

硅烷基聚合物防水粉末对早强砂浆性能影响的试验研究

Experimental Research on Effect of Silane-based Polymer Powder on Properties of Early-strength Mortar

李光辉¹, 宋 鸽²

(1. 河南交通投资集团有限公司, 河南 郑州 450016;

2. 河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州 450006)

摘 要: 通过试验, 研究了硅烷基聚合物防水粉末掺量对早强砂浆的流动性能、抗压强度、抗折强度、吸水性能及抗氯离子渗透性能的影响规律。早强砂浆是由普通硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥和石膏为胶凝材料制备而成, 硅烷基聚合物防水粉末是由 γ -氨丙基三乙氧基硅烷、聚乙烯醇和异丁基三乙氧基硅烷为主要原料制成。试验结果表明: 硅烷基聚合物防水粉末掺量 3.0% 以内时, 早强砂浆流动度和经时流动度损失符合规范要求; 掺量为 3.0% 时, 28 d 龄期的早强砂浆试件吸水率最大降低 58.9%, 抗压强度和抗折强度未降低, 抗氯离子渗透性能提高 44.6%。

关键词: 早强砂浆; 硅烷基聚合物防水粉末; 抗压强度; 吸水率; 抗氯离子渗透性能

中图分类号: U444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 04-0069-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.012

LI Guanghui¹, SONG Ge²

(1. Henan Transport Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China;

2. Henan Transportation Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450006, China)

Abstract: The effect of silane-based polymer powder content on the flow properties, compressive strength, flexural strength, water absorption and chloride ion resistance of early-strength mortar were studied through experiments. Early-strength mortar was prepared from ordinary Portland cement, sulfoaluminate cement and gypsum as binding materials. The main raw materials of the silane-based polymer powder were γ -aminopropyltriethoxysilane, polyvinyl alcohol and isobutyltriethoxysilane. The results showed that when the content of silane-based polymer powder was within 3.0%, the fluidity and loss of fluidity of early-strength mortar met the requirements of the specification. When the dosage was 3.0%, the water absorption rate of the 28d-aged early-strength mortar specimens decreased by 58.9%, the compressive strength and flexural strength were not reduced, and the resistance to chloride ion penetration increased by 44.6%.

Keywords: early-strength Mortar; silane-based polymer powder; compressive strength; water absorption; resistance to chlorideion resistance

0 引言

作者简介: 李光辉 (1981—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事新型建筑材料在公路工程中应用技术研究。

收稿日期: 2022-05-26

由普通硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥和石膏为主要胶凝材料制备的早强砂浆, 具有凝结速度快、早期强度高、收缩变形小等特点, 已被作为快速

材料科学

修补材料广泛应用于道路、机场跑道、桥梁伸缩缝等快速修复工程^[1-2]。工程中快速修补材料既要承受荷载作用,还要遭受自然环境的劣化,如碳化、氯离子侵蚀、硫酸盐侵蚀及冻融作用等。而水作为传输介质是水泥基类材料性能遭受自然环境劣化的必要条件。研究表明,阻断水在水泥基材料中的传输有两种途径,一是提高水泥制品结构密实性,降低孔隙率,如采用低水灰比和掺加矿物掺合料等技术;二是改善孔结构疏水,如利用硅烷参与水泥水化或吸附在水泥制品表面形成疏水结构。

目前,关于硅烷对水泥制品影响的研究较多,研究表明硅烷可以提高水泥基材料的疏水性和抗渗性,但由于硅烷的加入影响了水泥的水化,降低了浆体结构的密实度,对改善水泥基材料的耐久性能具有不利作用。张鹏等^[3]研究得到掺加硅烷改性是提高水泥混凝土材料防水和抗氯离子侵蚀能力等耐久性能的有效途径,但文献[4]和[5]研究发现硅烷乳液的加入降低了混凝土的抗冻性能,且随着硅烷乳液掺量的增加混凝土的抗冻性能变差。为进一步提高硅烷材料对水泥制品耐久性能的改善作用,实现硅烷材料既提高水泥基材料的抗渗性能,又保证水泥基材料力学性能的目的,采用司盘 80 和 OP-10 复合乳化体系将 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)、聚乙烯醇和异丁基三乙氧基硅烷等材料配制成硅烷乳液,加入

