文章编号:1008-1534(2024)02-0108-06

基于固废磷化渣的复合型防腐阻锈剂对混凝土性能的影响

张冀男[1],史兰香[2]

(1. 昂跑体育用品(上海)有限公司,上海 200000;2. 石家庄学院化工学院,河北石家庄 050035)

摘 要:为了提高严酷环境下建筑的耐久性,研究了防腐阻锈剂和防腐阻锈混凝土。以三乙醇胺、硝酸铝和 $Ca(OH)_2$ 为原料,经化学反应,制备新型固体醇胺,再按一定质量分数将固体醇胺、固废磷化渣、石膏和苯甲酸钠混合、球磨,制得复合型防腐阻锈剂,将其掺入基准混凝土中,制得防腐阻锈混凝土,并研究其力学性能和防腐阻锈性能。结果表明:掺复合型防腐阻锈剂的防腐阻锈混凝土,抗压强度和抗折强度显著提高,抗渗等级达 P12,碳化深度大幅降低,抗冷热干湿循环和抗冻融性能优异,用含防腐阻锈剂的海水混合液浸泡钢筋 2 年,钢筋无腐蚀行为。用复合型防腐阻锈剂制备的防腐阻锈混凝土能有效延缓建筑混凝土的腐蚀进程。利用固废磷化渣制备防腐阻锈剂,变废为宝,可为新型防腐阻锈剂的开发提供借鉴。

关键词:复合材料其他学科;防腐阻锈混凝土;复合型防腐阻锈剂;磷化渣;固体醇胺;防腐蚀

中图分类号:TU528;TQ126.3 **文献标识码**:A **DOI**:10.7535/hbgykj.2024yx02004

Effect of composite anti-corrosion and rust inhibitor based on solid phosphating slag on concrete properties

ZHANG Ji′nan[1], SHI Lanxiang[2]

(1. Ongo Sports Products (Shanghai) Company Limited, Shanghai 200000, China; 2. College of Chemical Engineering, Shijiazhuang University, Shijiazhuang, Hebei 050035, China)

Abstract: In order to improve the durability of buildings under harsh environment, anti-corrosion and anti-rust concrete were studied. A new type of solid alcohol amine was prepared using triethanolamine, aluminum nitrate and $Ca(OH)_2$ by chemical reaction. A composite corrosion-resistant and rust-resistant agent was prepared by mixing and milling solid amine, solid waste phosphating slag, gypsum and sodium benzoate in a certain mass fraction. The mechanical properties and anti-corrosion and anti-rust properties were also studied. The results show that the compressive strength and flexural strength of anti-corrosion and anti-rust concrete mixed with compound anti-corrosion and anti-rust agent are significantly increased, with an impermeability grade of P12. The carbonation depth is greatly reduced, and the anti-cold, hot, dry and wet cycle and anti-

收稿日期:2023-07-20;修回日期:2024-02-19;责任编辑:王淑霞

基金项目:河北省重点研发计划项目(21321401D)

第一作者简介:张冀男(1989—),男,河北赵县人,工程师,硕士,主要从事建筑工程技术与管理方面的研究。

通信作者:史兰香教授。E-mail: kedashilanxiang@163.com

张冀男,史兰香. 基于固废磷化渣的复合型防腐阻锈剂对混凝土性能的影响[J]. 河北工业科技,2024,41(2):108-113.

ZHANG Ji′nan, SHI Lanxiang. Effect of composite anti-corrosion and rust inhibitor based on solid phosphating slag on concrete properties [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2024, 41(2): 108-113.

freeze performance are excellent. The steel bar has been immersed in seawater containing corrosion inhibitor for 2 years, and no corrosion is found. The anti-corrosion and anti-rust concrete prepared with compound anti-corrosion and anti-rust agent can effectively delay the corrosion process of building concrete. The use of solid waste phosphating slag to prepare anti-corrosion and anti-rust inhibitor can be used as a reference for the development of new anti-corrosion and anti-rust inhibitor.

