

助剂改性水泥基渗透结晶防水材料试验研究

闫东^{1,2,3*}, 李士民¹, 刘浩博¹, 肖学党², 张雷³, 张凤翔⁴, 来利鹏¹,
成帅¹, 李肖飞¹, 时朋飞¹, 吕维鹏¹, 曹浪超¹

(1. 信阳师范大学 建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000;

2. 信阳市灵石科技有限公司, 河南 信阳 464000;

3. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

4. 浙江省金华市浦江县建设工程质量安全监督站, 浙江 金华 322200)

摘要: 为了研究水泥基渗透结晶防水材料抗渗性能提升技术, 提出了外加助剂改性水泥基渗透结晶材料方案, 从水泥粒度、硅灰掺量、助剂添加角度研究其改性规律特性, 通过试验测定水泥粒度、物理力学性能、抗渗性能, 得到水泥基渗透结晶防水材料性能提升数据。研究表明: (1) 水泥颗粒残余量直接影响水泥基渗透结晶防水材料性能, 硅灰掺量在15%时表现出较好的力学性能, 减水剂掺量为0.1%时, 氯离子含量低的水泥基材料有较好的性能。(2) 单因素实验中去除涂层后抗渗压力比最高达167%。(3) 正交试验活性助剂成分中最佳掺量为酒石酸占涂料总量的0.3%, 硅酸钠占涂料总量的4%, 甲酸钙占涂料总量的3%。材料28d抗压强度为30.5MPa, 抗折强度为6.2MPa, 吸水率为6.5%。该研究成果可为水泥基防水抗渗修复材料的应用推广提供依据和参考。

关键词: 水泥基渗透结晶; 助剂改性; 水泥粒度; 物理力学性能; 抗渗压力比

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental study of additive modification on cement-based permeable crystalline waterproof material

YAN Dong^{1,2,3*}, LI Shimin¹, LIU Haobo¹, XIAO Xuedang², ZHANG Lei³,
ZHANG Fengxiang⁴, LAI Lipeng¹, CHENG Shuai¹, LI Xiaofei¹, SHI Pengfei¹,
LYU Weipeng¹, CAO Langchao¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;

2. Xinyang Lingshi Technology Co., LTD, Xinyang 464000, China;

3. Yellow River Conservancy Research Institute of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

4. Zhejiang Jinhua City Pujiang County Construction Engineering Quality and Safety Supervision Station, Jinhua 322200, China)

Abstract: To investigate the technology of improving the impermeability of cement-based permeable crystalline waterproof material, a scheme of modifying cement-based permeable crystalline waterproof materials with supplementary additives was proposed. The modification patterns and characteristics of cement-based permeable crystalline waterproof material were studied by examining cement particle size, silica fume content and additive dosage. The particle size, physical and mechanical properties and impermeability of cement were evaluated experimentally, and the performance enhancement data of cement-based permeable crystalline waterproof material was obtained. The results indicated that: (1) The residual amount of cement particles directly influenced the

收稿日期: 2024-05-14; 修回日期: 2024-07-07; *通信作者, E-mail: yandong@xynu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279134); 河南省自然科学基金项目(232300420323)

作者简介: 闫东(1989—), 男, 内蒙古阿荣旗人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构抗渗与修复加固技术研究。

引用格式: 闫东, 李士民, 刘浩博, 等. 助剂改性水泥基渗透结晶防水材料试验研究[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版), 2025, 38(4): 481-489.

YAN Dong, LI Shimin, LIU Haobo, et al. Experimental study of additive modification on cement-based permeable crystalline waterproof material[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2025, 38(4): 481-489.

performance of cement-based permeable crystalline waterproof materials, and the mechanical properties of cement-based materials with low chloride ion content exhibited superior mechanical properties at the content of wollastonite content of 5%, and the cement-based materials with low chloride ion content were better when the content of water-reducing admixture of 0.1%. (2) In the single factor test, the maximum coating impermeability ratio reached 167%. (3) The optimum active additive composition in orthogonal test was 0.3% tartaric acid, 4% sodium silicate and 3% calcium formate. The 28 d compressive strength of the material was 30.5 MPa, the flexural strength was 6.2 MPa, and the water absorption was 6.5%. The research results can provide basis and reference for the popularization and application of cement-based waterproof and impermeability repair materials.

