

文章编号:1001-4888(2014)06-785-09

化学腐蚀对混凝土材料力学特性影响的试验研究^{*}

韩铁林^{1,2}, 陈蕴生^{1,2}, 师俊平¹, 马文涛³

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西西安 710048; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西西安 710048;

3. 宁夏大学 数学计算机学院, 宁夏银川 750021)

摘要: 对不同水化学环境腐蚀过程中砂浆试样物理力学性质进行了试验研究, 分析了溶液 pH 值、浓度及水化学成分对砂浆的腐蚀程度, 探讨了砂浆试样的化学腐蚀机制。试验结果表明: 在相对封闭的环境条件下, 无论是哪种水化学溶液, 随着化学侵蚀时间的加长, 溶液的 pH 值均趋于碱性; 同时, 溶出的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子具有累积性特点。在其他条件相同的情况下, 水化学溶液的离子成分对砂浆试样的腐蚀程度各不相同。酸性条件下, Na_2SO_4 溶液砂浆试样物理化学性质的影响要比 NaHCO_3 溶液大; 中性条件下, 与纯净的蒸馏水相比, Na_2SO_4 溶液对砂浆试样的腐蚀作用要强一些。

关键词: 砂浆; 水化学腐蚀; 孔隙率; 腐蚀机理

中图分类号: TU452

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-016

0 引言

土木工程中强度和稳定性的时间效应是一个不容忽视的理论及应用问题, 它直接影响重大土木工程的使用年限和投资效益。为了生存和发展的需要, 岩土工程不断地往地下发展, 其中坝基、边坡、洞室、石油开采、地热开采、核废料地下处置、地下能源储存、地下二氧化碳储存、文物保护等众多与水有关的岩土工程中, 经常会遇到天然材料(岩石)或人工材料(混凝土材料), 在其服役过程中受到周围环境中化学因素的长期作用而使其发生化学变化, 进而影响岩土工程材料的力学特性, 这已是一个众人皆知的客观事实。

地下水, 作为地质环境中最活跃的因素之一, 具有不同的离子成分、酸碱度等, 是一种十分复杂的水化学溶液。水-岩之间的相互作用既包含有物理方面的作用, 也包括复杂的水化学作用, 这两方面的综合作用严重的影响了混凝土材料在服役期间的耐久性, 加之维修或重建的费用巨大, 从而引起了广大学者的重视, 并取得了一定的研究成果^[1-7]。如 Grube 和 Recherberg^[8] (1989) 通过给浸泡砵试样的水溶液中通入 CO_2 来研究酸溶液对砵材料的腐蚀渗透过程, 并基于 Fick 定律提出了理论模型。谢绍东等^[9] (1997) 采用喷淋和周期浸泡两种试验方法来模拟酸雨对砂浆试样的影响, 得出: 砂浆受化学腐蚀后其强度降低, 并且降低的程度与材料中 CaO 和 SO_3^-/CaO 的比值成二元线性关系; 由于酸雨 H^+ 的侵蚀作用使砂浆中 MgO 、 CaO 、 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 组分流失。霍润科等^[10] (2006) 采用加速试验的方法对在酸性环境条件下不同时间段的砂浆试样所表现出来的物理性质进行了试验研究, 测定了不同时段砂浆试样的纵波波速以及溶液 Ca^{2+} 、 H^+ 浓度的变化, 得到: 不同时间段砂浆试样所表现出的物理性质有较大的差别, 其化学腐蚀过程具有明显的阶段性及 Ca^{2+} 的溶出具有明显的滞后性。同时对比分析了酸性化

^{*} 收稿日期: 2013-01-31; 修订日期: 2014-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(51269024)资助

通讯作者: 韩铁林(1985-), 男, 博士生。主要从事岩石力学方面的试验研究。E-mail: s3050210133@163.com

学溶液对不同尺寸的砂浆试样的影响程度。但以往的研究大多局限于模拟酸雨对混凝土材料的腐蚀作用,即仅考虑溶液 pH 值的影响,未考虑溶液的浓度及其化学成分的影响,关于这方面的研究有待开展进一步的试验研究。

本文模拟不同的水化学环境,分析了 pH 值、浓度及化学成分对试样力学特性的影响,并在试验的基础之上,探讨了水化学腐蚀机理,可为与水有关的岩体工程的安全性和稳定性提供一定的借鉴作用。

