

无机防腐剂抗硫酸盐侵蚀机理研究

郭欣¹, 高嵩^{1,2}, 宫尧尧¹, 蒋辉³

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 青岛理工大学 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033;
3. 广西壮族自治区建筑工程质量检测中心有限公司, 广西 南宁 530005)

摘要: 以机械活化超细矿渣粉为主要原料、以石膏和硫铝酸盐水泥熟料(SAC)为辅料, 制备海洋环境混凝土用无机防腐剂, 利用三元云分析、SEM、XRD 研究方法研究其防腐性能和防腐机理。研究结果表明: 该多元复合无机防腐剂凝结时间、膨胀率、耐蚀系数等指标均满足标准要求; 掺入该无机防腐剂的普通混凝土在硫酸盐侵蚀 150 次循环后, 耐蚀系数仍高于 75%, 达到 KS150 级; 防腐剂的加入有助于水化初期钙矾石(Aft)的生成, 并抑制其在水化后期向低硫型钙矾石(AFm)的转化, 同时消耗腐蚀原料, 并生成多种凝胶体填充晶体骨架的空隙, 增加了混凝土微结构的致密性, 进而提高混凝土的耐蚀性能, 从微观角度为矿渣粉在抗硫酸盐腐蚀中的应用提供理论参考。

关键词: 超细矿渣粉; 多元复合; 钙矾石; 防腐机理; 云分析

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)01-0128-08

Study on sulfate resistance mechanism of inorganic preservatives

GUO Xin¹, GAO Song^{1,2}, GONG Yaoyao¹, JIANG Hui³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue

Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

3. Guangxi Construction Testing Centre, Nanning 530005, China)

Abstract: The paper, inorganic preservatives for marine environmental concrete are prepared by using the activated ultrafine slag powder as the main raw material, gypsum and sulphur aluminate cement (SAC) as supplementary materials. The corrosion resistance and mechanism of inorganic preservatives are studied by means of ternary cloud analysis, SEM and XRD. The results show that the setting time, expansion rate and corrosion resistance coefficient of the composite inorganic preservative are consistent with the standard requirements. The corrosion resistance coefficient of ordinary concrete mixed with the inorganic preservative is higher than 75% after 150 cycles of sulfate corrosion. The addition of preservatives is helpful to the formation of calcium vanadium stone in the early stage of hydration and inhibits the late conversion to low sulfur calcium vanadium. At the same time, the corrosion raw materials are consumed and the various of gels are generated to fill the voids of cement paste, increasing compactness of the concrete microstructure. In addition, the research results provide a theoretical reference for the application of slag powder in sulfate corrosion resistance at the microscopic level.

Key words: GGBS; multivariate composite; Aft; corrosion protection mechanism; cloud analysis

硅酸盐水泥中 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 等矿物成分的含量相对较高, 水化生成较多的 $Ca(OH)_2$ 与外界侵入的 SO_4^{2-} 发生水化反应, 对混凝土造成严重破坏。传统措施采用相应的中或高抗硫酸盐水泥加钢筋阻锈剂制备防腐蚀混凝土, 其弊端在硫酸盐侵蚀条件下, 使用亚硝酸盐等盐类和少量表面活

性剂组成的钢筋阻锈剂易受水压以及水溶解扩散(迁移)作用的影响, 易从混凝土中浸析出来, 还会加速胶凝材料中钙的溶解, 不利于钢筋的保护^[1-2]。因此, 探究提高砂浆和混凝土抗腐蚀性能的有利方式, 减少水泥石中抗侵蚀性差的组分, 提高水泥石的密实度是混凝土耐久性设计的重要

收稿日期: 2021-11-23

修改稿日期: 2023-01-18

基金项目: 国家自然科学基金重点基金联合项目(U2006223), 国家自然科学基金项目(51978353)

第一作者: 郭欣(1997—), 女, 硕士生, 主要研究方向为再生混凝土耐久性。E-mail: guox0515@163.com

通信作者: 高嵩(1975—), 男, 教授, 主要研究方向为再生混凝土耐久性。E-mail: gaosong727@126.com

思路.

张迪等^[3]通过混凝土抗硫酸盐侵蚀试验研究了 BDY 型防腐剂对混凝土强度的影响, 研究表明, BDY 型防腐剂在混凝土中产生了微集料效应, 从而提高了混凝土的强度. 李响等^[4]研究了 SSP 防腐剂对混凝土抗硫酸盐性能的影响, 表明 SSP 防腐剂可以促进水泥水化进程, 生成较多的 AFt 和 C-S-H 凝胶, 提高结构致密性, 从而有效改善体系的抗硫酸盐性能. 张小平等^[5]进行了微膨胀型防腐剂对混凝土耐久性能影响的研究, 结果表明, 当微膨胀组分达到一定掺量时, 可以显著提高混凝土抗硫酸盐性能. Tang 等^[6]通过掺入不同替代率的废玻璃粉等固体废弃物, 研究了混凝土抗硫酸盐侵蚀防腐剂, 结果表明, 固体废弃物的掺入可以减少 C₃A, 消耗氢氧化钙, 从而提升混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能. Aragón 等^[7]对掺加火山灰混凝土和普通硅酸盐水泥混凝土的抗硫酸盐性能进行了对比分析, 研究结果表明, 当火山灰掺量达到 70% 时, 可以有效提高混凝土抗硫酸盐侵蚀能力.

