

沿海地区清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的研究

李超¹, 郁有升^{1,*}, 刘作岩², 杨淑娟¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛中建联合集团有限公司, 青岛 266061)

摘要:在我国沿海地区,硫酸盐侵蚀是清水混凝土耐久性破坏中最常见的一种破坏形式。为了延长清水混凝土的使用寿命,涂刷清水混凝土保护剂成为了一种必要的防护手段。研究了清水混凝土保护剂对清水混凝土抗硫酸盐侵蚀的防护作用以及不同涂刷方案对清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响。采用有机硅类渗透型、丙烯酸类成膜型保护剂对 C40 清水混凝土试块表面进行涂刷,并与没有涂刷保护剂的清水混凝土试块进行对比。试验结果表明:两种保护剂均能提高清水混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能;随浸泡时间的增加,涂刷 2 层保护剂比涂刷 1 层保护剂的防护效果更明显,浸泡满 60 d 时,涂刷 2 层保护剂的试块抗压强度相较于涂刷 1 层保护剂的试块提高了约 5%;丙烯酸类成膜型保护剂适用于短期和表面防护,有机硅类渗透型保护剂适用于深层侵蚀和长期防护。

关键词:硫酸盐侵蚀;保护剂;清水混凝土;有机硅;丙烯酸

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2026)02-0008-07

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.02.002

Research on the sulfate corrosion resistance of fair-faced concrete in coastal areas

LI Chao¹, YU Yousheng^{1,*}, LIU Zuoyan², YANG Shujuan¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Zhongjian Joint Construction Engineering Co., Ltd., Qingdao 266061, China)

Abstract: In the coastal areas of our country, sulfate corrosion is the most common form of damage to the durability of fair-faced concrete. In order to extend the service life of fair-faced concrete, applying fair-faced concrete protective agent has become a necessary means of protection. This study investigates the protective effect of fair-faced concrete protective agent on the resistance of fair-faced concrete to sulfate corrosion and the effects of different painting methods on the resistance of fair-faced concrete to sulfate corrosion. Organosilicon penetrating protective agent and acrylic film-forming protective agent were used to paint the surface of C40 fair-faced concrete test blocks, and these blocks were compared with other fair-faced concrete test blocks without protective agents. The test results show that the two types of protective agents can improve the resistance of fair-faced concrete to sulfate corrosion; the protective effect of applying two layers of protective agent becomes more obvious than that

收稿日期: 2024-07-01

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE243)

作者简介: 李超(1999—), 男, 山东泰安人。硕士, 研究方向为结构工程。E-mail: 3063155005@qq.com。

* 通信作者: 郁有升(1976—), 男, 山东临沂人。博士, 教授, 主要从事钢结构等方面的研究。E-mail: yuyousheng@126.com。

of applying a single layer of protective agent as the immersion time increases. After being immersed for 60 days, the compressive strength of the test blocks coated with two layers of protective agent is about 5% higher than that of the test blocks coated with a single layer of protective agent. Acrylic film-forming protective agents are suitable for short-term and surface protection, while organosilicon penetrating protective agents are suitable for deep corrosion and long-term protection.

Key words: sulfate corrosion; protective agent; fair-faced concrete; organosilicon; acrylic acid

清水混凝土直接采用现浇混凝土的自然表面作为其饰面,具有独特的审美价值^[1],这种设计导致清水混凝土直接接触外部环境,更易受到外界环境的直接影响。硫酸盐侵蚀在我国沿海地区尤为突出,是众多混凝土耐久性破坏因素中最为普遍和显著的一种,这种盐类侵害会使得混凝土发生膨胀、开裂、剥落等现象,最终使得混凝土的使用寿命大大降低^[2-4],严重威胁着清水混凝土的长期稳定性和安全性,不仅会造成巨大的经济损失,还会产生大量建筑垃圾^[5]。因此,深入研究清水混凝土在硫酸盐侵蚀环境下的耐久性表现,对于提高混凝土结构的长期性能和延长使用寿命具有重要意义。为了有效应对当前情况并增强清水混凝土的耐久性,对清水混凝土表面实施涂刷保护剂已成为一种不可或缺的防护措施^[6]。

