

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.006

砂浆特性参数对硅酸根电迁移反应法 致密化和表面涂覆效果影响

徐金霞,单鸿猷,唐力,蒋林华,高国富,刘大智

(河海大学力学与材料学院,江苏南京 210098)

摘要:采用硅酸根电迁移反应法致密化和表面涂覆砂浆,研究了水胶比、矿物掺和料、养护龄期和试件厚度等砂浆特性参数对被处理砂浆试件表面涂层厚度、抗压强度与抗折强度、电阻率的影响。结果表明:随着水胶比的减小与养护龄期的延长,砂浆试件生成的表面涂层增厚,抗压强度与抗折强度、电阻率提升增大;加入掺合料的砂浆试件形成的涂层厚度和电阻率大小顺序为硅粉>矿粉>无掺合料>粉煤灰,掺硅粉与矿粉的砂浆试件电阻率出现的峰值时间早于无掺合料试件;硅粉砂浆试件的抗压强度、抗折强度增幅大于无掺合料砂浆,而粉煤灰砂浆试件抗压强度与抗折强度变化不明显;砂浆试件厚度对于硅酸根电迁移反应法处理的砂浆性能影响不明显。

关键词:硅酸根电迁移反应法;致密化;表面涂层;砂浆;侵蚀性介质

中图分类号:TU57*8.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2015)02-0127-06

Effects of mortar properties on densification and surface coating through electro-migration reaction of silicate ions

XU Jinxia, SHAN Hongyou, TANG Li, JIANG Linhua, GAO Guofu, LIU Dazhi

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on densification and surface coating using the electro-migration reaction of silicate ions, the effects of mortar properties, such as the ratio of water to binder, mineral admixture, curing period, and thickness of the specimen, on the surface coating layer thickness, compressive strength, flexural strength, and resistivity of treated mortar specimens were investigated. The results show that the produced coating layer thickness, compressive strength, flexural strength, and resistivity of the specimens increase with the decrease of the ratio of water to binder and the increase of the curing period. The coating layer thicknesses and resistivity of mortar specimens with different admixtures follow an order of silica fume > slag > control (without admixtures) > fly ash. The times corresponding to the appearance of the resistivity peak of the specimens with silica fume and slag are shortened compared with that of the control specimen. The increments of compressive and flexural strength of the mortar specimens with silica fume are higher than those of the control mortar specimen. However, the addition of fly ash exerts little influence on the compressive strength and flexural strength of electrochemically treated specimens. The thickness of mortar specimens has little influence on the properties of electrochemically treated mortar specimens.

Key words: electro-migration reaction of silicate ion; densification; surface coating layer; mortar; erosion medium

混凝土因具有原材料丰富、易浇筑成型、价格低廉以及力学性能优越等优点,成为当今应用最为广泛的建筑材料。但是,工作环境和材料内部因素的作用会造成混凝土耐久性能劣化,给国民经济和人民生命安全造成损害^[1-3]。研究混凝土耐久性的提升方法,对于延长混凝土工程服役寿命、实现节能降耗和社会经济可持续发展具有重要意义^[4-5]。

混凝土耐久性劣化直接或间接源于环境中水、O₂、CO₂、Cl⁻和SO₄²⁻等侵蚀性介质的渗透侵入,因此已有

收稿日期:2014-05-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51278168,51478164,51278167);中国博士后科学基金(201104509,20100481082);江苏省博士后科研资助计划(1002019B);江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助计划(苏教师[2012]39号)

作者简介:徐金霞(1972—),男,安徽庐江人,副教授,博士,主要从事混凝土结构耐久性研究。E-mail: xujinxia@hhu.edu.cn

的混凝土耐久性提升方法多数是降低混凝土的渗透性^[6-7],其中最基本的方法是提高混凝土的密实性,制备高性能混凝土。高性能混凝土一般用降低水胶比、掺入足够多的活性掺合料(如硅粉和矿粉微粉等)与高效减水剂的方法来制备,但是,高性能混凝土会造成自收缩增加,早期易开裂,耐久性达不到预期效果^[8-9]。

