

电脉冲用于混凝土抗硫酸盐侵蚀加速试验方法

王冲¹, 刘焕芹², 罗遥凌¹, 张洪波¹

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 实际工程中水泥混凝土硫酸盐侵蚀过程缓慢, 常采用加速试验方法评价其抗硫酸盐侵蚀性能。通过分析现有方法的特点, 提出基于电脉冲原理的混凝土抗硫酸盐侵蚀性能加速试验方法。测试了不同水灰比、浸泡方式与粉煤灰掺量的混凝土在不同侵蚀条件下的抗蚀系数, 利用扫描电镜分析了电脉冲作用下硫酸盐侵蚀机理。试验结果表明, 电脉冲加速了混凝土的硫酸盐侵蚀, 基于电脉冲原理的混凝土抗硫酸盐性能加速试验方法技术上可行。

关键词: 混凝土抗硫酸盐侵蚀; 电脉冲; 加速试验方法

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Accelerated Test Method of Sulfate Attack Resistance of Concrete Based on Electrical Pulse

WANG Chong¹, LIU Huanqin², LUO Yaoling¹, ZHANG Hongbo¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Some accelerated test methods are usually adopted to measure the sulfate attack resistance of concretes due to a very slow sulfate attack process in actual engineering. By taking account of the characteristics of the accelerated methods in application and the research of cement concrete nowadays, a new accelerated test method for assessment of the sulfate attack resistance was proposed based on electrical pulse. Corrosion resistant coefficients of concretes with different water/cement ratios, different soaked ways and fly ash replacement of cement were measured under different corrosion conditions. The mechanism of sulfate attack in the case of electrical pulse was tested by using scanning electron microscope (SEM). The test results show that the sulfate attack process of concrete is accelerated under the action of the electrical pulse. Accelerated test method of sulfate attack resistance based on electrical pulse is feasible.

Key words: sulfate attack resistance; electrical pulse; accelerated test method

水泥混凝土由于水化产物与多孔性结构等原因, 易受空气、地下水及土壤中的有害成分的化学侵蚀, 造成其强度和使用寿命等性能下降。在诸多化学腐蚀类型中, 硫酸盐侵蚀是影响混凝土耐久性的一个重要因素。实际工程中硫酸盐侵蚀是一个缓慢的物理化学反应过程, 混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力一般采用加速试验方法进行评估。

目前常用方法包括小尺寸试件法、提高侵蚀溶液温度或浓度、干湿循环法等, 我国国家标准《水泥抗硫酸盐侵蚀测试方法》(GB/T749—2008) 与美国“Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate” (ASTM C452) 分别采用 10 mm × 10 mm × 30 mm 和 25 mm × 25 mm × 285 mm 的小尺寸试件^[1]。小尺寸试件方法的缺点在于, 由于试件体积小, 成型和侵蚀环境条件或试验条件的微小变化都可能对试验结果产生显著影响, 从而试验结果的离散性很大^[2]。国家现行标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082—2009) 采用的方法是提高侵蚀液温度与浓度及干湿循环共同作用的方法^[3]。干湿循环作用比较接近实际工程中混凝土结构的硫酸盐侵蚀破坏特征; 升高侵蚀液温度, 加快了 SO₄²⁻ 扩散速度, Santhanam 等人^[4] 证实了侵蚀溶液温度升高会加速混凝土硫酸盐的侵蚀。不过, 提升侵蚀溶液温度改变了混凝土硫酸盐侵蚀机理, 硫酸盐侵蚀过程中各种水化产物必须在一定质量分数的石灰溶液中才能稳定存在, 提高温度会增大各种水化产物的溶解度, 因而达不到预期效果^[5]; 此外, 水泥混凝土受到高温作用也会引起水化产物组成与结构的变

收稿日期: 2013-01-13

基金项目: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2012491211)

第一作者: 王冲(1972—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为水泥混凝土材料。E-mail: chongwang@cqu.edu.cn

化. Elkhadiri 等^[6]的研究表明,混凝土处于高温下(40~80 °C)的硫酸盐环境时,水化硅酸钙聚合度增加,混凝土强度增加. 游宝坤等^[7]认为,加热干燥过程中,混凝土组分及侵蚀产物分解,当被加热到 80 °C 时试件会产生膨胀,改变了硫酸盐侵蚀机理. 杨鼎宜等^[8]的研究表明,干燥环境下即使是 40 °C 的温度,钙矾石晶体也会出现分解现象. 此外,混凝土在 80 °C 的升温 and 降温过程伴随干湿变化所受的热震作用也会引起混凝土的结构破坏,从而影响对混凝土抗硫酸盐侵蚀能力的判定. 加速侵蚀试验方法还有 Cohen 等^[9]提出的压蒸法,该方法主要用于混凝土预制构件的抗硫酸盐侵蚀性能测试.