Keywords: other disciplines of composite material; anticorrosive anticorosive and anti-rust concrete; compound anti-corrosion and anti-rust agent; phosphating slag; solid alcoholamine; anti-corrosion

环境对钢筋混凝土建筑腐蚀严重，造成了巨大的经济损失，通过掺防腐阻锈剂抑制钢筋混凝土腐蚀的研究已经在国内外广泛开展。MOHAMMED 等[1]在混凝土中掺加矿粉和硅粉，制备了抗 Cl^- 渗透性能较好的混凝土。BASHEER 等[2]在不同外加剂中浸泡混凝土发现，多种外加剂具有抑制 Cl^- 向混凝土渗透的功能。马麒等[3]用氨基醇与有机胺制备了新型有机氨基醇阻锈剂，该阻锈剂可有效延缓砂浆试块中钢筋的起始锈蚀时间。郭群等[4]将 1%阳极型阻锈剂 Na_2MoO_4 与 1%阴极型阻锈剂苯并三氮唑复配制得了一种复合型阻锈剂，该复合型阻锈剂具有优良的延缓钢筋腐蚀的性能。何林等[5]将钢筋浸入用 3.5%(质量分数)的 NaCl 模拟的混凝土孔隙溶液中，发现复合氨基醇阻锈剂具有显著延缓钢筋起始锈蚀时间的功能，在钢筋钝化膜破钝后，也能很好地抑制钢筋锈蚀。由此不难发现，氨基醇类物质具有较好的防腐阻锈功能，是钢筋混凝土阻锈剂成分的首选。目前市售的有机钢筋混凝土阻锈剂以氨基醇类较多，防腐阻锈性能单一，用量偏大，市场亟需用量少、性能优良的复合型产品，来满足严酷环境下建筑防腐需要。

磷化渣是汽车、轮船、军工、机械等领域金属工件表面处理过程中产生的固体废弃物，产量高且成分复杂，虽无毒但综合处理难度大，造成了严重的环境污染和资源浪费。磷化渣处理方法有：制成磷化液或含锈转化液[6]、与碱反应制成三氧化二铁和磷酸钠[7]、制成磷酸盐颜料[8]、制成磷酸铁和聚磷酸铵肥料等[9]。这些方法尚处于试验或试用阶段，技术还不成熟。目前，固废磷化渣的处理仍以填埋为主，至今尚无成熟有效的磷化渣再利用的方法和技术。鉴于氨基醇类物质突出的阻锈性能，本研究利用磷化渣中含量较高且具有防腐蚀性能的磷酸根，提出以固废磷化渣协同自制的新型固体醇胺、石膏和苯甲酸钠，制备一种复合型防腐阻锈剂(ACAR)，将其掺入到混凝土中，制备一种防腐阻锈混凝土，并考察其防腐阻锈性能。

1　实验部分

1.1　材　料

磷化渣(含铁 20.7%(质量分数，下同)、磷酸(根)50.3%、锌和锰 6.1%、水 22.9%)，河北长城汽车股份有限公司提供；硅酸盐水泥(P·O 42.5)，唐山弘也水泥有限公司提供；粉煤灰(细度 45 μm)，石家庄电厂提供；碎石(粒径 5～20 mm)，河北井陉县茂鑫矿业有限公司提供；Q235-A·F、HPB235 和 HRB335 钢筋(均为直径 0.7 cm、长度 10 cm)，河北秦合重科金属科技有限公司提供。

1.2　固体醇胺和 ACAR 的制备

将 5 kg 黏稠状液体三乙醇胺与 1.5 kg 固体硝酸铝混合，剧烈搅拌，140 ℃加热，反应 3～5 min，再加入 0.8 kg 固体氢氧化钙，130 ℃加热，反应 3～5 min，冷却、固化、粉碎至比表面积为 90 m^2/kg 左右的粉末，制得固体醇胺[10]。