除制备高性能混凝土这一基本方法外,表面涂层法也是一种常用的耐久性辅助提升方法。该方法通过在外界环境和混凝土结构之间形成一层隔离层,直接或间接改变混凝土的表面特性,从而延缓甚至阻止侵蚀性介质进入混凝土的内部,避免混凝土过早破坏^[10-11]。目前,制备涂层的涂料有有机和无机两类。有机类涂料含有挥发性成分,在涂覆过程中易污染环境;无机类涂料特别是硅基涂料由于会形成与水泥水化物相近的涂层,对环境污染小,因而倍受青睐^[12]。无论何种涂料,对水下混凝土结构都很难进行涂覆处理。

硅酸根电迁移反应法是通过电驱动 SiO_3^{2-} 进入孔隙,由 SiO_3^{2-} 与孔隙液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C-S-H 以细化、硬化混凝土孔结构;此外,外加电场加速了混凝土中 Ca^{2+} 溶出, Ca^{2+} 与外部溶液中的 SiO_3^{2-} 反应生成涂层涂覆混凝土。硅酸根电迁移反应法兼有高性能混凝土和表面涂覆混凝土的双重效果,既克服了传统制备高性能混凝土方法的缺陷,又可生成硅基涂层,并适用于水下混凝土结构表面涂覆,显示出巨大的发展潜力与广阔的应用前景。本文在研究外加电压、硅酸钠浓度、通电时间和温度等工艺参数对硅酸根电迁移反应法处理效果影响规律的基础上^[13],研究了水胶比、矿物掺和料、养护龄期和样品厚度等砂浆特性参数对硅酸根电迁移反应法处理效果的影响。

1 试验过程

1.1 原材料及试件制作

水泥:中国水泥厂生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥,初凝时间 116 min,终凝时间 171 min,3 d 与 28 d 的抗折强度 R_f 分别是 5.1 MPa 和 8.8 MPa,抗压强度 R_c 分别为 28.1 MPa 和 53.4 MPa。掺合料:粉煤灰、矿粉与硅粉。其中,粉煤灰是南京华能电厂的Ⅱ级粉煤灰,细度为 45 μm ,方孔筛的筛余率 14.7%,需水量比 101%;矿粉是南京江南粉磨有限公司的 S95 级磨细矿粉,比表面积为 500 m^2/kg ;硅粉是上海天恺硅粉材料有限公司生产的 920U 微硅粉,平均晶粒尺寸 0.1 μm 。细集料:天然河砂,表观密度为 2 630 kg/m^3 ,堆积密度 1 430 kg/m^3 ,细度模数 2.10,属于Ⅲ区级配,用南京市自来水为拌和水成型试件。试验所用的化学试剂,如九水合硅酸钠($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)、氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)等均为分析纯,并用去离子水配制电解液。

水泥砂浆试件尺寸有 20 mm×40 mm×160 mm 与 40 mm×40 mm×160 mm 2 种,水胶比为 0.50 和 0.65;掺合料用等量替代水泥的方式掺入,粉煤灰、矿粉与硅粉替代掺量分别为 30%、50% 与 10%;成型 24 h 后拆模,标准养护 28 d 和 90 d。

1.2 试验方法

硅酸根电迁移反应法的原理及试验装置见文献[13]。将标准养护至规定养护龄期的试件进行安装,完成后,对其通电进行硅酸根电迁移反应法处理。采用等压加载方式,外加电压为 24 V/cm(相对于试件厚度),硅酸钠溶液浓度为 0.05 mol/L,通电时间 28 d,温度固定保持在(20±2)℃。其中,硅酸钠溶液每 3 d 更换一次,以保持其浓度基本不变。需要指出的是,除了研究砂浆厚度的影响外,其他试验所用的试件尺寸为 20 mm×40 mm×160 mm。

在硅酸根电迁移反应法处理过程中,不断观察砂浆试件的表面形貌(硅酸根电迁移反应法处理不同水胶比砂浆试件的典型表面形貌见图 1),另外,周期性测试砂浆试件的电阻率。待致密化和表面涂覆处理完毕后,再测试砂浆试件表面的涂层厚度、抗压强度与抗折强度。表面涂层厚度是根据游标卡尺测量被处理砂浆试件在处理前后接触溶液的 2 个面之间的厚度差来确定的。具体测量时,选择砂浆试件的 4 个边角为测试点,以 4 个测量值的算术平均值作为被处理砂浆试件在处理前后的厚度;砂浆试件的抗压强度、抗折强度参照水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)进行测试。