总体而言,尽管当前水泥混凝土材料的抗硫酸盐侵蚀性能测试方法很多,但目前还没有一种试验方法能快速而真实地揭示水泥基材料硫酸盐侵蚀破坏机理,尤其是用于长期预测水泥基材料处于硫酸盐环境中的性能^[5]. 鉴于以上原因,需要研发新的水泥混凝土抗硫酸盐侵蚀快速试验方法.

1 电脉冲原理及其应用现状

利用电场作用促使离子快速渗入混凝土中的研究与应用已经比较广泛. 文献^[10-13]研究了 Cl^- 在电场作用下的迁移与扩散, Saito 等^[14]研究了 Na^+ , Ca^{2+} 等阳离子在电场下的渗透. 不过,利用电场作用加速 SO_4^{2-} 迁移的研究报道不多. 可检索到的文献只有 Lorente 等^[15]分析比较了电场作用与自由扩散下的 SO_4^{2-} 迁移与硫酸盐腐蚀化学反应.

与一般的电场作用不同的是,本研究将利用电脉冲加速硫酸盐离子向混凝土的迁移. 电脉冲的技术原理如图 1 所示,在混凝土两端施加的是如图 2 所示的脉冲电压. 与一般的电场作用相比,利用电脉冲可获得更快的液体与离子迁移. 根据电动力学可知,液相中的带电离子从电场中获得的加速度较大,处于“热态”,带电离子迁移迅速. 随着脉冲的变化,迁移的带电离子就像工作的冲击钻头一样快速通过液体. 随着脉冲值变化,离子获得的推动力也在变化;带电离子在通过水泥混凝土孔隙时,孔结构表面电场的作用使离子经常调整受力方向与运动方向,就像筛分的物料在通过筛子时必须要有振动一样,使迁移的离子能够更有效地通过水泥混凝土孔结构. 随着脉冲电的有无与大小变化,加速了离子的迁移. 美国最早将电脉冲用于混凝土结构的防潮防

用. 在中国,电脉冲已被研究用于混凝土的抗渗防潮^[18-19].

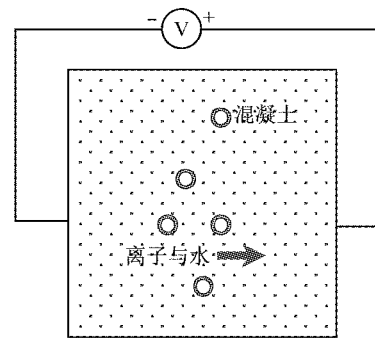


图 1 电脉冲用于混凝土的原理图

Fig. 1 Principle diagram of electrical pulse used in concretes

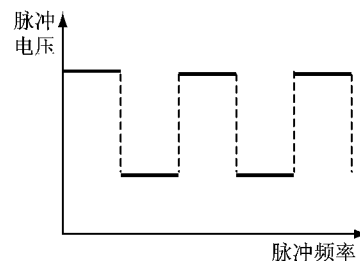


图 2 电脉冲波形图

Fig. 2 Oscillogram of electrical pulse

本文的目的是利用电脉冲促进 SO_4^{2-} 向水泥混凝土内部的迁移,促进 SO_4^{2-} 对水泥混凝土的腐蚀反应,研究将电脉冲用于快速评价混凝土抗硫酸盐侵蚀性能方法的技术可行性.

2 试验原材料及试验方法

2.1 试验原材料

2.1.1 胶凝材料

水泥采用重庆拉法基水泥有限公司生产的 P. O 42.5R 普通硅酸盐水泥,粉煤灰采用重庆珞璜电厂 II 级干排粉煤灰,水泥与粉煤灰的化学成分(质量分数)见表 1.