丁小富等^[8]采用活性激发剂制备混凝土抗硫酸盐侵蚀防腐剂, 结果表明, 防腐剂适度膨胀性能, 可以有效提高混凝土的致密性, 从而使混凝土具有良好的抗硫酸盐侵蚀能力. Lv 等^[9]研究了掺硅灰水泥砂浆的抗硫酸盐侵蚀性能及其增强机理, 研究结果表明, 硅灰既可以有效减少劣化产物 AFt 和石膏的形成, 又可以显著细化孔隙结构, 从而显著提高水泥砂浆抗硫酸盐侵蚀性能. Skaropoulou 等^[10]研究了高炉矿渣和偏高岭土对石灰石水泥混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响, 两者对于提高

混凝土抗硫酸盐侵蚀性能分别表现出良好的性能. Hu 等^[11]研究了掺加硅烷偶联剂处理的聚丙烯纤维水泥砂浆抗硫酸盐侵蚀性能, 结果表明, 改性后的聚丙烯纤维与水泥基材料之间的界面粘结力得到改善, 从而提高了材料的抗硫酸盐侵蚀性能. Li 等^[12]在再生混凝土内掺加橡胶屑, 探究其对再生混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响, 研究结果表明, 添加尺寸为 3 mm 橡胶屑对提高材料抗硫酸盐侵蚀性效果最佳. Guo 等^[13]在混凝土内掺加水泥替代率为 2% 的煅烧 LDH, 发现其对孔具有较好的细化作用, 并对硫酸根离子具有较高的吸附能力, 因此, 煅烧 LDH 可以增强混凝土抗硫酸盐侵蚀性. Huang 等^[14]研究了掺加纳米二氧化硅混合水泥砂浆抗硫酸盐侵蚀性能, 结果表明, 纳米二氧化硅的加入细化了水泥砂浆的孔隙, 降低了孔隙连通性, 从而提高了水泥砂浆的抗硫酸盐侵蚀性能.

目前, 大多数研究多以单一组分制备混凝土防腐剂, 而通过多元组分制备防腐剂的试验研究相对较少, 为此, 本文参考混凝土的硫酸盐腐蚀机理, 利用矿物掺合料在抗硫酸盐侵蚀中的作用, 采用活化后的超细矿渣粉, 辅以 SAC 及石膏激发剂制备混凝土用多元复合无机防腐剂.

1 实验

1.1 试验原料

超细矿渣粉: 济南鲁新公司生产的微米级矿粉, 比表面积为 1 824 m²/kg, 平均粒径 6.0 μm, 其化学组成见表 1.

表 1 各原料矿物成分 XRF 分析/%

Tab. 1 XRF analysis of mineral composition of each raw material

原料	CaO	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅
超细矿渣粉	36.08	2.80	30.08	17.35	0.84	0.30	0.71	9.90	0.78	0.08
SAC	47.68	23.87	4.12	18.87	1.63	0.16	0.28	1.84	1.02	-
石膏	39.91	56.52	1.29	0.134	0.22	0.021	0.28	1.88	1.02	-
水泥熟料	61.71	1.99	20.07	5.09	2.93	0.70	0.36	1.58	0.34	0.07

硫铝酸盐水泥熟料(SAC): 硫铝酸盐水泥熟料的主要矿物为硫铝酸钙、硅酸二钙, 比表面积为 368 m²/kg. XRF 试验测得 SAC 的化学成分见表 1.

硬石膏: 山东聚源建材开发有限公司生产的石膏粉, 杂质含量较低, 矿物成分如表 1 所示, 比表面积为 426 m²/kg.

水泥: 青岛山水水泥厂生产的 P. O42.5 水泥,

水泥熟料成分见表 1, 比表面积为 330 m²/kg.

粗骨料: 青岛崂山产的 5~25 mm 连续级配花岗岩碎石.

细骨料: 细度模数为 2.5 的中砂.

水: 去离子水.

