文章编号:1674-2869(2026)03-0246-07

有机硅提升磷石膏矿渣砖耐水性能研究

杨怡然,王 磊,陈 偏,陈旭勇*
武汉工程大学土木工程与建筑学院,绿色土木工程材料与结构湖北省工程研究中心,
湖北 武汉 430074

摘 要:工业固废磷石膏(PG)大量堆存造成环境问题,又因其力学性能不足、耐水性差的缺陷,导致资源化利用受限。为实现PG高值化利用,以PG和矿渣为主要原料,分别采用硅酸盐水泥(OPC)、硫铝酸盐水泥(SAC)搭配钢渣、氢氧化钙为碱性激发剂改善其力学性能,并在此基础上利用有机硅憎水剂增强其耐水性,制备免烧PG矿渣行道砖。实验方法包括吸水率与软化系数实验、冻融循环实验及防滑性能实验。结果表明,水泥类型显著影响耐水性,OPC体系仅O-1、O-2组满足国标要求;SAC体系各组均达标。有机硅憎水剂最佳掺量为1%,S-1-1组耐水性最优,吸水率0%,软化系数1.55。抗冻防滑测试中,S-1~S-3及O-2组满足D25等级与防滑要求,S-2-1组摆式仪测定值(BPN)达74,防滑最优,S-1-1强度损失率仅3%,抗冻性最佳。

关键词:磷石膏;行道砖;有机硅;耐水性
中图分类号:X781;TU522;TU526 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202604016

Improving water resistance of phosphogypsum slag brick with silicone

YANG Yiran, *WANG Lei*, *CHEN Pian*, *CHEN Xuyong**
School of Civil Engineering and Architecture, Hubei Provincial Engineering Research Center for Green Civil Engineering Materials and Structures, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: The large-scale stockpiling of phosphogypsum (PG), an industrial solid waste, causes environmental problems, and its subpar mechanical properties and poor water resistance restrict its resource utilization. To achieve high-value utilization of PG, PG and slag were used as the main raw materials to make PG-slag paving bricks. Silicate cement (OPC) and sulphaluminate cement (SAC) were respectively combined with steel slag and calcium hydroxide (as alkaline activators) to improve mechanical properties, while organosilicon water-repellent was added to enhance water resistance, thus preparing non-baked PG-slag paving bricks. Experimental methods included water absorption, softening coefficient, freeze-thaw cycle and anti-slip performance tests. Results showed that cement type had a significant impact on water resistance: only groups O-1 and O-2 in the OPC system met national standards, while all groups in the SAC system met the requirements. The optimal dosage of organosilicon water-repellent was 1%, and the S-1-1 group had the best water resistance with 0% water absorption and 1.55 softening coefficient. In the freeze-thaw and anti-slip tests, groups S-1 to S-3 and O-2 met the D25 grade and anti-slip requirements. The S-2-1 group had the best anti-slip performance with a BPN value of 74, and the S-1-1 group had the best frost resistance with a strength loss rate of only 3%.

Keywords: phosphogypsum; paving brick; organosilicon; water resistance

收稿日期:2026-04-18
基金项目:国家自然科学基金(52502036);2025年湖北省重大攻关项目(2025BEA005)
作者简介:杨怡然,硕士研究生。Email:3597178575@qq.com
***通信作者**:陈旭勇,博士,教授。Email:Cxy1314kl@126.com
引文格式:杨怡然,王磊,陈偏,等.有机硅提升磷石膏矿渣砖耐水性能研究[J].武汉工程大学学报,2026,48(3):246-252.