表 1 水泥与粉煤灰的化学成分(质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of cement and fly ash

材料	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	总碱量	烧失量
水泥	21.30	2.53	5.79	60.15	2.35	2.54	0.72	3.66
粉煤灰	40.08	15.35	25.31	3.41	0.49	1.31	1.10	3.26

2.1.2 集料

粗集料为重庆歌乐山石灰石碎石,试验中 5~10 mm 碎石与 10~20 mm 碎石按 3:7 质量比掺入;细

集料采用湖南洞庭湖中砂,含泥量为 1.2%,细度模数 2.3.

2.1.3 化学试剂

无水硫酸钠,纯度为 95%,工业纯;氢氧化钠,纯度 99%,工业纯,化学试剂皆由重庆东方化玻有限公

司提供.

2.2 混凝土试验配合比

试验所用混凝土各原材料用量见表 2,水胶比为水与胶凝材料(水泥和粉煤灰)的质量比.

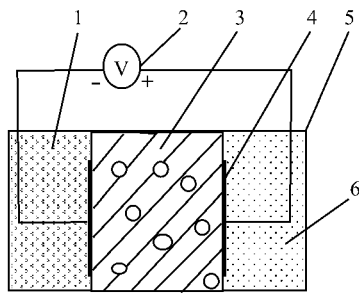
表 2 试验混凝土配合比
Tab.2 Mix proportion of concretes

序号	水泥/(kg·m ⁻³)	粉煤灰/(kg·m ⁻³)	砂/(kg·m ⁻³)	碎石/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	水胶质量比
1	633	0	602	1 025	190	0.30
2	475	0	660	1 125	190	0.40
3	380	0	696	1 184	190	0.50
4	380	95	660	1 125	190	0.40
5	285	190	660	1 125	190	0.40

2.3 试验方法

2.3.1 电脉冲试验

电脉冲作用下混凝土的硫酸盐侵蚀示意图 3,试验装置示于图 4.



1—Na₂SO₄ 溶液; 2—脉冲发生器; 3—混凝土试件;
4—多孔电极板; 5—试验箱; 6—NaOH 溶液

图 3 电脉冲侵蚀试验示意图

Fig.3 Schematic diagram for test of sulfate attack by action of electrical pulse

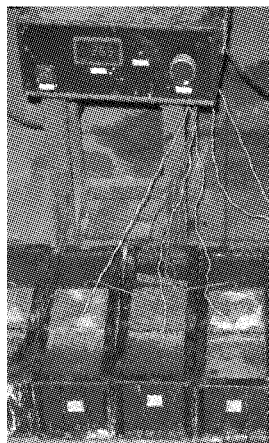


图 4 电脉冲侵蚀试验装置

Fig.4 Test-up for sulfate attack by action of electrical pulse

将混凝土试件直接成型于试验箱中间,试件尺寸 100 mm×100 mm×100 mm,试件与试验箱一起

标准养护至 28 d 后进行电脉冲作用下的侵蚀试验;混凝土阴极端为质量浓度 5%的 Na₂SO₄ 溶液,阳极端为质量浓度 5%的 NaOH 溶液.电极板为多孔金属板.试验脉冲电压为 30 V,脉冲频率分别为 20 s.电脉冲作用时间为 14 d.试验中,将相同配合比的混凝土试样标准养护 28 d 后,分别置于水中养护与质量浓度 5%硫酸钠溶液中进行常规侵蚀以作对比.

实验室环境温度为(20±2)°C.

2.3.2 抗硫酸盐侵蚀指标

试验中采用抗蚀系数表征混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能.抗蚀系数为硫酸盐侵蚀后混凝土的抗压强度值与相同龄期、相同温度下水中养护的混凝土抗压强度值之比,表达式为

$$K = R_2/R_1$$

式中:K 为抗蚀系数;R₂ 为试件在不同侵蚀条件下混凝土的抗压强度,MPa;R₁ 为相同龄期水中养护的抗压强度,MPa.

2.3.3 扫描电镜试验

扫描电镜试验采用净浆试样,所用原材料和灰比(水胶比)与混凝土试样相同.试样按规定条件侵蚀至规定时间,破碎试样,选取试件中心约 1 cm³的碎块,立即用丙酮反复冲洗、浸泡 24 h 以终止水化,在 60 °C 下干燥至恒重,置于真空下镀膜,然后观测试样.扫描电镜试验在重庆大学材料学院中心实验室完成.

