



# 地下水强酸盐复合腐蚀环境下不同矿物掺合料对水泥砂浆耐腐蚀性能的影响

杨志刚<sup>1</sup>, 蒋正武<sup>2</sup>, 李文婷<sup>2</sup>, 马敬畏<sup>2</sup>

(1. 贵州高速公路集团有限公司, 贵阳 5500047;

2. 同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**模拟了贵州地区地下水强酸盐复合腐蚀环境, 系统研究了粉煤灰、矿渣粉和硅灰 3 种矿物掺合料单掺与复掺对水泥砂浆耐腐蚀性能, 如耐蚀系数、质量变化率、氯离子相对扩散系数的影响规律, 并探讨了地下水强酸盐复合腐蚀环境下水泥砂浆的腐蚀机理。结果表明, 与基准砂浆相比, 单掺与复掺矿物掺合料均提高了砂浆的耐蚀系数, 降低了砂浆后期氯离子相对扩散系数, 但增大了砂浆质量损失率。这 3 项指标从不同角度反映了地下水复合腐蚀环境下水泥砂浆的耐腐蚀性能。

**关键词:**酸盐复合腐蚀; 水泥砂浆; 矿物掺合料; 耐蚀系数; 质量损失率

**中图分类号:** TU528.45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)05-0082-06

## Influence of mineral admixtures on corrosion resistance of cement mortar exposed to strong acid and salt composite groundwater

Yang Zhigang<sup>1</sup>, Jiang Zhengwu<sup>2</sup>, Li Wenting<sup>2</sup>, Ma Jingwei<sup>2</sup>

(1. Guizhou Expressway Group Co., Ltd, Guiyang 5500047, P. R. China; 2. Key Laboratory of

Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, 200092 Shanghai, P. R. China)

**Abstract:** The strong acid and salt composite groundwater in Guizhou province is simulated in the lab, and the influence of single addition and composite addition of mineral admixtures such as fly ash, slag and silica fume etc. on corrosion resistances of cement mortar using the evaluation indexes such as anti-corrosion coefficient, mass change fraction and chloride ion relative diffusion coefficient in the simulated solution is systematically studied. And its anti-corrosion mechanism of cement mortar is discussed. The results show that the single or composite addition of mineral admixtures results in the improvement of anti-corrosion coefficient, the reduction of chloride ion relative diffusion coefficient and the increase of mass change fraction of mortar compared with the control mortar. The three proposed evaluation indexes can evaluate the corrosion resistance of cement mortar exposed to strong acid and salt composite groundwater from different perspectives.

**Key words:** acid and salt composite corrosion; cement mortar; mineral admixtures; anti-corrosion coefficient; mass change fraction

**收稿日期:** 2015-03-16

**作者简介:** 杨志刚(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事建筑材料和结构研究, (E-mail) 215567990@qq.com.

**Received:** 2015-03-16

**Author brief:** Yang Zhigang(1972-), senior engineer, main research interests: building materials and structures, (E-mail) 215567990@qq.com.

随着城市建设和基础设施的大量兴建,地下水对基础工程的影响日渐突出。由于中国独特的自然地理条件和地质构造特征,形成了各地区不同类型的地下水,如硫酸盐型、氯化物型、重碳酸盐型等,地下水环境十分复杂。在贵州地区,尤其在盛产煤的地区,地下水酸性十分强烈,并存在许多对混凝土有侵蚀性的介质,包括酸、碱、硫酸盐、氯盐、压力流水等<sup>[1-3]</sup>。水泥是混凝土中最容易受到侵蚀的部分,而水化产物只能在碱性环境中才能稳定存在<sup>[4]</sup>,酸性水会破坏碱性环境,从而损害混凝土内部结构,硫酸盐能与混凝土中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水化铝酸钙等反应形成膨胀性石膏或钙矾石,使混凝土构件发生剥落破坏<sup>[5]</sup>,同时,地下水的氯离子对钢筋混凝土也会产生锈蚀破坏<sup>[6]</sup>,这种酸性、硫酸盐和氯盐的复合腐蚀严重影响混凝土结构的承载力和使用寿命。