磷石膏、冶炼渣、粉煤灰、尾矿、煤矸石等年产量超1亿t的工业固废[1-2]，其大量堆存对环境危害显著；其中工业固废磷石膏（phosphogypsum，PG）是湿法磷酸工艺中磷矿石和硫酸反应产生的工业副产品，主要成分为二水硫酸钙。全球堆存超60亿t，利用率仅25%，75%被堆存、填埋或排放大海[3]，既占地又污染地下水。虽可用于道路、建材、水泥缓凝剂等[4-5]，但其耐水性差难以规模化应用，存量问题仍未解决。

现有研究表明PG可用于行道砖中以解决存量问题。董礼[6]通过对PG基本特性分析、预处理优化、固化剂筛选与路面砖配合比设计，研究了大掺量PG基路面砖的制备工艺与性能，结果表明，经生石灰预处理后，以普通硅酸盐水泥为胶凝材料，采用静压成型与复合养护工艺，制得28 d抗压强度达41.2 MPa的路面砖。Maierdan等[7]将废水污泥与半水PG、普通波特兰水泥（ordinary portland cement，OPC）、水玻璃（sodium methyl silicate，SMS）以及矿渣等材料混合制成无烧制的绿色砖块，研究了砖样的无侧限抗压强度和水吸收率等，试验结果表明废水污泥与半水PG按照质量比6∶4的比例混合，加入质量分数16%的矿渣和质量分数4%的OPC，制成的砖块抗压强度达到31 MPa，满足中国国家标准。

虽然上述研究表明PG用于行道砖具有可行性，但关于如何提高PG基行道砖耐水性的研究仍为空白。为改善PG耐水性，常内掺水泥作为胶凝材料，但水泥生产碳排放约占全球8%[8]，不利于碳中和目标，且成本偏高、经济性较差。为此本研究采用碱矿渣水泥替代，其以碱性激发剂激活矿渣制备，具备快硬早强、低碳排放[9]等优势，是极具潜力的绿色胶凝材料。与此同时，有研究表明添加工业有机硅憎水剂可进一步改善PG耐水性差的问题。朱效甲等[10]通过添加有机硅乳液与有机硅粉末，研究了其对脱硫石膏浆体性能、力学强度及耐水性的影响，结果表明：有机硅乳液可显著提升脱硫石膏耐水性、降低吸水率，同时具有引气稳泡作用，使硬化体强度随掺量增加逐渐降低。王存等[11]采用质量分数0.9%甲基硅酸钠改性PG，经干湿循环试验发现，该有机硅防水剂可缓凝并提升PG耐水性，其强度随掺量先降后升再降，质量分数0.9%掺量下性能提升最优。现有研究仅探讨有机硅憎水剂对单一组分PG的性能影响，针对PG-矿渣复合胶凝体系的性能影响仍为空白，因此本研究聚焦有机硅憎水剂对PG-矿渣复合胶凝体系耐水性的影响来开展研究。

综上，本课题积极响应我国七部委联合发布《磷石膏综合利用行动方案》中提出的开拓PG资源化利用新场景，促进PG与其他固废协同利用，提升PG制品质量。本研究将大掺量PG用于制作行道砖，开拓了新用途，新场景。以PG、矿渣为主要原料，辅助以少量硫铝酸盐或硅酸盐水泥、钢渣、氢氧化钙为碱激发剂，工业有机硅为防水剂，制备出了一种免烧PG矿渣行道砖，实现了对PG、矿渣和钢渣三种工业固废的资源化利用。最终制成的行道砖制品具有优良的耐水性能、抗冻性能及防滑性能。

1　实验部分

1.1　原材料

1.1.1　PG　本研究选用的PG，源自湖北省武穴市某公司，为未经处理的原状PG。它的主要成分是二水硫酸钙（$CaSO_4·2H_2O$），物料整体呈深灰色。为去除原状PG中的游离水分、保证试验材料性能的稳定性，将其置于80 ℃的烘箱内，干燥9 h直至达到恒重状态，接着通过2.5 mm方孔筛进行筛选，最终得到粒径小于2.0 mm的PG粉体。

1.1.2　*矿渣*　本研究选用的S95级高炉矿渣由中建商混提供，经磨细加工而成，外观呈灰白色粉末状。其主要化学成分为氧化钙、二氧化硅、三氧化二铝及氧化镁等，密度为2 850 kg/m³，比表面积为450 m²/kg，各项性能指标均符合《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》（GB/T 18046—2017）中S95级矿渣粉的技术要求。