超细碳酸钙填料,并通过流化床烘干工艺制备成硅烷基聚合物粉末。试验研究了硅烷基聚合物粉末掺量对早强砂浆的流动性能、抗压强度、抗折强度、吸水率及抗氯离子渗透性能的影响规律,为进一步完善硅烷基聚合物粉末改善早强砂浆耐久性能进行了探索。

1 试验概况

1.1 原材料

(1) 普通硅酸盐水泥采用登封中联登电水泥有限公司生产的 P·II 52.5R 水泥;硫铝酸盐水泥采用郑州市建文特材科技有限公司生产的 R·SAC42.5 水泥,水泥化学组成见表 1。

(2) 石膏选用 α -半水石膏;细集料采用粒径 0.30~1.25 mm 石英砂。

(3) 自制硅烷基聚合物防水粉末:采用司盘 80 和 OP-10 复合乳化体系将一定比例的 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)、聚乙烯醇和异丁基三乙氧基硅烷等材料配制成硅烷乳液,加入超细碳酸钙填料,并通过流化床烘干工艺制成粉末。

(4) 减水剂选用巴斯夫 F10 聚羧酸减水剂。

(5) 自制调凝剂,采用硼砂和偏铝酸钠进行复配。

(6) 消泡剂选用有机硅系列消泡剂。

1.2 试验分组

硅烷基聚合物粉末早强砂浆的配合比见表 2。

表 1 水泥化学组成 Table 1 Chemical composition of cement									
化学组成 (wt%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
P·II 52.5R 水泥	65.21	21.50	6.03	3.16	0.72	0.22	2.74	0.42	0.18
R·SAC42.5 水泥	36.2	4.51	45.22	1.2	0.75	2.10	—	—	—

表 2 硅烷基聚合物粉末早强砂浆配合比 Table 2 Mix proportion of silane-based polymer powder early-strength mortar								
试件序号	普通硅酸盐水泥 /g	硫铝酸盐水泥 /g	石膏 /g	调凝剂 /g	细集料 /g	减水剂 /g	用水量 /kg	硅烷基聚合物防水粉末 /g
1	567	239	76	18	900	18	234	0
2	567	239	76	18	900	18	234	9
3	567	239	76	18	900	18	234	18
4	567	239	76	18	900	18	234	27
5	567	239	76	18	900	18	234	36

1.3 试验方法

(1) 抗压强度、抗折强度及砂浆流动度测定

按照 GB/T 17671-1999《水泥胶砂强度检验方法》^[6]制浆,测试初始流动度,浇筑试模成型

2 h后脱模, 标准条件 ($20\pm1^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}90\pm5\%$) 养护至设定龄期后 (2 h、1 d、7 d、28 d、90 d) 测试试件的抗折强度和抗压强度。浆体流动度测试按照 GB/T 50448-2015《水泥基灌浆材料应用技术规范》^[7]中规定的方法进行。

(2) 吸水率

试件成型并在标准条件下养护至 28 d 后, 在 $75^{\circ}\text{C}\sim80^{\circ}\text{C}$ 温度条件下烘干 48 h 后称量初始质量, 然后将试件放入水槽中。试件的成型面向下放置, 用两根直径 10 mm 的钢筋垫起试件, 试件浸入水中的深度为 50 mm。将装有试件的水槽放入温度为 $20^{\circ}\text{C}\pm3^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 80% 以上的恒温箱中, 达到设定试验时间后, 取出并用挤干的湿布擦去试件表面的明水 (试件表面无明水), 称量并记录。