目前,针对混凝土在酸、硫酸盐、氯离子环境下侵蚀破坏已有大量研究,粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料在混凝土耐腐蚀性能改善方面得到充分的论证<sup>[7-14]</sup>,而针对酸、硫酸盐、氯离子共同存在的强腐蚀环境下水泥混凝土的耐腐蚀性能的研究却甚少。

因此,本文针对贵州地区强酸盐复合腐蚀地下水的特性,在试验室模拟出强酸盐复合腐蚀溶液,提出以抗压抗强度耐蚀系数、质量变化率以及氯离子相对扩散系数等作为耐腐蚀性能的评价指标,探究不同矿物掺合料对强酸盐复合腐蚀环境中水泥砂浆的耐腐蚀性能的影响规律,探讨分析了在地下水酸强复合腐蚀溶液对水泥砂浆的腐蚀机理。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料

试验过程中水泥采用海豹牌 P·II 42.5 型硅酸盐水泥;砂采用细度模数为 3.7 的机制砂,石粉含量为 2.28%;粉煤灰为上海地区市售的二级灰;矿渣粉采用宝钢公司生产的 S95 矿渣粉;硅灰采用成都恒瑞源环保材料有限公司生产的硅灰;减水剂为云南天辰化学建材有限公司生产的聚羧酸高效减水剂,固含量为 30%,减水率为 25%~30%;拌合用水为上海地区饮用自来水。

### 1.2 试验

1.2.1 地下水腐蚀溶液模拟 综合分析目前已有的几种加速腐蚀试验方法及根据贵州省凯里地区地下水的组成成分,试验配制模拟地下水复合腐蚀溶液,其复合腐蚀溶液  $\text{pH}=2$  且主要含有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{H}^+$ 、

$\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等离子。模拟地下水复合腐蚀溶液的成分见表 1。

表 1 模拟地下水腐蚀溶液的成分  
Table 1 Simulation of the groundwater corrosion solution composition

corrosion solution composition			%
无水 $\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{NaCl}$	$\text{pH}$ (浓 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 调节)	
10	3.5	2.0	

1.2.2 试件制备 制作尺寸为  $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 160\text{ mm}$  的水泥砂浆试件。试件配合比见表 2,水胶比为 0.5,胶砂比为 1:2.5。试件在标准养护条件下成型 24 h 后拆模,并于标准养护室中进行养护。

表 2 水泥砂浆试件配合比  
Table 2 Proportion of cement mortar specimen

编号	水泥 /%	粉煤 灰/%	矿渣 粉/%	硅灰 /%	B/S	W/B	聚羧酸
							减水剂 /%
J0	100	0	0	0	1:2.5	0.5	0.27
F40	60	40	0	0	1:2.5	0.5	0.27
K40	60	0	40	0	1:2.5	0.5	0.27
S5	95	0	0	5	1:2.5	0.5	0.41
F20K20	60	20	20	0	1:2.5	0.5	0.27
F25K25	50	25	25	0	1:2.5	0.5	0.27
F20K20S5	55	20	20	5	1:2.5	0.5	0.27

1.2.3 试件腐蚀 将成型后的试件标准养护 28 d 后,分别放入清水和模拟地下水中进行浸泡腐蚀,腐蚀溶液的  $\text{pH}$  值每隔两天调节一次。

### 1.2.4 性能测试

1) 抗压和抗折强度。按照 GB/T 17671—1999 《水泥胶砂强度检验方法》测试水泥砂浆试件经 7 d 和 28 d 腐蚀浸泡后的抗折和抗压强度,同时测试未受腐蚀标准养护试件的抗折和抗压强度。每组测试均规定 3 个试件进行强度测试。

2) 质量变化率。为保证测试的一致性,每次测量均规定测量前将试件风干 2 h。且每组测试均规定 3 个试件进行质量测试。所选电子天平为赛多利斯电子天平 BS2202S,精度:0.01 g,量程:1 000 g。

3)  $\text{Cl}^-$  渗透深度。测定  $\text{Cl}^-$  渗透深度用“显色法”。将测试过抗折强度的水泥砂浆试块放入温度为  $105^\circ\text{C}$  的烘箱烘干,在试块的断裂表面喷 0.1 mol/L 铬酸钾 ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) 溶液,放回烘箱烘干,再涂

