

磷酸盐快补材料的耐腐蚀试验

俞家欢¹, 闫林伟¹, 卢俊萍², 顾章义³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 沈阳建筑大学理学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究不同腐蚀介质对磷酸盐快补材料的影响, 为防腐蚀设计提供理论基础. 方法 根据现有磷酸盐快补材料耐腐蚀的定义和评价指标, 研究5种腐蚀介质对磷酸盐快补材料力学性能、体积稳定性和强度保留率的影响, 进而得出其耐腐蚀能力的强弱. 结果 磷酸盐快补材料的抗压和抗折强度随龄期的增长其变化趋势大致相同. 各种溶液中的磷酸盐快补材料的干缩率随龄期的增加而增加, 28d龄期以前的增长幅度较大, 后期增长幅度明显降低. 磷酸盐快补材料在5种腐蚀介质中的强度保留率最高为53.91%, 最低22.43%. 结论 磷酸盐快补材料在盐腐蚀介质中, 耐腐蚀较强; 在酸碱腐蚀介质中, 耐腐蚀较差.

关键词 磷酸镁水泥基复合材料; 力学性能; 体积稳定性; 强度保留率; 耐腐蚀

中图分类号 TU503; U414

文献标志码 A

Experimental Research of Corrosion Resistance on Phosphate Rapid Repairing Materials

YU Jiahuan¹, YAN Linwei¹, LU Junping², GU Zhangyi³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Science, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The influence of different corrosion medium on phosphate fast mending material is studied, which provides a theoretical basis for corrosion protection design. Based on the existing definition and evaluation index of corrosion resistance of phosphate fast filling material, the effects of five corrosion mediums on mechanical properties, volume stability and strength retention of phosphate fast mending material were studied, and their corrosion resistance was obtained. The compressive strength and flexural strength of phosphate fast mending material are approximately the same with the increase of age. All kinds of solution of phosphate fast mending material shrinkage increases with age, before 28d age, the growth rate was larger, and the late growth rate decreased obviously. The highest strength retention rate of phosphate fast mending material in 5 corrosion media was 53.91%, the lowest 22.43%. Phosphate fast mending material has stronger corrosion

收稿日期: 2016-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478276)

作者简介: 俞家欢(1974—), 男, 教授, 主要从事道路桥梁快速修补材料与技术研究.

resistance in salt corrosion medium, and it has poor corrosion resistance in acid base corrosion medium.

Key words: magnesium phosphate cement matrix composite; mechanical properties; volume stability; strength retention rate; corrosion resistance

磷酸盐水泥是一种特种水泥,本身具有快凝快硬的特性,在一系列的磷酸盐胶凝材料中,磷酸镁水泥以其快速硬化、强度高等特点,受到越来越多关注,作为可持续发展的材料被广泛研究^[1-3]. 磷酸镁水泥基复合材料(MPB)是一种以磷酸镁水泥为胶凝材料和基体而配制的磷酸镁水泥砂浆的复合材料^[4]. 磷酸镁水泥(MPC)由氧化镁、磷酸盐和缓凝剂等按一定比例混合,与水混合经化学反应形成高度结晶的材料,也被称为“化学结合磷酸镁陶瓷”^[5-8]. 其硬化反应是利用活性氧化镁与可溶性磷酸盐的酸碱中和反应,快速反应并释放出大量的热量,通常情况下在几分钟内发生反应,形成坚硬的胶结块,没有反应的氧化镁和填料,形成材料的结构,且其强度较高^[9-11]. 与普通硅酸盐水泥相比,具有凝结硬化快、早期强度高、粘接强度高、干燥收缩小、低温可施工、耐磨性和抗冻性能高等优势. 因此,磷酸镁水泥常用于机场跑道、桥梁、公路、民用建筑和大量军事项目的修补与加固当中^[12-15].

近年来,对磷酸盐快补材料的研究较多,其中针对水化机理和缓凝机理、水化产物的组成和微观结构、凝结时间和力学性能、粘接

性能和修补性能等方面的研究较多^[16-18],而对其耐久性的研究比较少. 作为快速修补材料,磷酸盐快补材料的耐久性开发其未来应用市场的关键性因素^[19]. 因此,笔者对磷酸盐快补材料的耐腐蚀性能进行了试验,从力学性能、体积稳定性和强度保留率三个方面来表征磷酸盐快补材料的耐腐蚀能力,试验结果表明,磷酸盐快补材料在盐腐蚀介质中,耐腐蚀较强;在酸碱腐蚀介质中,耐腐蚀较差. 通过研究找出不同腐蚀溶液中对磷酸盐快补材料耐腐蚀性影响规律,为其在工程中应用提供参考依据.