电阻率是混凝土的重要特性,反映单位长度某一截面的混凝土抵抗电流通过的能力,其大小与混凝土的渗透性密切相关。由于混凝土的渗透性可直接或间接决定混凝土的耐久性,因此,混凝土电阻率可用作评判混凝土耐久性的一个参数^[14-15]。一般来说,混凝土电阻率越大,氯离子等有害离子越难渗入,混凝土耐久性就越好。本文试验中,电阻率 ρ 是用交流阻抗谱法测试阴、阳极间的电阻 R (所用设备为 PARSTAT 2273 型电化学工作站),并由式(1)计算获得:

$$\rho = \frac{RS}{L} \tag{1}$$

式中： L 、 S ——砂浆试件的厚度和端面面积。

2 结果与讨论

2.1 水胶比的影响

在硅酸根电迁移反应过程中,阳、阴钛网电极表面上经常会有气泡形成,这是电极反应中形成的氧气、氢气。此外,经硅酸根电迁移反应法处理的砂浆试件表面常常可以看到有白色物质生成(C-S-H 凝胶和硅胶混合物,见图 1),均匀涂覆在砂浆的表面上。本次试验中,对于水胶比为 0.50 与 0.65 的 2 种砂浆试件(未掺加掺合料,胶砂比统一为 0.4,标准养护 28 d),通电处理 28 d 后,其表面涂层厚度分别为 1.0 mm 和 0.8 mm,由此表明,水胶比提高,表面涂层的厚度减小。

图 2 是硅酸根电迁移反应法处理 2 种水胶比砂浆试件抗压强度与抗折强度变化示意图。图 2 显示,相对于控制砂浆试件,经硅酸根电迁移反应法处理的试件其抗压强度和抗折强度都有了一定程度的提高,表明硅酸根电迁移反应法处理对于砂浆试件的力学性能是有益的。此外,经硅酸根电迁移反应法处理后,2 种水胶比砂浆试件的抗压强度和抗折强度的变化趋势是一致的,即随着处理时间的延长先增加后逐步降低。对于水胶比为 0.50 的砂浆试件,经硅酸根电迁移反应法处理后抗压强度和抗折强度最大增加值分别是 4.5 MPa和2.3 MPa,而对于水胶比 0.65 的砂浆试件其抗压强度和抗折强度最大增加值分别是 4.4 MPa 和 0.5 MPa。由此说明,水胶比增加,硅酸根电迁移反应处理对砂浆试件抗压强度的增长影响不明显,但是抗折强度增长会降低。

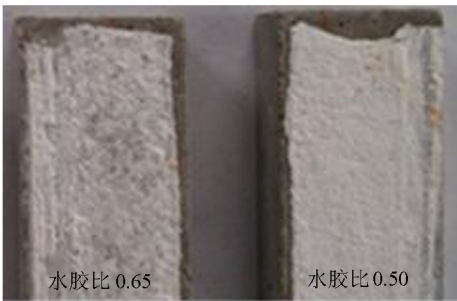


图 1 硅酸根电迁移反应法处理不同水胶比砂浆试件的典型表面形貌

Fig. 1 Typical surface morphology of mortar specimens treated with electro-migration reaction of silicate ions with different ratios of water to binder

