了试块的耐水性能。

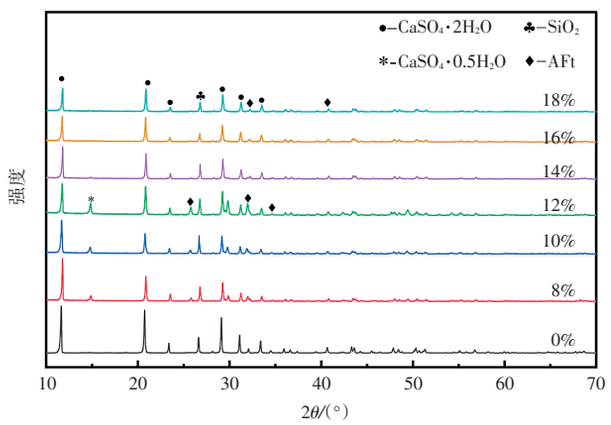
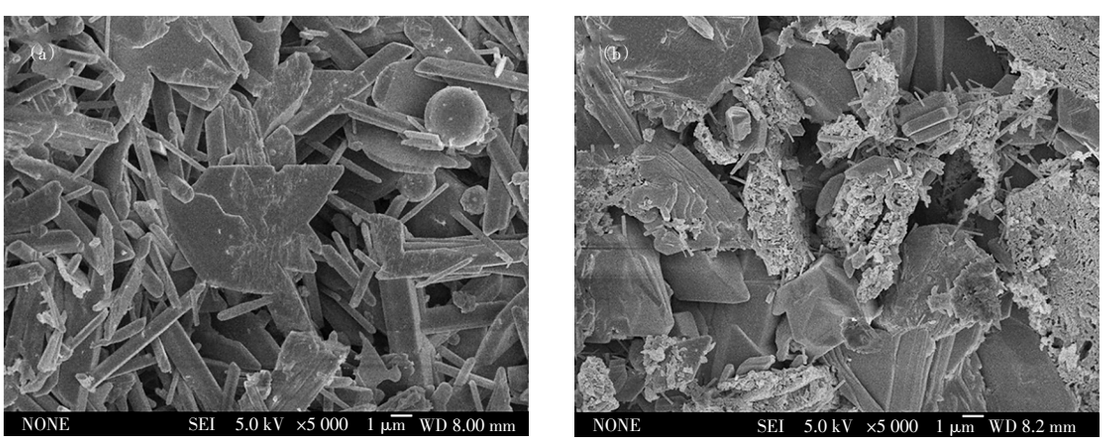


图5　不同硅酸盐水泥用量下建筑石膏试块的XRD图谱

Fig. 5　XRD patterns of building gypsum test blocks with different Portland cement contents

2.1.4　SEM结果

硅酸盐水泥改性对建筑石膏试块微观形貌及结构密实度的影响如图6所示。图6a.为未添加硅酸盐水泥的建筑石膏试块的SEM微观形貌，可以看出，石膏试块主要由板状和棒状的二水石膏晶体堆叠而成，晶体间存在较多空隙，结构疏松。图6b.则为在12.00%硅酸盐水泥用量下建筑石膏试块的SEM微观形貌，石膏试块晶体间隙中生成了大量针状钙矾石晶体，与絮状水化硅酸钙凝胶相互交织，填充了二水石膏晶体间的孔隙，且二者在水中的溶解度远低于二水石膏的溶解度，使晶体的网络结构更加密实牢固，促使改性后石膏试块的耐水性能增强。



a. 空白建筑石膏试块SEM图　　b. 掺加12.00%硅酸盐水泥建筑石膏试块SEM图

图6　掺加硅酸盐水泥对建筑石膏试块微观形貌的影响

Fig. 6　The influence of adding Portland cement on the microstructure of building gypsum test blocks