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

磷酸盐快补材料:自主研发,其组分主要有氧化镁、磷酸二氢铵、粉煤灰、缓凝剂、减水剂、早强剂.

磷酸盐快补材料中的磷酸二氢铵与重烧镁砂质量比为1:4,水胶比为0.31,矿物掺合料粉煤灰为无机胶凝材料总重的30%,缓凝剂硼砂为无机胶凝材料总量的1.5%. 磷酸盐快补材料配合比见表1,基本材料性能见表2.

表1 MPB的配合比

Table 1 The mix ratio of MPB

%

| 水 | 无机胶凝材料 | | | 外加剂 | | |
|------|--------|------|-----|-------|------|-------|
| | 磷酸二氢铵 | 氧化镁 | 粉煤灰 | 缓凝剂 | 减水剂 | 早强剂 |
| 0.31 | 0.14 | 0.56 | 0.3 | 0.015 | 0.01 | 0.006 |

表2 MPB 基本材料性能

Table 2 The basic material property of MPB

| 凝结时间/min | | 抗压强度/MPa | | | 抗折强度/MPa | | | 28 d 干缩 |
|----------|----|----------|------|------|----------|-----|------|----------------------|
| 初凝 | 终凝 | 1 h | 3 h | 28 d | 1 h | 3 h | 28 d | 率/% |
| — | 11 | 32.7 | 36.4 | 71.6 | 5.5 | 6.2 | 11.1 | 2.8×10^{-4} |

1.2 试验方法

1.2.1 力学性能测试

参考《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(JTGE30—2005的T0506—2005)来测定材料的力学性能.力学性能包括抗压强度和抗折强度,抗折强度采用水泥胶砂电动抗折机检测,抗折完成后的试块用电子万能试验机来测定.试验数据处理时,如果数据超过平均值的±10%,剔除数据,再次求平均值作为最终数据.

1.2.2 无侧限抗压强度的测试

参考《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ057—1994)中无机结合料稳定材料无侧限抗压强度试验方法来测定材料的无侧限抗压强度.

试验采用万能试验机测试,加载速率为1mm/min,记录试件破坏时的最大压力*P*,试验数据整理时,无侧限抗压强度数据保留一位小数.

无侧限抗压强度公式:

$$R_c = \frac{P}{A}.$$
 (1)

式中:*R_c*为无侧限抗压强度,MPa;*A*为试件的截面积,mm².

1.2.3 体积稳定性测试

参照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTGE30—2005)中水泥胶砂干缩试验方法来测定材料的体积稳定性.

特种水泥试样成型后30min脱模,普通水泥24h后脱模,然后放置到混凝土干缩检测室(室内温度(20±3)℃,相对湿度为50%),养护一段时间,分别测其1d、3d、7d、14d、21d、28d时的干缩率.每次检测时,需保证试件与仪表的同向性,每个试块应测试三次并求其平均值.

干缩率计算式为.

$$S_t = \frac{L_r - L_0}{250} \times 100\%$$
 (2)

式中:*S_t*为*t*天龄期试件的干缩率,*t*从测得

的试样长度初始读数*L₀*起算;*L_r*为*r*天龄期试件的长度,mm;*L₀*为试样长度的初始读数,mm;250为试样的有效长度,mm.

1.2.4 酸碱盐溶液配制

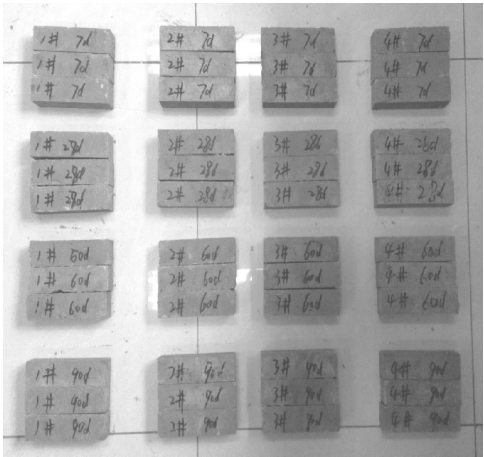
参照《工业建筑防腐设计规范》(GB50046—95)中液态介质对建筑材料的腐蚀性等级要求,分别配制了浓度为10%的HCl溶液、10%的NaOH溶液、3%的NaCl溶液、3%的Na₂SO₄溶液和清水进行试验研究,酸碱盐溶液的组分用量见表3.