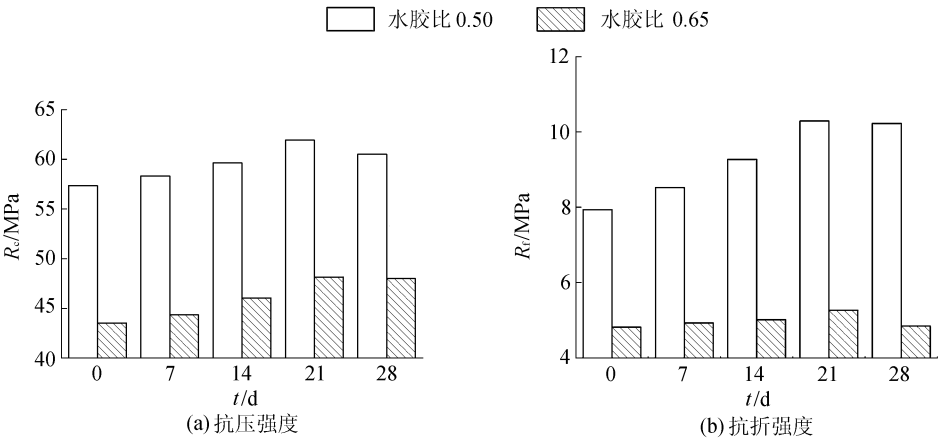


图 2 硅酸根电迁移反应法处理不同水胶比砂浆试件的抗压强度与抗折强度变化示意图

Fig. 2 Changes of compressive and flexural strength of mortar specimens treated with electro-migration reaction of silicate ions with different ratios of water to binder

图 3 是硅酸根电迁移反应法处理 2 种水胶比砂浆试件电阻率随时间变化曲线。从图 3 可以看出,相对于控制砂浆,经硅酸根电迁移反应法处理的砂浆电阻率有了不同程度的增长。鉴于电阻率与渗透性和耐久性密切关联,可以推断被处理砂浆耐久性经硅酸根电迁移反应法处理后得到了不同程度的提升。此外,图 3 中还可以看出,电阻率随处理时间的变化有类似于抗压强度与抗折强度一致的趋势,也即先增加后逐步降低。其中,对于水胶比为 0.50 与 0.65 砂浆试件经硅酸根电迁移反应法处理后的最大电阻率是原控制试件的 10.6 倍和 5.5 倍,如此高的增长倍数,显示了硅酸根电迁移反应法对于砂浆耐久性的巨大提升作用,此外,水胶比增加,硅酸根电迁移反应法处理对于砂浆电阻率的增长幅度减小。

2.2 养护龄期的影响

对于养护龄期分别为 28 d 和 90 d 的砂浆试件(胶砂比为 0.4,水胶比为 0.50,未掺加掺合料),通电 28 d

后砂浆试件白色表面涂层的覆盖程度区别不大,厚度均为1.0 mm,由此表明,养护龄期对硅酸根电迁移反应法处理砂浆表面生成涂层厚度影响不大。

图4是硅酸根电迁移反应法处理2种养护龄期砂浆试件的抗压强度与抗折强度变化示意图。图中显示,随着养护龄期的延长,砂浆的抗压强度和抗折强度都有不同程度的增加,而经硅酸根电迁移反应法处理后,2种养护龄期砂浆试件的抗压强度和抗折强度又进一步得到提升。此外,硅酸根电迁移反应法处理2种养护龄期砂浆试件的抗压强度和抗折强度的变化趋势是一致的,也即随着处理时间的延长先增加后逐步降低。其中,28 d 养护龄期的砂浆试件经硅酸根电迁移反应法处理后抗压强度和抗折强度最大增幅分别是4.5 MPa 和2.3 MPa,而90 d 养护龄期的砂浆试件经硅酸根电迁移反应处理后抗压强度和抗折强度最大增幅分别是7.9 MPa 和2.4 MPa,由此说明,养护龄期延长,硅酸根电迁移反应法处理对于砂浆试件的抗压强度增长效果更明显。

