

复合型阻锈剂阻锈性能及机理研究

邢祥伟, 柳俊哲*, 姚森元, 杨梦娜

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于阴阳两极阻锈剂阻锈机理, 通过盐水浸渍和钢筋混凝土阻锈试验, 得到阻锈效果良好的复合型阻锈剂, 并通过 X 射线衍射技术(XRD)和电镜扫描分析技术(SEM)微观手段探讨了其作用机理. 结果表明: 阻锈剂单掺时, 阳极型阻锈剂比阴极型阻锈剂具有更好的阻锈效果, 阴阳两极阻锈剂复合掺加后可得到优于单掺的阻锈效果; 磷酸盐的掺入能更好地改善亚硝酸盐在低掺量时引起的点蚀效应; 磷酸氢二钠与亚硝酸钠以 1:1 的质量配比时, 阻锈效果最好, 且混凝土的密实性得到提高.

关键词: 复合阻锈剂; 亚硝酸盐; 磷酸氢二钠; 阻锈机理

中图分类号: TU528.0

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 03-0080-07

添加阻锈剂是目前工程应用中最为普遍、效果最明显的阻锈方法^[1-3]. 无机阻锈剂中, 亚硝酸盐类阻锈剂起步最早, 且具有成本低、阻锈效果好的特点, 在混凝土中性能稳定, 但掺量不足时, 会加重钢筋局部腐蚀^[4-8]. 除亚硝酸盐以外, 杜荣归等^[9]还对铬酸盐、磷酸盐类、钨酸盐类、钼酸盐类和硅酸盐类进行研究, 发现其具有不同程度的缓蚀效果, 此外甲酸钠^[10]、锌盐^[11]等的阻锈作用也有人研究. 由于存在许多局限性, 单一组分的无机阻锈剂很少应用于混凝土. 因此, 将具有良好缓蚀性能的阻锈剂与其他缓蚀剂复配^[12], 以减少有毒性缓蚀剂的用量, 或者将具有阻锈性能、无毒无害、环境友好型的无机阻锈剂(如钨酸盐、钼酸盐和锌盐等)与其他阻锈剂复配形成高效的阻锈剂^[13], 也是一个研究的热点. 复合型阻锈剂可以利用各组分之间的协同作用, 在合理配比下, 集各组分优点, 克服单一组分阻锈剂的缺点, 同时保护阴、阳两极, 在理想掺量时能较好抑制钢筋腐蚀, 且不会因使用不当而加速腐蚀^[14-19]. 张大全等^[20]研究了咪啉多元胺与羧酸铵的复配阻锈剂, 发现咪啉多元胺对阴阳两极均有抑制作用. Nmai 等^[21]研究了由胺和脂肪酸复合成的有机阻锈剂, 发现具有双重阻

锈作用. 闫加利等^[22]研究了在亚硝酸根浓度差作用下的阻锈效果. 戴燕华等^[23]研究了亚硝酸盐复配苯并三唑具有良好的阻锈效果. 本文利用亚硝酸盐类阻锈剂成本较低、阻锈效果良好的特点, 采取复配方式选取合适的阴极型阻锈剂, 在保证阻锈效果的前提下确定最佳配比及掺量, 并对其微观作用机理进行分析, 为提高我国钢筋混凝土结构的耐久性和使用寿命提供理论依据.

1 试验概况

1.1 试验材料及试件制备

盐水浸渍试验: 氯盐采用 NaCl 分析纯, 配制氯化钠质量分数为 2% 的模拟孔溶液, 配比见表 1. 饱和 Ca(OH)₂ 溶液; 选取阻锈剂为亚硝酸钠、磷酸钠、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、单氟磷酸钠, 取粉剂阻锈剂添加量为质量分数 1.5%. 钢筋混凝土试块制作: 42.5 普通硅酸盐水泥; 细度模数为 2.25 的中砂; 粒径为 5~10 mm 粗骨料; 直径为 10 mm 的 HPB300 级光圆钢筋; 混凝土配比见表 2 和表 3. 混凝土试块中内掺质量分数 2% 的 NaCl, 浇筑试块尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm, 具体如图 1 所示. 阻锈剂掺量根据盐水浸渍实验选取最优组分后进

收稿日期: 2018-08-07.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金 (51778302, 51478227) .