1 试验仪器及方法

1.1 试验仪器及试样制备

试验仪器采用西安理工大学岩土所与长春朝阳试验仪器有限公司联合研制的 WDT-1500 多功能材料试验机,该试验机由轴向加载系统、围压加载系统、横向剪切系统、声波检测系统、计算机控制与量测系统 5 个部分组成。最大轴向力为 1500kN,最大围压为 80MPa,轴向、径向变形测量范围分别为 0~10mm 和 0~5mm。

试验采用 C(灰):S(砂):W(水)=1:2:0.5 砂浆试样,水泥选用陕西秦岭 P. O32.5(其成分详见表 1),砂料选用西安浐河砂,并对其水洗干净烘干处理,同时对砂粒粒径级配进行了严格的控制,目的是为了保证砂浆试件所用骨料的均匀性。所用砂粒骨料粒径级配重量比为 $\phi 1(0.16\sim 0.315\text{mm})$: $\phi 2(0.315\sim 0.63\text{mm})$: $\phi 3(0.63\sim 1.25\text{mm})$: $\phi 4(1.25\sim 2.50\text{mm})=5\%:30\%:40\%:25\%$,铸模一次成型,加工成 $\phi 50\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的圆柱形状砂浆试样,养护 24h 脱模,然后在养护箱内(20℃,湿度 90%)养护 28d 后,取出自然风干。试验前,先对试件进行声波波速测试,剔除差异比较大的试件,并依据纵波波速对砂浆试件进行分组。

表 1 通用硅酸盐水泥(复合)P. O32.5 的检验报告

Tab. 1 The inspection report of P. O32.5 general purpose portland cement (composite)

项目	细度 45 μm 方孔筛筛余	SO ₃	MgO	Cl ⁻	凝结时间		安定性	三天强度	
					初凝	终凝		抗折	抗压
计量单位	%	%	%	%	分		合格	MPa	
技术要求	≤30.0	≤3.5	≤6.0	≤0.06	≥45	≤600	煮沸法检验合格	≥3.5	≥15.0
实测值	16.5	2.76	2.22	0.020	131	182	合格	5.3	23.2

采用饱和浮力称重法测定试样的孔隙率,试验前将试件放在 105℃烘箱内烘 24h,然后测定每块试样的干燥质量及其波速度。砂浆试样的密度介于 2.02~2.08g/cm³ 之间,纵波速度变幅在 3602~3781m/s,孔隙率范围为 8.07%~9.59%,这说明砂浆样的物理性质相对均匀。

1.2 试验方案

本文在模拟中主要考虑 Na⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 离子对试样的影响,选择了 Na₂SO₄、NaHCO₃ 两种溶液。由于环境中水岩相互作用是一个长期而缓慢的过程,在试验过程中,为了在较短的时间尺度内观察到这种变化,以及排除一些因素的干扰,采用浓度较大、pH 值较小(酸性较强)或较大(碱性较强)来模拟。试验所配置化学溶液如表 2 表示。

表 2 化学溶液的配制

Tab. 2 Preparation of chemical solution

成分	浓度(mol · L ⁻¹)	pH 值
Na ₂ SO ₄	0.01	1, 3, 7, 9
NaHCO ₃	0.01	3
蒸馏水		7
Na ₂ SO ₄	0.1, 0.5	3

2 试验结果及分析

下面分析不同 pH 值、不同浓度及不同溶液化学成分条件下砂浆的物理力学特征。

2.1 变形特征

限于篇幅,下面主要对不同 pH 值条件下砂浆试样的变形特性进行分析,图 1、图 2 为不同 pH 值化学溶液侵蚀 1、2 个月后砂浆试样的应力—应变全过程关系曲线图。从图 1 中可以看出:砂浆试样($\sigma_1 - \sigma_3$)— ϵ_1 关系曲线都经历了微裂隙的压密阶段、弹性阶段、屈服破坏阶段。随着腐蚀时间的加长,初始的压密阶段有延长的趋势。这主要是由于在水化学溶液与砂浆试样相互作用的过程中,试样的砂颗粒矿物被溶蚀或其胶结物被溶解后而发生脱落,使得试样的孔隙率增大而产生加长的压密阶段;而弹性阶段相对应则变短,屈服阶段变得越来越明显,试样破坏时延性增强。