1.1.3　*碱性激发剂*　碱性激发剂用于激发矿渣活性。本研究选用的OPC为P·O 42.5级，外观呈灰白色粉末状，无结块现象，其凝结时间、强度等各项性能指标均符合《通用硅酸盐水泥》（GB 175—2023）相关要求。硫铝酸盐水泥（sulph alurninate cement，SAC）选用快硬型42.5级，外观为黄褐色粉末，细度均匀，各项性能均满足《硫铝酸盐水泥》（GB/T 20472—2006）技术规范。钢渣经烘干、破碎、磨细后过2.5 mm方孔筛备用，外观呈深灰色颗粒状。氢氧化钙为分析纯级，外观呈白色粉末状，纯度高、无明显杂质，易溶于水且具有强碱性。

1.1.4　*实验用水及有机硅憎水剂*　实验中用于时间成型及浸泡的水均为自来水。有机硅憎水剂为无色无味溶液，固含量质量分数为43%，主要成分为甲基硅酸钠钾，采用外掺法加入。

1.2　制备方法

依据《制品用过硫磷石膏矿渣水泥混凝土》

(JC/T 2391—2017)中过硫磷石膏矿渣水泥浆的定义并结合PG固废资源化“大掺量”界定(≥50.0%),本研究选取46.0%~62.0%的PG掺量,以4.0%梯度设置5组配比,PG与矿渣总掺量恒定,矿渣随PG等量递减,碱性激发剂掺量固定。同时,实验以同胶凝体系下未掺有机硅憎水剂的组别(O-1~O-5、S-1~S-5)作为空白对照组,分别与掺0.5%、1.0%、1.5%有机硅憎水剂的改性组进行横向对比,重点考察不同掺量的有机硅憎水剂对各组耐水性的提升效果及水泥类型对有机硅响应的影响规律。其中OPC组以OPC为碱性激发剂之一,SAC组以SAC为碱性激发剂之一,其他组分及其比例两组相同,配合比详见表1及表2。

各组制备流程如下:(1)将PG、矿渣、硅酸盐水泥/硫铝酸盐水泥、钢渣与氢氧化钙置于水泥胶砂搅拌机中干拌均匀;(2)控制各组水灰比均为0.37,将有机硅掺入水(注:加水量扣除有机硅溶剂部分)中搅拌均匀后加入拌好的干料继续搅匀;(3)装料并振捣成型;(4)脱模后将试件置于密封袋中进行标准养护。

表1 OPC组PG矿渣行道砖配合比

Table 1 Mix proportions of PG-slag paving bricks in the OPC group %

编号	PG	矿渣	硅酸盐水泥	氢氧化钙	钢渣	有机硅
O-1	46	44	5	2.5	2.5	0.5
O-1-0.5	46	44	5	2.5	2.5	0.5
O-1-1	46	44	5	2.5	2.5	1.0
O-1-1.5	46	44	5	2.5	2.5	1.5
O-2	50	40	5	2.5	2.5	0.5
O-2-0.5	50	40	5	2.5	2.5	0.5
O-2-1	50	40	5	2.5	2.5	1.0
O-2-1.5	50	40	5	2.5	2.5	1.5
O-3	54	36	5	2.5	2.5	0.5
O-3-0.5	54	36	5	2.5	2.5	0.5
O-3-1	54	36	5	2.5	2.5	1.0
O-3-1.5	54	36	5	2.5	2.5	1.5
O-4	58	32	5	2.5	2.5	0.5
O-4-0.5	58	32	5	2.5	2.5	0.5
O-4-1	58	32	5	2.5	2.5	1.0
O-4-1.5	58	32	5	2.5	2.5	1.5
O-5	62	28	5	2.5	2.5	0.5
O-5-0.5	62	28	5	2.5	2.5	0.5
O-5-1	62	28	5	2.5	2.5	1.0
O-5-1.5	62	28	5	2.5	2.5	1.5