(3) 抗氯离子渗透性能试验

氯离子侵蚀试验用 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times100\text{ mm}$ 砂浆试件, 标准条件下养护至 28 d 后, 将砂浆试件切割成 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times50\text{ mm}$ 形状, 用环氧树脂将切割后试件的 4 个侧面和底面密封, 然后将试件放入浓度为 3% 的 NaCl 溶液中浸泡 120 d 后, 沿氯离子侵蚀方向以 2 mm 规格分层研磨成粉末, 采用电极法测定粉末中氯离子含量, 氯离子含量取 3 个试件的平均值。

2 结果与分析

2.1 流动度

图 1 为不同硅烷防水粉末掺量时早强砂浆的流动度测试结果。从图 1 可得到, 随着硅烷防水粉末掺量的增加, 初始流动度和 30 min 流动度呈现先升高后降低的趋势。硅烷粉末掺量由 0 到 1% 时, 早强砂浆的初始流动度从 300 mm 提高到 310 mm, 硅烷粉末掺量 2% 与掺量 1% 的初始流动度相同, 掺量 3% 时与掺量 0 时的初始流动度均为 300 mm。这是由于聚乙烯醇与硫铝酸钙水泥颗粒结合形成界面层, 具有减水的作用, 可以改善砂浆的工作性能。同时, 早强砂浆 30 min 流动度的经时损失呈现先减小后增大的现象, 当硅烷防水粉末掺量为 2.0% 时, 早强砂浆的 30 min 流动度经时损失值最小。这是由于烷氧基硅烷官能团水解

后生成 =Si-OH 能与水泥颗粒表面的羟基脱水缩合形成化学键, 通过化学结合的方式吸附在水泥颗粒表面, 相对于减水剂静电吸附方式, 这种化学吸附作用力更强, 氨基硅烷烷基水解生成 =Si-OH 既能与水泥颗粒表面形成化学键, 氨基也可以与 PVA 产生通过色散力和氢键形成物理化学吸附, 硅烷减水剂竞争吸附, 减水剂的吸附量降低, 在硅烷和聚乙烯醇综合作用下, 初始流动度略微增加, 残余在水泥浆体中起补偿吸附作用的减水剂的量较多, 从而使浆体后期分散性较好, 所以掺量为 2% 时, 砂浆流动度经时损失最小, 但是当硅烷粉末含量过多时, 在碱性环境中, 硅烷水解后生成 =Si-OH 会发生缩合反应, 在浆体中形成超疏水多聚体, 水泥颗粒形成超疏水颗粒, 破坏了减水剂的吸附, 使减水剂分散性能降低, 浆体流动度降低。

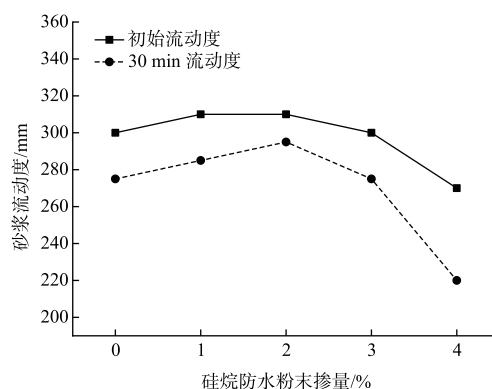


图 1 不同硅烷防水粉末掺量时早强砂浆的流动度
Fig. 1 Fluidity of early-strength mortar with different silane-based polymer powder content

2.2 抗压强度

图 2 为不同硅烷防水粉末掺量早强砂浆的各龄期时抗压强度测试结果。从图 2 中可以得到, 2 h 时, 硅烷粉末掺量 1%、2%、3% 和 4% 与掺量 0 时相比砂浆抗压强度分别降低了 15.8%、25.3%、37.2% 和 48.8%; 1 d 时, 硅烷粉末掺量 1%、2%、3% 和 4% 与掺量 0 时相比砂浆抗压强度分别降低了 5.9%、12.8%、22.2% 和 43.1%; 7 d 时, 硅烷粉末掺量 1%、2%、3% 和 4% 与掺量 0 时相比砂浆抗压强度分别降低了 4.1%、6.9%、16.0% 和 25.5%; 28 d 时, 硅烷粉末掺量 1%、2%、3% 和 4% 与掺量 0 时相比砂浆抗压强度分别降低了