3 试验结果及讨论

3.1 不同侵蚀条件下混凝土的抗蚀系数

3.1.1 不同水灰比时混凝土抗蚀系数

将不参加任何矿物掺合料的混凝土,在水灰比(水与水泥的质量比)为 0.30,0.40 和 0.50 时分别

对在电脉冲、硫酸盐溶液常规侵蚀和水中养护的混凝土抗压强度进行了测试,计算得到的抗蚀系数如图 5 所示。

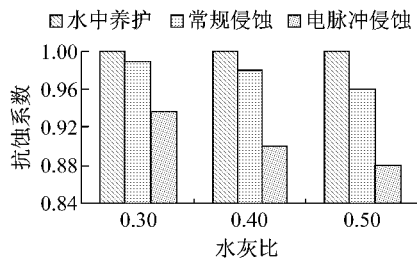


图 5 不同水灰比时混凝土的抗蚀系数

Fig. 5 Corrosion resistant coefficients of the concrete at different water-cement ratios

图 5 中,水中养护时混凝土的抗蚀系数皆为 1,硫酸盐溶液常规侵蚀条件下抗蚀系数均小于 1,表明在硫酸盐溶液中侵蚀 14 d 后,混凝土结构都受到影响,导致强度下降,因而抗蚀系数降低.与之对比明显的是,电脉冲作用下,混凝土受到硫酸盐侵蚀后的抗蚀系数更低,显示出因为电脉冲的作用,受到硫酸盐侵蚀的混凝土结构劣化更趋严重而导致抗压强度进一步降低,表明电脉冲加速了混凝土的硫酸盐侵蚀。

结果也显示,无论是硫酸盐溶液常规侵蚀,还是电脉冲作用下的硫酸盐侵蚀,水灰比从 0.30 增加至 0.50 时,混凝土抗蚀系数皆随之降低,其原因是水灰比增加,混凝土结构疏松多孔而更容易遭到硫酸盐侵蚀破坏。

3.1.2 不同浸泡方式下的混凝土抗蚀系数

文献[20]表明,处于干湿循环环境中的混凝土受到硫酸盐和盐结晶的侵蚀要比处于持久湿环境中的混凝土更加严重.本研究将水灰比为 0.40,不掺加粉煤灰的混凝土按全浸泡与半浸泡两种方式,分别置于水中养护、硫酸盐溶液常规侵蚀和电脉冲作用下的硫酸盐侵蚀 3 种环境中,测试了其抗蚀系数,所得结果见图 6。

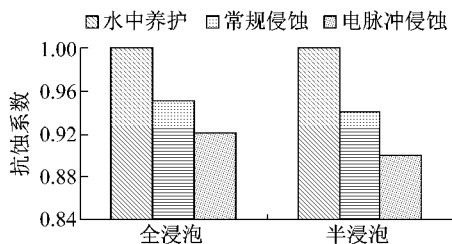


图 6 不同浸泡方式时混凝土的抗蚀系数

Fig. 6 Corrosion resistant coefficients of the concrete by different soaking ways

图 6 结果显示,与全浸泡方式相比,半浸泡条件下硫酸盐常规侵蚀与电脉冲下的硫酸盐侵蚀的抗蚀系数皆比全浸泡条件下的抗蚀系数小,显示在半浸泡下硫酸盐的侵蚀加剧了混凝土的结构劣化而导致强度降低,这与文献[21-22]的研究结果一致。

图 6 结果亦显示,全浸泡与半浸泡两种方式下,电脉冲作用下的硫酸盐侵蚀抗蚀系数皆比硫酸盐常规侵蚀作用下的抗蚀系数小,表明电脉冲作用下混凝土的硫酸盐侵蚀破坏更为严重,再次显示电脉冲具有加速混凝土硫酸盐侵蚀破坏的作用。

3.1.3 粉煤灰对混凝土抗蚀系数的影响

众所周知,粉煤灰等活性矿物掺合料可以提高混凝土抗硫酸盐侵蚀能力.本论文试验中,将水胶比为 0.40,粉煤灰掺量为 0,20% 和 40% 的混凝土分别置于水养护、硫酸盐常规侵蚀和电脉冲作用下的硫酸盐侵蚀 3 种环境中,分别测试其抗蚀系数,所得结果示于图 7。