表2 SAC组PG矿渣行道砖配合比

Table 2 Mix proportions of PG-slag paving bricks in the SAC group %

编号	PG	矿渣	硫铝酸盐水泥	氢氧化钙	钢渣	有机硅
S-1	46	44	5	2.5	2.5	0.5
S-1-0.5	46	44	5	2.5	2.5	0.5
S-1-1	46	44	5	2.5	2.5	1.0
S-1-1.5	46	44	5	2.5	2.5	1.5
S-2	50	40	5	2.5	2.5	0.5
S-2-0.5	50	40	5	2.5	2.5	0.5
S-2-1	50	40	5	2.5	2.5	1.0
S-2-1.5	50	40	5	2.5	2.5	1.5
S-3	54	36	5	2.5	2.5	0.5
S-3-0.5	54	36	5	2.5	2.5	0.5
S-3-1	54	36	5	2.5	2.5	1.0
S-3-1.5	54	36	5	2.5	2.5	1.5
S-4	58	32	5	2.5	2.5	0
S-4-0.5	58	32	5	2.5	2.5	0.5
S-4-1	58	32	5	2.5	2.5	1.0
S-4-1.5	58	32	5	2.5	2.5	1.5
S-5	62	28	5	2.5	2.5	0.5
S-5-0.5	62	28	5	2.5	2.5	0.5
S-5-1	62	28	5	2.5	2.5	1.0
S-5-1.5	62	28	5	2.5	2.5	1.5

1.3 试验方法

1.3.1 抗压强度实验 参照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—2021)标准进行实验。在抗折强度测试完成后从6个半截棱柱体中取3个,利用抗折抗压一体机测试试件不同龄期的抗压强度。每组3个试件并取平均值,数据精确至0.1 MPa。

1.3.2 防滑性能实验 据《混凝土路面砖》(GB/T 28635—2012)标准进行实验。试件尺寸为150 mm×150 mm×75 mm,试验前湿润试件表面并清除附着物,固定试件后调节摆锤高度,使橡胶片在测试面滑动长度为(126±1) mm。试验过程中持续洒水保持表面湿润,释放摆锤并记录测量值,首次数据不计,重复测试5次;若数值极差大于3BPN(british pendulum number,摆式仪测定值)则重新试验。取5块试件测试结果的算术平均值作为最终抗滑值,结果精确至1BPN。

1.3.3 吸水率与软化系数测定 按GB/T 28635—2012标准进行试验,部分试验条件根据PG性质进行改良。养护28 d后将两组试样置于50 ℃的干燥箱中烘干至恒重,一组记录其干燥质量为m_1,另一

组测其干抗压强度为R。随后将第一组试样直立浸入20 ℃水中，水面高出试样顶面20 mm，浸泡24 h后取出擦净表面水后称重，记其24 h吸水质量为m_2，同时测试其湿抗压强度r。每组5个试件，取结果的平均值进行分析。吸水率按式(1)计算，软化系数按式(2)计算。

$$w = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中：w为吸水率，%；m_2为试件吸水24 h的质量，g；m_1为干燥试件的质量，g。

$$K = \frac{r}{R} \quad (2)$$

式中：K为软化系数；r为吸水24 h试件的抗压强度，MPa；R为干燥试件的抗压强度，MPa。

1.3.4　*冻融循环实验*　依据《混凝土路面砖性能试验方法》(GB/T 32987—2016)开展试验。试样经28 d养护后，置于20 ℃水中浸泡24 h，水面高出试件顶面20 mm；取出后拭去表面水分，测定抗压强度R_{co}。将饱水试样从水中取出，拭去表面水分，放入−18 ℃冷冻箱中，冷冻4 h以上。随后立即取出并置于20 ℃的水中融化2 h以上，上述过程即为一次冻融循环。测试经25次冻融循环后的试件的抗压强度为R_{cn}。损失率按式(3)计算，数据精确至0.01%。