第一作者: 邢祥伟 (1991—), 男, 山东菏泽人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 混凝土耐久性. E-mail: 632815909@qq.com

*通信作者: 柳俊哲 (1964—), 男, 黑龙江五常人, 教授, 主要研究方向: 混凝土耐久性. E-mail: liujunzhe@nbu.edu.cn

行复合配比, 掺量见表 4。同时制作水灰比为 0.45, 胶砂比为 0.4 的水泥砂浆试件, 尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 试块中阻锈剂掺量对应表 4, 分别用以测定 3, 7, 28 d 的抗压强度、抗折强度。

表 1 模拟混凝土孔溶液组分 mol·L⁻¹

组分	浓度值
Ca(OH) ₂	0.001
NaOH	0.2
KOH	0.6

表 2 混凝土配合比 kg·m⁻³

组分	质量浓度值
水泥	300
砂	760
石	1 080
水	180

表 3 配合比参数

名称	参数值
砂率/%	41
坍落度/cm	16
抗压强度/MPa	48.5
含气量/%	4
初凝/min	160

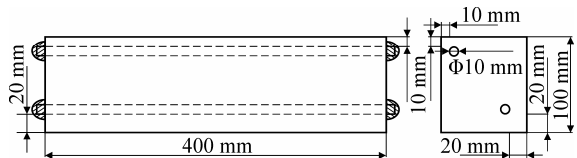


图 1 钢筋混凝土试块尺寸图

表 4 混凝土试块阻锈剂掺量 %

亚硝酸钠 阻锈剂	磷酸氢二钠 阻锈剂	复合型 阻锈剂	复合型 阻锈剂
编号 掺量	编号 掺量	编号 掺量	编号 掺量
N1 0.5	P1 0.5	A1 0.5+1.5	C1 1.5+0.5
N2 1.0	P2 1.0	A2 0.5+2.0	C2 1.5+1.0
N3 1.5	P3 1.5	B1 1.0+1.0	C3 1.5+1.5
N4 2.0	P4 2.0	B2 1.0+1.5	D1 2.0+0.5
N5 2.5	P5 2.5	B3 1.0+2.0	D2 2.0+1.0

注: 另有空白对照组 BLK, 未掺加阻锈剂。

1.2 试验方法

1.2.1 盐水浸渍试验

配制氯离子质量分数为 2.0%的混凝土模拟孔溶液, 并加入质量分数为 1.5%的不同组分阻锈剂。

将 2 根事先切割好并除去钝化膜长度为 50 mm 钢筋段置于装有 200 mL 模拟孔溶液的广口瓶中, 全部浸于模拟孔溶液中。利用参比电极分别测量 1 h、2 h、3 h、6 h、1 d、3 d、5 d、7 d 时段的钢筋自然电位值。

1.2.2 混凝土中阻锈试验

试块浇筑完成后, 养护 24 h 后脱模, 将试件两端钢筋裸露部分用环氧树脂涂抹覆盖。每种掺量的试件做 3 个。将成型后试件在标准养护条件下养护 28 d, 然后放置在自然条件下养护, 并用自然电位仪每隔 1 个月测试试件中钢筋的自然电位, 用以判断钢筋的锈蚀情况。养护 12 个月后, 通过液压机进行劈裂, 取出钢筋, 观察钢筋表面锈蚀情况, 并计算钢筋的失重率和腐蚀面积率。

1.2.3 复合型阻锈剂作用下的力学性能试验

制作水灰比为 0.45, 胶砂比为 0.4 的水泥砂浆试件, 试块中阻锈剂掺量对应表 4, 尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 试块成型后置于标准条件下养护 28 d。然后将养护完毕的试块通过抗折试验机与万能试验机分别测定 3, 7, 28 d 的抗折强度、抗压强度。

1.2.4 复合型阻锈剂作用的微观机理试验

(1)XRD 分析。将在自然条件下养护 1 个月的混凝土试块劈裂, 取少许与钢筋粘结的水泥浆体, 经研磨过筛后得到粒径小于 0.3 mm 的粉体, 用烘箱在(60±5)°C的条件下烘 24 h, 烘干后取出置于塑料样品袋密封冷却备用。采用布鲁克 AXS 公司的 D8 ADVANCE X 射线衍射仪对制备的试样进行物相分析;

(2)SEM 分析。将在自然条件下养护 1 个月的混凝土试块劈裂, 取少许与钢筋粘结的水泥浆体, 用小锤轻轻敲成粒径为 5 mm 左右见方的碎块, 取一定量的碎块放入烘箱在(60±5)°C的条件下烘 24 h, 烘干后取出置于塑料样品袋密封冷却, 在检测时进行二次制样。采用 SU-70 型场发射扫描电镜对事先制备的水泥净浆样品内部结构进行扫描。