Key words: osmotic crystallization; additive composition; cement particle size; physical and mechanical properties; impermeability pressure ratio

0 引言

随着我国城市化的高速发展,建筑行业和建筑材料不断更新,地下工程领域正蓬勃发展^[1]。地下工程结构长时间使用,由于荷载以及外界条件的影响,混凝土会生成结构性新生裂缝,进而在地下水的作用下形成内部渗水通道,造成地下工程渗水现象的发生,影响地下结构的耐久性,因此地下工程混凝土防水抗渗问题亟须解决。目前,学者们发现水泥基渗透结晶型防水材料在地下工程结构中能改善混凝土的密实程度,从而达到防水要求^[2-3]。顾春平等^[4]通过在水泥里加入不同比例的高吸水树脂(C-SAP)、反应修复剂(RHA)和高性能混凝土外加剂(HCSA)制备了快速堵漏、高效修复裂缝的自修复颗粒,并利用X射线衍射分析了化学反应的机理。KOBAYASHI等^[5]研究了被熔融后的玄武岩颗粒对水泥基结构的影响。AQUINO ROCHA等^[6]研究发现,再生混凝土粉含量低于30%时,水泥基材料表现出较好的力学性能及水化特性。AMIN等^[7]通过机器学习来预测蛋壳和玻璃粉替代砂子和水泥时水泥基材料(CBM)的吸水率。BOUKHATEM等^[8]使用海藻的黏度来替代部分水泥增加塑性黏性、水泥悬浮液的屈服应力和刚度。HADDAJI等^[9]将纳米二氧化硅添加到水泥基材料中,测得水泥基材料的吸水率和氯化物渗透的影响,并利用X射线衍射分析了水泥基材料侵入的情况。MENG等^[10]通过热处理强化后的珊瑚废弃物在水泥基材料中的性能,并通过微观X射线衍射分析(XRD)和热重分析(TGA)表征了珊瑚粉的流变性能。吴胜坤等^[11]总结了现阶段建筑行业提出的CO₂矿化封存技术,对提高水泥基材料力学性能、耐久性都有很大的帮助。张杰等^[12]将锂渣、水渣和高钙灰三种材料

分别研磨一定的细度,进行合理搭配来取代水泥,开展粒度分析和水泥强度试验。

上述研究成果集中于不同材料在水泥基材料中掺量和作用机理。而针对水泥原材料以及助剂掺量研究较少,为赋予水泥基渗透结晶防水材料更好的抗渗修复性能,本文通过水泥粒度、硅灰掺量、外加剂试验研究,分析水泥粒度、抗压强度、抗折强度、流动度、凝结时间、吸水率和抗渗性能,分别对试验中材料掺量与性能变化进行讨论分析,并为后续深入研究提供一定的参考。

1 试验内容

1.1 主要试验材料

(1) 选取硅酸盐水泥(P.O 42.5)相关参数见表1。

(2) 石英砂,目数80~120目,形状为颗粒状,含泥量为0.05%,破损率 $\leq 0.36\%$ 。

(3) 标准砂,来源于厦门艾思欧标准砂有限公司,符合GB/T 17671—2021。

(4) 硅灰,白色粉体,二氧化硅含量约为98%,比表面积约为21 m²/g,28 d活性指数约为105。

(5) 聚羧酸减水剂,减水率 $\geq 25\%$,泌水率 $\leq 60\%$,含气量 $\leq 3\%$ 。

(6) 硅酸钠,细度为98.9%,溶解速度为59 s,模数为2。

(7) 酒石酸,C₄H₆O₆含量为 $\geq 99.5\%$,氯化物含量 $\leq 0.0005\%$,灼烧残渣含量(以硫酸盐计) $\leq 0.01\%$ 。

(8) 甲酸钙,Ca(HCOO)₂含量为 $\geq 98\%$,含钙量 $\geq 30.4\%$,水不溶物 $\leq 0.5\%$,pH值(10水溶液)为7.0~7.5,重金属(以Pb计)为0.002%、(以AS计) $\leq 0.005\%$ 。

(9) 聚丙烯纤维,密度为0.91,断裂伸长率为

表1 硅酸盐水泥性能

Tab. 1 Properties of ordinary portland cement

品种	烧失量/%	三氧化硫/%	Cl ⁻ 离子/%	氧化镁/%	初凝时间/min	终凝时间/min
A	2.32	2.60	0.040	3.07	251	298
B	3.22	2.71	0.039	2.80	181	225
C	2.89	2.78	0.039	3.25	170	232
D	3.00	2.82	0.042	3.30	180	280

30%,断裂强度为550 MPa。

1.2 试验方案

通过水泥粒度分析,筛选出最优性能的水泥,设置硅灰的掺量为10%、15%、20%和25%,分别对水泥基材料的力学性能进行测试,确定减水剂最佳掺量,同时单独考察活性助剂(酒石酸、甲酸钙、硅酸钠)的掺量对水泥基渗透结晶防水材料抗渗性能的影响,最后选择酒石酸、甲酸钙、硅酸钠等3种活性助剂进行正交试验,并对其性能进行测试,选出最优的掺量,试验方法如下:

(1)水泥粒度测量试验方法

将水泥样品均匀分散在装有乙醇的循环池中,配制成悬浮液,进行缩分取样后充分搅拌,搅拌过程中用注射器插到悬浮液中部,抽取4~6 mL的悬浮液,然后在超声波中进行分散处理、测试,粒度分析仪如图1。



图1 粒度分析仪

Fig. 1 Particle size analyzer

(2)水泥净浆流动度试验方法

水泥净浆流动度测定(如图2)参照《混凝土外加剂匀质性试验方法》(GB/T 8077—2023)^[13]。



图2 水泥净浆流动度试验图

Fig. 2 Flow test diagram of cement paste

(3)水泥基凝结时间测试方法

水泥基材料的凝结时间测定(如图3)参照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)^[14]。



图3 水泥基凝结时间测试

Fig. 3 Test for setting time of cement base

(4)水泥砂浆试件抗压强度和抗折强度试验方法

水泥砂浆抗压强度和抗折强度的测定(如图4)参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)^[15]。



图4 水泥砂浆试验图

Fig. 4 Cement mortar test diagram

(5)水泥基渗透结晶型防水材料吸水率试验方法

吸水率是将涂刷后的长方体砂浆试件在标准养护条件下,在塑料池中加水至试块的3/4部位浸没,按照此条件养护至所需龄期28 d后,测得恒重的湿质量 G_w ,然后放入 $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的烘箱中干燥5 h后取出,待冷却至室温后,迅速称取恒重试件的质量 G_d 。

砂浆吸水率应按公式(1)计算:

$$W_x = \frac{G_w - G_d}{G_d} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: W_x 为水泥基吸水率, 单位为%; G_w 为吸水后试件湿质量, 单位为 g; G_d 为干燥试件的质量, 单位为 g。在标准试验条件下, 测试吸水率的砂浆试件, 如图 5。



图 5 正在测试吸水率的砂浆试件

Fig. 5 Mortar specimen being tested for water absorption

(6) 水泥基渗透结晶防水材料抗渗修复试验

参照国标《水泥基渗透结晶型防水材料》^[16] 进行抗渗强度测定, 如图 6。



图 6 抗渗试验图

Fig. 6 Impermeability test diagram

2 试验结果与分析

2.1 不同的水泥品种对水泥粒度残余含量的影响

从市面选取 4 种普通硅酸盐水泥(分别记为 A、B、C、D), 完成后的水泥粒度检测, 见图 7—图 10。根据上面用粒度分析仪测出来粒度分析图, 计算出来的水泥颗粒残余含量见表 2。