将磷化渣用水洗净，105 ℃烘干。将烘干的磷化渣 15 kg 与 7 kg 石膏在球磨机上粉碎至比表面积为 90 m^2/kg 左右的粉末，再加入 21 kg 固体醇胺粉末和 7 kg 固体苯甲酸钠，继续球磨，使混合物比表面积达到 443 m^2/kg，制得 ACAR 粉末[10]。

1.3　防腐阻锈混凝土性能测试

混凝土试件按标准 GB/T 33803—2017[11]制作，质量浓度(kg/m^3)为 ρ(基准水泥)：ρ(粉煤灰)：ρ(标准中砂)：ρ(碎石)：ρ(水)＝1.00：0.13：2.50：3.31：0.45，ACAR 的掺量为基准水泥的 1.5%(质量分数)，制成尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的试件；将钢筋置于混凝土中央，制成钢筋混凝土试件。试件成型后，在(20±1)℃、湿度 95%的条件下养护 28 d。

塌落度、含气量、抗压强度、抗折强度、混凝土氯离子扩散系数、耐蚀系数、抗冻融和碳化深度按国家标准规定的方法进行测定[12-16]。

2　结果与讨论

2.1　混凝土性能研究

2.1.1　ACAR 各成分配比对混凝土性能的影响

设计基准水泥掺 ACAR 的质量分数为 1.5%，以抗压强度和 Cl^- 扩散系数为指标，考察 ACAR 各成分配比对混凝土性能的影响(见表 1)。结果显示，随着磷化渣用量不断增加，混凝土的抗压强度逐渐增大，Cl^- 扩散系数逐渐减小，当磷化渣的质量分

数达到 30%时，混凝土的抗压强度和 Cl^- 扩散系数达到最佳状态。固体醇胺的用量对混凝土的抗压强度和 Cl^- 扩散系数的影响也表现出了相同的趋势。单加磷化渣或固体醇胺，混凝土的抗压强度和 Cl^- 扩散系数均不理想，说明磷化渣和固体醇胺协同改善了混凝土的性能。石膏和苯甲酸钠的用量对混凝土的抗压强度和 Cl^- 扩散系数的影响较小。综合判断，ACAR 各成分配比优选 w(固废磷化渣)：w(固体醇胺)：w(石膏)：w(苯甲酸钠)= 30：42：14：14。

表 1 ACAR 各成分配比对混凝土性能的影响

Tab. 1 Effect of ACAR component partition ratio on concrete performance

组别	w(固废磷化渣)/%	w(固体醇胺)/%	w(石膏)/%	w(苯甲酸钠)/%	抗压强度/MPa	Cl^- 扩散系数$\times10^{-12}$/(m^2/s)
1	0	42	14	14	51.7	4.3
2	20	42	14	14	53.6	3.7
3	30	42	14	14	57.2	1.9
4	40	42	14	14	55.7	2.2
5	30	0	14	14	52.1	5.1
6	30	25	14	14	54.7	3.5
7	30	50	14	14	57.1	1.9
8	30	42	14	16	57.1	1.9
9	30	42	14	12	57.0	2.1
10	30	42	16	14	56.7	2.2
11	30	42	12	14	56.8	2.2
12	0	0	14	14	37.3	6.1

2.1.2 ACAR 掺量对混凝土抗压和抗渗性能的影响

固定上述优选的 ACAR 各成分配比，通过改变 ACAR 掺量，考察 ACAR 掺量对混凝土抗压和抗渗性能的影响(见表 2)。结果显示，掺入 ACAR 可以有效提高混凝土的抗压和抗渗性能，ACAR 掺量增大，混凝土的抗压强度比增大，0.8 MPa 水压下的渗透高度降低。当 ACAR 的掺量为水泥凝胶材料质量分数的 2.0%时，虽标养 28 d 的混凝土的抗压强度比有所增加，但标养 28 d＋海水 180 d 养护的混凝土的抗压强度比不再增加，综合考虑抗压强度比和生产成本，优选 ACAR 最佳掺量为水泥凝胶材料质量分数的 1.5%。