近年来,随着清水混凝土的应用越来越广泛,关于清水混凝土以及混凝土保护剂的研究也越来越多。赵斌^[7]对清水混凝土保护剂的性能及其作用原理进行了详尽的阐述,并进一步探讨了混凝土保护剂的施工技术和工艺流程。胡洋等^[8]针对清水混凝土施工过程中出现的各种质量缺陷和表观破坏,提出了关于清水混凝土的修复方案。李芳等^[9]研究发现,不同层数的保护剂显著影响清水混凝土的吸水率;面漆防水效果优于底漆,氟碳类保护剂体系防水能力最佳,最佳效果为涂刷 2 层面漆和 2 层底漆。刘晶晶^[10]研究了氟碳类和有机硅类清水混凝土保护剂对清水混凝土多方面的应用效果,对涂刷不同层数、不同类型的清水混凝土保护剂的试块与未涂刷保护剂的混凝土试块进行对比,发现保护剂能降低清水混凝土的碳化深度和吸水率,显著提高抗冻性和耐久性。

目前关于清水混凝土抗硫酸盐侵蚀的研究较少,现有研究主要是通过被硫酸盐侵蚀 60 d 后的抗压强度耐腐蚀系数进行评判,并没有考虑 60 d 之前硫酸盐侵蚀的情况,因此本试验设计了 15、30、45、60 d 4 个时间点,用各个时间点混凝土试块的抗压强度降低值以及满 60 d 后的抗压强度耐腐蚀系数进行综合分析。目前主流的清水混凝土保护剂包括有机硅类渗透型和丙烯酸类成膜型两种^[11]。本次试验将对这两种保护剂进行研究,以延长混凝土的使用寿命,减少因硫酸盐侵蚀而带来的损害,为工程实践中选择合适的混凝土保护措施提供参考。

1 清水混凝土的配制

1.1 清水混凝土原材料的选用

清水混凝土对表观质量的控制比普通混凝土更为严格,因此对原材料的选用也更为严格。为确保混凝土质量稳定,试验采用的普通硅酸盐水泥需具备低碱含量、质量稳定的特点。为了避免因为使用不同强度等级的水泥而引起混凝土颜色偏差,需要确保所有的水泥都来自相同的生产商和批次。对于粗骨料,需要挑选粒度介于 5~25 mm、具有较高的强度、优秀的连续性和无杂质的碎石;对于细骨料,需要使用细度模数至少为 2.5 的中粗砂,并确保其含泥量低于 2%^[12]。本试验采用的水泥是由诸城市杨春水泥有限公司出产的 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,其详细性能指标见表 1。细骨料选择细度模数为 2.8 的河砂;选用粒径在 5~20 mm、具备连续级配的碎石作为粗骨料;此外,选用聚羧酸减水剂为外加剂。

表 1 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥性能指标

3 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	细度(>80 μm)/%	初凝时间/min	终凝时间/min
28.6	46.5	0.32	152	240

1.2 清水混凝土配合比设计

根据水灰比 0.5, 强度等级为 C40 的要求配制混凝土, 坍落度以 150~180 mm 为宜, 经过多次适配得到的具体配合比见表 2。

表 2 清水混凝土配合比

表 2 清水混凝土配合比					kg/m ³
水泥	河砂	碎石	水	减水剂	
340	857	928	165	0.38	

2 试块的制备与涂刷

2.1 试块的制备

试块配制时按先后顺序依次加入碎石、河砂、水泥并搅拌 60 s, 然后加入水和减水剂, 再搅拌 120 s, 浇筑成型试块为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体, 混凝土试块经浇筑成型保湿 48 h 后脱模处理, 为了不影响清水混凝土试块表面保护剂的涂刷效果, 同时消除试块在抗硫酸盐侵蚀性能试验中的干扰因素, 在浇筑时模具中不涂刷脱模剂^[13]。在成功脱模后, 将试块置于标准养护室中, 该养护室维持恒定的温度 20 ℃ 与相对湿度 95%, 以确保在 28 d 的龄期内得到充分的养护。养护完成后将试块转移至 60 ℃ 的烘箱中, 进行彻底的干燥处理。当试块的质量达到稳定状态后, 取出并自然冷却至室温, 以备后续的试验或分析使用^[14]。