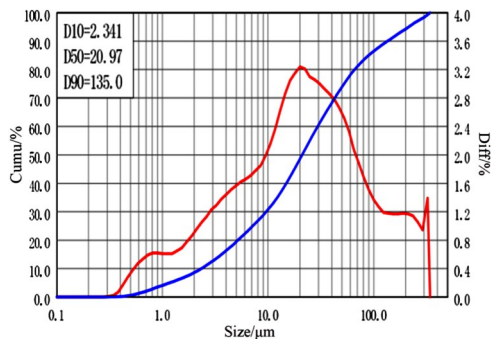


图 7 水泥 A 的粒度分布图

Fig. 7 Grain size distribution of cement A

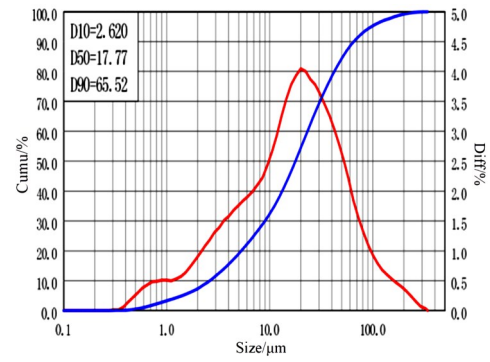


图 8 水泥 B 的粒度分布图

Fig. 8 Grain size distribution of cement B

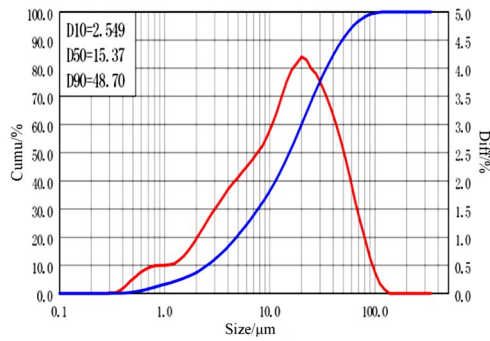


图 9 水泥 C 的粒度分布图

Fig. 9 Grain size distribution of cement C

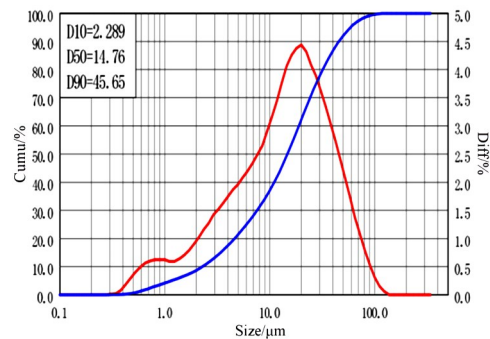


图 10 水泥 D 的粒度分布图

Fig. 10 Grain size distribution of cement D

表 2 不同水泥品种水泥颗粒的残余含量

Tab. 2 Residual content of cement particles for different cement varieties

品种	粒径区间占比/%				水泥颗粒残余含量/%
	30~40 μm	40<~ 50 μm	50<~ 80 μm	>80 μm	
A	8.76	5.44	9.64	9.64	12.15
B	10.34	5.81	8.75	6.98	7.53
C	10.53	5.75	5.78	1.74	4.20
D	10.01	5.13	6.64	1.46	4.19

从图中可以看出,不同水泥粒度分布范围占比不相同,大于80 μm的粒径占比影响水泥未水化的水泥颗粒比重比较大,这可能是由于近似成球体时,球心残余未水化水泥占比较大,水泥水化分为5个阶段:起始期、诱导期、加速期、减速期和稳定期。水泥水化在诱导期生成以AFt为主的晶体附着在水泥表面,将未水化的水泥颗粒隔开,减缓了水化的速度。随着时间的延长,水化又开始进行,这是由于有一部分水分子、钙离子和硫酸根离子以扩散方式通过薄膜层,然后进入到未水化的水泥颗粒当中,重新开始产生AFt和CSH,原薄膜破裂,重新开始水化。水泥基渗透结晶材料中水泥未水化含量占比越大,对修补混凝土的二次抗渗有较好的影响,重启水泥水化对水泥成膜以及活性物质向混凝土内渗透有很大影响。水泥强度随着时间缓慢增长,会持续水化,未水化颗粒残余含量会逐渐降低,分布均匀。混凝土裂缝的随机概率不会因为重启水泥水化反应而导致原料不足。通过分析,选用水泥品种A,对后期渗透结晶抗渗防水效果更好。

2.2 硅灰掺量对水泥基渗透结晶型防水材料力学性能的影响

选择好水泥品种后,设定硅灰的掺量分别为10%、15%、20%和30%,在上述掺量下进行力学性能的测试,根据数据绘制图11—图12。

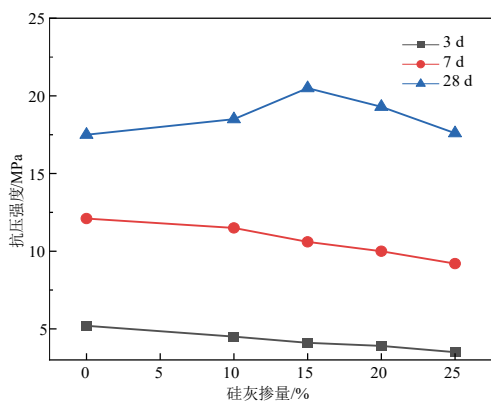


图 11 抗压强度图

Fig. 11 Compressive strength diagram

从图中可以看出,掺入硅灰后,净浆试块的抗压和抗折强度的3 d和7 d变化规律是相同的。净浆试块随着硅灰的掺量增加,其强度在逐渐降低,而在28 d时随硅灰掺量的增加,抗压和抗折强度出现了先上升后下降的趋势,其中硅灰掺量在15%时,28 d的净浆抗压强度达到最大值。这可

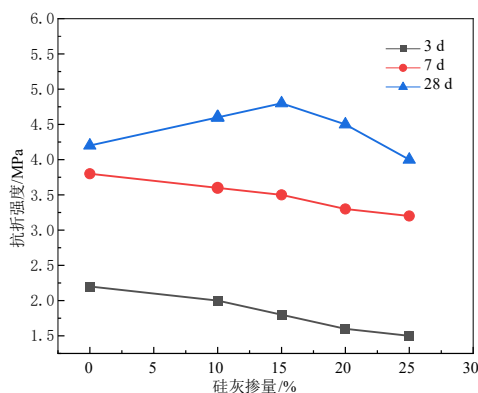


图 12 抗折强度图

Fig. 12 Flexural strength diagram

能由于硅灰在前期活性比较低,水泥水化反应较慢,生成的氢氧化钙较少,没有激发硅灰的火山灰效应。随着养护周期的增长,水泥水化生成的氢氧化钙增加,火山灰效应逐渐显现出来。28 d抗压强度随着硅灰掺量的增加,又出现了降低,这是硅灰反应消耗了水泥水化的氢氧化钙,产生的结晶含量较少,导致抗压强度下降。综合分析可得,选取硅灰掺量为15%时,水泥基材料的力学性能有明显的提高。