铬酸钾(K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>)溶液,如此反复进行 2~3 遍;经上述处理后的水泥砂浆试块表面微干后,即涂 0.1 mol/L 硝酸银溶液。此时,被 Cl<sup>-</sup> 侵蚀的水泥砂浆试件由表面向深部观察,靠近表面无色部分是 Cl<sup>-</sup> 渗透部分,内部深红色部分为未被 Cl<sup>-</sup> 渗透的部分。被 Cl<sup>-</sup> 侵蚀的水泥胶砂会呈白色,未被 Cl<sup>-</sup> 侵蚀部分仍为朱红色。测定水泥砂浆试件四边的 Cl<sup>-</sup> 渗透深度,把 4 个数据平均,即为该块水泥砂浆试件的渗透深度。将一组块水泥砂浆试件的 Cl<sup>-</sup> 渗透深度平均,即得该组水泥砂浆试件的 Cl<sup>-</sup> 渗透深度。每组测试均规定 3 个试件进行 Cl<sup>-</sup> 渗透深度测试。

### 1.3 耐腐蚀评价方法

在试验中,分别通过试件的抗压抗折强度耐蚀系数、质量损失率、氯离子相对扩散系数来表征在水和模拟地下水腐蚀溶液环境中砂浆的性能变化。具体计算公式见式(1)、(2)、(3)。耐蚀系数是指同龄期的水泥胶砂试件分别在复合腐蚀溶液中浸泡和在 20 °C 水中养护的强度比。

$$K = \frac{f_{\text{腐蚀液}}}{f_{\text{水}}} \quad (1)$$

式中:K 为抗压(抗折)强度耐蚀系数;f<sub>腐蚀液</sub> 为在模拟地下水腐蚀溶液中浸泡一定龄期后砂浆的抗压(抗折)强度,MPa;f<sub>水</sub> 为在水中浸泡相同龄期砂浆的抗压(抗折)强度,MPa。

$$S = \frac{M_0 - M_{7(28)}}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

质量变化率表征在长期浸泡腐蚀下,水泥砂浆试件质量损失的百分比,其中正值表示质量损失,负值表示质量增加。其中:S 为质量变化率;M<sub>7(28)</sub> 为浸泡 7 d(28 d)的砂浆试件的风干后质量,g;M<sub>0</sub> 为标养后砂浆的风干后质量,g。

$$D = \frac{d_0}{d_{j_0}} \times 100\% \quad (3)$$

氯离子相对扩散系数表示在相同腐蚀龄期下,掺入矿物掺合料的水泥砂浆的氯离子渗透深度与未掺入矿物掺合料的水泥砂浆的氯离子渗透深度的比值。其中:D 为氯离子相对扩散系数;d<sub>0</sub> 为任意试验组在浸泡一定龄期后的氯离子渗透深度,mm;d<sub>j<sub>0</sub></sub> 为 J<sub>0</sub> 基准组在浸泡相同龄期后的氯离子渗透深度,mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 强度耐蚀系数

图 1 表示砂浆试件浸泡腐蚀后的抗压、抗折强

度耐蚀系数的变化情况。从图 1(a)中可以看出,随着浸泡腐蚀龄期的增长,水泥砂浆的抗压强度耐蚀系数逐渐减小。相比于 J<sub>0</sub> 基准组而言,所有掺入矿物掺合料的试验组的抗压强度耐蚀系数均大于 J<sub>0</sub> 基准组,且几乎均大于 1.00。复掺适量矿物掺合料的水泥砂浆抗压强度耐蚀系数大于单掺矿物掺合料的试验组,其中以粉煤灰、矿渣粉和硅灰三元复掺水泥砂浆 F20K20S5 的抗压强度耐蚀系数最大。通过将 F20K20 和 F25K25 两组进行对比可以看出,当矿物总掺量过大后,水泥砂浆的抗压强度耐蚀系数降低。