2.2　高炉渣对建筑石膏试块的防水改性研究

2.2.1　高炉渣用量对建筑石膏试块力学性能的影响

高炉渣用量对石膏试块力学性能的影响如图7所示。当高炉渣用量为10.00%时，石膏试块的干抗折强度与湿抗折强度分别达到最大值2.56、2.20 MPa，干抗压强度与湿抗压强度也分别达到最大值9.72、7.48 MPa。在干强度方面，与空白组相比，高炉渣各用量下，干强度均出现显著下降，这表明高炉渣的引入在一定程度上削弱了纯石膏晶体的直接搭接骨架结构，导致干态力学性能降低；在湿强度方面，低高炉渣用量下有效提高，可能是因为高炉渣在石膏发生水化的过程中自身也发生水化反应生成水化硅酸钙凝胶覆盖在石膏晶体表面，未参与水化的高炉渣颗粒起填料作用，使石膏试块的湿强度有所改善，当高炉渣掺量超过14.00%后湿抗压强度明显下降，说明随着高炉渣用量增加，未水化的高炉渣在水中充当填料，减少了石膏晶体间的有效搭接，导致石膏试块湿强度下降。

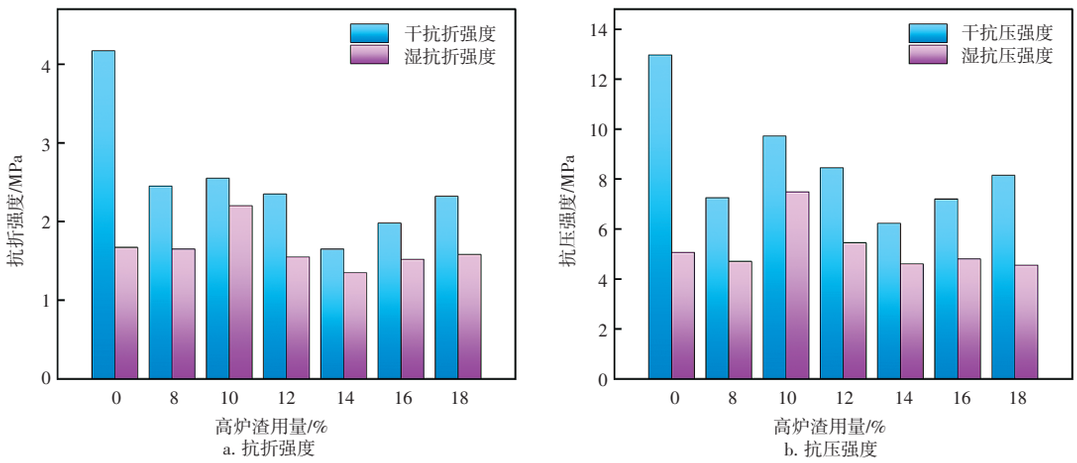


图7　高炉渣用量对建筑石膏试块抗折强度和抗压强度的影响

Fig. 7　Effects of blast furnace slag content on the flexural strength and compressive strength of building gypsum test blocks

2.2.2　高炉渣用量对建筑石膏吸水率及软化系数的影响

高炉渣用量对建筑石膏试块吸水率的影响见图8。如图8所示，与空白组相比，高炉渣的引入有效降低了石膏试块的吸水率。随着高炉渣用量增加，石膏试块的吸水率整体呈先降低后增加再降低的趋势。当高炉渣用量低于10.00%时，试块的吸水率逐渐降低，这是因为高炉渣水化时会生成水化硅酸钙凝胶，石膏晶体被凝胶黏结密实，导致吸水率降低，且在高炉渣用量为10.00%时，试块的吸水率降至最低，最小吸水率为20.32%，较空白组降低了41.76%。当高炉渣用量超过10.00%时，吸水率有所升高，可能是因为高炉渣用量过多，多余的高炉渣未参与水化分散在石膏浆料里面起到填料的作用，填充了孔隙，未能参与水化反应的高炉渣与石膏黏结性不强，吸水率有所增加。