1.2 试验设计

1.2.1 多元复合无机防腐剂配合比

设计以超细矿渣粉为主体, SAC 及石膏为辅

助材料的无机复合防腐剂,该防腐剂用量占总胶凝材料用量的 15%,表 2 为体系的具体配比。

表 2 多元复合粉体配比/%
Tab. 2 Multiple composite powder ratio

编号	超细矿渣粉	SAC	石膏	编号	超细矿渣粉	SAC	石膏
A1	100	0	0	A22	30	40	30
A2	90	0	10	A23	25	40	35
A3	80	0	20	A24	40	50	10
A4	70	0	30	A25	30	50	20
A5	65	0	35	A26	20	50	30
A6	80	10	10	A27	15	50	35
A7	70	10	20	A28	40	60	0
A8	60	10	30	A29	30	60	10
A9	55	10	35	A30	20	60	20
A10	80	20	0	A31	10	60	30
A11	70	20	10	A32	5	60	35
A12	60	20	20	A33	20	70	10
A13	50	20	30	A34	10	70	20
A14	45	20	35	A35	20	80	0
A15	60	30	10	A36	10	80	10
A16	50	30	20	A37	0	100	0
A17	40	30	30	A38	0	90	10
A18	35	30	35	A39	0	80	20
A19	60	40	0	A40	0	70	30
A20	50	40	10	A41	0	65	35
A21	40	40	20				

1.2.2 试验测试方法

为探究多元复合无机防腐剂的防腐性能,将水泥基材料的凝结时间、膨胀率以及耐蚀系数作为无机防腐剂的评价指标。三者根据《通用硅酸盐水泥》、《混凝土抗侵蚀防腐剂》、《膨胀水泥膨胀率试验方法》的要求测试。

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》进行干湿循环抗硫酸盐侵蚀性能试验,制备尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,每组为 3 块,在 5%Na₂SO₄ 溶液中以 24 h 为一个循环周期,进行干湿循环试验。循环进行到 60 次、90 次、120 次、150 次时,分别测试混凝土的抗压强度及抗压强度耐蚀系数等指标进行比较分析。

2 结果与讨论

2.1 多元复合无机防腐剂防腐性能分析

根据试验结果,利用 MATLAB 程序建立模型,进行防腐剂组成与性能的运算分析,如图 1 所示。

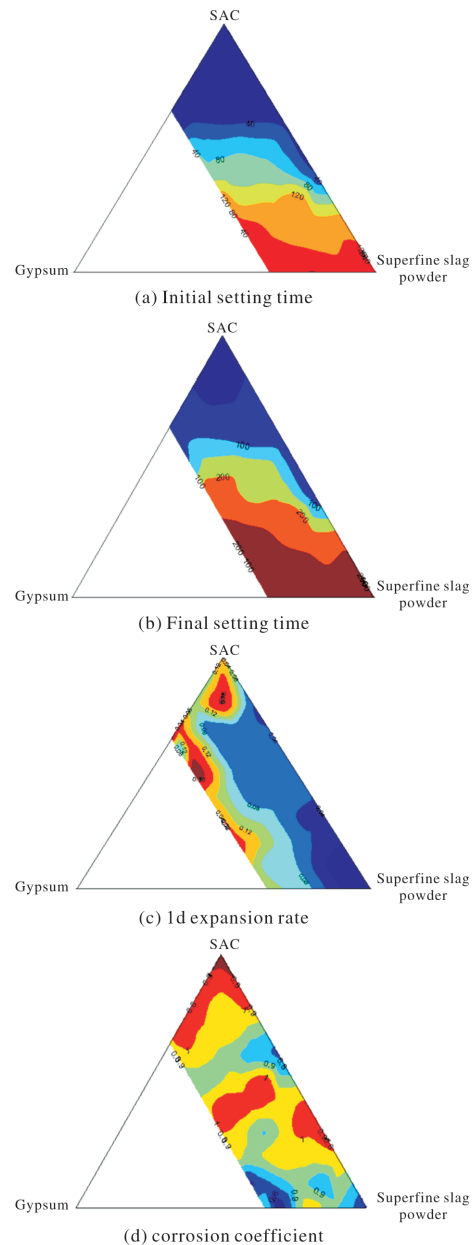


图 1 复合防腐剂不同指标与体系组成的云分析

Fig. 1 Test of different indicators and systems of composite powders

从图 1(a)、(b)中发现 SAC 和石膏对体系凝结时间的影响较大。随 SAC 掺量增加,体系的凝结时间呈缩短趋势,当掺量大于 50%时,初凝时间低于 45 min,不能满足混凝土用胶凝材料的使用要求。在石膏激发条件下,C₃A 与石膏反应生成 AFt 包裹 C₃A 与 SAC,对体系起到缓凝作用。分析图 1(c)可知,当体系中超细矿渣粉含量较高,其他两组分含量较低时,体系的膨胀率不能满足规范要求。随着 SAC 与石膏含量的增加,膨胀率相应增大。可以看出该胶凝体系中石膏对水化初期的膨胀性能有较大影响,一方面石膏本身具有膨胀特性,另一方面它提供大量的 SO₄²⁻ 促使水化

初期生成大量 AFt, 增大体系的膨胀率. 由图 1 (d)可知, SAC 和石膏对耐蚀系数影响较大, 超细矿渣粉对耐蚀系数影响相对较小.