2.2 保护剂的涂刷

本次试验采用的保护剂为有机硅类渗透型保护剂和丙烯酸类成膜型保护剂, 两者的特点如下:

1) 有机硅类渗透型保护剂。无色透明液体, 可以渗透到混凝土内部, 在混凝土内部形成防水层, 提高混凝土的抗渗性, 同时保持混凝土的透气性。

2) 丙烯酸类成膜型保护剂。乳白色半透明液体, 涂刷完成待其干燥后会在混凝土表面形成一层半透明的薄膜, 能够抵御水分、化学物质和其他污染物的侵蚀, 提高混凝土的耐候性和耐久性。

涂刷保护剂前需要使用砂纸和锉刀细致地对试块表面进行打磨处理, 以去除表面的砂包、空鼓等瑕疵。对试块进行倒角处理, 以提高安全性和后续操作的便利性。使用干燥的清洁布将试块表面彻底擦拭干净^[15]。涂刷方案采用刷涂或者辊涂, 自下而上, 从左向右, 横竖各涂刷 1 遍算作 1 层。尽量保证保护剂涂刷均匀, 并且试块的 6 个面都要涂刷完整, 涂刷多层保护剂时需间隔至少 30 min。具体涂刷方案见表 3, 其中 Si 为有机硅类渗透型保护剂, Ac 为丙烯酸类成膜型保护剂。两种保护剂混合涂刷时 Si 在下 Ac 在上。

表 3 保护剂的涂刷方案

方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
1 层 Si	1 层 Ac	2 层 Si	2 层 Ac	1 层 Si+1 层 Ac

3 试验

3.1 试验设计

该试验考虑硫酸盐浸泡时间对混凝土抗压强度的影响, 分别在浸泡 15、30、45、60 d 时测定不同涂刷方案下清水混凝土试块的抗压强度, 同时采用未涂刷保护剂的空白组试块进行对照, 最后对浸泡满 60 d 的试块进行抗压强度耐腐蚀系数的测定。

3.2 试验方法

依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[16] 进行混凝土抗硫酸盐侵蚀性能试验, 步骤如下:

1) 试块放置。将混凝土试块置于容器中, 确保试块间距及试块与容器壁间距均 ≥ 20 mm, 以保证溶

液充分接触且互不影响。

2) 溶液注入。匀速注入浓度为 5% 的 Na_2SO_4 溶液,当液面高出试块顶面 20 mm 时,开始计时浸泡。

3) 环境控制。溶液温度恒定控制在 25~30 °C;每 20 d 更换 1 次 Na_2SO_4 溶液,保持侵蚀活性。

4) 强度测试。测定各个时间段试块的抗压强度,在试块累计浸泡 60 d 后结束浸泡。采用式(1)计算试块浸泡 60 d 后的抗压强度耐腐蚀系数。

$$K_f = \frac{f_n}{f_0} \quad (1)$$

式中: K_f 为抗压强度耐腐蚀系数; f_n 为浸泡 n 天后试块的抗压强度测定值,MPa; f_0 为同条件下标准试块的抗压强度测定值,MPa。

4 试验结果与分析

4.1 试验结果

随着 Na_2SO_4 溶液浸泡时间的增加,测得不同涂刷方案的试块在 15、30、45、60 d 的抗压强度,并计算浸泡 60 d 后抗压强度耐腐蚀系数,结果如表 4 所示。