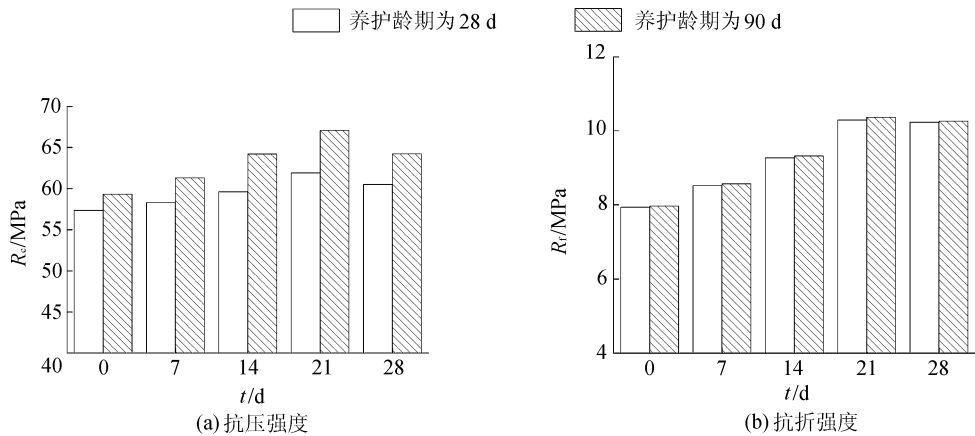


图4 硅酸根电迁移反应法处理不同养护龄期砂浆试件的抗压强度与抗折强度变化示意图

Fig. 4 Changes of compressive and flexural strength of mortar specimens treated with electro-migration reaction of silicate ions with different curing periods

图5是硅酸根电迁移反应法处理2种养护龄期砂浆试件电阻率随时间变化曲线。从图5可以看出,相对于未处理的控制砂浆试件,经硅酸根电迁移反应法处理的2种养护龄期砂浆试件电阻率均有不同程度的增长。同时,电阻率随处理时间的延长先增加后逐步降低,其中,对于养护龄期28 d 和90 d 的砂浆试件经硅酸根电迁移反应法处理后的最大电阻率是控制试件的10.6 倍和11.4 倍。由此说明,延长养护龄期,硅酸根电迁移反应法处理砂浆试件电阻率逐渐增大,且对应于电阻率的峰值出现时间提前。

2.3 掺和料的影响

对于无掺合料砂浆试件、粉煤灰砂浆试件、矿粉砂浆试件和硅粉砂浆试件(胶砂比为0.4,水胶比为0.50,养护龄期28 d),经硅酸根电迁移反应法处理后,表面生成的涂层厚度分别为1.0 mm、1.3 mm、1.2 mm 和0.3 mm。由此可见,掺入矿粉和硅粉有利于砂浆试件表面生成涂层,但是,掺加粉煤灰则不利于砂浆试件表面生成涂层。

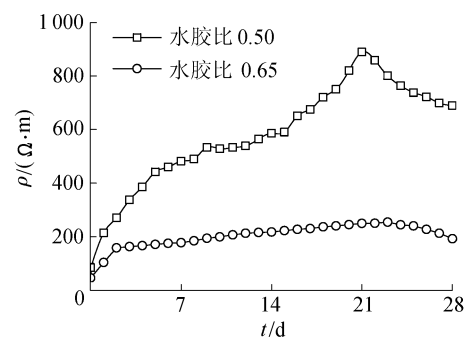


图3 硅酸根电迁移反应法处理不同水胶比砂浆试件电阻率随时间变化曲线

Fig. 3 Evolution of resistivity of mortar specimens treated with electro-migration reaction of silicate ions with different ratios of water to binder

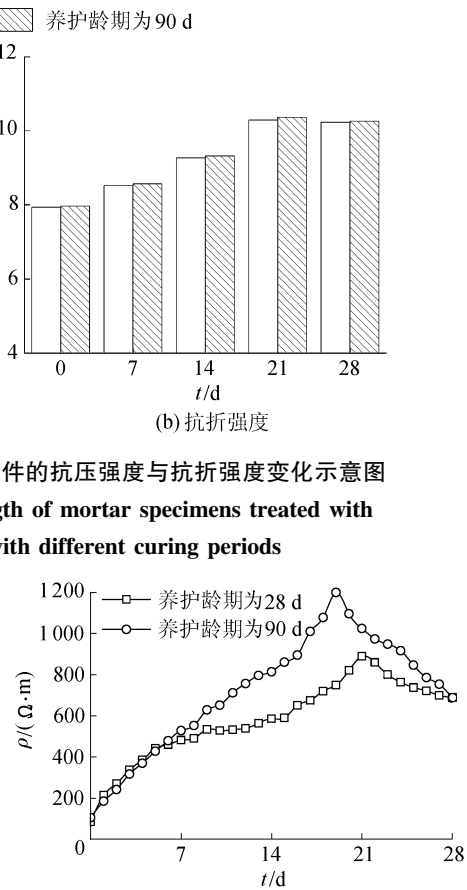


图5 硅酸根电迁移反应法处理不同养护龄期砂浆试件的电阻率随时间变化曲线

Fig. 5 Evolution of resistivity of mortar specimens treated with electro-migration reaction of silicate ions with different curing periods