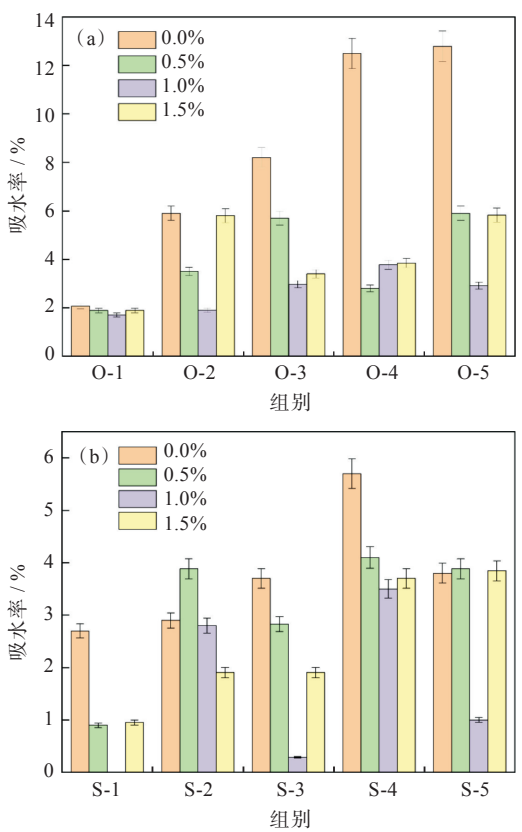
$$r_{cm} = \frac{R_{co} - R_{cn}}{R_{co}} \times 100\% \quad (3)$$

式中：r_{fm}为抗压强度损失率，%；R_{co}为冻融循环前抗压强度，MPa；R_{cn}为25次冻融循环后的抗压强度，MPa。

2　结果与讨论

2.1　有机硅掺量对PG矿渣行道砖耐水性的影响

2.1.1　*有机硅掺量对PG矿渣行道砖吸水率的影响*　图1(a)和图1(b)分别为OPC组与SAC组不同有机硅掺量对PG矿渣行道砖吸水率的影响规律。由图1(a)可知，编号为O-3，O-4，O-5三组吸水率为8.2%，12.5%及12.8%均大于6.5%，不符合GB/T 28635—2012标准6.4物理性能中规定的吸水率小于等于6.5%，其余组吸水率均小于6.5%符合要求，表明有机硅的添加对PG行道砖吸水率的降低有显著效果。进一步结合各组柱状图和数据可得，吸水率随有机硅含量的增加均呈现先降低后升高的趋势，除O-4组在有机硅掺量0.5%处吸水率达到最低值2.8%，其余各组均在1.0%处吸水率达到最低值。O-4组最优有机硅掺量异于其他组的可能原因是其PG掺量(58.0%)较高、矿渣掺量(32.0%)较低，基体致密性差且孔隙分布特殊，0.5%掺量即可均匀覆盖孔隙阻断水分。由图1(b)可知，各组试件吸水率均低于6.0%，符合GB/T 28635—2012标准6.4物理性能中规定的吸水率小于等于6.5%的规定，对比图1(a)可知，以SAC为碱激发剂激发矿渣活性从而对材料改性的效果优于OPC。整体而言，除S-2-0.5组外所有样品组在使用有机硅憎水剂后，吸水率都低于0.0%的空白对照组，表明了有机硅憎水剂总体上发挥了显著的疏水作用，原因在于有机硅可通过其含憎水性Si-O-Si主链的分子[12]，与PG表面发生化学缩合，使疏水基团向外排列并形成牢固持久的憎水膜层，从而提高PG的耐水性[13]。将以上数据结合柱状图进行纵向对比，各组吸水率几乎均呈现先降低后升高的趋势，除S-2组在质量分数1.5%有机硅处吸水率达到最小值1.9%，其余各组均于1.0%处达到最小值，表明有最优浓度的存在。质量分数0.5%下，多数组别吸水率较空白组下降，说明憎水剂已在孔隙内壁形成疏水膜[14]，抑制毛细吸水；S-2、S-5组不降反升，对低浓度有机硅响应不