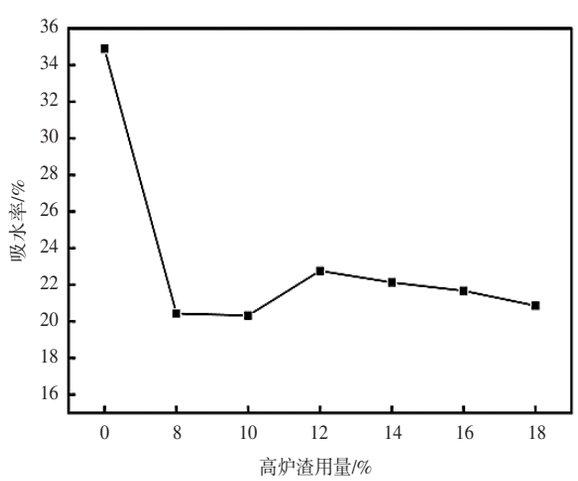


图8　高炉渣用量对建筑石膏试块吸水率的影响

Fig. 8　Effects of blast furnace slag content on water absorption rate of building gypsum test blocks

高炉渣用量对建筑石膏试块抗折软化系数和抗压软化系数的影响见图9。由图9可知，当高炉渣用量为10.00%时，抗折软化系数和抗压软化系数分别达到最大值0.86和0.77，说明此高炉渣用量下，石膏试块具有较好的耐水性，高炉渣水化产生的水化硅酸钙凝胶对石膏起到包裹、黏结保护作用，不仅可以提高石膏试块的力学性能，还可以提高石膏试块的耐水性。

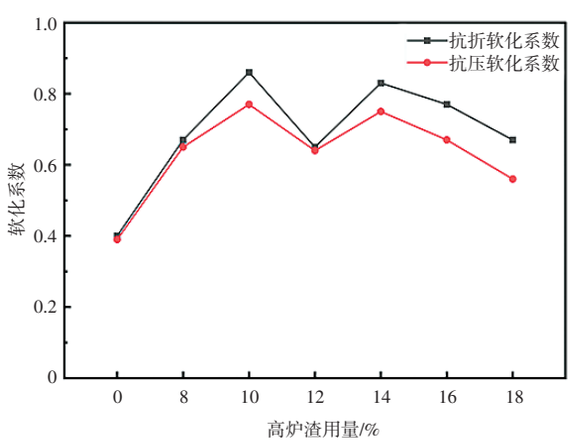


图9　高炉渣用量对建筑石膏试块软化系数的影响

Fig. 9　Effect of blast furnace slag content on softening coefficient of building gypsum test blocks

2.2.3　XRD表征结果

为探明高炉渣添加比例对建筑石膏试块水化产物物相演变的作用，图10展示不同高炉渣用量下建筑石膏试块的XRD图谱。由图10可知，通过高炉渣的改性处理，XRD图谱中出现了$CaSO_4·2H_2O$、SiO_2和Mg_2SiO_4的特征衍射峰，添加高炉渣后，石膏试块的主要水化产物为$CaSO_4·2H_2O$，且未检测到$CaSO_4·0.5H_2O$的特征峰，表明体系中的半水硫酸钙组分已