表3 酸碱盐溶液用量

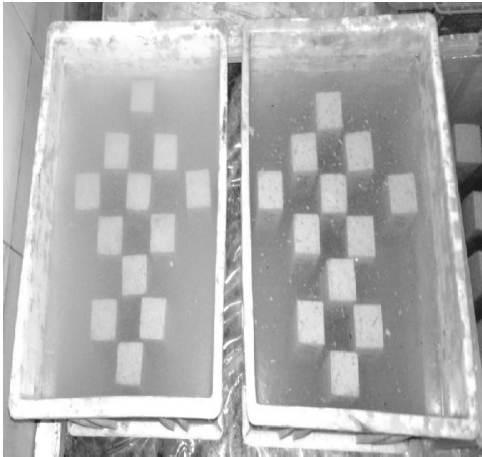
| Table 3 Dosage of acid base salt solution g | | |
|---|---------|--------------------|
| 酸碱盐溶液类型 | 溶质用量 | H ₂ O用量 |
| 10% HCl(溶液) | 4 633 | 13 788 |
| 10% NaOH(固体) | 1 999.8 | 18 000 |
| 3% NaCl(固体) | 556.2 | 18 000 |
| 3% Na ₂ SO ₄ (固体) | 556.2 | 18 000 |

2 磷酸盐快补材料耐腐蚀试验

在实验室模拟现实中的腐蚀环境,通过模拟现实中道路材料所处的腐蚀环境,分别选取不同介质和不同浓度的溶液作为腐蚀介质^[17],试件和溶液长时间的接触并充分反应,采用耐水性的评价指标来评定磷酸盐快补材料的耐腐蚀能力^[12].试件制作和试件养护(自然水中养护28d)见图1.



(a) 试件制作



(b) 试件养护

图1 试件制作和试件养护

Fig.1 Specimen fabrication and specimen maintenance

表4 不同腐蚀介质中MPB的力学性能

Table 4 The mechanics performance of MPB in the different corrosive medium

| 龄期/d | H ₂ O | | HCl | | NaOH | | NaCl | | Na ₂ SO ₄ | |
|------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------------------|----------|
| | 抗折强度/MPa | 抗压强度/MPa | 抗折强度/MPa | 抗压强度/MPa | 抗折强度/MPa | 抗压强度/MPa | 抗折强度/MPa | 抗压强度/MPa | 抗折强度/MPa | 抗压强度/MPa |
| 7 | 6.00 | 20.02 | 5.3 | 19.06 | 5.4 | 19.31 | 6.25 | 27.50 | 6.50 | 27.97 |
| 28 | 6.50 | 27.34 | 5.45 | 24.69 | 5.9 | 26.28 | 6.75 | 28.38 | 6.90 | 30.94 |
| 60 | 6.7 | 30.57 | 6.2 | 21.80 | 6.38 | 25.63 | 7.05 | 36.91 | 7.15 | 39.84 |
| 90 | 5.95 | 25.16 | 5.2 | 18.98 | 5.63 | 22.42 | 6.62 | 25.55 | 6.75 | 26.88 |

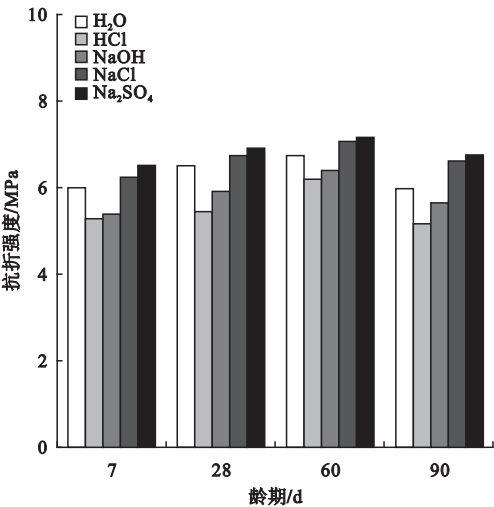


图2 不同腐蚀介质对MPB抗折强度的影响

Fig.2 Effect of different corrosion medium on flexural strength of MPB

2.1 耐腐蚀的定义及评价指标

磷酸盐快补材料的耐腐蚀是指磷酸盐快补材料的硬化物在自然环境(水、酸、碱、盐等溶液)中,抵抗由于化学作用而引起的变质和破坏的能力.