表 2 ACAR 掺量对混凝土抗压和抗渗性能的影响

Tab. 2 Effect of ACAR content on compressive and impermeability of concrete

w(ACAR 掺量)/%	抗压强度比/%		0.8 MPa 水压下渗透高度/cm
	标养 28 d	标养 28 d ＋ 海水 180 d 养护	
0	100	100	透水
1.0	104	105	2.2
1.5	108	110	1.2
2.0	109	110	1.1

2.1.3 ACAR 对混凝土性能的影响

固定阻锈剂掺量为 1.5%，考察 ACAR 对混凝土性能的影响，并与阻锈剂 DCI-S(瑞士西卡公司提供)进行性能比较(见表 3)。结果显示，相较基准混凝土，掺 ACAR 的混凝土的塌落度由 7.3 cm 减小至 6.0 cm，抗压强度比提高了 8%，抗折强度比提高了 12%，抗渗等级达到了 P12，碳化深度降低了 35.6%，表明 ACAR 对混凝土性能有很大提升，掺 ACAR 混凝土与掺 DCI-S 混凝土的性能相似。掺入 ACAR 后，混凝土中：1)ACAR 中的固体醇胺经水化产生了三乙醇胺与铝离子，三乙醇胺发挥防腐阻锈作用，铝离子与石膏反应，生成了硫铝酸钙，降低了水泥水化初期产生疏松铝酸三钙结晶的几率，提升了混凝土的早期强度，并在混凝土硬化之前，基本完成了体积膨胀；2)通过液相和气相扩散传递，固体醇胺快速吸附在钢筋表面，提高了临界 Cl^- 浓度，降低了 Cl^- 的腐蚀性能；3)水泥水化生成的 $Ca(OH)_2$ 与试件内部的 CO_2 不可避免地反应生成碳化腐蚀物 $CaCO_3$，固体醇胺能快速与 $CaCO_3$ 反应生成碳铝酸钙，将 $CaCO_3$ 消耗掉，降低了混凝土的碳化几率；4)碳铝酸钙使混凝土的密实度变大，进而减慢 CO_2 向混凝土的扩散。ACAR 中铁等金属物质水化后可与混凝土反应生成铁酸三钙和硫铁酸钙等晶体物质，晶体物质可填充、堵塞、封闭混凝土内部孔隙，使混凝土更致密，抗压强度更高。

表 3 阻锈剂对混凝土性能的影响

Tab. 3 Effect of rust inhibitor on concrete properties

混凝土试件	抗压强度比/%	抗折强度比/%	抗渗等级	碳化深度降低/%	坍落度/cm
掺 ACAR	108	112	P12	35.6	6.0
掺 DCI-S	107	111	P11	32.7	6.2
基准	100	100	P6	0	7.3

2.2　混凝土防腐性能研究

2.2.1　冷热干湿循环试验

以质量分数为 3.0%的 NaCl 溶液为冷热干湿循环试液。循环周期为浸泡 16 h、干燥 4 h、室温 4 h。浸泡溶液温度为 25 ℃，干燥温度为 75 ℃。连续循环 60 次，测定不同混凝土试件的抗压强度，计算耐腐蚀系数，结果见表 4。结果显示，相较基准混凝土，掺 ACAR 的混凝土的抗压强度和耐腐蚀系数均得到明显提升，说明掺 ACAR 有利于改善混凝土性能。冷热干湿循环 60 次后，基准试件出现了破损，掺 ACAR 混凝土试件表面完整无破损，抗压强度几乎没有发生变化（见图 1）。破碎试件后，基准试件钢筋锈蚀严重，掺 ACAR 的试件钢筋没有锈蚀现象（见图 2）。说明掺 ACAR 混凝土抵御外界腐蚀的能力强。