图 6 是硅酸根电迁移反应法处理不同掺合料砂浆试件的抗压强度与抗折强度变化示意图。图 6 显示,随着矿粉和硅粉的掺加,砂浆试件的抗压强度与抗折强度提高,但是掺加粉煤灰,会使砂浆试件的抗压强度与抗折强度下降。各种砂浆试件的抗压强度和抗折强度由小到大的顺序为:粉煤灰<无掺合料<矿粉<硅粉。与无掺合料砂浆试件一样,经硅酸根电迁移反应法处理后的粉煤灰砂浆试件、矿粉砂浆试件和硅粉砂浆试件抗压强度和抗折强度都得到不同程度的提高,其抗压强度最大增值分别为 0.8 MPa、4.5 MPa 和 5.6 MPa,抗折强度最大增值分别为 0.3 MPa、2.3 MPa 和 1.5 MPa。对比控制砂浆试件的抗压强度和抗折强度最大增值可见,硅酸根电迁移反应法处理对于粉煤灰砂浆试件的强度提高水平最低。此外,对于掺加掺合料的砂浆试件,经硅酸根电迁移反应法处理的抗压强度、抗折强度变化规律与无掺合料砂浆试件是一致的,即先增加后逐步降低。

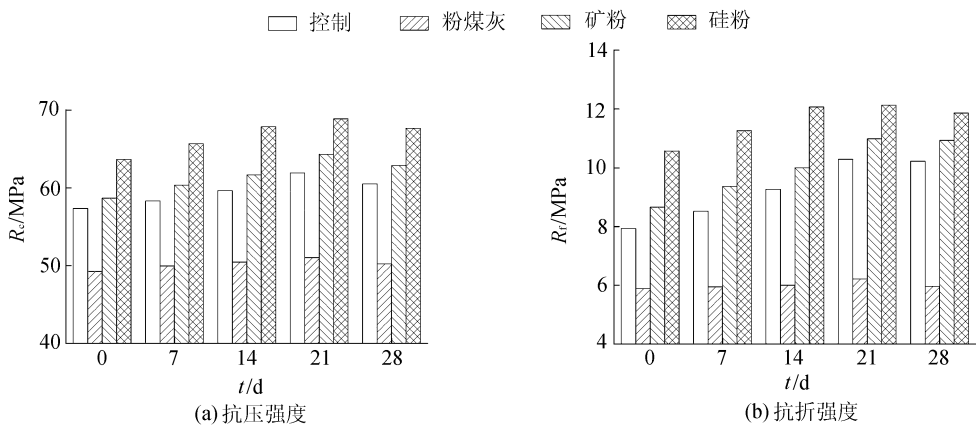


图 6 硅酸根电迁移反应法处理不同掺合料砂浆试件的抗压强度与抗折强度变化示意图
Fig. 6 Changes of compressive and flexural strength of mortar specimens treated with electro-migration reaction of silicate ions with different mineral admixtures

图 7 为硅酸根电迁移反应法处理不同掺合料砂浆试件电阻率随时间变化曲线。从图 7 可以看出,相对于控制砂浆试件,经硅酸根电迁移反应法处理的不同掺合料砂浆试件电阻率都有了不同程度的增长。但是,相对于控制砂浆试件,硅粉砂浆试件的电阻率提升效果更为显著,粉煤灰砂浆试件电阻率提升作用相对较弱。其中,粉煤灰、矿粉和硅粉砂浆试件的电阻率最大值分别是处理前砂浆试件电阻率的 6.7 倍、10.6 倍和 12.9 倍。需要说明的是,相对于控制砂浆试件,虽然矿粉砂浆试件电阻率的增长倍数是一样的,但考虑到矿粉砂浆试件处理前的电阻率更高,实际的电阻率绝对增加值也高。由此可见,硅酸根电迁移反应法处理不同掺合料砂浆试件的电阻率提升由低到高的顺序是:粉煤灰<无掺合料<矿粉<硅粉。此外,图 7 还可以看出,经硅酸根电迁移反应法处理硅粉和矿粉砂浆试件的电阻率峰值显现时间相对于控制试件提前了,而粉煤灰砂浆试件电阻率峰值显现时间则延迟了,说明硅酸根电迁移反应法对硅粉和矿粉砂浆试件处理效率更高。