材料科学

3.0%、2.5%、6.3%和21.5%；90 d时，与掺量0时相比，硅烷粉末掺量1%和2%的砂浆抗压强度分别增加了0.7%和1.5%，掺量3%和4%的砂浆抗压强度分别降低了2.3%和21.5%。硅烷粉末对早强砂浆的早期抗压强度影响比较明显，硅烷粉末掺量相同时，2 h龄期的抗压强度下降最大，且随着龄期的增长，硅烷粉末对早强砂浆的抗压强度影响程度逐渐降低。硅烷粉末掺量3%以内，28 d龄期的抗压强度与掺量0的基本持平，最大仅降低了6.3%；90 d龄期的抗压强度已略高于掺量0的抗压强度值。硅烷粉末掺量4%时，各龄期的抗压强度均出现降低现象，降低幅度在21.5%~48.8%。

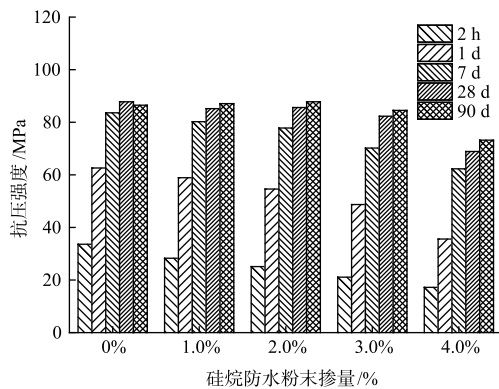


图2 不同硅烷防水粉末掺量早强砂浆的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of early-strength mortar with different silane-based polymer powder content

2.3 抗折强度

图3为不同硅烷防水粉末掺量早强砂浆的各龄期时抗折强度测试结果。从图3中可以得到，2 h时，硅烷粉末掺量1%、2%、3%和4%与掺量0时相比砂浆抗折强度分别降低了7.8%、16.9%、27.3%和33.8%；1 d时，硅烷粉末掺量1%、2%、3%和4%与掺量0时相比砂浆抗折强度分别降低了10.1%、31.2%、40.4%和49.5%；7 d时，硅烷粉末掺量1%、2%、3%和4%与掺量0时相比砂浆抗折强度分别降低了8.9%、22.0%、31.7%和36.6%；28 d时，与掺量0时相比，硅烷粉末掺量1%、2%和3%的砂浆抗折强度分别增加了5.9%、10.9%和10.1%，掺量4%的砂浆抗折强度降低了20.2%；90 d时，与掺量0时相比，硅烷粉末掺量1%、2%和3%的砂浆抗折强度分别增加了9.2%、