从图 2 中可以看出:砂浆试样的 $\epsilon_3 - \epsilon_1$ 关系曲线同样也都有压密、弹性、屈服阶段和破坏阶段。压密阶段时,砂浆试样的侧向变形较小;在弹性阶段,试样的侧向变形与轴向变形成线性关系,但侧向变形的增加速率较其轴向变形小一些;直到屈服破坏阶段,侧向变形与轴向应变偏离直线段,侧向变形迅速增加,而且浓度越大其增加的越快。同时随着腐蚀时间的延长,在压密阶段和弹性阶段几乎观察不到侧向变形,直到屈服破坏阶段,侧向变形才越来越明显。

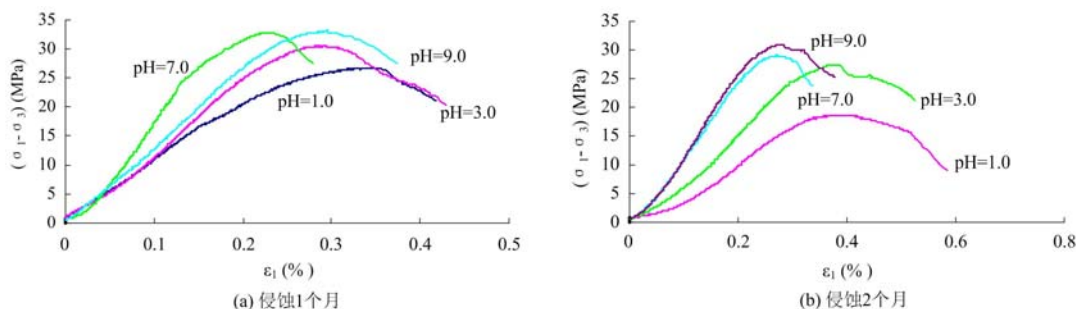


图 1 0.01mol/L Na_2SO_4 pH=1,3,7,9 时,砂浆试样($\sigma_1 - \sigma_3$)— ϵ_1 关系曲线

Fig. 1 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ of mortar sample in 0.01mol/L Na_2SO_4 of pH=1,3,7,9

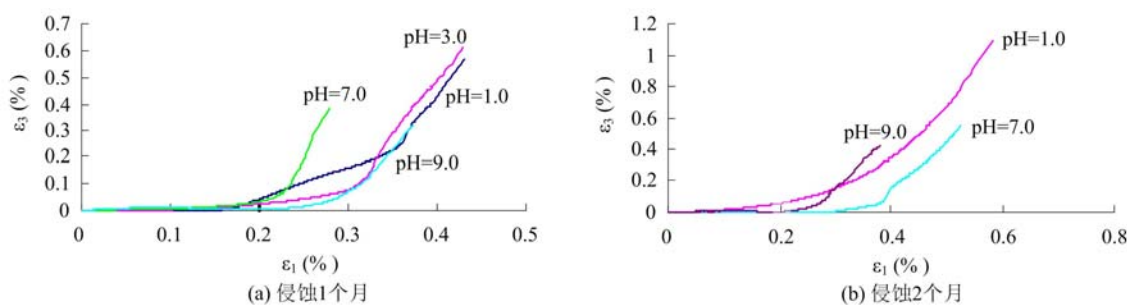


图 2 0.01mol/L Na_2SO_4 pH=1,3,7,9 时,砂浆的 $\epsilon_3 - \epsilon_1$ 关系曲线

Fig. 2 Curves of $\epsilon_3 - \epsilon_1$ of mortar sample in 0.01mol/L Na_2SO_4 of pH=1,3,7,9

2.2 强度特征

在不同的水化学溶液腐蚀的过程中,砂浆试样强度的变化情况详见表 3。试验结果表明:

(1) 无论哪种水化学溶液,随着浸泡时间的加长,试样的峰值强度和其弹性模量随着减少,而峰值应变有所增大。在其他条件相同的情况下,随着溶液酸性的增加,试样的峰值强度及弹性模量逐渐减小。