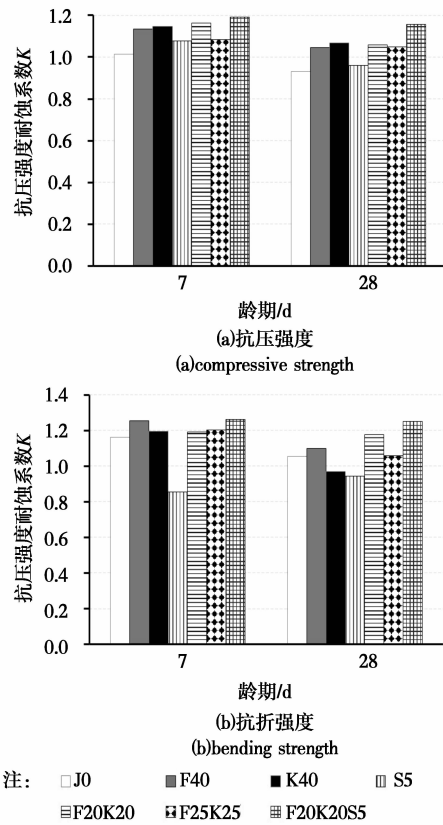


图 1 不同矿物掺合料对砂浆耐蚀系数的影响

Fig. 1 Influence of different mineral admixtures to the Corrosion resistant coefficient of the mortar

从图 1(b)中可以看出,总体上不同矿物掺合料对砂浆抗折强度耐蚀系数的影响规律与抗压强度耐蚀系数的变化规律相似。可以明显地看出,硅灰的掺入对砂浆抗折强度耐蚀系数并无贡献,甚至有所削弱,而粉煤灰与矿渣粉均可以一定程度提高水泥砂浆腐蚀过程中的抗折强度耐蚀系数,复掺适量矿物掺合料的水泥砂浆抗折强度耐蚀系数大于单掺矿物掺合料的试验组,其中,以粉煤灰、矿渣粉和硅灰三元复掺水泥砂浆 F20K20S5 的抗折强度耐蚀系数

最大。

由以上分析可得, 矿物掺合料的掺入改善了水泥砂浆的耐腐蚀性能, 主要原因在于, 矿物掺合料一方面可以降低水泥的用量, 减少  $C_3A$  的含量, 另一方面, 矿物掺合料与水化生成的  $Ca(OH)_2$  发生二次水化, 在降低  $Ca(OH)_2$  含量的同时提高基体的密实度, 提高砂浆的耐腐蚀性能。

从图 1 中可以看到掺入矿物掺合料的试验组的抗压抗折强度耐蚀系数均比基准组的大, 且当矿物掺合料的掺量过大后, 水泥砂浆的抗压抗折强度耐蚀系数降低。这说明, 抗压抗折强度耐蚀系数这项指标可较好地表征不同矿物掺合料对砂浆耐腐蚀性能的影响。

### 2.2 质量变化率

图 2 给出了掺不同矿物掺合料的水泥砂浆分别在水和模拟地下水腐蚀环境中的质量变化率。其中, 质量变化率为负数时, 表示给定龄期下砂浆质量增加, 正数表示质量减少。从图 2(a) 中可以得知, 在水浸泡的砂浆试件表现为质量增加, 且随养护龄期增长, 其质量增加越大; 而在模拟地下水腐蚀溶液中(图 2(b))的所有试验组质量变化率都为正数, 即表现为质量损失。掺矿物掺合料水泥砂浆的试验组质量损失大于基准组 J0, F40 质量损失大于 K40。同时, 通过对比 F20K20 和 F25K25 可以看出, 当矿物总掺量大于 50% 时, 水泥砂浆的质量损失进一步增大。浸泡在复合腐蚀溶液中的水泥砂浆质量损失大小顺序为:  $F25K25 > F40 > K40 > S5 > F20K20 > F20K20S5 > J0$ 。这一结果其规律与以往单因素腐蚀情况不同, 值得研究, 同时, 也说明质量变化率这项指标很难真实反映地下水复合腐蚀环境下掺矿物掺合料的砂浆耐腐蚀性能。

在地下水强酸盐复合腐蚀环境下, 影响水泥砂浆的质量变化率主要有 3 个方面: 第一方面, 在腐蚀的初期, 由于  $H^+$  对水泥砂浆腐蚀, 溶解  $Ca(OH)_2$  晶体, 降低水泥砂浆的 pH 值, 并导致水化产物的分解, 致使砂浆试件的质量下降; 第二方面, 砂浆试件经浸泡腐蚀后, 溶液中的  $SO_4^{2-}$  离子侵入试件内部, 与材料内  $Ca(OH)_2$  等易受侵蚀的矿物组成反应生成钙矾石而固化其中, 致使砂浆更密实, 增加了试件的质量; 另外, 一部分未水化水泥的继续水化及粉煤灰、矿渣粉颗粒的火山灰反应, 吸收了一部分水分, 亦可增加试件的质量。从试验结果来看, 对基准砂浆来说, 第一个方面在腐蚀初期起主要作用, 后期第