13.3%和15.0%，掺量4%的砂浆抗折强度降低了17.5%。硅烷粉末掺量对抗折强度的影响规律与抗压强度类似，但略有差异。硅烷粉末对早强砂浆的早期抗折强度影响比较明显，硅烷粉末掺量相同时，1 d龄期的抗折强度下降最大，且随着龄期的增长，硅烷粉末对早强砂浆的抗折强度影响程度逐渐降低。硅烷粉末掺量3%以内，28 d龄期的抗折强度略高于掺量0的抗折强度值，增加幅度在5.9%~10.9%；90 d龄期增加幅度在9.2%~15.0%。硅烷粉末掺量4%时，各龄期的抗折强度均出现降低现象，降低幅度在17.5%~49.5%。这说明当硅烷粉末掺量超过3%时，过量的硅烷粉末抑制了水泥水化，阻碍了强度的发展。硅烷官能团水解后生成 $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ 能与水泥颗粒表面的羟基脱水缩合形成化学键，通过化学结合的方式吸附在水泥颗粒表面，而且吸附量较大，在水泥颗粒表面形成疏水层，阻碍了矿物相、水及离子间扩散接触，延缓水泥水化，早期强度发展缓慢，但是由于氨基硅烷既可以和水泥颗粒氢键缔合，又可以与PVA产生物理化学吸附，水泥的铝盐成分会同PVA活性基团起交联反应，氨基硅烷、烷氧基硅烷和PVA与硅凝胶和铝凝胶互穿网络，使水泥浆体系坚硬致密并有一定韧性，因此加入适量的硅烷憎水粉末虽然影响了水泥水化，但抗压强度几乎没有降低，抗折强度略有提高。当掺量过高时，硅烷水解后生成 $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ 会发生缩合反应，在浆体中形成超疏水多聚体，使水泥颗粒与水隔离，严重影响水泥水化，抗折和抗压强度显著降低。

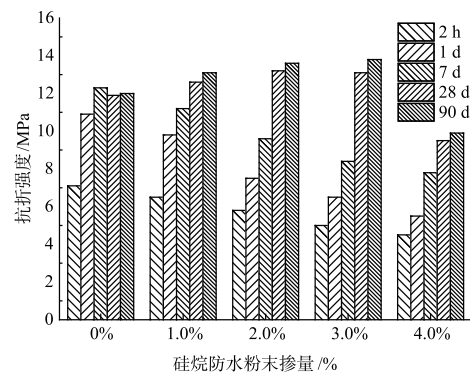


图3 不同硅烷防水粉末掺量早强砂浆的抗折强度

Fig. 3 Flexural strength of early-strength mortar with different silane-based polymer powder content

2.4 吸水率试验

图 4 为不同硅烷防水粉末掺量早强砂浆的不同时间吸水率测试结果。如图 4 所示, 硅烷粉末的加入明显降低了砂浆试件的吸水率, 28 d 时吸水率最大降低 58.9%。随着硅烷粉末掺量的增加吸水率降低趋势不明显, 但是硅烷粉末掺量为 4% 时, 吸水率较低掺量试件的值有所增长。同时, 随着浸泡时间的延长, 掺有硅烷粉末的砂浆试件的吸水率均呈现增加趋势, 增加幅值略有不同, 但均低于掺量 0 的砂浆试件吸水率。这是由于随着硅烷粉末憎水含量的增加, 烷氧基硅烷的疏水基团越多, 早期吸水率越低, 疏水基团越多, 水泥水化程度越低, 降低了浆体结构的致密性, 疏水基团虽然可以阻碍液态水进入凝胶孔, 但水蒸气仍能进入凝胶孔中, 长期浸泡在水中, 砂浆吸水率会逐渐升高, 在一定范围内, 加入硅烷粉末, 在氨基硅烷、烷氧基硅烷和聚乙烯醇与硅凝胶、铝凝胶及水化硫铝酸钙的相互作用下形成致密疏水凝胶结构, 延缓了水的进入, 降低了吸水率, 硅烷粉末掺量 2.0%~3.0% 时, 砂浆吸水率最低。

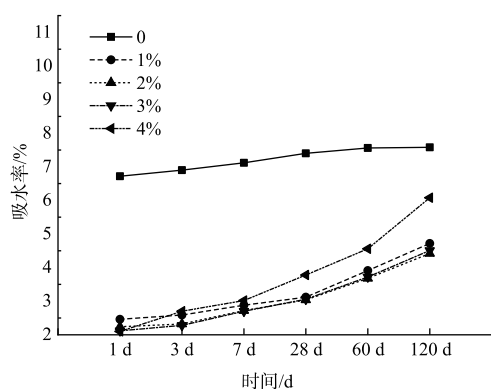


图 4 不同硅烷防水粉末掺量早强砂浆的吸水率

Fig. 4 Water absorption of early-strength mortar with different silane-based polymer powder content