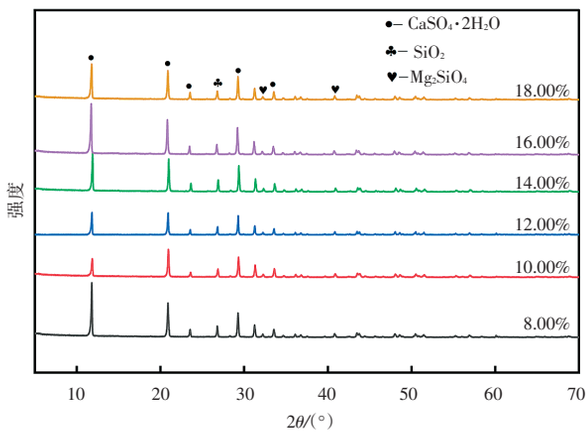


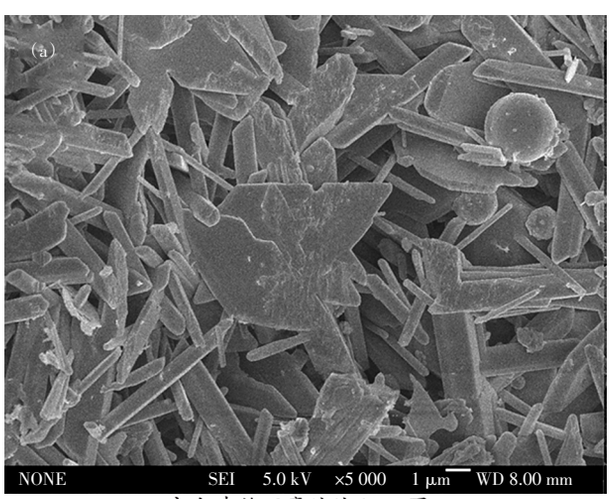
图 10　不同高炉渣用量下建筑石膏试块的 XRD 图谱

Fig. 10　XRD patterns of building gypsum test blocks with different blast furnace slag contents

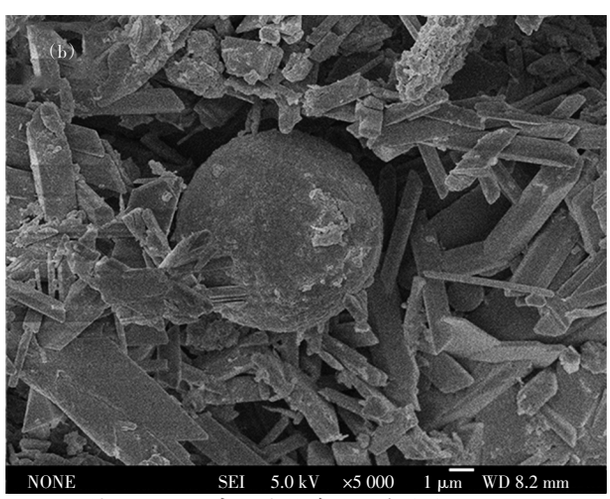
完全水化。在高炉渣用量为 10.00%的 XRD 谱图中，$CaSO_4·2H_2O$ 的衍射峰相对较弱，说明 $CaSO_4·2H_2O$ 主晶相晶体结构变弱，结晶度较差，更有利于提高石膏试块的致密性和强度[19]，这与图 8 中的结果一致。高炉渣的主要成分为 SiO_2 和 MgO，其与石膏反应生成水化硅酸钙凝胶，从而提高致密度，且高炉渣的 XRD 图谱对应主要组分为 Mg_2SiO_4，而高炉渣高掺量下的石膏试块中也有少量 Mg_2SiO_4 的特征衍射峰，说明未参与水化的高炉渣在里面起到填料的作用。

2.2.4　SEM 结果

高炉渣改性对磷建筑石膏微观形貌及结构密实度的影响规律如图 11 所示。观察图 11b. 可见，石膏晶体表面覆盖一些棉絮状物质（水化硅酸钙凝胶），其中较大的球体则是未反应的 SiO_2。高炉渣中 SiO_2 在石膏溶解的同时，与溶液中的 Ca^{2+} 反应生成水化硅酸钙凝胶，不仅填充了石膏中的孔隙，还对石膏晶体形成包裹，阻碍了 $CaSO_4·2H_2O$ 的溶解。水化硅酸钙凝胶的生成提高了石膏试块的密实度，从而使石膏试块具有一定的耐水性。



a. 空白建筑石膏试块 SEM 图



b. 掺加 10.00%高炉渣的建筑石膏试块 SEM 图

图 11　掺加高炉渣对建筑石膏试块微观形貌的影响

Fig. 11　The influence of adding blast furnace slag on the microstructure S of building gypsum test blocks