表 4　混凝土试件冷热干湿循环试验结果

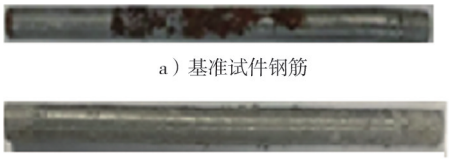
Tab. 4　Results of cold, hot, dry and wet cycle test of concrete specimens

混凝土试件	抗压强度/MPa		耐腐蚀系数
	标养 28 d	标养 28 d+60 次冷热干湿循环	
基准	37.3	26.2	0.62
掺 ACAR	57.2	56.9	0.99

掺ACAR混凝土试件　　基准混凝土试件

图 1　冷热干湿循环后混凝土试件情况

Fig. 1　Concrete specimen condition after hot and cold dry and wet cycle



a）基准试件钢筋

b）掺ACAR试件钢筋

图 2　冷热干湿循环后混凝土试件钢筋锈蚀情况

Fig. 2　Corrosion of steel bar after cold, hot, dry and wet cycling of concrete specimens

2.2.2　抗硫酸盐侵蚀性能试验

用抗蚀系数法测试混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能。侵蚀液为质量分数 3%的硫酸钠溶液，pH 值为 6～8，侵蚀液每使用 30 d 必须更换新配侵蚀液。将混凝土试件浸入侵蚀液中，按规定期龄取出，测定抗折强度，计算得出抗腐蚀系数（见表 5）。结果表明，随着侵蚀时间的延长，抗硫酸盐腐蚀系数逐渐减小，浸泡 90 d，不掺 ACAR 的（基准）试件，抗硫酸盐腐蚀系数降到 0.72，已经完全丧失了抗硫酸盐腐蚀的能力；掺 ACAR 的试件，因混凝土的密实度高，能有效阻止硫酸盐的侵入，抗硫酸盐腐蚀系数可达 1.18。

表 5　抗硫酸盐侵蚀系数

Tab. 5　Sulfate resistance coefficient

混凝土试件	抗硫酸盐腐蚀系数			抗硫酸盐腐蚀能力等级
	28 d	60 d	90 d	
基准	1.32	1.07	0.72	较低
掺 ACAR	1.39	1.33	1.18	高

2.2.3　抗冻融性能试验

冻融循环 100、150、200 次，按文献[15]方法测试掺 ACAR 混凝土的抗冻融性能（见表 6）。结果显示，冻融循环 100 次，基准混凝土试件就出现了破损；而掺 ACAR 的混凝土试件，冻融循环 200 次，试件表面仍保持完整（见图 3），并且抗压强度损失和质量损失均较小，说明掺 ACAR 的混凝土具有良好的抗冻融性，原因是掺加 ACAR 的混凝土的密实度大，能有效堵塞混凝土的毛细管，截断了水渗入混凝土内部的通道，减少了冻融对混凝土的破坏。

2.2.4　钢筋耐海水腐蚀性能试验

分别将光洁的 Q235-A・F、HPB235 和 HRB335 钢筋浸入海水与掺 1.5%（质量分数）ACAR 的混合溶液中，持续浸泡 2 年，通过观察钢筋的锈蚀情况，考察钢筋的耐海水腐蚀性能（见表 7）。结果显示，3 种钢筋均未发生锈蚀，说明 ACAR 具有优秀的防腐阻锈性能。原因是 ACAR 中的磷酸根可吸附在钢筋表面阴极区域形成一层致密的保护膜，阻止 O_2、Cl^- 和 SO_4^{2-} 等接近钢筋，阻断钢筋锈蚀；苯甲酸钠也同样抑制了钢筋的阳极锈蚀；固体醇胺经水化产生三乙醇胺，其分子结构上的氨基、羟基的 N 原子、O 原子上的孤对电子可以与钢筋表面的铁原子的空 d 轨道以配位键牢固结合，形成一层致密、稳定且难脱附的保护膜，有效阻止了 Cl^-、SO_4^{2-}、O_2 等腐蚀介质的渗透，有效保护钢筋不被腐蚀。