2.5 氯离子侵蚀试验

图 5 为不同硅烷防水粉末掺量砂浆试件的氯离子含量分布情况。从图 5 可得到, 硅烷粉末的加入明显降低了砂浆试件的表层氯离子含量, 最大降低了 46.4%。随着距离表面深度的增加, 氯离子含量均呈现降低的趋势, 降低幅值略有不同,

但均低于掺量 0 的砂浆试件氯离子含量。距离表面深度相同时, 硅烷粉末掺量 3% 以内时, 砂浆试件的氯离子含量降低明显, 硅烷粉末掺量为 4% 时, 氯离子含量明显增多, 但仍低于掺量 0 试件的氯离子含量。通过图 5 与图 4 的对比发现, 硅烷粉末对砂浆的抗氯离子渗透性能的影响规律与吸水率的类似, 硅烷粉末显著提高了早强砂浆的抗氯离子侵蚀性能。分析原因是由于加入硅烷粉末后, 砂浆试件的吸水速率明显降低, 氯离子的传输介质进入浆体受阻, 大大延缓了氯离子的渗透, 当粉末含量过高时, 水泥水化程度降低, 孔结构致密性降低, 抗氯离子侵蚀能力降低。

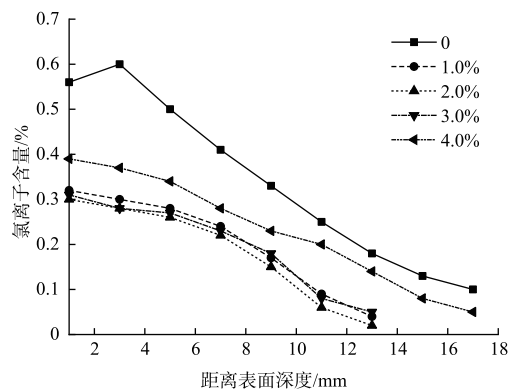


图 5 不同硅烷粉末掺量早强砂浆的氯离子含量

Fig. 5 Chloride ion content of early-strength mortar with different silane-based polymer powder content

2.6 机理分析

烷氧基硅烷官能团水解后生成 $\equiv \text{Si}-\text{OH}$ 能与水泥颗粒表面的羟基脱水缩合形成化学键吸附在水泥水化产物表面形成疏水结构, 延缓液态水的介入, 提高了耐水性和抗氯离子侵蚀能力; 氨基硅烷既可以和水泥颗粒氢键缔合, 又可以与 PVA 产生物理化学吸附, PVA 既可以和 γ -氨基丙基三乙氧基硅烷 (KH550) 通过氢键和色散力产生吸附又可以水泥形成化学键, 氨基硅烷、烷氧基硅烷和 PVA 与硅凝胶和铝凝胶及水化硫铝酸钙互穿网络, 改善了胶凝体系的力学性能, 使水泥浆体系坚硬致密, 加入硅烷粉末后, 虽然影响了水泥早期水化程度, 但不影响后期强度的发展, 这与砂浆早期强度降低, 后期抗压强度和抗折强度提高相符合。

(下转第 111 页)

中,将本文方法应用在更多的边坡中,提升本文方法可应用性。

参 考 文 献

- [1] 常明,潘荔君,孟宪纲,等.基于三维激光扫描仪的边坡形变监测研究[J].大地测量与地球动力学,2019,39(5):533-537.
- [2] 杜江丽,岳军红,陈建平,等.基于三维激光扫描仪的矿区边坡变形监测数据的分析处理[J].矿业安全与环保,2021,48(1):75-79.
- [3] 陈辉,黄晓铭,刘万泉.基于动态网格k邻域搜索的激光点云精简算法[J].控制与决策,2020,35(12):2986-2992.
- [4] 何秉高,孙向阳,孟繁磊,等.三维激光扫描定位光机系统优化设计[J].激光与红外,2020,50(9):1048-1056.
- [5] 姚飞,胡肖潇,曾丽珍,等.基于光纤光栅的深部位移传感探头研究[J].光通信技术,2019,43(5):9-12.
- [6] 李俊鑫,强小俊,郎向伟.基于FBG的测斜传感器设计与实现[J].压电与声光,2019,41(1):53-56.
- [7] 仇唐国,孙阳阳,卢天鸣,等.基于OFDR技术的深层土体水平位移场监测研究[J].压电与声光,2020,42(1):108-112.