2 试验结果与分析

2.1 模拟孔溶液中阻锈剂阻锈效果

根据《钢筋阻锈剂使用技术规程》YB/T 9231 评判标准, 7 d 内钢筋表面无锈蚀, 且钢筋自然电位

在 0~-250 mV 范围之间, 即认为钢筋未发生锈蚀。

由图 2 可知, 未添加阻锈剂的空白样钢筋自然电位非常低, 在加入阻锈剂后, 自然电位均有所上升, 说明阻锈剂均不同程度地抑制了氯离子对钢筋的腐蚀作用。其中, 亚硝酸钠电位值最低, 7 d 后自然电位已在 -250 mV 以上, 已完全阻锈。同时, 在掺入磷酸盐类阻锈剂的钢筋电位值均高于空白试样, 起到一定延缓钢筋锈蚀的作用, 但未能达到完全阻锈的目的。对比亚硝酸钠和各种磷酸盐系阻锈剂, 可见亚硝酸钠起效较快, 原因是阳极型阻锈剂扩散速度快, 并迅速通过氧化作用形成钝化膜。而阴极型阻锈剂其阻锈机理是通过吸附成膜, 反应所需时间较长, 在钢筋表面形成保护膜后, 才能达到一定防腐蚀效果。对比 4 种阴极阻锈剂, 磷酸氢二钠的阻锈效果最好, 因此混凝土阻锈试验将通过复掺亚硝酸钠与磷酸氢二钠, 并设计不同配比以制作最优的复合型阻锈剂。

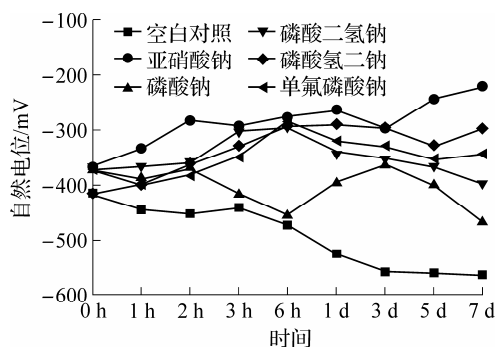


图 2 钢筋的自然电位值

2.2 混凝土中阻锈剂阻锈效果

图 3 和图 4 对比了添加各浓度亚硝酸钠、磷酸氢二钠时, 混凝土试块中钢筋的自然电位值。由图 3 和图 4 可见, 当亚硝酸钠掺量只有 0.5% 时, 电位持续下降, 且斜率大于基准试件, 说明该试件锈蚀概率提高, 其原因可能是由于 Cl^- 浓度过高, NO_2^- 修复速度不及钢筋的腐蚀速度, 而导致宏电池效应提高了腐蚀速率, 这也说明亚硝酸盐阻锈剂在较高浓度时才具有阻锈作用。当亚硝酸钠掺量达到 2.0% 时, 混凝土内钢筋电位就处于稳定状态, 此时钢筋将处于钝态, 而不会发生锈蚀。亚硝酸盐作为阳极型阻锈剂, 其阻锈机理是通过 NO_2^- 的强氧化性, 能够氧化钢筋表面电离的 Fe^{2+} , 反应生成 Fe_2O_3 以附着在钢筋阳极表面, 并形成一层致密的钝化膜, 从