3　结论

本研究通过分别添加硅酸盐水泥与高炉渣两种无机矿物添加剂对磷石膏基建筑石膏进行防水改性研究，探究其对石膏试块力学性能和耐水性的影响及作用机制。研究发现，当硅酸盐水泥用量为 12.00%时，改性效果最佳：抗折软化系数达 0.87，抗压软化系数达 0.71，均超过 JC/T 698—2010 标准中要求的 0.6，吸水率降至 22.20%，石膏试块对应的干抗折强度与湿抗折强度分别为 4.02 MPa 和 3.50 MPa，干抗压强度和湿抗压强度分别为 8.65 MPa 和 6.14 MPa；机制为硅酸盐水泥水化生成钙矾石和水化硅酸钙凝胶填充材料内部孔隙并包裹二水石膏晶体，抑制其溶蚀，提升试块耐水性，但掺量过高时，水化产物膨胀会引发微裂纹，导致耐水性下降。当高炉渣用量为 10.00%时，改性效果最优：抗折软化系数为 0.86，抗压软化系数为 0.77，吸水率进一步降至 20.32%，石膏试块的干抗折强度与湿抗折强度达到最大值 2.56 MPa 和 2.20 MPa，干抗压强度与湿抗压强度也达到最大值 9.72 MPa 和 7.48 MPa；机制为高炉渣水化生成的水化硅酸钙凝胶与石膏晶体紧密黏结，阻隔水分侵入，但未水化的高炉渣充当填料，减少了石膏晶体间的有效搭接，导致石膏试块湿强度下降。本研究结果表明，无机矿物添加剂硅酸盐水泥和高炉渣均可有效提升

磷石膏基建筑石膏的耐水性能，使制备的石膏试块具备优异力学性能和一定的耐水性能，为磷石膏综合利用提供理论研究基础与技术利用途径。

[参考文献]

[1] 张瞿天,梁处芳,阮耀阳,等.磷石膏无害化与资源化研究现状[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(1):84-90.
Zhang Qutian, Liang Chufang, Ruan Yaoyang, et al. Research status of phosphogypsum harmless and resource utilization[J]. Eco-industry Science & Phosphorus and Fluorine Engineering, 2025,40(1):84-90.

[2] 唐向阳,何新建,谢陈鑫,等.磷石膏资源化研究现状及展望[J].无机盐工业,2025,57(6):18-26.
Tang Xiangyang, He Xinjian, Xie Chenxin, et al. Research status and prospects of phosphogypsum resource utilization [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2025,57(6):18-26.

[3] 崔荣政,王臣,修学峰.2023年我国磷石膏综合利用情况及产业发展现状分析[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(11):1-6.
Cui Rongzheng, Wang Chen, Xiu Xuefeng. Analysis of comprehensive utilization and industrial development status of phosphogypsum in China in 2023[J]. Eco-industry Science & Phosphorus and Fluorine Engineering, 2024,39(11):1-6.

[4] 廖滢,何妮,何春云,等.磷石膏协同多元固废处理及资源化利用研究进展[J].云南化工,2025,52(1):38-43.
Liao Ying, He Ni, He Chunyun, et al. Overview of phosphogypsum synergistic multifunctional solid waste treatment and resource utilization [J]. Yunnan Chemical Technology, 2025, 52 (1): 38-43.

[5] 陈汉昭,李德高,黄迪,等.磷石膏综合利用的研究进展[J].云南化工,2024,51(9):11-15.
Chen Hanzhao, Li Degao, Huang Di, et al. Research progress on comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. Yunnan Chemical Technology, 2024,51(9):11-15.

[6] 薛紫欣,陈哲,吴春丽,等.磷石膏制品的耐水性问题及解决措施[J].广东建材,2024,40(9):169-173.
Xue Zixin, Chen Zhe, Wu Chunli, et al. Water resistance and solution of phosphogypsum products [J]. Guangdong Building Materials, 2024,40(9):169-173.

[7] 李桦军,刘东辉,王平艳,等.石膏防水剂的研究进展[J].硅酸盐通报,2014,33(4):831-835.
Li Huajun, Liu Donghui, Wang Pingyan, et al. Research progress on gypsum waterproofing agent [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014,33(4):831-835.