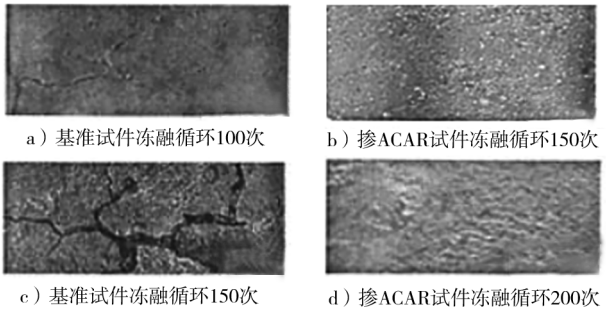
2.2.5　自然电位判定钢筋锈蚀试验

用 SCA-0.2-II 型钢筋锈蚀评定仪（深圳市宇凯科技有限公司提供）测定基准试件和掺 ACAR 的试件的自然电位，用自然电位测定值判定 ACAR 对钢筋的保护作用（见表 8）。结果显示，相较基准试件的自然电位测定值为－472 mV，掺 ACAR 试件的自然电位测定值为－159 mV，说明掺 ACAR 能降低钢筋的自然电位，具有保护钢筋的作用。

表 6 混凝土抗冻融性能

Tab. 6 Freeze-thaw resistance of concrete

混凝土试件	抗压强度/MPa	冻融次数					
		100		150		200	
		质量损失/%	抗压强度损失/%	质量损失/%	抗压强度损失/%	质量损失/%	抗压强度损失/%
基准	37.3	4.1	28.30				
掺 ACAR	57.2	0	1.11	0.07	2.99	0.22	4.76



a) 基准试件冻融循环100次 b) 掺ACAR试件冻融循环150次

c) 基准试件冻融循环150次 d) 掺ACAR试件冻融循环200次

图 3 冻融循环混凝土试件情况

Fig. 3 Condition of freeze-thaw cycle concrete specimen

表 7 钢筋耐海水腐蚀性能

Tab. 7 Corrosion resistance of rebar to seawater

钢筋种类	钢筋是否锈蚀				
	4 个月	8 个月	12 个月	18 个月	24 个月
Q235-A·F	否	否	否	否	否
HPB235	否	否	否	否	否
HRB335	否	否	否	否	否

表 8 自然电位的测量结果

Tab. 8 Measured result of the natural potential of steel bar

混凝土试件	自然电位测定值/mV
基准	−472
掺 ACAR	−159

2.3 成本对比研究

在达到相同设计要求下，国内市售的阻锈剂材料一般为水泥凝胶，掺量为 3%～5%(质量分数，下同)，而 ACAR 为粉末，掺量仅为 1.5%，用量降低了 1.5～3.5 个百分点。ACAR 中磷化渣的质量分数占 30%左右，因是固体废弃物，不仅不用花钱购买，而且还可以赚取 3 000～3 500 元/t 磷化渣处理费，磷化渣处理费可抵消其他原材料的购买成本，因此 ACAR 的制备成本低，性价比更高。

3 结 语

本文研究制备了新型固体醇胺，并协同固废磷化渣、石膏和苯甲酸钠制备了复合型防腐阻锈剂，将其掺入基准混凝土中，制得了高品质的防腐阻锈混凝土。并对其力学性能、防腐阻锈性能和性价比进行了研究。

1)制备的固体醇胺为新物质。固体醇胺、固废磷化渣、石膏和苯甲酸钠混合制备的复合型防腐阻锈剂能有效阻止 Cl^-、SO_4^{2-}、O_2 等腐蚀介质的渗透性，性能指标达到了国外同类产品的水平，且制备成本低、掺量少、性价比高。