评价磷酸盐快补材料的耐腐蚀能力的指标以强度保留率为主,以力学性能和体积稳定性为辅.

2.2 不同腐蚀介质对磷酸盐快补材料力学性能的影响

表4为不同腐蚀介质中MPB的力学性能变化情况,图2为不同腐蚀介质对MPB抗折强度的影响,图3为不同腐蚀介质对MPB抗压强度的影响.

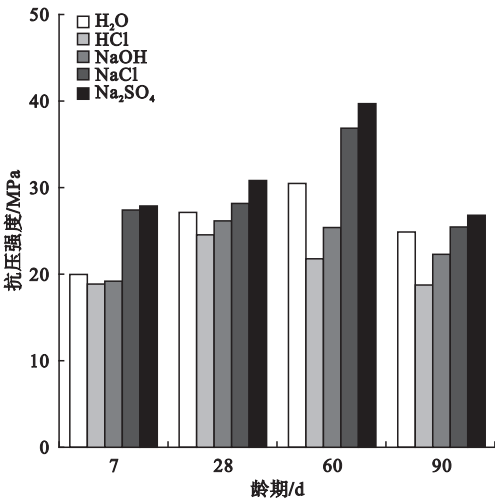


图3 不同腐蚀介质对MPB抗压强度的影响

Fig.3 Influence of different corrosion medium on compressive strength of MPB

从图2和图3可知,在5种溶液中,磷酸盐快补材料的抗压和抗折强度随龄期的增长其变化趋势大致相同,在H₂O溶液、NaCl溶液和Na₂SO₄溶液中,磷酸盐快补材料的抗压强度和抗折强度呈递增趋势且后期有倒缩现象;在HCl溶液和NaOH溶液中,磷酸盐快补材料的抗压强度和抗折强度呈递增趋势且中后期有下降的波动.同等条件下比较5种溶液中磷酸盐快补材料的抗压和抗折强度,由高到低排序为Na₂SO₄、NaCl、H₂O、NaOH、HCl.说明酸碱溶液对磷酸盐快补材料的抗压和抗折强度影响较大,水对其的影响次之,盐溶液对其影响较小.

从表4可以得出,同等条件下比较5种溶液中磷酸盐快补材料的抗折强度,各龄期的盐溶液的抗折强度与酸碱溶液的抗折强度的差值都比较大,最大差值为1.95 MPa,最小值为0.85 MPa.说明磷酸盐快补材料不适用于酸碱含量大的区域,在盐含量的区域使用效果较好^[13].比较各龄期的抗压强度,磷酸盐快补材料在7 d和60 d龄期盐溶液中的抗压强度较酸碱强度差值较大,最大值为18.04 MPa,最小值为8.44 MPa.对比磷酸盐快补材料在空气养护下7 d的抗压强度(66.1 MPa)和抗折强度(10.7 MPa),其力学性能降低的幅值均大于30%,说明酸碱盐溶液对磷酸盐快补材料力学性能的影响较大,耐腐蚀能力明显较低.

2.3 不同腐蚀介质对磷酸盐快补材料体积稳定性的影响

不同腐蚀介质中MPB的干缩率变化情况见表5.图4为不同腐蚀介质对MPB的体积稳定性的影响.

从图4可以看出,各种溶液中的磷酸盐快补材料的干缩率随龄期的增加而增加.28d以前的增长幅度较大,后期增长幅度明显降低.对比各龄期下不同溶液中磷酸盐快补材料的干缩率变化,NaOH的干缩率最大,NaCl和Na₂SO₄的干缩率次之,HCl的干缩率居

表5 不同腐蚀介质中MPB的干缩率变化情况
Table 5 Dry shrinkage of MPB in the different corrosive medium

| 龄期/d | 干缩率/ 10^{-4} | | | | |
|------|------------------|-----|------|------|---------------------------------|
| | H ₂ O | HCl | NaOH | NaCl | Na ₂ SO ₄ |
| 3 | 0.8 | 1.2 | 2.0 | 2.0 | 2.2 |
| 7 | 2.4 | 3.2 | 4.0 | 3.6 | 3.8 |
| 28 | 2.8 | 3.6 | 4.8 | 4.4 | 4.6 |
| 60 | 2.9 | 4.0 | 5.6 | 5.2 | 5.4 |