(2) 在其他条件相同的情况下,随着浓度的增加,砂浆试样的峰值强度逐渐降低,并且浓度越大,其降低幅度也就越明显。

(3) 在其他条件相同的情况下,随着浸泡时间的加长,0.01mol/L pH=3.0 的 Na_2SO_4 溶液,砂浆试样的峰值强度由 30.512MPa 降低为 27.129MPa,降低了 11.09%;0.01mol/L NaHCO_3 pH=3 溶

液,其值由 31.1471MPa 降低为 28.991MPa,降低了 6.92%;在 Na_2SO_4 溶液中其降低的幅度要大一些,这说明:在其他条件不变的情况下,化学溶液种类对砂浆试样腐蚀作用不同,相同条件下的 Na_2SO_4 溶液对试样的腐蚀程度较 NaHCO_3 溶液相对大一些。

表 3 不同化学溶液下砂浆试样单轴压缩试验结果

Tab. 3 Uniaxial test results of mortar sample under different water chemical solution

试样状态	水化学环境	pH 值	浓度 (mol/L)	峰值强度 (MPa)	峰值应变 ϵ_1 (%)	弹性模量 (GPa)	泊松比
自然状态				38.2	0.356	15.55	—
饱水(浸泡 30d)	Na_2SO_4 溶液	1	0.01	26.684	0.325	11.23	—
饱水(浸泡 60d)	Na_2SO_4 溶液	1	0.01	18.625	0.394	9.1	0.272
饱水(浸泡 30d)	Na_2SO_4 溶液	3	0.01	30.512	0.289	14.29	0.229
饱水(浸泡 60d)	Na_2SO_4 溶液	3	0.01	27.129	0.379	10.26	0.248
饱水(浸泡 30d)	Na_2SO_4 溶液	7	0.01	32.689	0.226	17.25	0.223
饱水(浸泡 60d)	Na_2SO_4 溶液	7	0.01	29.13	0.27	13.63	0.26
饱水(浸泡 30d)	Na_2SO_4 溶液	9	0.01	33.2	0.296	15.73	0.244
饱水(浸泡 60d)	Na_2SO_4 溶液	9	0.01	30.873	0.276	15.4	0.359
饱水(浸泡 30d)	Na_2SO_4 溶液	3	0.1	29.14	0.27	14.5	0.239
饱水(浸泡 60d)	Na_2SO_4 溶液	3	0.1	25.334	0.294	12.77	0.278
饱水(浸泡 30d)	Na_2SO_4 溶液	3	0.5	28.991	0.24	15.05	0.263
饱水(浸泡 60d)	Na_2SO_4 溶液	3	0.5	24.612	0.249	11.24	—
饱水(浸泡 30d)	NaHCO_3 溶液	3	0.01	31.147	0.24	15.43	0.244
饱水(浸泡 60d)	NaHCO_3 溶液	3	0.01	28.991	0.226	17.25	0.223
饱水(浸泡 30d)	蒸馏水	7	0.01	34.157	0.308	17.36	0.217
饱水(浸泡 60d)	蒸馏水	7	0.01	32.86	0.31	14.43	0.234

2.3 水溶液 pH 值变化规律

从试验开始计时,分不同的时间段测量水化学溶液的 pH 值,得到各种环境下水化学溶液 pH 值随时间的变化规律,如图 3 所示。

(1) 无论是哪种水化学溶液,随着化学侵蚀时间的加长,溶液的 pH 值均趋于碱性。这主要是由于试验所用的硅酸盐水泥在水解和水化反应的过程中生成了硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙等矿物,前两者水化生成了水化硅酸钙和氢氧化钙,大量氢氧化钙的生成是水泥浆体呈现碱性的主要原因;另外水化产物水化铝酸钙等也呈碱性,加之随着化学反应的进行,溶液中的 H^+ 逐渐减少。

(2) 在水化学腐蚀的初期,各种条件下的水化学溶液 pH 值变化比较显著,随后随着化学腐蚀时间的加长,溶液 pH 值变化幅度逐渐变小并趋于稳定。这说明:在相对较封闭的系统内,水化学溶液对砂浆试样的腐蚀作用具有时间效应,同时,随着时间的增加,水化学腐蚀作用逐渐减弱并稳定。