2.4 试件厚度的影响

通电 28 d 后砂浆试件(胶砂比为 0.4,水胶比为 0.50,未掺加掺合料,厚度 20 mm 和 40 mm 2 种试件)表面均会出现白色涂覆层,且涂层厚度(1 mm 左右)和覆盖程度基本相同,也即当施加同等电位梯度的电场,砂浆试件的厚度对于表面涂层厚度无影响。

由于抗压强度和抗折强度有显著的尺寸效应,即与砂浆厚度有关,因此,抗压强度和抗折强度不宜作为参数来研究硅酸根电迁移反应法处理的影响,本次试验没有进行硅酸根电迁移反应法处理过程中总砂浆厚度对抗压强度和抗折强度的影响试验。但是,电阻率与试件的外观尺寸无关,是研究砂浆试件厚度对硅酸根电迁移反应法处理效果影响的一个适宜参数。图 8 是硅酸根电迁移反应法处理 2 种厚度砂浆试件的电阻率

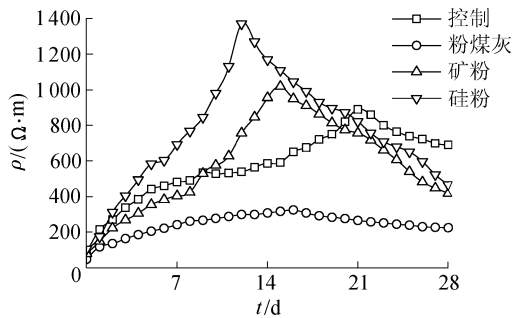


图 7 硅酸根电迁移反应法处理不同掺合料砂浆试件电阻率随时间变化曲线
Fig. 7 Evolution of resistivity of mortar specimens treated with electro-migration reaction of silicate ions with different mineral admixtures

随时间变化曲线。图8显示,砂浆厚度对于电迁移反应法处理砂浆试件的电阻率影响不大。

3 结 论

- a. 硅酸根电迁移反应法处理砂浆试件在其表面产生厚度0.3~1.3mm硅基涂层,此外,能适当提高砂浆试件的抗压强度与抗折强度,极大地增加砂浆试件的电阻率(10倍以上),显示了极高的耐久性提升能力。
- b. 随着砂浆试件水胶比减小,砂浆表面生成的涂层厚度增加,抗压强度与抗折强度提升增加,电阻率提升增大。
- c. 养护龄期越长,砂浆表面生成涂层厚度增加,抗压强度与抗折强度提升增加,电阻率提升增大。
- d. 掺合料砂浆试件经硅酸根电迁移反应法处理后表面涂层厚度、电阻率提升从大到小排列依次为:硅粉>矿粉>无掺合料>粉煤灰;硅粉和矿粉砂浆试件电阻率峰值出现的时间提前;硅粉砂浆试件抗压强度与抗折强度比与无掺合料砂浆试件提升增加,而粉煤灰砂浆试件抗压强度与抗折强度变化不明显。
- e. 试件厚度对于硅酸根电迁移反应法处理砂浆试件的性能无明显影响。

参考文献:

[1] 金伟良,吕清芳,赵羽习,等. 混凝土结构耐久性设计方法与寿命预测研究进展[J]. 建筑结构学报,2007(1):7-13. (JIN Weiliang,LYU Qingfang,ZHAO Yuxi,et al. Research progress on the durability design and life prediction of concrete structures [J]. Journal of Building Structures,2007(1):7-13. (in Chinese))

[2] 余红发. 盐湖地区高性能混凝土的耐久性、机理与使用寿命预测方法[D]. 南京:东南大学,2004.