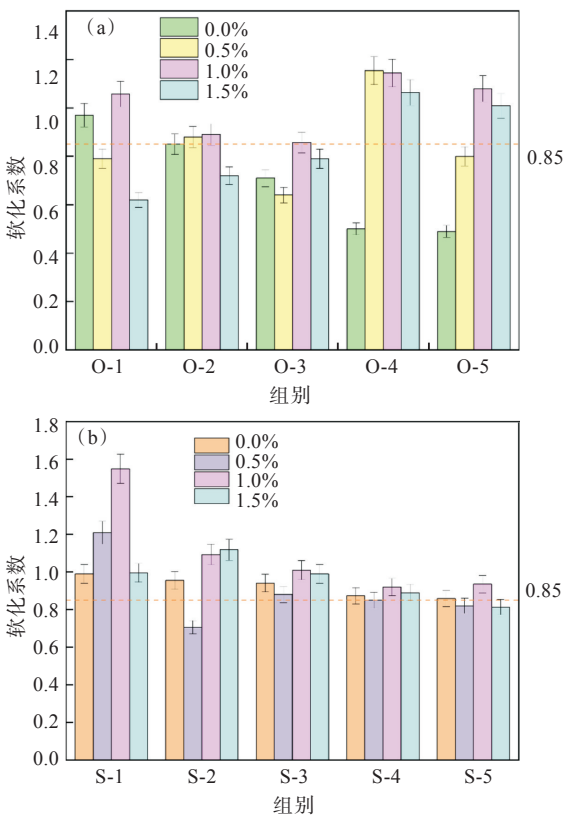
注：数据为均值±标准差(n=5)。

图1　有机硅掺量对吸水率的影响：(a)OPC组，(b)SAC组

Fig. 1　Effect of silicone content on water absorption rate: (a) OPC group, (b) SAC group

敏感。质量分数1.0%下各组吸水率进一步降低，憎水覆盖更充分，S-1-1吸水率降至0.0%。质量分数1.5%时除S-2外吸水率回升，可能是过量憎水剂形成连通通道或疏水膜不均产生薄弱间隙，导致吸水率上升。综上，除S-2及O-4组外，1.0%有机硅憎水剂浓度为最优掺量，S-1-1组吸水率最低为0.0%，O-1-1组吸水率最低为1.7%。

2.1.2 *有机硅掺量对PG矿渣行道砖软化系数的影响* 图2(a)和图(b)分别为OPC组与SAC组不同有机硅掺量对PG矿渣行道砖软化系数的影响规律。软化系数可表征水分对材料强度的劣化作用，与吸水率联用可综合评价PG行道砖的耐水性能。由图2(a)可知，除O-1-0.5、O-1-1.5、O-2-1.5及O-3-0.5组较空白组软化系数略有下降外，其余掺加有机硅憎水剂的各组软化系数均高于对照组，说明有机硅可显著提升试件的水稳定性能。《岩土工程勘察规范》中对耐水材料的要求为软化系数≥0.85，图中橙色参照线以上柱体为耐水材料组。横向看，O-2，O-4和O-5组软化系数随有机硅掺量增加先升高后降低；O-1和O-3组软化系数随有机硅掺量增加呈现先降低后升高再降低的趋势。除O-4组在有机硅掺量0.5%处软化系数达到最大值外，其余各组均在有机硅掺量1.0%处达到最大值。综合来看：OPC组内，O-4-0.5组软化系数最高为1.2，O-1-1组吸水率最低且软化系数为1.1，耐水性最优。由图2(b)可知，除S-2-0.5、S-3-0.5、S-4-0.5、S-5-0.5和S-5-1.5五组的软化系数较空白组有所下降外，其余经有机硅处理的组别软化系数均有不同程度提升，表明有机硅憎水剂对PG行道砖的耐水性具有显著的改善效果。图中橙色参照线以上柱体均为耐水材料，仅S-2-0.5，S-5-0.5和S-5-1.5三组为不耐水材料。综上所述，SAC组材料吸水率和软化系数均优于OPC组，且1.0%掺量有机硅为最优掺量，S-1-1组耐水性表现最佳，吸水率0.0%，软化系数为1.55。



注：数据为均值±标准差（n=5）。

图2 有机硅掺量对软化系数的影响：(a)OPC组，(b)SAC组

Fig. 2 Effect of silicone content on softening coefficient: (a) OPC group, (b) SAC group