表 4 抗压强度测定值与 K_f 计算值

试块	抗压强度/MPa					K_f
	f_0	f_{15}	f_{30}	f_{45}	f_{60}	
空白组	42.81	40.47	37.22	33.85	29.11	0.68
方案 1	44.83	43.92	41.75	40.43	39.58	0.88
方案 2	43.36	42.89	41.17	39.45	37.81	0.87
方案 3	42.96	42.28	41.62	40.87	40.17	0.94
方案 4	42.73	42.23	41.68	40.57	39.56	0.92
方案 5	43.05	42.47	41.22	40.35	39.81	0.93

单从 60 d 的抗压强度耐腐蚀系数来看,由表 4 可知,方案 3(2 层 Si)展现出了最优异的性能,其抗压强度耐腐蚀系数 K_f 高达 0.94;方案 4(2 层 Ac)和方案 5(1 层 Si+1 层 Ac)的 K_f 基本一致,分别为 0.92 和 0.93;相比之下,方案 1(1 层 Si)和方案 2(1 层 Ac)的 K_f 分别为 0.88 与 0.87,远低于其他方案,尤其是方案 2,在所有测试的涂刷方案中,其 K_f 处于最低水平。为进一步探究清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响因素,以下将从涂层类型、涂层厚度及涂刷方式 3 个方面,结合试验设计的浸泡时间节点,进行详尽分析。

4.2 涂层类型对清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响

如图 1 所示,分析了不同类型清水混凝土保护剂对其抗硫酸盐侵蚀性能的影响,可以明确有机硅类渗透型和丙烯酸类成膜型两种保护剂均能有效缓解硫酸盐侵蚀导致的强度衰减。随浸泡时间的延长,这种保护作用愈发显著。具体而言,在 15 d 的浸泡后,涂刷有机硅类渗透型与丙烯酸类成膜型保护剂试块的强度分别损失了 2.0% 与 1.1%;至 30 d 时,强度损失扩大至 6.9% 与 5.1%;45 d 时,则分别达到 9.8% 与 9.0% 的降幅;等到 60 d 浸泡结束

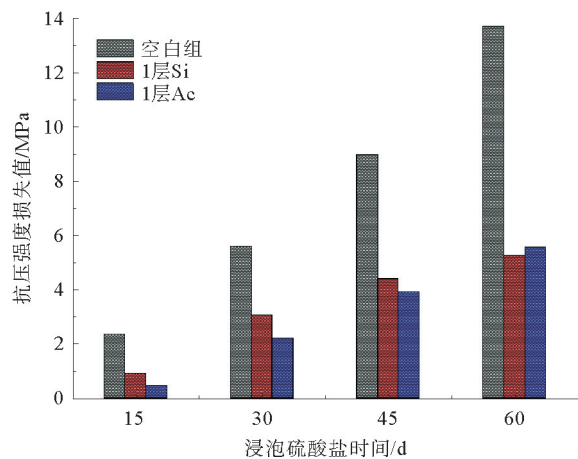


图 1 涂层类型对清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响

后,强度损失分别为 11.7%与 12.8%。值得注意的是,在浸泡初期,丙烯酸类成膜型保护剂展现出了更为优秀的防护效能;然而随着浸泡时间的增加,有机硅类渗透型保护剂的优势逐渐显现,试块的强度损失速率明显放缓,至 60 d 浸泡结束时,强度损失值相较于丙烯酸类成膜型保护剂更低。相比之下,丙烯酸类成膜型保护剂在整个浸泡过程中,试块的强度损失趋势保持相对稳定,虽也有效但不及有机硅类渗透型保护剂在长期作用下的表现。