而抑制阳极反应发生, 阻止铁原子进一步失去电子。但当亚硝酸盐含量不足时, 生成的钝化膜容易被破坏, 后续锈蚀生成的产物会堆积于钝化膜表面, 从而加深钢筋的锈蚀。

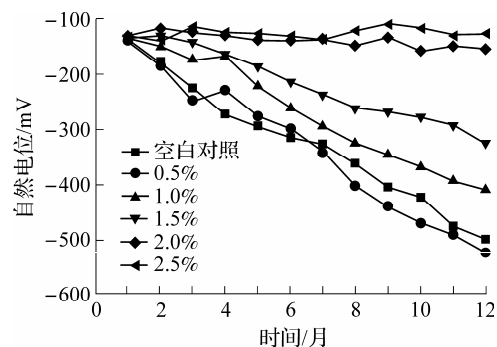


图 3 内掺亚硝酸钠阻锈剂

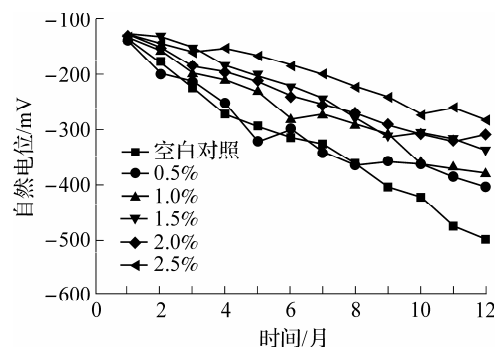


图 4 内掺磷酸氢二钠阻锈剂

磷酸盐在低掺量下并未加剧钢筋锈蚀的概率, 可推测未发生宏电池腐蚀, 因此磷酸盐并不是通过氧化作用来达到阻锈效果。目前基于 HPO_4^{2-} 的阻锈机理, 普遍观点认为, HPO_4^{2-} 与混凝土孔溶液中氢氧化钙生成羟基磷灰石, 堵塞混凝土中孔隙, 或是 HPO_4^{2-} 水解成的 PO_4^{3-} 与钢筋表面生成的 Fe^{2+} 反应, 生成一层磷酸铁膜, 阻止 Cl^- 侵入^[7]。

图 5 比较了亚硝酸钠与磷酸氢二钠复掺后, 试件 12 个月内的自然电位值。相比于单独掺加亚硝酸钠, 自然电位均有上升趋势。在低掺量亚硝酸钠 (0.5%) 试件中, 复掺磷酸氢二钠后, 虽然自然电位在前期有所下降, 但在 12 个月时基本处于 -200 mV 左右, 起到了明显的阻锈效果; 随着磷酸氢二钠掺入量的增加, 钢筋锈蚀概率明显减小。同时在亚硝酸钠质量浓度为 1.5% 和 2.0% 时, 复掺不同浓度的磷酸氢二钠均能较单掺时降低试件中钢筋的锈蚀概率。

同时, 单掺磷酸氢二钠时, 其掺量对自然电位

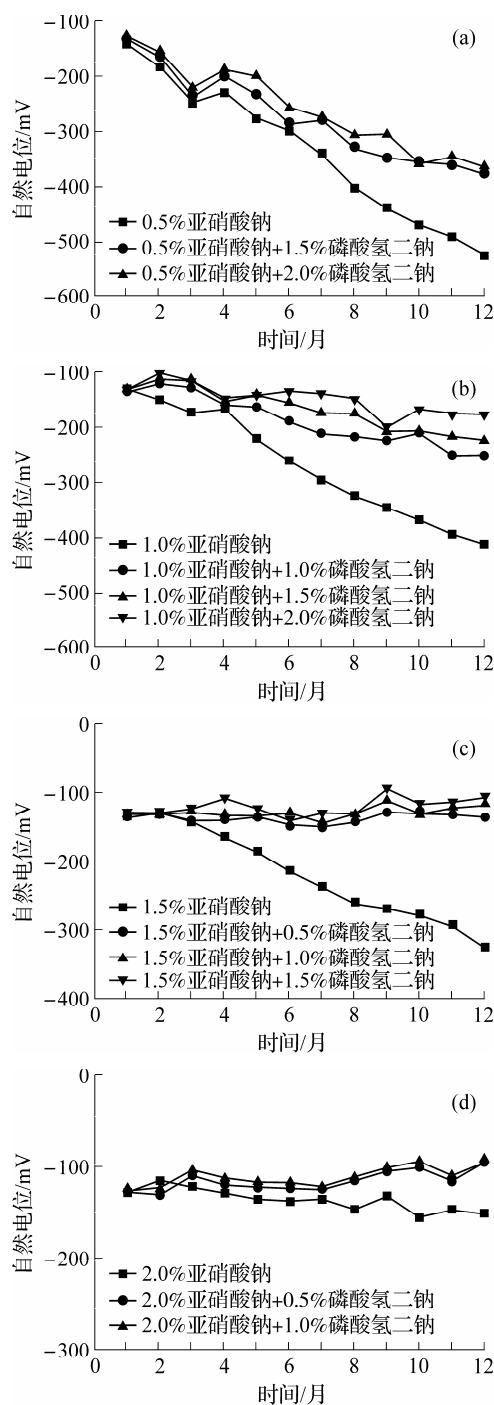


图5 复掺时钢筋自然电位值

并未造成明显影响; 在亚硝酸钠掺量固定情况下, 改变磷酸氢二钠掺量, 对电位值也未有明显的变化. 因此从自然电位角度分析, 磷酸氢二钠的掺入量并不能对阻锈效果起到决定性的作用.