通过对复合防腐剂的凝结时间、膨胀率、耐蚀性能各项指标进行试验, 综合分析发现复合防腐剂能够有效改善水泥基胶凝体系的抗硫酸盐腐蚀性能, 但在超细矿渣粉和 SAC 含量较高的区域不能较好地改善其性能.

2.2 多元复合无机防腐剂对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能分析

综合考虑凝结时间和膨胀率等指标可以看出, 超细矿渣粉和 SAC 含量较高的区域都不适合作为提高水泥基材料抗硫酸盐侵蚀的组分, 因此, 选择合适的多元复合粉体配合比区域是必要的. 如图 2 所示, 选择阴影范围内的配比制备混凝土, 编号为 A10~A25, 以及不含任何激发防腐体系的基准组编号 K, 测试多元复合无机防腐剂对混凝土抗侵蚀性能的影响, 并分析其抗侵蚀机理.

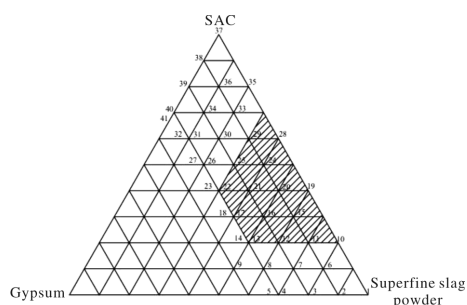


图2 多元复合粉体的体系配合比分布图

Fig. 2 Distribution map with multiple composite powder system

试验混凝土耐久性设计参照《混凝土结构耐久性设计规范》, 满足耐久性要求的混凝土最低强度等级为 C50. 以混凝土抗压强度、耐蚀系数等指标来评价混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能, 平均碳化深度和 Cl^- 扩散系数等耐久性试验按照标准进行, 根据试验结果, 利用 MATLAB 程序建立模型, 进行复合粉体组成与性能的运算分析, 抗压强度与组成关系如图 3, 平均碳化深度、 Cl^- 扩散系数和耐蚀系数与组成关系如图 4、图 5 和图 6.

从图 3 抗压强度分析图中可以看出 28 d 强度均高于 54 MPa, 说明复合防腐剂的加入对胶凝体系具有增强作用, 水化初期增加石膏的比重能够提高体系的早期强度, 但对后期的强度生成中这种作用却有所降低. 矿渣粉中的富硅相物质能够在石膏的激发作用下水化生成沸石类和凝胶相产物^[15], 同时 SO_4^{2-} 与水泥中的 C_3A 反应迅速生成 AFt 填充于孔隙中, 形成致密性结构, 因此, 石

膏的比重增加有利于早期强度的提高. 但是, 随着水化反应的继续进行, 过多的 SO_4^{2-} 并不利于结构强度的形成. 这是因为 AFt 具有膨胀性, 大量的 AFt 在孔隙中膨胀对结构造成微损伤, 损害结构的密实性, 腐蚀性介质通过损伤进入体系内部, 影响结构耐久性. 因此, 石膏的比重应该控制在一定范围内.

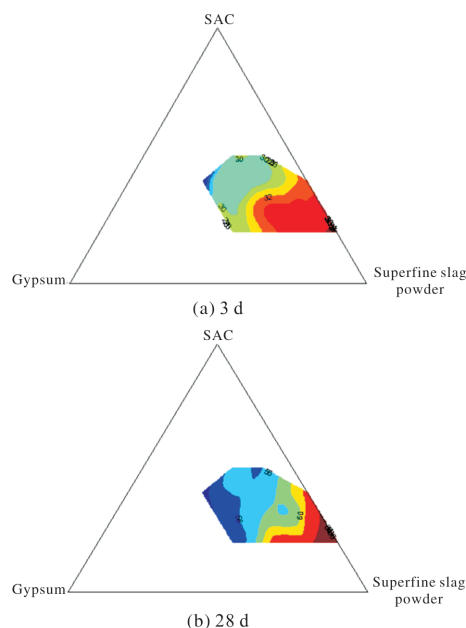
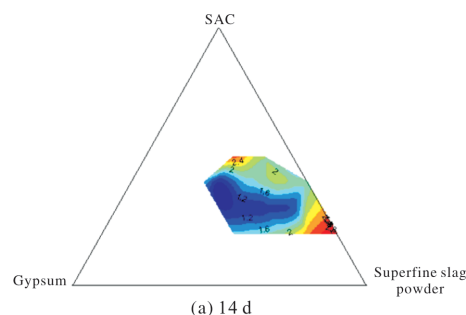