2.3 减水剂掺量对水泥基渗透结晶型防水材料物理性能的影响

选定水泥品种和硅灰掺量下,设置减水剂掺量分别为涂料总量的0.0%、0.1%、0.2%、0.3%,进行流动度和凝结时间的测定,实验数据如表3所示。

表 3 不同减水剂掺量下的流动度和凝结时间

Tab. 3 Fluidity and setting time under different dosage of water reducer

掺量/%	流动度/mm	初凝时间/min	终凝时间/h
0.0	160	90	3.5
0.1	172	100	4.1
0.2	179	124	4.6
0.3	189	136	5.8

在实际工程中,要考虑涂料的施工性能,施工性能最主要体现在流动性上。由试验可得,随着减水剂的增加,水泥流动度是逐渐增加的,减水剂的加入增加了自由水的含量,自由水释放出来。对于水泥基渗透结晶型防水材料而言,流动性问题可以通过用水量调节,但是过大的用水量会导致水泥石硬化后出现孔隙,从而造成混凝土的开

裂和收缩,使其自身所具有的防水性能消失。

流动度来衡量涂料的流动性能,通过试验可知,随着减水剂掺量的增加,流动性逐渐增加,但是过量的减水剂造成流动度太大,甚至离析现象,因此采用一定流动度的涂料浆体可具有良好的施工性能。从使用经验上来说,对于流动度大于 170 mm 的涂料施工性能都表现得很好。考虑到经济因素,掺量只要求在 0.1% 时试验所需要的水量满足即可,过多的减水剂掺量会造成资源的浪费。如果减水剂掺量过大,还会造成凝结时间过长,对于施工是不利的。由于水泥基渗透结晶型防水材料施工一般情况下是在渗水的背水面上进行,存在静水压力,所以涂层凝结时间不能过长,过长的话会造成受压脱落。一般情况下对比不同的国内外涂料,以及考虑实际操作经验,涂料的初凝时间应保持在 100 min 左右,终凝时间在 4 h 之内是比较好的。

2.4 不同品种石英砂中氯离子含量对水泥基材料力学性能的影响

选取了市面售卖的不同品种的砂子 4 种(分别标记为 S1、S2、S3 和 S4),然后通过氯离子含量快速测定仪来测量砂子中氯离子含量。4 种石英砂在标准条件下制备水泥胶砂,然后测得相关性能,如图 13 所示。

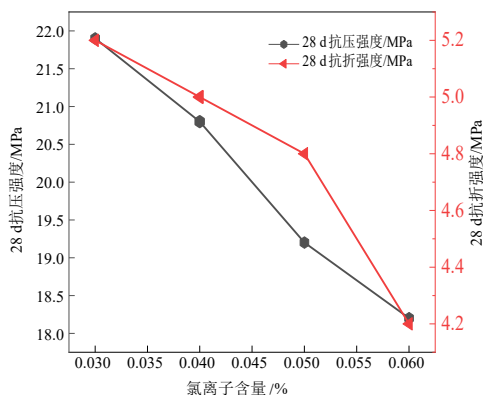


图 13 氯离子含量与力学性能关系

Fig. 13 Relationship between chloride content and mechanical properties

水泥基渗透结晶防水材料中氯离子的含量会对水泥基材料的力学性能、耐久性等造成深远的影响。由图 13 可得,氯离子含量越高,水泥胶砂的力学性能越低。这是由于氯离子会与水泥中的钙离子结合生成低水化铝酸钙,这种物质会降低水化作用,影响水泥水化的进程。水泥水化不完全,

会造成砂浆内部毛细孔道增多,进而影响水泥胶砂的吸水率。综合考虑后,选定氯离子含量最低的石英砂 S1 作为水泥基渗透结晶活性成分所用的石英砂。

2.5 活性助剂对水泥基渗透结晶防水材料抗渗性能影响

水泥基渗透结晶防水材料(CCCW)主要成分是水泥石英砂,这两种材料主要提供力学性能,活性物质能够在混凝土中生成晶体,这些活性物质大致分为 3 类:

(1)能与钙离子反应直接生成沉淀结晶类的活性化学物质。选用硅酸钠作为活性成分之一,试验中设置单因素实验,硅酸钠的掺量分别为 0%、2%、4%、6%、8% 和 10%,随后进行去除涂层抗渗试验,试验操作见上文 1.2 节,砂浆抗渗仪精度为 0.1 MPa,抗渗压力比精度为 1%,得出的试验结果如图 14 所示。

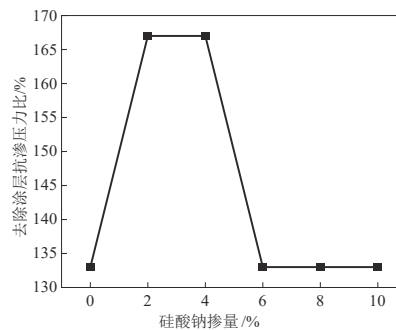


图 14 硅酸钠掺量与去除涂层抗渗压力比关系

Fig. 14 Relation between sodium silicate content and impermeability pressure ratio of removing coating