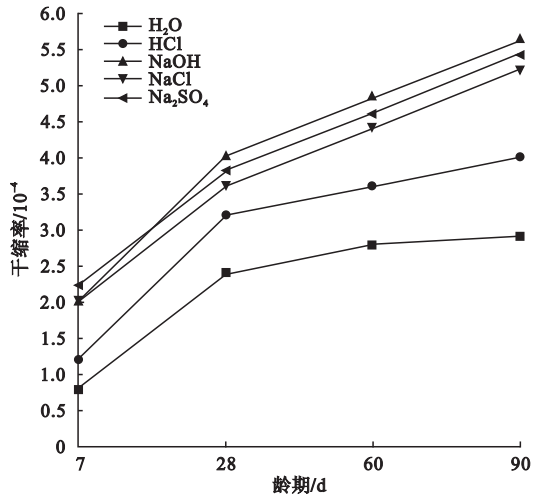


图4 不同腐蚀介质对MPB的体积稳定性的影响
Fig. 4 Effect of different corrosion medium on volume stability of MPB

中,H₂O的干缩率最小.这说明OH⁻对磷酸盐快补材料的体积稳定性影响最大.

在各龄期下,各种溶液中磷酸盐的干缩率在 6.0×10^{-4} 以内,均小于普通硅酸盐水泥28 d的干缩率,说明酸碱盐溶液下磷酸盐快补材料体积稳定性较差,但是却等同于普通硅酸盐水泥.

2.4 不同腐蚀介质对磷酸盐快补材料强度保留率的影响

图5为不同腐蚀介质中MPB的强度保留率情况.由图5可以看出,磷酸盐快补材料的耐腐蚀能力由强到弱排序:3% Na₂SO₄、3% NaCl、H₂O、10% NaOH、10% HCl.从整体来看,磷酸盐快补材料在5种腐蚀介质中的强度保留率最高为53.91%,最低22.43%.说明在盐腐蚀介质中,磷酸盐快补材料的耐腐

蚀较强;在酸碱腐蚀介质中,磷酸盐快补材料的耐腐蚀较差.就磷酸盐快补材料在各种溶液中的强度保留率的变化趋势而言,HCl 和 NaOH 中的趋势为递减趋势, H_2O 中的趋势为前期增长平缓,后期为递减趋势,NaCl 和 Na_2SO_4 中的趋势为递增趋势.各龄期下,7 d 龄期时各腐蚀介质差别不是很大,28 d 龄期及其以后龄期中磷酸盐快补材料强度保留率的差别逐渐加大且更加明显.说明酸碱盐腐蚀介质对磷酸盐快补材料早期的耐腐蚀影响较小,中后期的耐腐蚀影响较大.

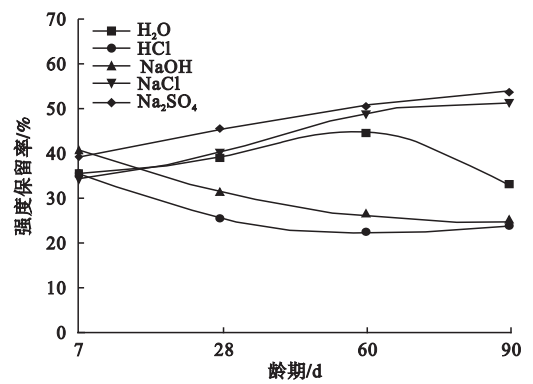


图5 强度保留率

Fig. 5 Strength retention ratio

2.5 不同溶液对磷酸盐快补材料的腐蚀机理分析

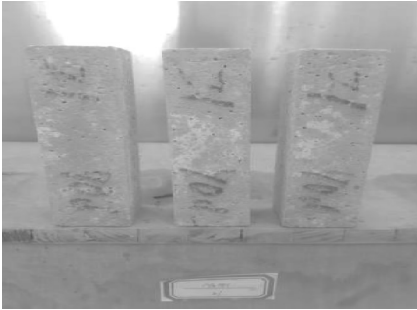
图6所示为90 d龄期时各溶液中MPC的外观形态.比较5种溶液中磷酸盐快补材料的侵蚀程度,90 d龄期时,HCl 和 NaOH 溶液中的侵蚀程度最为严重,出现了局部的剥落现象. H_2O 的侵蚀程度一般,NaCl 和 Na_2SO_4 下外观形态保存较为完整.