图3 复合防腐剂制备混凝土抗压强度云分析

Fig. 3 Compressive strength test of concrete prepared by composite powders

分析图 4 和图 5 可知添加该无机复合防腐剂的混凝土的碳化深度及 Cl^- 扩散系数, 28 d 碳化深度几乎仍低于 4 mm, Cl^- 扩散系数不超过 $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 与基准混凝土 K 相比有明显提高; 图 6 为无机复合防腐剂制备的混凝土抗压强度耐蚀系数云分析图谱, 基准混凝土强度 90 次循环后开始下降, 而添加防腐剂的混凝土强度在硫酸盐侵蚀初期呈现上升状态, 120 次循环后强度开始明显下降, 这表明加入该防腐剂延缓了混凝土在硫酸盐侵蚀环境中强度下降的时间, 150 个循环结束时抗压强度耐蚀系数仍高于 75%, 其中, A20、A21 仍高于 90%, 达到 KS150 等级.



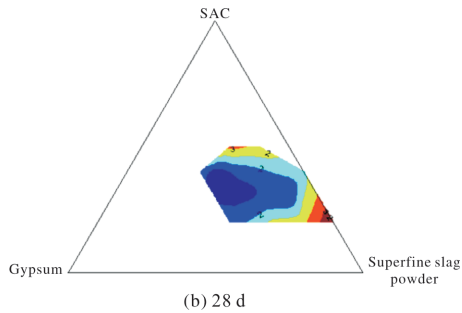


图4 复合防腐剂制备混凝土等碳化深度云分析
Fig. 4 Carbonization test of concrete prepared by composite powders

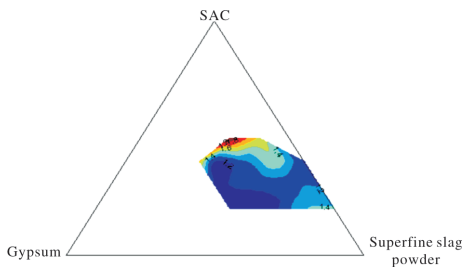


图5 复合防腐剂制备混凝土 Cl^- 扩散系数云分析
Fig. 5 Cl^- diffusion coefficient of concrete prepared by composite powders

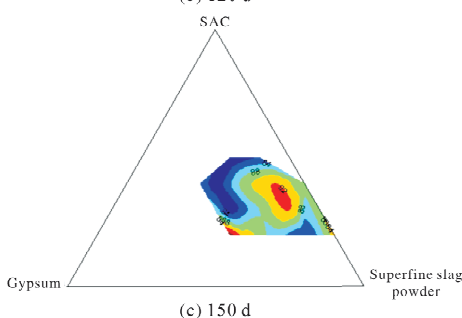
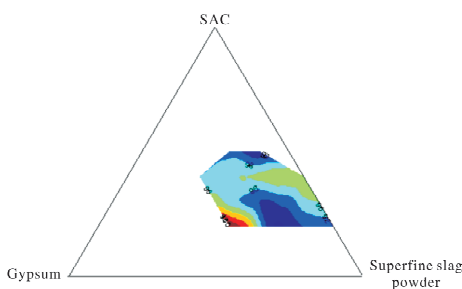
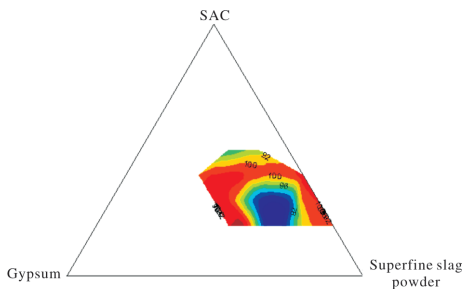


图6 复合防腐剂制备混凝土抗压强度耐蚀系数云分析
Fig. 6 Coefficient of corrosion resistance analysis of concrete prepared by composite powder

混凝土在硫酸钠溶液干湿循环作用下, 强度表现为先上升后下降, 这是因为随着胶凝材料的水化, 内部结构逐渐密实, 水化生成的 AFt 和二水石膏进一步填充微孔密实混凝土结构, 但是随着水化反应的继续进行, 大量 AFt 产生膨胀会破坏微观结构增大裂缝。早期浸泡过程中, 游离水进入混凝土毛细孔, 在硫酸盐的作用下孔隙中生成的 AFt 对混凝土起到一定的密实作用; 烘干过程中, 温度升高使未完全水化的水泥颗粒在孔隙水存在的条件下继续水化, 生成 C-S-H 和水化铝酸钙, 使混凝土毛细孔得到进一步密实, 在两者共同作用下混凝土初期强度有所上升^[16]; 但随着时间的增长, AFt 含量增加, 在孔隙中膨胀产生的应力一旦超过临界值即产生细微裂缝, 内部损伤的不断累积导致后期强度降低^[17], 混凝土发生破坏。