根据《混凝土构筑物的钢筋腐蚀、防腐蚀试验方法及规范》JCI-SC1, 将养护至 360 d 的钢筋混凝土试块通过劈裂试验, 取出钢筋后, 测量腐蚀面积

率及失重率.

图 6 和图 7 比较了掺加不同阻锈剂条件下, 试块中钢筋的腐蚀面积率和失重率的变化. 单掺亚硝酸钠时, 钢筋腐蚀面积率和失重率总体趋势均随着亚硝酸钠的掺量增加呈先增大后迅速减少. 在掺入量达到 2.0% 后, 腐蚀面积率则小于 10%, 失重率小于 10‰, 可视为钢筋锈蚀基本被抑制, 说明亚硝酸钠具有良好的阻锈效果, 但当亚硝酸钠掺入量不足时, 会加速钢筋腐蚀. 复掺磷酸氢二钠时, 腐蚀面积率从超过 50% 下降至 20% 左右, 失重率也从超过 35‰ 下降至 20‰. 亚硝酸钠浓度越高, 复掺磷酸氢二钠对腐蚀面积率和失重率改善作用越明显; 当亚硝酸钠与磷酸氢二钠复掺比例在 1:1 时, 相比单掺亚硝酸钠试件中的钢筋, 腐蚀面积率和失重率的降低率已高达 80%, 钢筋基本未发生腐蚀. 结合用量与效果, 当亚硝酸钠与磷酸氢二钠以质量比 1:1 配比时, 各自掺量皆为 1.5% 比例添加时阻锈效果最好.