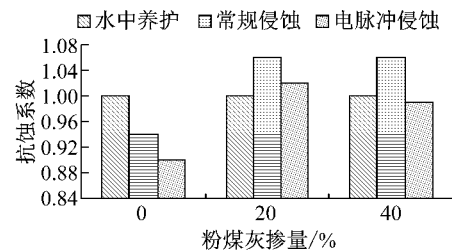


图 7 不同粉煤灰掺量时混凝土的抗蚀系数

Fig. 7 Corrosion resistant coefficients of the concrete with different fly ash replacements of cements

图 7 结果显示,与不掺粉煤灰的混凝土相比,粉煤灰掺入后,硫酸盐溶液常规侵蚀条件下的混凝土抗蚀系数皆大于 1,表明粉煤灰的掺入增加了混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力,且因为硫酸盐进入混凝土后激发了粉煤灰的活性,从而表现出抗蚀系数大于 1.而在电脉冲作用下的硫酸盐侵蚀环境中,不同掺量的粉煤灰抗蚀系数表现不同:不掺粉煤灰时电脉冲侵蚀条件下抗蚀系数 $K=0.90$;掺入粉煤灰,电脉冲侵蚀下抗蚀系数显著增加,同样表明粉煤灰的掺入增加了混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力.粉煤灰掺量 20% 时,抗蚀系数大于 1,而粉煤灰掺量为 40% 时抗蚀系数小于 1.表明过多的活性矿物掺料并未改善混凝土抗硫酸盐侵蚀性能,文献[2]的研究也证实了这一结果。

3.2 电脉冲作用下混凝土硫酸盐侵蚀机理分析

利用扫描电镜分析了电脉冲作用下混凝土的硫酸盐侵蚀机理.试验中,将不加粉煤灰与掺入 20% 粉

煤灰的净浆试样,分别在水灰比(水与水泥的质量比)或水胶比(水与胶凝材料总量的质量比)为 0.30, 0.40 和 0.50 时分别置于硫酸盐溶液常规侵蚀和电脉冲作用下的硫酸盐侵蚀条件下,待试验结束后利用扫描电镜分析试样的微观结构。

3.2.1 不掺粉煤灰不同侵蚀条件下的硫酸盐侵蚀

不掺粉煤灰,水灰比分别为 0.30, 0.40 和 0.50 时,净浆试样在硫酸盐溶液常规侵蚀与电脉冲作用侵蚀下的扫描电镜(SEM)试验结果分别示于图 8 和图 9。

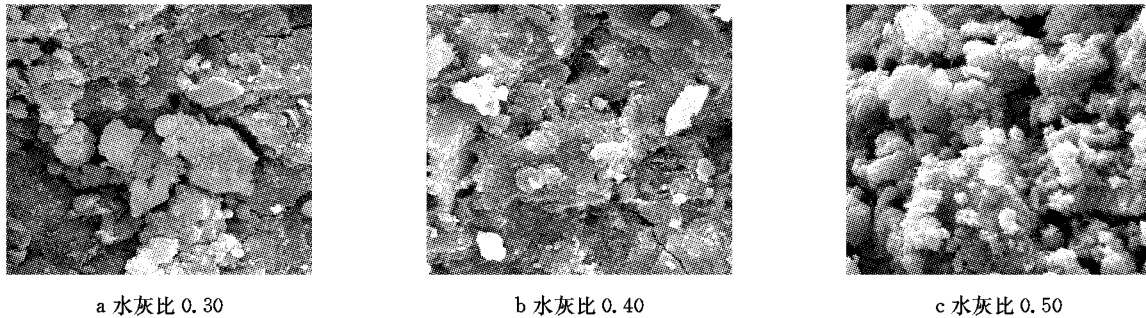


图 8 硫酸盐溶液常规侵蚀下扫描电镜测试结果

Fig.8 SEM profiles of the samples under the action of conventional sulfate erosion