二方面占主导; 而对掺矿物掺合料的砂浆而言, 水泥砂浆中掺入矿物掺合料, 导致水化生成物中碱性物质减少, 降低了混凝土的碱储备量, 而且粉煤灰与矿渣的二次水化反应消耗了  $Ca(OH)_2$ , 进一步降低了混凝土中的碱储备量, 可与复合腐蚀溶液中化学物质发生生产钙矾石的量大大减小。因此, 第一个方面酸根离子在腐蚀初期起主导作用, 所以, 掺矿物掺合料水泥砂浆质量损失大于基准组。

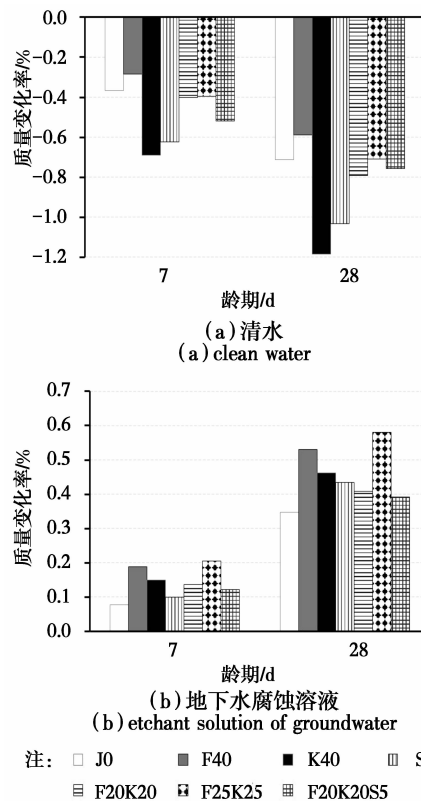


图 2 不同矿物掺合料对不同溶液中砂浆质量损失率的影响

Fig. 2 Influence of different mineral admixtures to the mass-loss rate of the mortar

### 2.3 氯离子相对扩散系数

图 3 给出了地下水腐蚀溶液下不同矿物掺合料对砂浆氯离子相对扩散系数的影响。从图中可以看出, 在龄期为 7 d 时, 矿物外掺料的加入对砂浆的抗氯离子性能并无明显的益处, 氯离子相对扩散系数普遍大于未掺入掺合料的 J0 组; 而当龄期达到 28 d 时, 各组的氯离子相对扩散系数有了显著的降低, K40、F20K20、F20K20S5 三组的氯离子相对扩散系数仅为 J0 组的一半左右。另一方面, 也说明氯离子相对扩散系数可以较好地评价不同矿物掺合料对水泥砂浆抗氯离子扩散性能的影响。

此外, 通过对不同矿物掺合料的水泥砂浆随腐

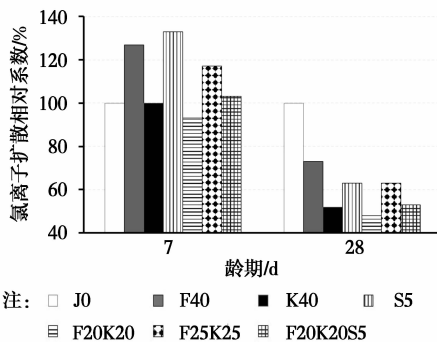


图 3 不同矿物掺合料对地下水腐蚀溶液条件下砂浆氯离子相对渗透系数的影响

Fig. 3 Influence of different mineral admixtures to relative permeability coefficient of chloride ions on condition of groundwater etchant solution