2)相较基准混凝土，制备的防腐阻锈混凝土抗压强度比提高了 8 个百分点，抗折强度比提高了 12 个百分点，碳化深度提高了 35.6 个百分点，抗渗等级达到 P12，Cl^- 扩散系数为 1.9×10^{-12} m^2/s，0.8 MPa 水压下渗透高度 1.2 cm，抗硫酸盐腐蚀系数为 1.18(90 d)，冷热干湿循环 60 次，抗压强度基本未降低；冻融循环 200 次，抗压强度损失为 4.76%，质量损失为 0.22%，钢筋用含 1.5% ACAR 的海水浸泡 2 年，无腐蚀现象。

上述各项指标说明该混凝土的性能及防腐阻锈性能可有效提高盐碱土地和海洋气候等恶劣环境中建筑的耐久性。但 ACAR 与混凝土的作用机制尚未完全清楚，后续将进行深入研究，找到 ACAR 对混凝土性能的影响规律，为进一步改进新型防腐阻锈混凝土的品质提供参考。

参考文献/References：

[1] MOHAMMED T, HAMADA H. Relationship between free chloride and total chloride contents in concrete[J]. 2003. DOI: 10.1016/S0008.8846(03)00065-6.

[2] BASHEER P A M, GILLEECE P R V, LONG A E, et al. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cemantitious materials to assess their resistance to chloride penetration[J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(5): 437-449.

[3] 马麒，蔡景顺，穆松，等. 有机氨基醇阻锈剂在混凝土模拟孔隙液和砂浆试块中对钢筋的阻锈作用[J]. 中国腐蚀与防护学报，2021，41(5)：659-666.
MA Qi, CAIJingshun, MU Song, et al. Composite organic compound as corrosion inhibitor for reinforced steel in simula-

ted concrete pore solution or mortar specimen[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(5): 659-666.

[4] 郭群，李晓珍，宋屹林，等. 钢筋阻锈剂在碳化钢筋混凝土中的阻锈作用[J]，建筑材料学报. 2023，26(1)：21-28.
GUO Qun, LI Xiaozhen, SONG Yilin, et al. Effect of steel bar corrosion inhibitors in carbonated reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1): 21-28.

[5] 何林，梁冠亭，蔡景顺，等. 复合氨基醇阻锈剂对钢筋耐蚀性能的影响[J]. 新型建筑材料. 2020，47(12)：140-144.
HE Lin, LIANG Guanting, CAI Jingshun, et al. The influence of composite amino alcohol corrosion inhibitor on corrosion resistance of reinforcement[J]. New Building Materials, 2020, 47(12): 140-144.

[6] 范洪强. 固废磷化渣的处理与资源化研究[D]. 大连：大连理工大学，2008.
FAN Hongqiang. Research in Disposal and Resource Utilization of Phosphated Residue[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.

[7] 武晓燕，黄继承，郎庆成，等. 磷化渣资源化研究进展与展望[J]. 再生利用，2015，8(8)：38-40.
WU Xiaoyan, HUANG Jicheng, LANG Qingcheng, et al. Research progress and prospect of resource utilization of phosphating slag[J]. Recycling, 2015, 8(8): 38-40.

[8] 左伏根. 一种利用磷化渣制取无毒复合防锈颜料的方法：CN02139799. 6[P]. 2003-05- 07.

[9] 史兰香，张宝华，刘斯婕，等. 一种利用磷化渣制备磷酸铁和聚磷酸铵肥料的方法：CN201710360580. 9[P]. 2019-03-29.

[10] 张宝华，张冀男. 一种复合型混凝土防腐阻锈剂及制备方法：CN108046641B[P]. 2020-07-21.

[11] GB/T 33803—2017，《钢筋混凝土阻锈剂耐蚀应用技术规范[S].

[12] GB/T 5008—2016，普通混凝土拌合物性能实验方法[S].

[13] GB/T 50081—2019，混凝土物理力学性能实验方法标准[S].

[14] JTJ 012—94，公路水泥混凝土路面设计规范[S].

[15] GB/T 50082—2009，普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S].

[16] JTJ 270—98，水运工程混凝土试验规程[S].