2.2 PG矿渣行道砖的抗冻性分析

为评价行道砖在冻融循环后的耐久性与稳定性，确保其在寒冷气候环境中长期安全服役，开展了抗冻性试验。由表3和表4可知，试样经25次冻融循环后均符合外观质量要求，列出各组冻融前后抗压强度及强度损失值，强度损失率及其均值。由表3可得，S-1-1组强度损失率最低为3.1%，S-5组抗压强度损失率最高为25.8%，仅有S-4-1，S-5，S-5-0.5三组损失率大于20.0%，不符合GB/T 28635—2012冻融循环后强度损失率≤20.0%的要求，其余各组均满足要求。根据表3可得，O-2组强度损失率为18.2%，符合冻融循环后强度损失率≤20.0%的要求。综上所述，两表中除S-4-1，S-5，S-5-0.5三组不符合D25级抗冻性标准，其余十三组均符合GB/T 28635—2012中规定D25级抗冻性标准。

2.3 PG矿渣行道砖的防滑性能

行道砖的防滑性能关系到行人通行安全与城市基础设施服务水平摆式仪测定值(british pendulum number，BPN)是行道砖表面防滑性能的常用表征指标，通过摆式摩擦仪测得，反映材料表面的防滑阻力水平。BPN数值越大，表明铺装路面砖表面对行人鞋底的摩擦阻力越大，防滑性能越好。在雨雪、潮湿等恶劣气候条件下，抗滑阻力水平进一步下降，因此选取表3和表4中抗冻性优良的13个组进行进一步防滑性能测试，结果见表5。每块测6次，取后五次的平均值作为测定值。如表5所示，13组全部符合GB/T 28635—2012防滑性≥60BPN的要求，除S-3-0.5及O-2组外，其余各组BPN > 70BPN满足低温防滑的要求，是潮湿状态下优质的防滑材料。综上，符合D25级抗冻性标准的PG矿渣行道砖均具有优良的防滑性能。

表3　部分SAC组试样抗压强度损失率

Table 3　Loss in compressive strength of selected samples from the SAC group

编号	对照试件抗压强度 / MPa	冻融试件抗压强度 / MPa	强度损失值抗压强度 / MPa	强度损失率 / %	平均损失率 / %
S-1	34.7	30.5	4.2	12.1	13.6
S-1-0.5	33.4	31.4	2.0	6.0	
S-1-1	38.9	37.7	1.2	3.1	
S-1-1.5	36.4	30.5	5.9	16.2	
S-2	31.5	27.7	3.8	12.1	
S-2-0.5	29.7	25.6	4.1	13.8	
S-2-1	37.5	34.9	2.5	6.7	
S-2-1.5	33.3	31.2	2.1	6.3	
S-3	29.0	24.6	4.4	15.2	
S-3-0.5	34.0	29.2	4.8	14.1	
S-3-1	33.9	32.7	1.2	3.5	
S-3-1.5	31.6	25.5	6.1	19.3	
S-4-1	23.4	17.5	5.9	25.2	
S-5	19.8	14.7	5.1	25.8	
S-5-0.5	22.9	17.2	5.7	24.9	

表4　部分OPC组试样抗压强度损失率

Table 4　Loss in compressive strength of selected samples from the OPC group

编号	对照试件抗压强度 / MPa	冻融试件抗压强度 / MPa	抗压强度损失值 / MPa	抗压强度损失率 / %	平均损失率 / %
O-2	19.2	15.7	3.5	18.2	18.2

表5　PG矿渣行道砖BPN值

Table 5　BPN values of PG-slag paving bricks

编号	第一块BPN	第二块BPN	第三块BPN	第四块BPN	第五块BPN	算数平均BPN
S-1	72	70	75	71	72	72
S-1-0.5	71	71	73	71	70	71
S-1-1	75	72	76	72	70	73
S-1-1.5	69	70	72	68	73	70
S-2	68	70	70	73	72	71
S-2-0.5	76	72	69	70	70	71
S-2-1	70	75	72	75	76	74
S-2-1.5	73	75	68	74	70	72
S-3	72	76	73	69	71	72
S-3-0.5	66	69	70	70	67	68
S-3-1	72	70	68	71	73	71
S-3-1.5	69	73	76	72	71	72
O-2	70	65	72	70	68	69