蚀龄期变化的氯离子渗透深度的试验结果进行分析可以得到,在地下水强复合腐蚀环境下, $\text{Cl}^-$ 对水泥砂浆的侵蚀还受到 $\text{H}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 的影响。图4给出了掺不同矿物掺合料砂浆氯离子渗透深度随腐蚀龄期的变化曲线。从图中可以看出,7~28 d的氯离子渗透深度的增长明显小于0~7 d的氯离子渗透深度的增长,即随着腐蚀龄期的增长,氯离子渗透深度增长率减小。显然对于J0基准组,在28 d的浸泡腐蚀龄期, $\text{H}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 的存在降低了氯离子扩散能力。对于掺入矿物掺合料的试验组,由于 $\text{H}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 存在降低了氯离子渗透能力的作用及矿物掺合料对水泥砂浆孔结构的改善作用,其氯离子渗透深度增长率小于J0基准组。

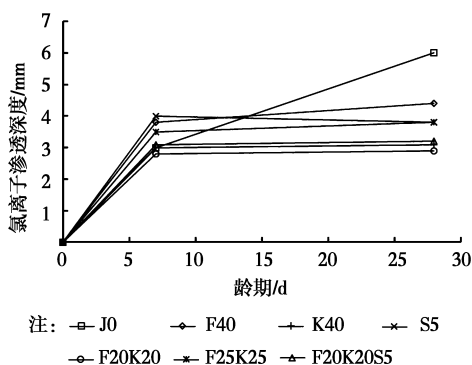


图 4 掺不同矿物掺合料砂浆的氯离子渗透深度随腐蚀龄期的变化曲线

Fig. 4 Change curve of the penetration depth of chloride ion with different mineral admixtures mortar along with corrosion time

强酸盐复合环境下掺掺合料混凝土更长期的耐腐蚀性能有待进一步观察、评估。

## 2.4 地下水强酸盐复合腐蚀环境下水泥砂浆耐腐蚀机理分析

当水泥砂浆与模拟地下水腐蚀溶液接触后,复合腐蚀溶液中的 $\text{H}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 对水泥砂浆材料产生腐蚀,一方面溶液中的 $\text{H}^+$ 与砂浆中水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等作用,使其表面发生变化,导致砂浆强度和质量的降低。但是,另一方面在腐蚀的初期, $\text{SO}_4^{2-}$ 与水泥水化产物生成钙矾石等膨胀性的物质,导致水泥砂浆材料孔径减小,密实度增加,同时,由于 $\text{H}^+$ 溶蚀硬化砂浆表面的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,生成 $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{SO}_4^{2-}$ 结合生成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,阻塞材料的通道,增加密实性,致使其强度和质量的增加。这两方面作用对受强酸盐复合溶液腐蚀的水泥砂浆试件是不同的。因此,水泥砂浆抗压强度和质量的增大或减小关键在于哪种离子起主导作用。从上面的试验结果可知,强酸盐复合腐蚀溶液对砂浆的腐蚀机理在于,早期 $\text{H}^+$ 对水泥砂浆的溶解作用对其质量变化起主导作用, $\text{SO}_4^{2-}$ 对水泥砂浆的侵入生成钙矾石膨胀性物质增加了砂浆的密实度,因此,腐蚀初期水泥砂浆的质量开始减小,同时,因水泥砂浆的密实度增加,故其强度增大。另外,在地下水强酸盐复合溶液中, $\text{Cl}^-$ 对水泥砂浆的侵蚀还受到 $\text{H}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 的影响, $\text{H}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 的存在降低了氯离子扩散能力,主要原因在于在腐蚀初期,硫酸盐扩散到水泥砂浆内部,因膨胀性物质的生成在孔隙和界面区,对砂浆中的孔隙有填充和密实作用,同时,由于 $\text{H}^+$ 溶蚀硬化砂浆表面的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,生成 $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{SO}_4^{2-}$ 结合生成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,阻塞材料的通道,增加密实性,致使氯离子扩散通道在一定程度上被腐蚀产物石膏等膨胀性物质填充,其扩散能力下降。

综上所述,模拟地下水强酸盐复合腐蚀溶液对掺矿物掺合料水泥砂浆的腐蚀作用是 $\text{H}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 对水泥砂浆综合作用结果。