2.3 多元复合无机防腐剂抗硫酸盐侵蚀机理分析

多元复合无机防腐剂各组分的防腐原理如图7所示。超细矿渣粉能够在体系中发挥火山灰活性效应, 消耗水泥中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 生成 C-S-H 凝胶, 减少腐蚀性原料^[18]。SAC 在水化初期生成充分 AFt, 阻止 AFt 向 AFm 转化, 并阻止后期 AFt 型腐蚀^[19], 石膏与 C_3A 反应生成早期 AFt, 产生微膨胀填充结构孔隙, 进一步提高胶凝体系的密实程度^[20]。下文通过实验验证了无机防腐剂各组分的防腐原理, 并进一步阐述了微观防腐机理。

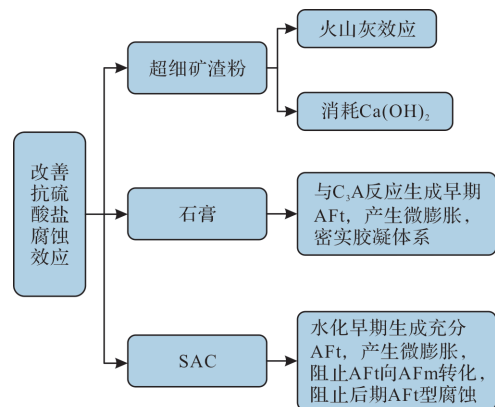


图7 复合粉体防腐机理分析

Fig. 7 Anticorrosive mechanism for composite excitation group

相比于基体部分孔隙率更高, 为腐蚀性产物的生长提供了充足的空间, SO_4^{2-} 扩散到混凝土内部, 骨料周围更容易形成过饱和溶液, 与水泥中的 C_3A 反应生成的 AFt 和石膏在混凝土的浆体-骨料界面区及孔隙中生长并集聚^[21], 当混凝土孔隙和界面区被聚集的腐蚀产物填满后, 由于腐蚀产

物继续生长,体积大于原有的水化产物,从而在聚集点将产生膨胀应力,当膨胀应力大于混凝土的临界抗拉强度时,混凝土内部产生微裂缝,从而加快了腐蚀速度;随着腐蚀的继续,腐蚀产物逐渐增多并在裂纹处生长,混凝土内部产生的微裂缝逐步扩展成为宏观裂缝,进而加速混凝土体积膨胀。

比较之下,掺入无机复合防腐剂的试样在相同侵蚀环境下的微观形貌更加密实,如图8(c)、(d)所示。

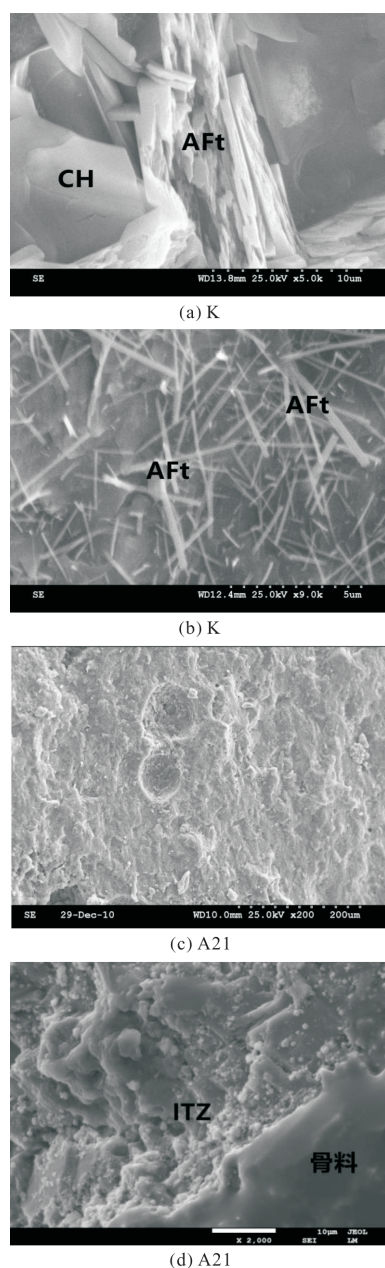


图8 硫酸钠溶液浸泡28个循环K试样及A21试样的SEM微观形态扫描

Fig. 8 SEM picture of the sample K and sample A21 after sulfate solution 28 cycle

从试样的表观结构来看该防腐剂能在一定程

度上提高胶凝体系的抗腐蚀性能。由于复合防腐剂中使用的超细矿渣粉不仅具有火山灰活性,且在体系中发挥“细集料”的填充效应,提高了体系密实度并改善界面区结构;石膏进一步激发矿粉中的硅铝质成分,形成沸石类硅铝酸钙矿物及C-S-H凝胶相物质,结构密实度得到提高,且在一定程度上阻挡 SO_4^{2-} 的扩散,降低腐蚀产物的生长条件。该复合防腐剂的掺入改善了胶凝体系的表观结构,形成更加致密的体系,阻断腐蚀性溶液的侵入路径。