(a) H_2O



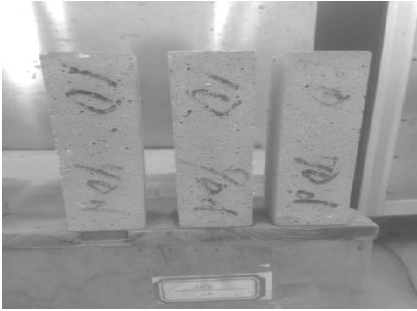
(b) Na_2SO_4



(c) NaOH



(d) NaCl



(e) HCl

图6 90 d龄期时各溶液中MPC的外观形态

Fig. 6 Appearance of MPC in solution at 90 d age

2.5.1 H_2O 溶液腐蚀

磷酸盐的不断溶出,减少了水化后期磷酸盐的参与量,进而降低了水化产物(MAP)的生成量,结构的密实度得不到保障,进而降低了磷酸盐快补材料的耐水性^[7].也有另外

一种说法^[8],水化产物的结晶形态发生改变,从而增加了孔隙率^[18],所以无法保证其强度的发展,耐水性也降低了。

2.5.2 Na_2SO_4 溶液腐蚀

硫酸盐对普通硅酸盐水泥的侵蚀有两类:溶解型和结晶膨胀型。溶解型破坏是指 Na_2SO_4 和 MgSO_4 与水泥基材料混合后,生成的水化产物较松软、不易胶凝但易溶于水,所以材料易破坏^[19];结晶膨胀型破坏是在混合物中产生一种低溶解度的水化产物并填充在孔隙和毛细管里,水化产物的增加会产生巨大应力,最终导致材料的破坏。根据试验数据可知,磷酸盐快补材料在 Na_2SO_4 溶液的强度保留率随龄期的增长呈现递增趋势,所以推出磷酸盐快补材料在 Na_2SO_4 溶液的破坏类型为结晶膨胀型。

2.5.3 NaOH 溶液腐蚀

NaOH 对普通硅酸盐水泥混凝土的侵蚀分为化学腐蚀和结晶腐蚀,化学腐蚀破坏的原因是混合物与 NaOH 反应生成正硅酸钠(Na_4SiO_4)和偏铝酸钠(NaAlO_2),降低材料的强度。结晶腐蚀破坏的原因是 NaOH 和 CO_2 在混凝土中生成结晶水合物,即十水合碳酸钠($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$),其体积是 NaOH 体积的2倍多,因此而产生的结晶应力足以导致水泥石的结构破坏。根据体积稳定性数据可知,磷酸盐快补材料在 NaOH 溶液中的干缩率变化较大,磷酸盐快补材料在 NaOH 溶液的破坏类型应为结晶腐蚀破坏型。

2.5.4 NaCl 溶液腐蚀

钠盐对普硅水泥的侵蚀属于溶解型破坏, NaCl 与水泥基材料混合后,生成的水化产物较松软、不胶凝且易溶于水,所以材料破坏。

2.5.5 HCl 溶液腐蚀

HCl 属于无机酸,对普硅混凝土的腐蚀性很强,与水化产物生成的钙盐具有较强的可溶性,水化产物因此而分解并增大了材料的孔隙率,降低材料的整体强度,导致其最终

的破坏。从强度保留率来看,其强度保留率在各龄期均小于其他盐类,说明其腐蚀程度也明显高于其他盐类。

3 结 论

(1)磷酸盐快补材料在盐腐蚀介质中,磷酸盐快补材料的耐腐蚀较强;在酸碱腐蚀介质中,耐腐蚀较差。磷酸盐快补材料在5种腐蚀溶液中的耐腐蚀能力由强到弱的排序为3% Na_2SO_4 、3% NaCl 、 H_2O 、10% NaOH 、10% HCl 。

(2)通过分析5种溶液对磷酸盐快补材料的腐蚀机理可以得出,要想改善磷酸盐快补材料的耐腐蚀性能,必须从配合比设计时考虑,通过引入外加剂来改善提高磷酸盐快补材料的各项性能。