(3) 在其他条件相同的情况下,不同浓度条件、不同化学成分条件下化学溶液的 pH 变化趋势基本一致,化学溶液的 pH 值随着腐蚀时间均趋于碱性。

2.4 不同时段溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度的变化规律

从试验开始计时,分不同的时间段测量水化学溶液的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子浓度,得到不同环境下水化学溶液的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度随化学侵蚀时间的变化规律,如图 4~图 7 示。从图中可以得到如下结论和认识:

(1) 无论在何种溶液中,其 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子溶出速率具有明显的阶段性和累积性:试验初期(0~

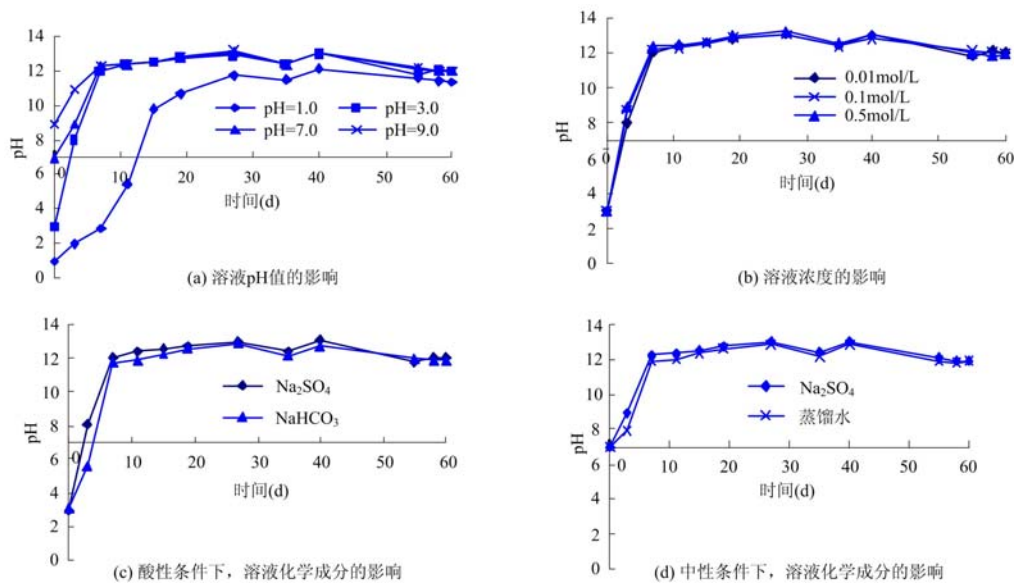
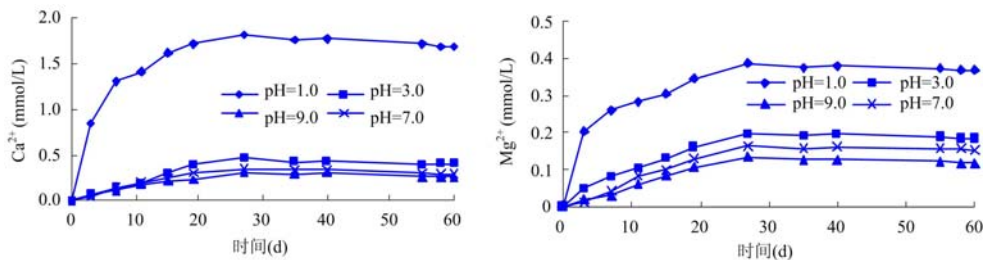
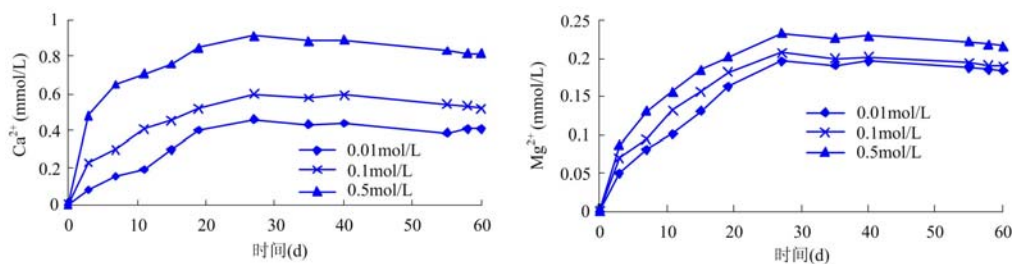