硅酸盐水泥最基本的水化产物中,C-S-H凝胶的数量与水泥和混凝土的耐腐蚀性能密切相关。C-S-H凝胶是组成不定的非化学计量化合物,受水泥组成、环境条件和水化时间等因素的变化而变化^[22,23]。为了从微观角度解释复合防腐剂的防腐机理,将掺入该防腐剂的胶凝体系与基准试样的XRD图谱进行对比分析,如图9所示。

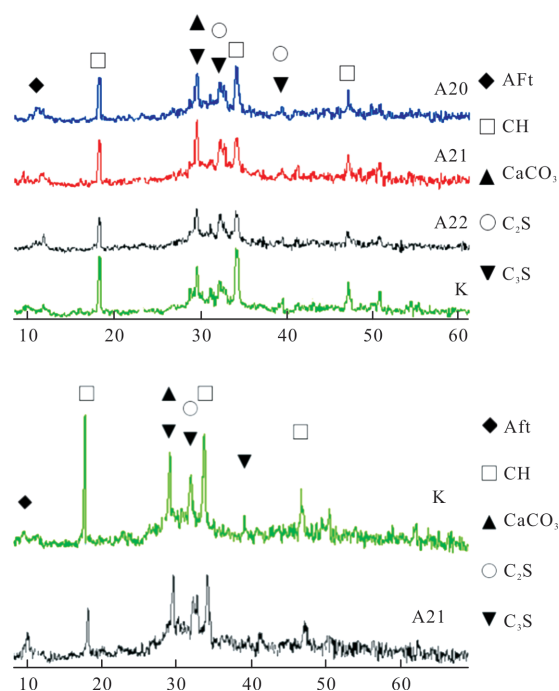


图9 复合防腐剂XRD图谱

Fig. 9 XRD pattern of composite powder

图9(a)标准养护条件下,与基准试件相比,复合防腐剂制备的试样中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的衍射峰强度下降,而AFt衍射峰的强度明显上升。主要因为石膏能够与SAC和水泥中的 C_3A 反应生成AFt,同时能够激发超细矿渣粉的活性,消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成C-S-H凝胶,填充于AFt的晶体骨架间,使结构更加致密,有利于强度的提升。图9(b)在硫酸钠溶液干湿循环条件下,与基准试样相比,复合防腐剂制备的试样 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰强度

下降明显, AFt 的衍射峰强度上升. 在石膏的激发作用下, 超细矿渣粉的表面大部分水化, 玻璃体分解与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C-S-H 凝胶, 石膏也消耗了水泥中的 C_3A 并生成早期 AFt, 同时, 复合防腐剂中的 SAC 可以与 C_3A 反应生成早期 AFt, 阻止 AFt 向 AFm 转化, 并阻止后期次生 AFt 的生成, 而且, 硫酸盐的腐蚀环境在腐蚀早期进一步强化了这一作用, 因此, 在腐蚀发生的初期强度反而有所上升.

3 结论

(1)无机复合防腐剂凝结时间、膨胀率、耐蚀系数等指标均满足标准要求, 且复合防腐剂能够有效改善水泥基胶凝体系的抗腐蚀性能;

(2)添加无机复合防腐剂的混凝土在硫酸钠溶液干湿循环的作用下, 强度表现为先上升后下降. 在经过 150 次循环后, 耐蚀系数仍高于 75%, 满足 KS150 级要求;

(3)无机复合防腐剂的防腐蚀机理为超细矿渣粉在体系中发挥火山灰效应, 并消耗部分减腐蚀性物质; 石膏与 C_3A 反应生成 AFt, 形成更加密实的胶凝体系; 硫铝酸盐水泥熟料在水化早期生成充分的 AFt, 阻止 AFt 向 AFm 转化, 防止后期强度的降低.