此差异源于两种保护剂截然不同的作用原理。丙烯酸类成膜型保护剂可以在试块表面形成一层保护膜,能够直接阻隔 SO_4^{2-} 的侵蚀,但是对于深层侵蚀则效果较弱。因此,在初期浸泡阶段丙烯酸类成膜型保护剂展现出显著优势。相比之下,有机硅类渗透型保护剂则渗入混凝土基质,通过化学反应生成硅酸盐凝胶,这一机制不仅增强了混凝土的密实度,还显著提升了其抵抗化学侵蚀的能力。随着浸泡时间的延长,当硫酸盐逐渐渗透至混凝土内部时,有机硅类渗透型保护剂的深层防护效果愈发凸显,展现出更优秀的防护性能。

4.3 涂层厚度对清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响

由图 2 可以看出,涂层厚度对清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响显著。观察数据可知,无论时间跨度如何,相较于涂刷 1 层保护剂的试块,涂刷 2 层保护剂的试块在各个时间节点上均展现出更低的强度损失。随着浸泡时间的增加,2 层保护剂的优越性愈发显著。具体而言,浸泡 15 d 后,涂刷 2 层 Si 保护剂相较于 1 层,试块强度损失减少了 0.5%,而涂刷 2 层 Ac 保护剂与 1 层时试块强度损失之间的差异尚不明显;至 30 d 时,涂刷 2 层 Si 与 Ac 保护剂分别使试块强度损失减少了 3.7%与 2.5%;45 d 后,这一差异进一步扩大,涂刷 2 层 Si 与 Ac 保护剂的试块强度损失分别减少 5%与 4%;直至 60 d,涂刷 2 层 Si 与 Ac 保护剂的防护效果均达到最佳,试块强度损失分别减少 5.9%与 5.4%。综上所述,涂刷 2 层保护剂显著优于 1 层,且随浸泡时间的延长,其增强防护效能的趋势愈发明显,有力证明了增加涂层厚度对于提升混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的重要性。

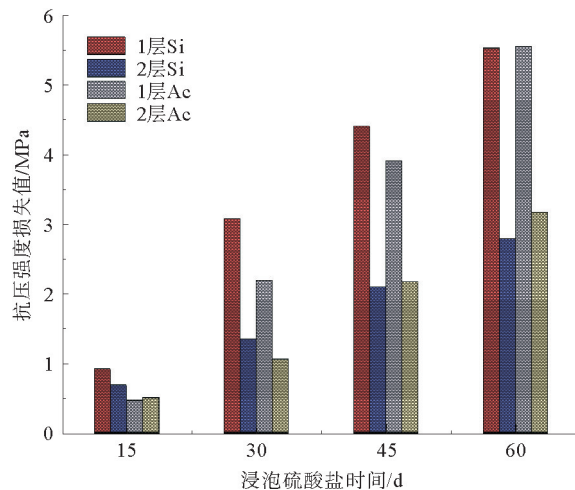


图 2 涂层厚度对清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响

可以看出保护剂厚度增加可以显著提高清水混凝土抗硫酸盐的侵蚀性能,这归因于涂层厚度的增加直接使保护剂构建的物理屏障更加坚固,更厚的屏障能更有效抵御硫酸盐及其他侵蚀性化学物质的渗透,进而强化混凝土的抗侵蚀性能。同时,较厚的涂层也意味着混凝土表面覆盖了更为充足的保护剂,这不仅增强了防护效果的即时性,还延长了其有效寿命,从而提升了混凝土的耐久性。然而,值得注意的是,涂层厚度的增加也可能对混凝土表面的外观特性产生一定影响,特别是采用丙烯酸类成膜型保护剂时,可能会削弱其原有的质感和光泽度。因此,在实际工程应用中,应综合考虑工程的具体需求、材料的固有属性以及预期的视觉效果,通过详尽的评估和测试来确定最适宜的涂层厚度,在确保良好保护效果的同时,尽可能维持清水混凝土表面的质感和光泽。