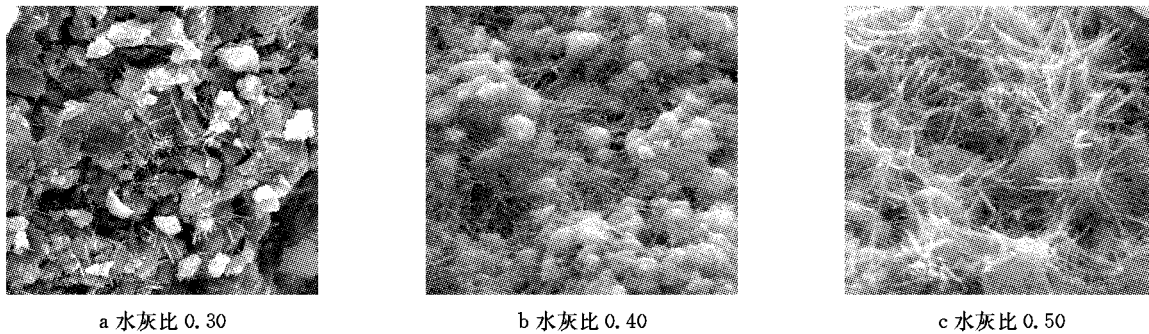


图 9 电脉冲作用下硫酸盐侵蚀扫描电镜测试结果

Fig.9 SEM profiles of the samples under the action of EOP sulfate erosion

图 8 与图 9 试验结果显示,图 8 所示硫酸盐溶液常规侵蚀条件下,并未观察到明显的钙矾石生成物;与之鲜明对比的是,图 9 中电脉冲作用下,钙矾石生成非常明显,且钙矾石生成量随着试样水灰比的增大而增加明显.试验结果表明,在电脉冲作用下, SO_4^{2-} 更容易进入混凝土中生成钙矾石腐蚀产物,因而宏观力学性能上表现为抗蚀系数下降.结果

也表明,混凝土的水灰比增加,试样结构越疏松, SO_4^{2-} 在电场作用下更容易快速迁移进入混凝土内部,从而生成了更多的钙矾石腐蚀产物。

3.2.2 掺入粉煤灰不同侵蚀条件下的硫酸盐侵蚀

掺入 20% 粉煤灰后,水胶比分别等于 0.30, 0.40 和 0.50 的净浆试样的扫描电镜试验结果示于图 10 和图 11。

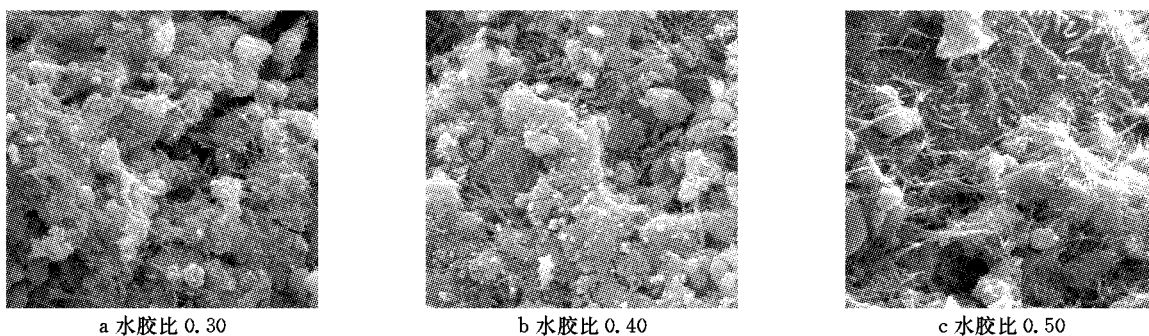


图 10 常规硫酸盐侵蚀下的扫描电镜测试结果

Fig.10 SEM profiles of the samples under the action of conventional sulfate erosion