- [8] 王旭娇,马杰,王楠楠,等.基于图卷积网络的深度学习点云分类模型[J].激光与光电子学进展,2019,56(21):56-60.
- [9] 江鸿,张永涛,陈培帅,等.山岭隧道三维激光扫描及数据处理技术研究[J].施工技术,2019,48(1):116-120.
- [10] 黄晓杰,陈宇磊,邵跃堂,等.基于激光雷达的地铁隧道形变检测方法[J].城市轨道交通研究,2019,22(11):47-51.
- [11] 王帅,徐颖,夏开文,等.基于三维激光扫描技术的混凝土磨蚀监测方法研究[J].水利水电技术,2019,50(2):208-213.
- [12] 马福义,赵喜江,张在岩,等.基于三维激光扫描技术的竖井井筒变形分析方法[J].中国矿业,2019,28(S1):72-75.
- [13] 沙欧,吕源治,凌剑勇,等.三维激光扫描系统中目标点云的颜色复原[J].光学精密工程,2020,28(10):2158-2167.
- [14] 何荣,陆广.基于三维激光扫描的矿区地表倾斜值提取方法研究[J].煤炭科学技术,2020,48(11):199-205.
- [15] 许艺腾,李国元,邱春霞,等.基于地形相关和最小二乘曲线拟合的单光子激光数据处理技术[J].红外与激光工程,2019,48(12):148-157.

(上接第73页)

3 结 论

(1)掺加2%~3%硅烷聚合物防水粉末的早强砂浆,初始流动度和30 min流动度均符合规范要求;与未掺加的砂浆相比,早期强度有所降低,1 d龄期抗压强度和抗折强度最大降低了22.2%和40.4%,但28 d龄期抗压强度和抗折强度基本持平。

(2)硅烷聚合物防水粉末的加入明显降低了砂浆的吸水率,28 d时吸水率最大降低58.9%。这是由于硅烷聚合物防水粉末改善了水泥凝胶孔结构疏水性,有效降低液态水的渗透速率,从而降低砂浆的吸水率。

(3)硅烷聚合物防水粉末的加入降低了砂浆试件的表层氯离子含量,一定掺量范围内,最大降低46.4%;随着距离表面深度的增加,氯离子含量均呈现降低的趋势。

参 考 文 献

- [1] PELLETIER L, WINNEFELD F, LOTHENBACH B, et al. Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement - calcium sulphoaluminate clinker - calcium sulphate binders[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(5):551-561.
- [2] PELLETIER L, WINNEFELD F, LOTHENBACH B. The ternary system Portland cement - calcium sulphoaluminate clinker - anhydrite: hydration mechanism and mortar properties[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(7):497-507.
- [3] 张鹏,赵铁军,戴建国,等.硅烷改性混凝土防水和抗氯离子性能试验研究[J].土木工程学报,2011,44(3):72-78.
- [4] 赵炜,黄巍林,宋强,等.冻融环境下硅烷防水混凝土渗透性试验研究[J].混凝土,2016,322(8):238-242.
- [5] 马志鸣,赵铁军,朱方之,等.掺硅烷乳液制备整体防水混凝土的抗冻性试验研究[J].新型建筑材料,2012,(7):53-56.
- [6] GB/T 17671-1999,水泥胶砂强度检验方法(ISO法)[S].
- [7] GB/T 50448-2015,水泥基灌浆材料应用技术规范[S].