4.4 涂刷方式对清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响

图 3 所示为不同涂刷方式对清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响。本试验选取了 3 种涂刷方案:2 层 Si 保护剂、2 层 Ac 保护剂以及 1 层 Si 与 1 层 Ac 保护剂的混合涂刷。结果显示,在初期(15 及 30 d 浸泡后),涂刷 2 层 Ac 保护剂试块的强度损失最低,表明其在此阶段内的防护效果最为显著,混合涂刷次之,而 2 层 Si 保护剂的防护效果相对较弱。然而,随着浸泡时间延长至 45 d,涂刷 2 层 Ac 保护剂试块的强度损失开始超过涂刷 2 层 Si 保护剂和混合涂刷保护剂的试块,后两者间的强度损失则趋于一致。进一

步至 60 d 浸泡结束时,情况发生逆转,2 层 Si 保护剂试块展现出最低的强度损失,表明有机硅类渗透型保护剂在长时间浸泡下对深层混凝土的防护更为有效。混合涂刷方案则位于两者之间,前期防护不及 2 层 Ac 保护剂直接有效,但优于 2 层 Si 保护剂;后期则体现出其介于两者之间的稳定防护性能。这一现象可归因于丙烯酸类成膜型保护剂在初期能迅速形成有效保护膜,而有机硅类渗透型保护剂则凭借其渗透性在后期为混凝土提供更为持久的深层保护,混合涂刷则结合了两者的特点,其防护效果随时间推移展现出独特的过渡性优势。

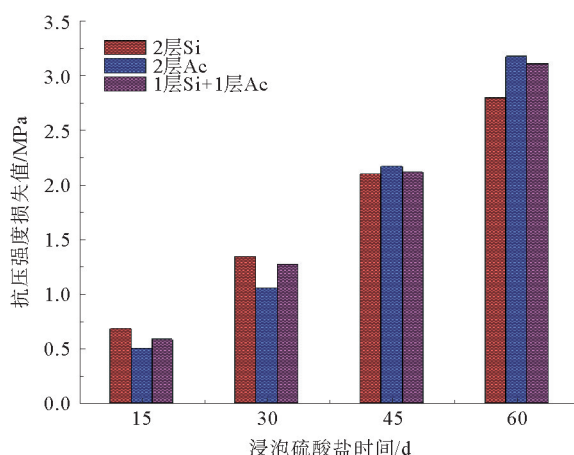


图 3 涂刷方式对清水混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响

5 结论

为提高沿海地区清水混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能,对保护剂的选择及其应用效果进行研究,得出以下结论:

- 1) 有机硅类渗透型、丙烯酸类成膜型保护剂均可提高清水混凝土抗硫酸盐侵蚀的性能。
- 2) 对于硫酸盐侵蚀的防护来说,随着硫酸盐浸泡时间的增加,2 层保护剂相较于 1 层保护剂的保护效果更加明显。
- 3) 两种保护剂的作用机理不同。丙烯酸类成膜型保护剂在表面形成一层保护膜,能够直接阻隔硫酸盐的侵蚀,但是对于深层侵蚀则效果较弱。而有机硅类渗透型保护剂能够渗透到混凝土内部,形成硅酸盐胶凝物,从而提高混凝土的致密性和耐化学侵蚀性,对于深层侵蚀具有较好的防护效果。因此,在追求长效深层防护与增强的应用场景中,有机硅类渗透型保护剂无疑是更为理想的选择;而针对表面快速防护或基础保护需求,丙烯酸类成膜型保护剂则因其便捷性与直接性而更具适用性。

参考文献(References):