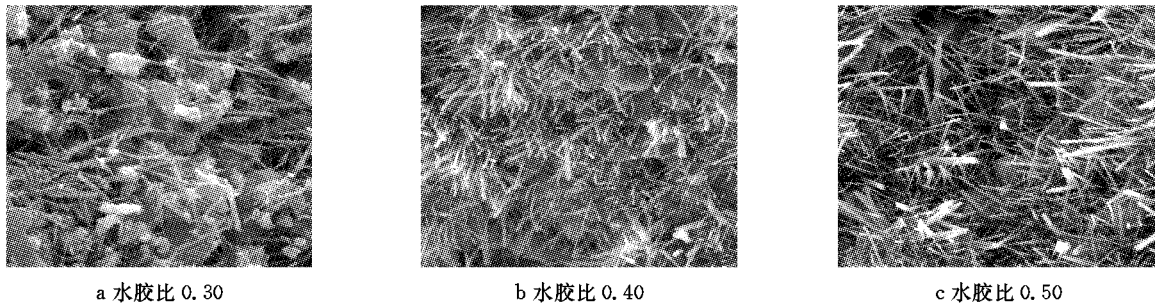


图 11 电脉冲作用下硫酸盐侵蚀扫描电镜测试结果

Fig.11 SEM profiles of the samples under the action of EOP sulfate erosion

从图 10 和图 11 两种不同的硫酸盐侵蚀条件下试样的扫描电镜测试结果可以看出,电脉冲作用下,图 11 中钙矾石腐蚀产物明显比图 10 中硫酸盐溶液常规侵蚀的试样中的钙矾石腐蚀产物多,同样表明电脉冲加快了 SO_4^{2-} 向混凝土中的迁移,加速了钙矾石腐蚀产物的生成.水胶比从 0.30 增大至 0.50 时,图 11 中钙矾石的生成量增加,其主要原因与不掺粉煤灰一样,也是由于水胶比越大,混凝土结构越疏松多孔, SO_4^{2-} 越容易迁移进入混凝土内部,从而对混凝土结构产生腐蚀影响.

4 结论与讨论

(1)抗蚀系数与扫描电镜试验结果表明,电脉冲加速了混凝土的硫酸盐侵蚀,基于电脉冲原理的混凝土抗硫酸盐性能加速试验方法技术可行.

(2)尚有诸多问题需要进一步研究,包括:电脉冲下硫酸盐对水泥石的腐蚀是否能代表混凝土实际服役环境条件下的硫酸盐化学侵蚀,以及电脉冲作用下 SO_4^{2-} 迁移与腐蚀化学之间的相互影响等.

参考文献:

- [1] 封孝信,李秀娟.抗硫酸盐侵蚀测试方法评述[J].河北理工学院学报,2004,26(2):92.
FENG Xiaoxin, LI Xiujuan. Comments on testing methods of sulfate attack resistance [J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2004, 26(2): 92.
- [2] 高礼雄.掺矿物掺合料水泥基材料的抗硫酸盐侵蚀性能研究[D].北京:中国建筑材料科学研究院,2005.
GAO Lixiong. Study on resistance to sulfate attack on cement based composites materials containing mineral additive [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2005.
- [3] 冷发光,戎君明,丁威,等. GB/T50082—2009 普通混凝土长期性能与耐久性能试验方法[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
LENG Faguang, RONG Junming, DING Wei, et al. GB/T50082-2009 Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building, 2010.
- [4] Santhanam M, Cohen M D, Olek J. Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(4): 585.
- [5] 曹征良,袁雄洲,邢锋,等.美国混凝土硫酸盐侵蚀试验方法评析[J].深圳大学学报理工版,2006,23(3):201.
CAO Zhengliang, YUAN Xiongzhou, XING Feng, et al. American test methods for evaluating the durability of cement based materials against external sulfate attack[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2006, 23(3): 201.
- [6] Elkhadiri I, Puertas F. The effect of curing temperature on sulphate-resistant cement hydration and strength [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(7): 1331.
- [7] 游宝坤,席耀忠.钙矾石的物理化学性能与混凝土的耐久性[J].中国建材科技,2002(3):13.
YOU Baokun, XI Yaozhong. Physicochemical property of ettringite and durability of concrete[J]. Building Materials of China, 2002(3): 13.
- [8] 杨鼎宜,孙伟,刘志勇.钙矾石晶体热分解的动力学[J].硅酸盐学报,2007,35(12):1641.
YANG Dingyi, SUN Wei, LIU Zhiyong. Thermal decomposition kinetics of ettringite crystal[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(12): 1641.
- [9] Cohen M D, Mather B. Sulfate attack on concrete: research needs [J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(1): 62.
- [10] Yang C C, Liang C. H. The influence of medium-high temperature on the transport properties of concrete by using accelerated chloride migration test [J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 114(2/3): 670.
- [11] Yang C C, Weng S H. Effect of 95 °C temperature on the chloride-migration of concrete using electrical field [J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 125(3): 876.
- [12] ZHANG Yunsheng, SUN Wei, LIU Zhiyong, et al. One and two dimensional chloride ion diffusion of fly ash concrete under flexural stress [J]. Journal of Zhejiang University—Science A: Applied Physics & Engineering, 2011, 12(9): 692.
- [13] 胡少伟,朱雅仙,游日,等.外加电场作用下氯离子在钢筋混凝土结构中的扩散模拟[J].水运工程,2010(8):7.
HU Shaowei, ZHU Yaxian, YOU Ri, et al. Diffusion simulation analysis of chloride ion penetration in reinforced concrete