参考文献 References

- [1] NAVARRO C, DOEHNE E. Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 24(3):191-209.
- [2] GHOBADI M H, BABAZADEH R. Experimental studies on the effects of cyclic freezing-thawing, salt crystallization, and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandstones[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(3):1001-1016.
- [3] 张迪, 刘斌云, 徐天杰. 防腐剂对混凝土抗硫酸盐性能影响的试验研究[J]. *混凝土*, 2013(10):95-97.
ZHANG Di, LIU Binyun, XU Tianjie. Experimental study on the effect of preservatives on sulfate resistance of concrete[J]. *Concrete*, 2013(10):95-97.
- [4] 李响, 杭美艳, 郝小龙, 等. 抗硫酸盐侵蚀防腐剂对混凝土性能影响[J]. *硅酸盐通报*, 2016(6):1907-1911.
LI Xiang, HANG Meiyang, HAO Xiaolong, et al. Effect of sulfate resistant preservatives on properties of concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016(6):1907-1911.
- [5] 张小平, 刘燕, 李新新, 等. 微膨胀型防腐剂对水泥混凝土耐久性的影响[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(12):15-18, 34.
ZHANG Xiaoping, LIU Yan, LI Xinxin, et al. Effect of micro expansive preservative on durability of cement concrete[J]. *New Building Material*, 2020, 47(12):15-18, 34.
- [6] TANG Z, LI W G, KE G J, et al. Sulfate attack resistance of sustainable concrete incorporating various industrial solid wastes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 218:810-822.
- [7] ARAGON P, RAFAEL A, RUBY M. Alkali-activated concrete based on natural volcanic pozzolan: chemical resistance to sulfate attack[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(5):1~10.
- [8] 丁小富, 李长成, 赵顺增, 等. 混凝土抗侵蚀防腐剂性能研究[J]. *低温建筑技术*, 2020, 42(7):59-61, 73.
DING Xiaofu, LI Changcheng, ZHAO Shunzeng, et al. Study on the performance of corrosion-resistant preservative for concrete[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2020, 42(7):59-61, 73.
- [9] LV X D, DONG Y, WANG R K, et al. Resistance improvement of cement mortar containing silica fume to external sulfate attacks at normal temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258:119630.
- [10] SKAROPOULOU A, SOTIRIADIS K, KAKALI G, et al. Use of mineral admixtures to improve the resistance of limestone cement concrete against thaumasite form of sulfate attack[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 37(1):267-275.
- [11] HU Y Y, MA L L. Effect of surface treatment of polypropylene (PP) fiber on the sulfate corrosion resistance of cement mortar[J]. *Materials*, 2021, 14(13):3690-3704.
- [12] LI Y, YANG X, LOU P, et al. Sulfate attack resistance of re-cycled aggregate concrete with NaOH-solution-treated crumb rubber[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 287(4):123044.
- [13] GUO L, WU Y, DUAN P, et al. Improving sulfate attack resistance of concrete by using calcined Mg-Al- CO_3 LDHs: Adsorption behavior and mechanism[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 232(2):117256.
- [14] HUANG Q, ZHU X H, ZHAO L, et al. Effect of nanosilica on sulfate resistance of cement mortar under partial immersion[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 231:117180.
- [15] 张雄, 鲁辉, 张永娟, 等. 矿渣活性激发方式的研究进展[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 43

- (3):379-384.
ZHANG Xiong, LU Hui, ZHANG Yongjuan, et al. Research progress on activation mode of slag activity [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2011, 43(3): 379- 384.
- [16] 王海龙,董宜森,孙晓燕,等. 干湿交替环境下混凝土受硫酸盐侵蚀劣化机理[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012,46(7):1255-1261.
WANG Hailong, DONG Yisen, SUN Xiaoyan, et al. Degradation mechanism of concrete corroded by sulfate in dry-wet alternating environment[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46 (7): 1255-1261.
- [17] 张璇. 硫酸盐侵蚀环境下混凝土断裂性能试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
ZHANG Xuan. Experimental study on fracture behavior of concrete under sulfate attack environment[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2019.
- [18] 纪宪坤,徐可,赵娟,等. 矿物掺合料对双膨胀源膨胀剂限制膨胀率的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48 (8):38-42.
JI Xiankun, XU Ke, ZHAO Juan, et al. Study on the effect of mineral admixture on the limited expansion rate of double expansion source expander [J]. New Building Material, 2021, 48(8): 38- 42.
- [19] 史琛,何廷树,李益民,等. 粉煤灰对硅酸盐水泥-铝酸盐水泥-石膏三元体系性能的影响[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016,48(3):459-462.
SHI Chen, HE Tingshu, LI Yimin, et al. Effect of fly ash on properties of Portland cement aluminate cement gypsum ternary system [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48 (3): 459- 462.
- [20] 李国新,张歌,史琛,等. 膨胀剂在大体积混凝土环境下的膨胀效能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016,48(2):289-295.
LI Guoxin, ZHANG Ge, SHI Chen, et al. Study on expansion efficiency of expansion agent in mass concrete environment [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48 (2): 289-295.
- [21] 高嵩,李秋义,张巨松. 超细矿渣复合防腐剂对混凝土界面区晶体取向和尺寸影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015,31(1):109-116.
GAO Song, LI Qiuyi, ZHANG Jusong. Effect of superfine slag composite preservative on crystal orientation and size of concrete interface zone [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2015, 31(1): 109-116.
- [22] 王倩. 镁离子对 C-S-H、AFt 和 AFm 的作用及产物 M-S-H 的性能研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.
WANG Qian. Effect of magnesium ion on C-S-H, aft and AFM and properties of product m-s-h [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [23] 余林岑. 水化硅酸钙的制备及其对水泥水化过程的影响[D]. 上海:华东理工大学, 2018.
YU Lincen. Preparation of hydrated calcium silicate and its effect on cement hydration process [D]. Shanghai:East China University of Science and Technology, 2018.

(编辑 沈波)