- [1] 郭伟,路林海,王龙志,等. 清水混凝土概念、研究现状、存在问题及配合比设计方法综述[J]. 混凝土与水泥制品,2016(10):23-27.
GUO Wei, LU Linhai, WANG Longzhi, et al. Summary for concept, research status, existing problems and mix proportion design of fair-faced concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2016(10):23-27.
- [2] 费倩男. 复杂环境硫酸盐侵蚀混凝土微观试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
FEI Qiannan. Microscopic test research of sulfate attack concrete in a complex environment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [3] 申春妮,杨德斌,方祥位,等. 混凝土硫酸盐侵蚀影响因素的探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2004(2):16-19.
SHEN Chunni, YANG Debin, FANG Xiangwei, et al. Investigation on influencing factors of sulfate attack of concrete[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2004(2):16-19.
- [4] 孙丛涛,牛荻涛. 混凝土抗盐冻性能试验研究[J]. 硅酸盐通报,2010,29(4):762-767.
SUN Congtao, NIU Ditao. Experimental study on frost-salt resistance of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(4):762-767.
- [5] 滕海文,黄峰洲,马德云,等. 硫酸盐与多因素共同作用下混凝土的耐久性研究[J]. 建筑技术,2010,41(9):834-836.
TENG Haiwen, HUANG Fengzhou, MA Deyun, et al. Discussion on durability of concrete exposed to functions of multiple factors containing sulfate[J]. Architecture Technology, 2010, 41(9):834-836.
- [6] 张志增,张云鹏,李松凡,等. 清水混凝土保护剂对混凝土抗冻性能的影响研究[J]. 新型建筑材料,2018,45(11):134-138.
ZHANG Zhizeng, ZHANG Yunpeng, LI Songfan, et al. Study on the influence of fair-faced concrete protective agent on the resistance to freezing and thawing of concrete[J]. New Building Materials, 2018, 45(11):134-138.

- [7] 赵斌. 清水混凝土保护剂施工技术[J]. 科技视界, 2012(22):220-221.
ZHAO Bin. Construction technology of protective agent for plain concrete[J]. Science and Technology Vision, 2012(22):220-221.
- [8] 胡洋, 付效铎, 李云杰, 等. 清水混凝土表面修复与防护[J]. 天津建设科技, 2017, 27(5):25-26.
HU Yang, FU Xiaoduo, LI Yunjie, et al. Surface repair and protection of bare concrete[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2017, 27(5):25-26.
- [9] 李芳, 张云鹏, 李松凡, 等. 清水混凝土保护剂对混凝土吸水率的影响[J]. 河南科学, 2018, 36(7):1075-1079.
LI Fang, ZHANG Yunpeng, LI Songfan, et al. Effect of fair-faced concrete protectant on water absorption of concrete[J]. Henan Science, 2018, 36(7):1075-1079.
- [10] 刘晶晶. 清水混凝土保护剂对混凝土性能的影响[J]. 四川水泥, 2023(5):1-3.
LIU Jingjing. Effect of fair-faced concrete protective agent on concrete performance[J]. Sichuan Cement, 2023(5):1-3.
- [11] 李松凡. 清水混凝土保护剂对混凝土耐久性影响研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2018.
LI Songfan. Research of the durability effect of several protectants applied during the formation of fair-faced concrete[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2018.
- [12] 胡志强. 建筑科技与管理[C]//2021年3月建筑科技与管理学术交流会议论文集. 北京, 2021:3.
HU Zhiqiang. Organizing committee of construction technology and management[C]// Proceedings of the Academic Exchange Conference on Construction Technology and Management in March 2021. Beijing, 2021:3.
- [13] 李慧艳, 方月华, 肖葵, 等. 干热大气环境中涂层材料失效行为研究进展[J]. 科技导报, 2012, 30(34):76-79.
LI Huiyan, FANG Yuehua, XIAO Kui, et al. Progress of failure behavior of coatings in hot and dry atmosphere environment[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(34):76-79.
- [14] 徐永祥, 严川伟, 高延敏, 等. 大气环境中涂层下金属的腐蚀和涂层的失效[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(4):249-256.
XU Yongxiang, YAN Chuanwei, GAO Yanmin, et al. Underfilm corrosion of metals and failure of organic coatings in atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2002, 22(4):249-256.
- [15] 刘瑞雪. 干湿循环下混凝土的氯离子渗透性能及涂层防护作用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
LIU Ruixue. Research of chloride ion permeability of concrete and coating protective effect under the wet-dry cycle[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [16] GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
GB/T 50082—2009, Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S].

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)