## 3 结论

1) 抗压抗折强度耐蚀系数、质量变化率和氯离子相对扩散系数3项指标从不同角度反映了地下水强酸盐复合腐蚀环境下水泥砂浆的耐腐蚀性能。

2) 掺入适量的矿物掺合料提高了水泥砂浆的强度耐蚀系数,复掺优于单掺矿物掺合料,其中以粉煤灰、矿渣粉和硅灰三元复掺效果最为明显。

3) 地下水腐蚀一定龄期下所有砂浆均表现为质量损失,掺矿物掺合料水泥砂浆早期质量损失大于

基准砂浆。

4)地下水强酸盐复合腐蚀溶液对水泥砂浆的腐蚀作用是  $H^+$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $Cl^-$  对水泥砂浆交互与复合作用。腐蚀初期,  $SO_4^{2-}$  侵入水泥砂浆生成钙矾石而增加了砂浆的密实度,致使水泥砂浆试件的强度增加;  $H^+$  对水泥砂浆的酸溶解作用对其质量变化起主导作用,导致水泥砂浆的质量减小;  $Cl^-$  对水泥砂浆的侵蚀受到  $H^+$  和  $SO_4^{2-}$  的影响,  $H^+$  和  $SO_4^{2-}$  的存在降低了氯离子扩散能力。

#### 参考文献:

- [1] 张小丽. 浅析地下水对混凝土结构的腐蚀及其预防措施[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(1): 272-273.  
Zhang X L. Analysis on the corrosion of groundwater to the concrete structure and the precautions [J]. Sci-tech Information Development and Economy, 2007, 17(1): 272-273. (in Chinese)
- [2] 彭海波, 董同刚, 黄春江. 海工混凝土掺和料的研究与应用[J]. 混凝土世界, 2014(6): 69-72.  
Pen G B, Dong T G, Huang C J. The research and application of marine engineering concrete admixture [J]. World of Concrete, 2014(6): 69-72. (in Chinese)
- [3] 杨礼明. 高性能混凝土的化学腐蚀、盐结晶和应力腐蚀及其微结构演变规律[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
Yang L M. Chemical attack, salt crystallization and stress attack to high performance concrete and the microstructural evolution during corrosion process [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [4] 蒋正武, 梅世龙. 机制砂高性能混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [5] 吴科如, 张雄. 土木工程材料[M]. 上海: 同济大学出版社, 2008.
- [6] 汉斯·博尼. 钢筋混凝土结构的腐蚀[M]. 蒋正武, 龙广成, 孙振平. 译. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] 慈军, 刘健, 王建祥. 矿渣微粉高性能混凝土的抗侵蚀试验研究[J]. 混凝土, 2010(5): 21-24.  
Ci J, Liu J, Wang J X. Experimental research on anti-corrosion of slag high performance concrete [J]. Concrete, 2010(5): 21-24. (in Chinese)
- [8] Makhloufi Z, Kadri E H, Bouhicha M. Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution [J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(3): 497-504.
- [9] 王凯, 马保国, 张泓源. 矿物掺合料对混凝土抗酸雨侵蚀特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2013(3): 416-421.  
Wang K, Ma B G, Zhang H Y. Effect of mineral admixtures on deterioration of concrete under acid rain attack [J]. Journal of Building Materials, 2013(3): 416-421. (in Chinese)
- [10] Al-Dulaijan S U, Maslehuddin M, Al-Zahrani M M, et al. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4/5): 429-437.
- [11] 郭会芳. 掺粉煤灰、硅灰混凝土抗硫酸侵蚀性能的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.  
Guo H F. The experiment research on anti-corrosion by sulfuric acid of fly ash concrete and silica fume concrete [D]. Kun Ming: Kunming University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 闫乙鹏, 山宏宇, 叶青, 等. 复掺矿物掺合料海工混凝土氯离子抗渗性机理分析及寿命预测[J]. 公路, 2012(10): 148-152.  
Yang Y P, Shang H Y, Ye Q, et al. Mechanism analysis of chloride ion penetration resistance of marine concrete and its durability life prediction [J]. Highway, 2012(10): 148-152. (in Chinese)
- [13] 霍俊芳, 王婷. 复掺矿物掺合料混合骨料混凝土微观抗冻性研究[J]. 商品混凝土, 2013(8): 90-92.  
Huo J F, Wang T. Study of mixed mineral admixtures on microstructure in frost resistance of mixed aggregate concrete [J]. Ready-Mixed Concrete, 2013(8): 90-92. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)