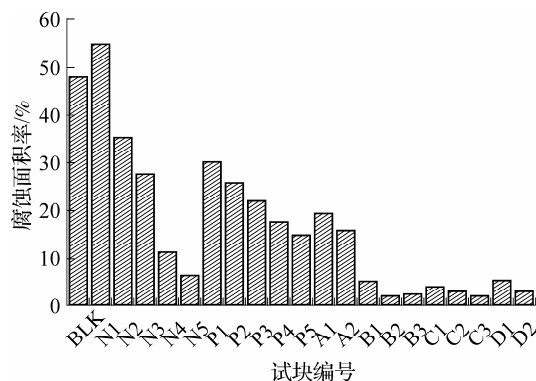


图6 钢筋腐蚀面积率

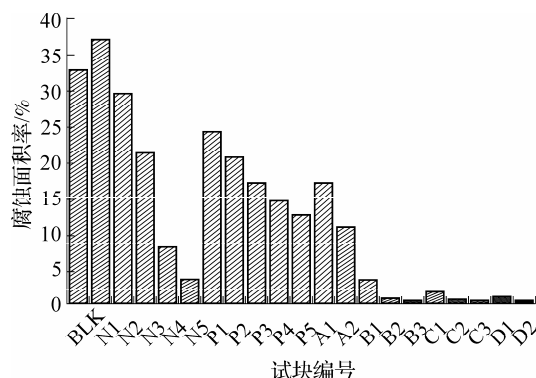


图7 钢筋腐蚀失重率

2.3 阻锈剂对浆体试件力学性能的影响

依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2016), 测定掺加各典型配比阻锈剂后

的水泥砂浆 3 d、7 d 和 28 d 的抗折、抗压强度值, 结果如图 8 所示。

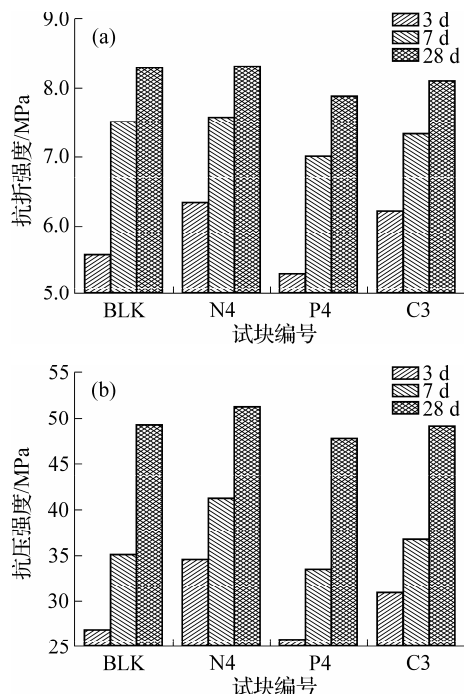


图 8 试块的抗压抗折强度

由图 8 可见, 各典型阻锈剂掺量下水泥砂浆的抗折、抗压强度比均高于基准试件的 90%, 根据《钢筋阻锈剂使用技术规程》YB/T 9231-2009, 试块强度满足规范要求。其中, 亚硝酸钠作为一种促凝剂, 早期强度增长较快, 后期有所减缓, 但仍略高于基准试件。磷酸氢二钠加入砂浆后, 早期强度较低, 但后期增长速度逐渐上升, 28 d 抗折和抗压强度均高于基准试件的 95%。而两者经过 1:1 的比例复掺后, 砂浆试件的强度与基准试件几乎相同, 虽不能有效提高混凝土强度, 但也不会造成不良影响。

亚硝酸钠作为早强剂, 磷酸氢二钠作为缓凝剂, 两者复合配比掺加后, 对混凝土力学性能和凝结时间几乎无影响, 是一种可行的复合阻锈剂。

2.4 阻锈剂对混凝土微观结构影响

2.4.1 X 射线衍射分析

图 9 对比了各典型阻锈剂掺加下, 混凝土试样中水泥水化产物的区别。在掺入亚硝酸钠后, 方解石、钙矾石和二水石膏的含量较基准试样明显降低, 而水化硅酸二钙含量显著增加, 这说明在掺有氯盐的混凝土试样中发生了碳化, 导致水泥水化产

物中氢氧化钙和 C-S-H 被消耗, 而掺入亚硝酸钠后减弱了侵蚀性离子的渗透作用。掺入磷酸氢二钠后, 钙矾石、方解石、二水石膏和水化硅酸二钙主要特征峰强度变化与掺亚硝酸钠类似, 不同之处在于产生了磷酸钙铁特征峰。文献[24-25]表明, 随着混凝土服役时间的增加, 碳化作用会消耗混凝土孔溶液中的氢氧化钙, 使孔溶液中碱性降低, 而磷酸氢二钠中的磷酸氢根会随 pH 值降低而升高, 与孔溶液中存在的 Ca^{2+} 结合, 形成带正电荷的磷酸钙胶粒向电极反应的阴极区移动, 并与钢筋表面的铁离子反应生成磷酸钙铁沉淀膜, 在电化学反应阴极起到保护作用, 以抑制腐蚀过程。复配掺入亚硝酸钠和磷酸氢二钠后, 二水石膏、钙矾石、水化硅酸二钙和方解石主特征峰相对基准试块有所降低, 但比单掺 2.0% 亚硝酸钠和 2.0% 磷酸氢二钠的试件有所提高, 磷酸钙铁特征峰强度较单掺 2.0% 磷酸氢二钠有所下降, 说明在多组分阻锈成分作用下, 亚硝酸盐氧化了钢筋表面铁离子, 生成致密钝化膜, 使锈蚀区域减少, 因此磷酸钙胶粒与钢筋表面铁离子的接触机会减少, 验证了亚硝酸盐和磷酸盐具有一定的协同作用。其中主要是亚硝酸盐在阳极氧化 Fe^{2+} 生成钝化膜, 而磷酸盐同时作用于水泥石和钢筋表面, 一方面提高了混凝土致密度, 另一方面在电极反应阴极生成磷酸钙铁沉淀, 以抑制腐蚀, 因此亚硝酸钠与磷酸氢二钠复配可达到最佳阻锈效果。

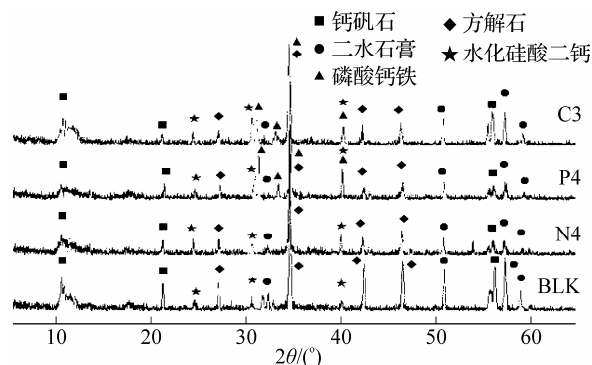


图 9 阻锈剂对混凝土中水泥水化产物的影响

2.4.2 电镜扫描分析

图 10 为养护龄期为 28 d 的空白对照组、单掺 2.0% 亚硝酸钠组、单掺 2.0% 磷酸氢二钠组、复掺 1.5% 亚硝酸钠和 1.5% 磷酸氢二钠组的 10K 倍电镜图。从图 10(a) 可见, 基准混凝土试样孔隙率较大,