[3] 孙伟. 现代混凝土材料与结构服役特性的研究进展[J]. 混凝土世界,2009(7):20-30. (SUN Wei. Research progress on service performance of modern concrete and concrete structure[J]. China Concrete,2009(7):20-30 (in Chinese))

[4] 徐建芝,丁铸,邢峰. 钢筋混凝土电化学脱盐修复技术研究现状[J]. 混凝土,2008(9):22-24. (XU Jianzhi,DING Zhu,XING Feng. Research status of electrochemical chloride extraction(ECE) on steel reinforced concrete[J]. Concrete,2008(9):22-24. (in Chinese))

[5] SHI Xianming,XIE Ning,FORTUNE K,et al. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments:an overview[J]. Construction and Building Materials,2012,30:125-138.

[6] BASHEER L,KROPP J,CLELAND D J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties:a review[J]. Construction and Building Materials,2001,15:93-103.

[7] GUIMING W,JIANYING Y. Self-healing action of permeable crystalline coating on pores and cracks in cement-based materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition,2005,20:89-92.

[8] NEVILLE A,AÏTCIN P-C. High performance concrete:an overview[J]. Materials and Structures,1998,31(2):111-117.

[9] BHARATKUMAR B H,NARAYANAN R,RAGHUPRASAD B K,et al. Mix proportioning of high performance concrete[J]. Cement and Concrete Composites,2001,23(1):71-80.

[10] WITTMANN F H,战洪艳,赵铁军. 混凝土表面防水处理与氯离子隔离层的建立[J]. 建筑材料学报,2005,8(1):1-6. (WITTMANN F H,ZHAN Hongyan,ZHAO Tiejun. Water repellent treatment of concrete surface and establishment of chloride barrier[J]. Journal of Building Materials,2005,8(1):1-6. (in Chinese))

[11] 朱桂红,郭平功,赵铁军. 有机硅防水剂对氯盐侵蚀混凝土的防护效果研究[J]. 混凝土,2007(11):58-60. (ZHU Guihong, GUO Pinggong, ZHAO Tiejun. Research on the efficiency of different water repellent agents [J]. Concrete, 2007 (11):58-60. (in Chinese))

[12] MOON H Y,SHIN D G,CHOI D S. Evaluation of the durability of mortar and concrete applied with inorganic coating material and surface treatment system[J]. Construction and Building Materials,2007,21:362-369.

[13] 徐金霞,唐力,蒋林华,等. 硅酸根电迁移反应砂浆致密化方法的研究[J]. 建筑材料学报,2014,17(3):497-503. (XU Jinxia, TANG Li,JIANG Linhua,et al. New method of densified cement mortar by electro-migration reaction of silicate ion[J]. Journal of Building Materials,2014,17(3):497-503. (in Chinese))

[14] RAMEZANIANPOUR A A,PILVAR A,MAHDIKHANI M,et al. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity,water penetration,rapid chloride penetration and compressive strength[J]. Construction and Building Materials, 2011,25:2472-2479.

[15] POLDER R B,PEELEN W H A. Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity[J]. Cement and Concrete Composites,2002,24(5):427-435.

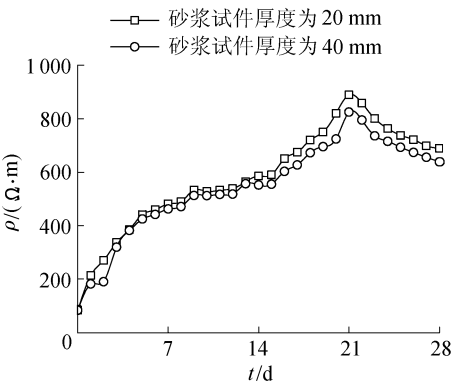


图8 硅酸根电迁移反应法处理不同厚度砂浆试件的电阻率随时间变化曲线

Fig. 8 Evolution of resistivity of mortar specimens treated with electro-migration reation of silicate ions with different thickness