[8] 潘红,李国忠.含氟硅乳液防水剂制备及其对石膏性能的影响[J].建筑材料学报,2013,16(2):226-231.
Pan Hong, Li Guozhong. Preparation of waterproof agent of emulsion containing fluorine and silicone (FSE) and its effect on performance of gypsum[J]. Journal of Building Materials, 2013,16 (2):226-231.

[9] 周祥,杜浪,李凤英,等.硅酸盐水泥熟料细度对磷建筑石膏水化行为和强度的影响研究[J].新型建筑材料,2022,49(8):129-132.
Zhou Xiang, Du Lang, Li Fengying, et al. Study on fineness of Portland cement clinker on hydration behavior and strength of calcined gypsum from phosphogypsum [J]. New Building Materials, 2022,49(8):129-132.

[10] Wang Qiang, Cui Yong, Xue Junfeng. Study on the improvement of the waterproof and mechanical properties of hemihydrate phosphogypsum-based foam insulation materials[J]. Construction and Building Materials, 2020,230:117014.

[11] Jiang Qi, Huang Jian, Ma Baoguo, et al. SiO_2/silicone hybrid superhydrophobic coating on gypsum-based materials with self-cleaning and moisture resistance [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2020,96(1):207-218.

[12] Zhou Jun, Li Xiaoqian, Zhao Yu, et al. Preparation of paper-free and fiber-free plasterboard with high strength using phosphogypsum[J]. Construction and Building Materials, 2020, 243:118091.

[13] 崔立功,张志军,李贞庆,等.水洗预处理对磷石膏力学性能的影响研究[J].应用化工,2025,54(3):558-561.
Cui Ligong, Zhang Zhijun, Li Zhenqing, et al. Research on the influence of water washing pretreatment on the mechanical properties of phosphogypsum [J]. Applied Chemical Industry, 2025,54(3):558-561.

[14] 左伟,杨秀山,张志业.磷石膏净化处理技术研究进展[J].硫酸工业,2025(1):16-22.
Zuo Wei, Yang Xiushan, Zhang Zhiye. Research progress on purification treatment technology of phosphogypsum [J]. Sulphuric Acid Industry, 2025(1):16-22.

[15] 郭爽,邢冬娴,郭校,等.磷石膏基建筑石膏的制备及改性研究[J].无机盐工业,2023,55(12):102-110.
Guo Shuang, Xing Dongxian, Guo Xiao, et al. Study on preparation and modification of phosphogypsum-based architectural gypsum[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2023,55(12):102-110.

[16] 高育欣,麻鹏飞,程宝军,等.掺和料对磷石膏复合胶凝材料性能影响研究[J].非金属矿,2021,44(2):102-106.
Gao Yuxin, Ma Pengfei, Cheng Baojun, et al. Investigation on Effect of Admixture to the Performance of Phosphogypsum Composite Binders [J]. Non-Metallic Mines, 2021, 44 (2): 102-106.

[17] 耿飞,桂敬能,曹欣欣,等.脱硫石膏基复合胶凝材料的物理力学性能试验[J].南京航空航天大学学报,2019,51(1):124-130.
Geng Fei, Gui Jingneng, Cao Xinxin, et al. Study on Physical and Mechanical Properties of FGD Gypsum-Based Cementitious Materials [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019,51(1):124-130.

[18] 郭会师,王庆佩,张果,等.普通硅酸盐水泥改性脱硫建筑石膏耐水性能[J].硅酸盐通报,2021,40(7):2288-2295.
Guo Huishi, Wang Qingpei, Zhang Guo, et al. Water Resistance of Flue Gas Desulfurization Building Gypsum Modified by Ordinary Portland Cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021,40(7):2288-2295.

[19] 付德进,勾碧波,李明东,等.增强剂对磷石膏免烧建材的性能影响研究[J].无机盐工业,2022,54(2):90-94.
Fu Dejin, Gou Bibo, Li Mingdong, et al. Study on effect of reinforcement on properties of phosphogypsum non-burning building materials[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54 (2):90-94.