- structure[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2010(8): 7.
- [14] Saito H, Deguchi A. Leaching tests on different mortars using accelerated electrochemical method [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(11): 1815.
- [15] Lorente S, Yssorche-Cubaynes M P, Auger J. Sulfate transfer through concrete; migration and diffusion results [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2011, 33 (7): 735.
- [16] Hock V, Morefield S, Bushman J B, et al. Evaluating the performance of the electro-osmotic pulse basement dewatering system [J]. *Materials Performance*, 2006, 45(1): 24.
- [17] Hock V, Morefield S, McInerney M, et al. Control of water migration through concrete using electro-osmosis [J]. *Materials Performance*, 2005, 44(7): 42.
- [18] 王冲, 刘焕芹, 林鸿斌, 等. 电脉冲用于混凝土结构抗渗防潮技术研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(2): 132.
WANG Chong, LIU Huanqin, LIN Hongbin, et al. Seepage resistance and moisture proof of concrete using electro-osmotic pulse[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(2): 132.
- [19] 程丽华, 初元璋, 韩静涛. 地下与半地下建筑电脉冲防潮技术初探 [J]. *中国建筑防水*, 2006(3): 16.
CHENG Lihua, CHU Yuanzhang, HAN Jintao. Discussion on the electro-osmotic pulse (EOP) technology for basement and semi-basement[J]. *China Building Waterproofing*, 2006(3): 16.
- [20] 王琴, 杨鼎宜. 干湿循环对混凝土硫酸盐侵蚀的影响 [J]. *混凝土*, 2008(3): 22.
WANG Qin, YANG Dingyi. Influence of the dry- wet cycle ion on the concrete sulfate attack[J]. *Concrete*, 2008(3): 22.
- [21] Yoshida N, Matsunami Y, Nagayama M, et al, Salt weathering in residential concrete foundations exposed to sulfate-bearing ground [J]. *Journal of Advance Concrete Technology*, 2010, 8 (2): 121.
- [22] 肖海英, 葛勇, 张宝生, 等. 浸泡方式对混凝土腐蚀性的研究 [C]// 沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法. 北京: 人民交通出版社, 2004: 147-151.
XIAO Haiying, GE Yong, ZHANG Baosheng, et al. Research of immersion mode of concrete corrosion performance [C]// *Durability and Design of Concrete Structure on Coastal Region*. Beijing: China Communications Press, 2004: 147-151.

~~~~~

(上接第 1848 页)

- [12] Yang S, Hamedi M, Haghani A. An on-line emergency vehicle dispatching and routing model with area coverage constraints [C]//the 84<sup>th</sup> annual meeting of the Transportation Research Board. Washington D C; TRB, 2005: 05-0841.
- [13] Yasuhiro Shiomi, Yumiko Seto, NobuhiroUno. A medical facilities location model considering road network vulnerability and accessibility [C]//the 90<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D C; TRB, 2010: 11-0377.
- [14] 胡毓达. 多目标决策: 实用模型和选优方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.  
HU Yuda. Multi-objective decision: practical models and optimal methods [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishers, 2010.
- [15] 张宏伟, 牛志广. LINGO 8.0 及其在环境系统优化中的应用 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2005.  
ZHANG Hongwei, NIU Zhiguang. LINGO 8.0 and its application in environmental systems optimization [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005.
- [16] 丁小东, 姚志刚, 程高. LINGO 语言与 0-1 混合整数规划选址模型的再结合[J]. *物流工程与管理*, 2009, 31(10): 72.  
DING Xiaodong, YAO Zhigang, CHENG Gao. LINGO language in the logistics distribution center location [J]. *Storage Transportation & Preservation of Commodities*, 2009, 31(10): 72.