由图 14 可得,随着硅酸钠的增加,去除涂层抗渗压力呈现出先上升后下降的趋势。硅酸钠在掺量 0%~4% 之间的涂层抗渗压力逐渐增强,从掺量 4% 之后,逐渐下降。硅酸钠在前期渗入混凝土内,可以很好地生成水化硅酸钙凝胶,密实混凝土内部,从而造成去除涂层的抗渗压力比上升。后期掺量多时,导致水泥水化变慢,出现缓凝的效果,影响水泥早期强度,进而使去除涂层抗渗压力比下降。

(2)能够与钙离子生成络合物的活性成分。此物质根据络合物溶解性不同,分为可溶性络合物、微溶性络合物以及不溶性络合物,选定酒石酸作为试验材料。

试验中设置单因素实验,设置酒石酸掺量分别为 0.0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 和 1.0%,随

后进行去除涂层抗渗试验,得出的试验结果如图15所示。

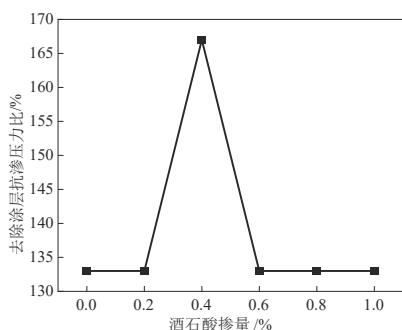


图15 酒石酸掺量与去除涂层抗渗压力比关系

Fig. 15 Relation between tartaric acid content and impermeability pressure ratio of removing coating

根据图15可知,酒石酸在水泥基材料中,在0.4%时去除涂层抗渗压力比达到了峰值167%。这是由于加入酒石酸后,钙离子与酒石酸中的离子生成络合,当碰到容易产生沉淀的离子时,优先结合,其浓度降低,促进水泥水化,加快水泥水化速度。随着酒石酸过多的加入,酒石酸还有一定的减水和缓凝作用,影响水泥水化的进行,造成水泥水化进程缓慢,影响水泥基材料的工作性能和施工性能。

(3)钙离子助剂。试验中设置单因素实验,甲酸钙掺量分别为0%、1%、2%、3%、4%和5%,随后进行去除涂层抗渗试验,得出的试验结果如图16。

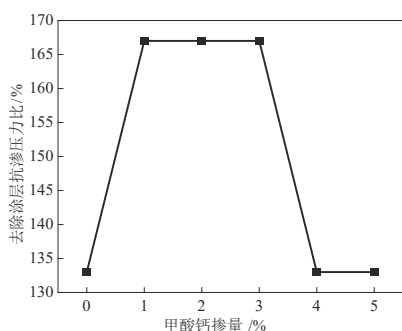


图16 甲酸钙掺量与去除涂层抗渗压力比关系

Fig. 16 Relation between calcium formate and impermeability pressure of coating removal

根据图16,随着甲酸钙掺量的增加,去除涂层抗渗压力比先上升后下降,当甲酸钙掺量在1%~3%时,去除涂层的抗渗压力比达到了最大值,抗渗效果较好。甲酸钙在水泥基材料中作为钙离子补偿剂,随着反应进行,钙离子减少。当加入甲酸

钙时,补充钙离子,促进沉淀结晶的生成,改善混凝土的凝结时间。过多的甲酸钙在水泥水化过程中生成大量的氢氧化钙,造成水泥碱骨料反应,导致水泥基材料的去除涂层抗渗压力比降低。

2.6 活性助剂成分对水泥基材料力学性能的影响

通过上述单因素分析结果可知,水泥基材料去除涂层的抗渗压力比达不到国家标准,这就需要多种材料的耦合作用,并分析耦合作用产生的效果。水泥基渗透结晶防水材料通过上述试验和活性成分的理论分析,选定后续试验用砂为80~120目石英砂,硅灰的掺量为15%,水泥基渗透结晶防水材料中水泥与石英砂比为2:1,减水剂掺量为0.1%。选定活性材料掺量(占涂料质量的百分比)为:酒石酸为0.2%、0.3%、0.4%、0.5%,硅酸钠为1%、2%、3%、4%,甲酸钙为1%、2%、3%、4%,设计三因素四水平正交试验,共16组。完成水泥基渗透结晶防水材料的制作与养护后,测试并对比分析不同比例混合使用对28d水泥基抗压强度、抗折强度、吸水率的影响。根据三因素四水平正交试验的试验结果,绘制出各组别活性成分掺量与水泥基渗透结晶型防水材料抗压强度与抗折强度的关系,如图17—图18。