参考文献

- [1] WAGH A S. Chemically bonded phosphate ceramics [M]. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2004.
- [2] 杨建明,钱春香,焦宝祥,等.缓凝剂硼砂对磷酸镁水泥水硬化特性的影响[J].材料科学与学报,2010,28(1):31-35.
(YANG Jianming, QIAN Chunxiang, JIAO Baoxiang, et al. Effect of borax on hydration and hardening properties of magnesium and pottassium phosphate cement pastes [J]. Journal of materials science and engineering, 2010, 28(1):31-35.)
- [3] 姜洪义,周环,杨慧.超快硬磷酸盐修补水泥水硬化机理的研究[J].武汉理工大学学报,2002,4:18-20.
(JIANG Hongyi, ZHOU Huan, YANG Hui. Investigation of the hydrating and hardening mechanisms of phosphate cement for repair with super rapid hardening [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2002, 4: 18 - 20.)
- [4] 郑锦得,余少君.水泥混凝土路面病害原因及施工预防措施浅析[J].工程技术与管, 2005(9):5-6.
(ZHENG Jinde, YU Shaojun. Disease causes and prevention measures of cement concrete pavement construction [J]. Engineering technology and management, 2005(9):5-6.)

- [5] 李东旭,李鹏晓,冯春花. 磷酸镁水泥耐水性研究[J]. 建筑材料学报,2009,12(12):505-510.
(LI Dongxu, LI Xiaopeng, FENG Chunhua. Magnesium phosphate cement water resistance [J]. Building materials, 2009, 12(12):505-510.)
- [6] TURKER F. Effects of magnesium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume [J]. Cement and concrete research, 1997, 27(2):205-214.
- [7] 万朝均. 新型高效掺合料及其性能研究[D]. 重庆:重庆建筑大学,2000.
(WAN Chaojun. New efficient and properties of mineral admixture [D]. Chongqing: Chongqing University, 2000.)
- [8] 陈兵,吴震,吴雪萍. 磷酸镁水泥改性试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(4):29-34.
(CHEN Bing, WU Xia, WU Xueping. Experimental research on the properties of modified MPC[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2011, 33(4):29-34.)
- [9] 汪宏涛. 高性能磷酸镁水泥基材料研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.
(WANG Hongtao. Study on high performance magnesium phosphate cement based materials [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.)
- [10] QIAO F, CHAU C K, LI Z. Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material [J]. Construction and building materials, 2010, 24(6):695-700.
- [11] DONAHUE P K, Matthew D A. Durable phosphate-bonded natural fiber composite products [J]. Construction and building materials, 2010, 24(2):215-219.
- [12] 杨小平,苏素芹. 磷酸盐改性波特兰水泥提高玻纤耐碱性[J]. 山东建材,2005,26(1):16-18.
(YANG Xiaoping, SU Suqin. The application of phosphate in improving the Portland cement's property and increasing the anti-basicity of glass fiber [J]. Shandong building materials, 2005, 26(1):16-18.)
- [13] 汪宏涛,吴传明,唐春平. 磨细粉煤灰对磷酸盐快补材料基材料性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用,2005(6):38-40.
(WANG Hongtao, WU Chuanming, TANG Chunping. Influence of pulverized coal ash on properties of phosphate based fast filling material [J]. Comprehensive utilization of fly ash, 2005(6):38-40.)
- [14] BENSTED J. A discussion of the paper: rapid setting magnesium phosphate rapid repairing materials for quick repair of concrete pavements characterization and durability aspects [J]. Cement and concrete research, 1994, 24(3):595.
- [15] 涂平涛. 氯氧镁材料技术与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
(TU Pingtao. Technology and application of magnesium oxychloride materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.)
- [16] CHANDRAWAT M P S, YADAV R N. Effect of aluminum phosphate as admixture on oxychloride cement [J]. Bull. Mater. Sci., 2000, 23(1):69-72.
- [17] DENG Dehua, ZHANG Chuanmei. The effect of acuminate minerals on the Phases in magnesium oxychloride cements [J]. Cement and concrete research, 2006(26):1203-1211.
- [18] 季允松,武忠仁,张福珍. 添加剂对新型抗水镁水泥显微结构和性能的影响[J]. 无机材料学报,1995,(2):241-247.
(JI Yunsong, WU Zhongren, ZHANG Fuzhen. Effects of additives on the microstructure and properties of new water resistant magnesium cement [J]. Proceedings of the inorganic materials, 1995, (2):241-247.)
- [19] SANTHANAM M, COHEN M D, OLEK J. Sulfate attack research-wither now [J]. Cement and concrete research, 2001, 31(5):845-855.