3　结　论

本研究为各个配比设置0.0%，0.5%，1.0%，1.5%四个掺量梯度的有机硅憎水剂。研究了不同掺量的有机硅憎水剂对PG矿渣行道砖试件的耐水性（吸水率与软化系数）、抗冻性和防滑性能的影响，并遴选出各组耐水性表现优良的最优掺量。研究得到的结论如下：

（1）OPC组试件吸水率随有机硅掺量增加呈先降后升趋势，除O-4组外，其余各组均在1.0%掺量时吸水率最低，憎水效果最佳；软化系数除O-4组在0.5%掺量时最大外，其余组别均在1.0%掺量达到峰值。综合对比，O-1-1组吸水率最低，为1.7%；软化系数最高，为1.1，耐水性最优。

（2）SAC组试件吸水率除S-2组外均随有机硅掺量增加先降低后升高，各组均在1.0%掺量处吸水率最低，疏水效果最佳；软化系数除S-2组于1.5%掺量处最大外，其余组别均在1.0%掺量达到峰值。综合比较，S-1-1组耐水性表现最佳，吸水率0.0%，软化系数为1.55。SAC组吸水率和软化系数均显著优于OPC组，表明SAC对有机硅的响应性更优，更适合搭配有机硅憎水剂用于PG矿渣行道砖制备。

（3）有机硅的掺入对PG矿渣行道砖的抗冻性和防滑性能无明显影响。OPC组中有一组满足D25级抗冻性标准及防滑性≥60 BPN的要求，SAC组中有十二组满足D25级抗冻性标准及防滑性≥60 BPN的要求。

（4）磷石膏掺量在46.0%~62.0%范围内，在OPC组及SAC组两个体系中，有机硅最佳掺量均为1%。

参考文献

[1] 柴立元，柯勇，王云燕，等. 大宗难消纳工业固体废物“地球宏循环”生态回归研究[J]. 中国工程科学，2025，27(3)：98-105.

[2] 罗开林，吴起鑫. 高质量推进大宗工业固体废物综合利用研究：以贵州省为例[J]. 安顺学院学报，2025，27(6)：116-121.

[3] LIU S L, WANG Y M, WU A X, et al. Water resistance and hydration mechanism of phosphogypsum cemented paste backfill under composite curing agent modification [J]. Environmental Research, 2025, 286: 122797.

[4] 崔荣政，白海丹，高永峰，等. 磷石膏综合利用现状及“十四五”发展趋势[J]. 无机盐工业，2022，54(4)：1-4.

[5] WANG J M, DONG F Q, WANG Z J, et al. A novel method for purification of phosphogypsum [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2020, 56(5): 975-983.

[6] 董礼. 磷石膏固化剂与路面砖性能研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2025.

[7] MAIERDAN Y, HAQUE M A, CHEN B, et al. Recycling of waste river sludge into unfired green bricks stabilized by a combination of phosphogypsum, slag, and cement [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 120666.

[8] ZHANG G Y, WANG X Y. Carbon peaking and carbon neutrality in the cement-based materials [J]. Materials, 2023, 16(13): 4705.

[9] 左义兵，廖宜顺，叶光. 盐耦合侵蚀下碱矿渣水泥相演变的热力学模拟[J]. 建筑材料学报，2023，26(1)：7-13.

[10] 朱效甲，陈永杰，朱芸馨，等. 憎水剂对脱硫石膏耐水性能的影响[J]. 江苏建材，2021(4)：30-33.

[11] 王存，魏书剑，乔攀举. 甲基硅酸钠改性磷建筑石膏耐水性能研究[J]. 建材技术与应用，2024(5)：21-24.

[12] 王东. 不同有机硅憎水剂对建筑石膏性能的影响[J]. 新型建筑材料，2014，41(2)：68-70，89.

[13] 李丹，赵志曼，田睿，等. 有机防水剂对磷建筑石膏性能影响研究[J]. 非金属矿，2018，41(5)：38-40.

[14] 丁益，方有春，方辉，等. 新型建筑石膏用防水剂的研究[J]. 材料导报，2015，29(8)：126-129.

本文编辑：张 瑞