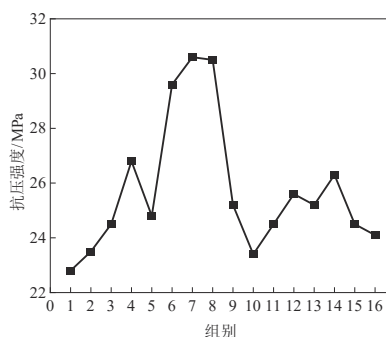


图17 抗压强度图

Fig. 17 Compressive strength

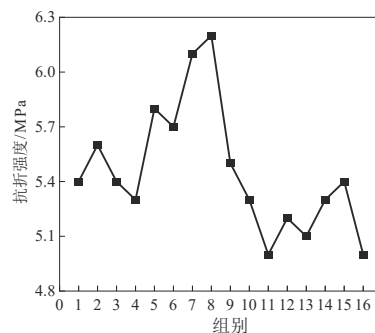


图18 抗折强度图

Fig. 18 Flexural strength

根据图 17 和图 18,在加入不同掺量的活性成分后,水泥基渗透结晶型防水材料加入后,抗压强度比空白组有不同程度的提高,这是由于活性成分加入后,与水泥水化后的物质生成各种沉淀,堵塞毛细孔道以及生成络合物等物质来催化水泥水化。水泥加水拌和后在前期生成了钙矾石,起始阶段形成大量的 AFt 晶体,后期在水泥水化过程会生成大量的硅酸钙凝胶和氢氧化钙,而活性成分的加入有助于硅酸钙的形成来提高力学性能。

通过正交试验可得,在第 7、8 组试验中 28 d 的抗压强度和抗折强度较大,第 9 组呈现下降的趋势,下降比例较大。这是由于酒石酸络合物的加入,与钙离子反应生成络合物,形成钙离子富集,与裂缝中的碳酸根离子、碳酸氢根离子反应生成碳酸钙晶体,促进水泥熟料中的硅酸三钙和硅酸二钙的水化,生成大量的硅酸钙凝胶以及钙矾石,有利于裂缝的修补。酒石酸的加入会降低水泥水化放热的速率,减少裂缝的产生,但是自身还具有一定的作用,如果过量地掺入,酒石酸就会具有很强的缓凝效果,大大抑制水泥水化的过程,使水泥砂浆的强度明显降低。酒石酸中含有羟基,羧基羧酸可以与水泥中的钙离子形成络合物,吸附在水泥粒子表面,胶凝材料在水化和硬化过程中吸附在新产生的化合物之上,改变了饱和溶液中晶胚的生成速度,控制胶凝物的水化和硬化过程。酒石酸还有一定的减水作用,会影响水泥浆体的黏结性能和包裹性。掺量超过一定值后,会释放出一定量的被水泥浆体包裹的拌和水,这部分水分会影响水泥基材料的工作性能以及力学性能。

2.7 活性助剂成分对水泥基材料吸水率的影响

正交试验测得的吸水率结果,见图 19。根据图 19 得出,在上述正交试验中,第 8 组的吸水率达到了最低的 6.5%,较空白组降低了 39.8%。正交试验上的吸水率较空白组都有明显的降低,这说明 3 种活性成分加入后,通过涂刷地下工程表面,使活性物质与水泥水化后的产物不同程度地渗入孔隙和裂缝中,生成不溶物,导致砂浆内部孔隙堵塞,在合理的掺量下能够影响水泥水化反应以及

参考文献:

- [1] 王将. 水泥基渗透结晶型防水材料在地下工程应用[J]. 中国建筑金属结构, 2021(11): 134-135.
WANG Jiang. Cement-based permeable crystalline waterproofing materials are used in underground engineering[J]. China Construction Metal Structure, 2021(11): 134-135.

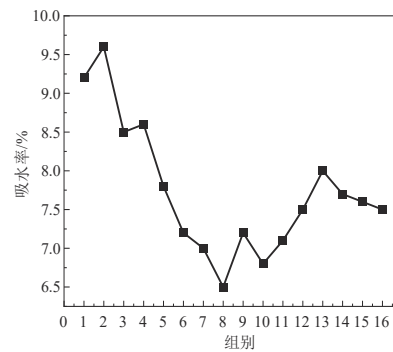


图 19 吸水率图

Fig. 19 Water absorption diagram

砂浆内部密实程度,减少吸水量,对建筑物的耐久性有显著提高。

3 结论

为了制备出性能更加优越的水泥基渗透结晶型防水材料,分析了水泥种类、硅灰的掺量以及减水剂助剂掺量对性能的影响,确定了各个材料的种类以及用量。以此为基准,对试验结果综合分析得到如下的结论:

(1)水泥是其主要成分,在水泥粒度分析中,通过粒度分析仪对不同品种的水泥进行检测并得出数据,然后计算出水泥颗粒残余量,最后得出水泥品种 A 对水泥基渗透结晶型防水材料表现出更好的性能。

(2)通过试验得出,硅灰掺量在 15% 时更能表现出良好的力学性能,此时 28 d 后砂浆的抗压强度为 20.5 MPa,抗折强度为 4.8 MPa。综合各项性能分析,得出减水剂掺量为 0.1% 时,水泥基材料更能表现出良好的施工性。

(3)试验选定酒石酸掺量 0.4% 时去除涂层抗渗压力比为 167%;甲酸钙掺量 1%~3% 时去除涂层的抗渗压力比达到了最大值,为 167%;硅酸钠掺量 2%~4% 时去除涂层的抗渗压力比为 167%。

(4)活性助剂成分中酒石酸占涂料总量的 0.3%,硅酸钠占涂料总量的 4%,甲酸钙占涂料总量的 3%。此时水泥基渗透结晶型防水材料 28 d 抗压强度为 30.5 MPa,抗折强度为 6.2 MPa,吸水率为 6.5%。

- [2] 齐孟,蒲云东,杨森,等.氧化石墨烯对水泥基渗透结晶型防水材料抗渗性能的影响[J].复合材料学报,2023,40(3):1598-1610.
 QI Meng, PU Yundong, YANG Sen, et al. Effect of graphene oxide on the impermeability of cementitious capillary crystalline waterproofing[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1598-1610.
- [3] 吴明.对水泥基渗透结晶防水涂料的几点思考[J].中国建筑防水,2011(17):4-9,19.
 WU Ming. Views on cementitious capillary crystalline waterproofing materials [J]. China Building Waterproofing, 2011(17): 4-9, 19.
- [4] 顾春平,双雨竹,马俊涛,等.水泥基材料自修复颗粒的制备及修复效果事前快速评价方法[J].材料导报,2024,38(15):146-151.
 GU Chunping, SHUANG Yuzhu, MA Juntao, et al. Preparation of self-healing particles of cement-based materials and rapid evaluation method for their repair effect in advance[J]. Materials Reports, 2024, 38(15): 146-151.
- [5] KOBAYASHI M, TAKAHASHI K, KAWABATA Y. Deterioration of cement-based materials in low-temperature seawater[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2023, 16(15): 5278.
- [6] AQUINO ROCHA J H, TOLEDO FILHO R D. The utilization of recycled concrete powder as supplementary cementitious material in cement-based materials: A systematic literature review [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107319.
- [7] AMIN M N, AHMAD W, KHAN K, et al. Evaluating the relevance of eggshell and glass powder for cement-based materials using machine learning and SHapley additive exPlanations (SHAP) analysis[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02278.
- [8] BOUKHATEM A, BOUARAB K, YAHIA A. Kappaphycus alvarezii seaweed as novel viscosity-modifying admixture for cement-based materials[J]. ACI Materials Journal, 2023, 120(4): 15-28.
- [9] HADDAJI B, KEITA E, FABIEN A, et al. Nanosilica-based post-treatment of hardened cement-based materials: The underlying physics[J]. Cement and Concrete Research, 2023, 171: 107211.
- [10] MENG Shaoqiang, SHI Zhenming, WU Kai, et al. Phase modification of coral waste and its performance in cement-based materials: Rheology, hydration, and interface strength[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 72: 106746.
- [11] 吴胜坤,黄天勇,谢岩,等.二氧化碳矿化养护水泥基材料研究进展[J].硅酸盐通报,2023,42(6):1897-1911.
 WU Shengkun, HUANG Tianyong, XIE Yan, et al. Review on CO₂ mineral carbonation-cured cement-based materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(6): 1897-1911.
- [12] 张杰,彭丙杰,罗小东,等.工业废渣对水泥粉体粒度分布及性能影响的试验研究[J].新世纪水泥导报,2022,28(3):6-11.
 ZHANG Jie, PENG Bingjie, LUO Xiaodong, et al. Experimental study on effect of industrial waste slag on particle size distribution and properties of cement powder[J]. Cement Guide for New Epoch, 2022, 28(3): 6-11.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法:GB/T 1346—2011[S].北京:中国标准出版社,2012.
 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for water requirement of normal consistency, setting time and soundness of the portland cement: GB/T 1346—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.混凝土外加剂匀质性试验方法:GB/T 8077—2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Methods for testing uniformity of concrete admixture: GB/T 8077—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [15] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
 State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method of cement mortar strength(ISO method): GB/T 17671—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.水泥基渗透结晶型防水材料:GB 18445—2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Cementitious capillary crystalline waterproofing materials: GB 18445—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

责任编辑:郭红建