有少许板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶. 图 10(b) 中, 混凝土在掺入 2.0% 亚硝酸钠后, 相对于基准试件, 内部趋于致密. 因为亚硝酸钠作为早凝剂, 加入混凝土后可促进水化作用, 使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体和水化硫铝酸钙晶体加速生成, 使孔隙内部更为致密. 由图 10(c) 可见, 存在一些交织的片状水化产物附着于硬化水泥浆体表面, 以填充混凝土内部孔隙. 主要是磷酸盐能与混凝土孔溶液中氢氧化钙反应生成羟基磷灰石, 沉积于水泥石内微孔中, 从而增强混凝土致密性. 由图 10(d) 可将, 复掺 1.5% 亚硝酸钠和 1.5% 磷酸氢二钠阻锈剂后, 水泥石被各种水化产物致密填充, 虽有一些孔洞, 但之间由 C-S-H 棒状凝胶相互连接, 这些水化产物附着于硬化水泥浆体表面, 填充了水泥石内部孔洞, 进而提高结构致密性. 磷酸氢二钠作为阴极型阻锈剂, 水解后产生的 HPO_4^{2-} 与混凝土孔溶液中 Ca^{2+} 反应生成磷酸钙胶粒, 并通过孔溶液向电极反应阴极区移动, 和钢筋阳极区产生的 Fe^{2+} 发生反应, 形成磷酸钙铁的沉淀膜, 该膜能改变毛细孔中液相与水泥石接触角度, 并利用表面张力作用阻止孔中水向内移动. 因此, 磷酸氢二钠能减少有害物质进入混凝土, 大大延长了钢筋表面氯离子达到临界浓度值的时间, 提高了混凝土耐久性.

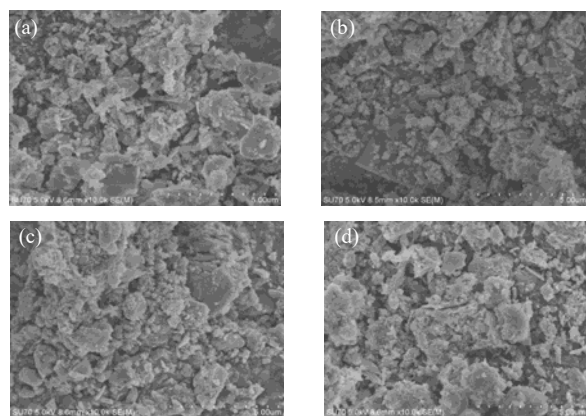


图 10 试样的 SEM 图

3 结论

(1) 单组分阴极阻锈剂的阻锈效果弱于阳极阻锈剂, 阴阳两极阻锈剂复掺后其性能优于单掺时阻锈效果.

(2) 磷酸盐的掺入可很好地改善亚硝酸盐在低掺量时引起的点蚀效应, 二者可以发挥协同作用,

大幅改善腐蚀面积和失重率, 提高阻锈效果.

(3) 亚硝酸钠与磷酸氢二钠以 1:1 的质量比配合时, 阻锈效果最好, 并提高了混凝土的密实性.

参考文献:

- [1] 仲朝明, 邵正明, 高汉青, 等. 亚硝酸盐类钢筋阻锈剂应用技术问题探讨[J]. 混凝土, 2009(12):46-51.
- [2] 马世豪, 李伟华, 郑海兵, 等. 钢筋阻锈剂的阻锈机理及性能评价的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(12): 963-968.
- [3] Okeniyi J O, Omotosho O A, Ajayi O O, et al. Effect of potassium-chromate and sodium-nitrite on concrete steel-rebar degradation in sulphate and saline media[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50:448-456.
- [4] Zhang Z W, Li Y S, Liu R. Failure behavior of adhesive bonded interface between steel and bamboo plywood[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016, 30 (19):2081-2099.
- [5] Valcarce M B, Vázquez M. Carbon steel passivity examined in solutions with a low degree of carbonation: The effect of chloride and nitrite ions[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 115:313-321.
- [6] 唐聿明, 牛犇, 林冰, 等. NO_2^- 及其浓度对混凝土模拟孔隙液中碳钢早期孔蚀的作用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(2):123-128.
- [7] 陈明实, 孙丛涛, 于景飞. 钢筋阻锈剂在混凝土中的阻锈机理[J]. 混凝土, 2015(6):80-83.
- [8] 柳俊哲, 孙武, 贺智敏, 等. 亚硝酸盐在混凝土结构中的阻锈作用(英文)[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(5):607-612.
- [9] 杜荣归, 胡融刚, 胡仁, 等. 若干无机缓蚀剂对混凝土中钢筋的阻锈作用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(4):908-913.
- [10] Blustein G, Rodringuze J, Romanogli R, et al. Inhibition of steel corrosion by calcium benzoate adsorption in nitrate solutions[J]. Corrosion Science, 2005, 47(2):369-383.
- [11] Ashassi S H, Asghari E. Effect of solution hydrodynamics on corrosion inhibition performance of zinc sulfate in neutral solution[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 159(1):C1-C7.
- [12] 杜荣归, 王周成, 黄若双, 等. LD-2 复合缓蚀剂对海水介质混凝土中钢筋阻锈作用研究[J]. 电化学, 2001, 7(4): 494-500.
- [13] Boucherit M, Amzert S A, Arbaoui F, et al. Pitting corrosion in presence of inhibitors and oxidants[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2008, 55(3):115-

- 122.
- [14] 吕明敏. 钢筋阻锈剂的种类与发展现状分析[J]. 桥隧工程, 2018, 14(2):204-206.
- [15] Tang Y B, Wang S N, Xu Y P. Influence of calcium nitrite on passive films of rebar in simulated concrete pore solution[J]. Materials Protection, 2017, 50(8):28-31.
- [16] Shi J J, Sun W. Effect of phosphate on the chloride-induced corrosion behavior of reinforcing steel in mortars [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 45:166-175.
- [17] Etteyeb N, Dhouibi L, Takenouti H. Protection of reinforcement steel corrosion by phenylphosphonic acid pre-treatment, part II: Tests in mortar medium[J]. Cement and Concrete Composites. 2016, 65(3):94-100.
- [18] Zhang Z W, Li Y S, Liu R. An analytical model of stresses in adhesive bonded interface between steel and bamboo plywood[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 52:103-113.
- [19] Verbruggen H, Terryn H, Graeve I D. Inhibitor evaluation in different simulated concrete pore solution for the protection of steel rebars[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124:887-896.
- [20] 张大全, 安仲勋, 潘庆谊, 等. 吗啉多胺对混凝土钢筋的阻锈作用[J]. 材料保护, 2004, 27(8):4-6.
- [21] Nami C K. Multi-functional organic corrosion inhibitor[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(3):199-207.
- [22] 闫加利, 柳俊哲, 蒋义, 等. 亚硝酸根浓差作用下混凝土中钢筋的腐蚀特征[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(2):95-99.
- [23] 戴燕华, 柳俊哲, 蒋义, 等. 基于亚硝酸盐的复合型阻锈剂性能研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2016, 29(4): 96-100.
- [24] Shi W, Wang T Z, Dong Z H, et al. Application of wire beam electrode technique to investigate the migrating behavior of corrosion inhibitors in mortar[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134:167-175.
- [25] Bastidas D M, Criado M, Lglesia V M L, et al. Comparative study of three sodium phosphates as corrosion inhibitors for steel reinforcements[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 43:31-38.

Corrosion resistance and mechanism of composite corrosion inhibitor

XING Xiang-wei, LIU Jun-zhe*, YAO Sen-yuan, YANG Meng-na

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: By both the salt-water impregnation test and the corrosion resistance test of reinforced concrete, a composite corrosion inhibitor with good performance was obtained based on the corrosion inhibiting mechanisms of anodic and cathodic corrosion inhibitors. Results indicated that when the corrosion inhibitor was single-doped, the rust-inhibiting effect in cathodic corrosion inhibitors was weaker than that of the anode corrosion inhibitors. Moreover, composite corrosion inhibitor had better rust resistance than single component corrosion inhibitor. The addition of phosphate could improve the pitting effect of nitrite at low concentration. The new composite corrosion inhibitor had great inhibiting and synergistic effect, and could improve the compactness of concrete when the mass ratio of disodium hydrogen phosphate to sodium nitrite is 1:1.

Key words: composite corrosion inhibitor; nitrite; dibasic sodium phosphate; corrosion-resistant mechanism

(责任编辑 章践立)