图3 不同水化学溶液条件下,pH 值随时间的变化关系

Fig. 3 Variation of pH value of solutions with time in different water chemical solution conditions

15d),其溶出速率很快;15~30d 时,其溶出的速率逐渐减慢;30~60d 时,其浓度有减小的趋势,当达到某一值以后基本保持不变。

图4 0.01mol/L Na_2SO_4 , pH=1,3,7,9 时,溶液 Ca^{2+} , Mg^{2+} 值随时间的变化关系Fig. 4 Variation of Ca^{2+} , Mg^{2+} value of solutions with time in 0.01mol/L Na_2SO_4 of pH=1,3,7,9图5 0.01mol/L,0.1mol/L,0.5mol/L pH=3 的 Na_2SO_4 溶液 Ca^{2+} , Mg^{2+} 值随时间的变化关系Fig. 5 Variation of Ca^{2+} , Mg^{2+} value of solutions with time in pH=3 Na_2SO_4 of 0.01mol/L,0.1mol/L,0.5mol/L

(2) 考虑溶液 pH 值的影响:不同时间段溶出的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的变化趋势基本相同,并随着酸性的增大, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的溶出量也随着增加。

(3) 考虑溶液浓度的影响:不同时段下 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的变化关系曲线大致相同,同时,随着浓度的增加, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的溶出量也随着增加,但随着化学反应的进一步进行, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子溶出量均有不同程度的降低,并最终趋于稳定。

(4) 考虑溶液化学成分的影响: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的变化趋势与 pH 值、浓度影响下基本一致。

酸性条件下,在相同化学侵蚀时间内, Na_2SO_4 溶液中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子变化幅度相较于 NaHCO_3 溶液大,这说明: Na_2SO_4 溶液对砂浆试样的腐蚀作用较 NaHCO_3 强。中性条件下, Na_2SO_4 溶液中

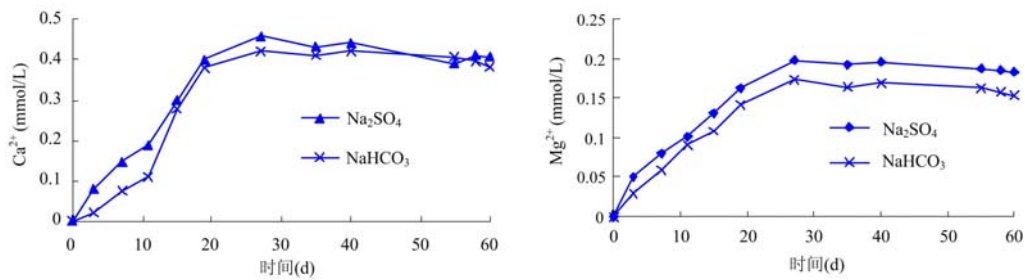


图 6 0.01mol/L pH=3 的 Na_2SO_4 溶液和 NaHCO_3 溶液 Ca^{2+} , Mg^{2+} 值随时间的变化关系

Fig. 6 Variation of Ca^{2+} , Mg^{2+} value of solutions with time in 0.01mol/L pH=3 Na_2SO_4 and 0.01mol/L pH=3 NaHCO_3

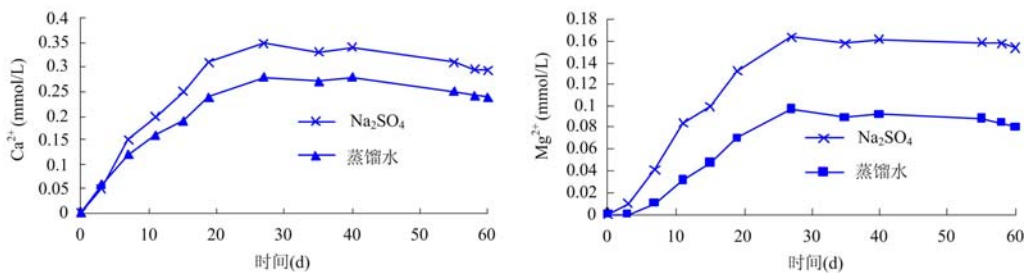


图 7 0.01mol/L pH=7 的 Na_2SO_4 溶液和蒸馏水 Ca^{2+} , Mg^{2+} 值随时间的变化关系

Fig. 7 Variation of Ca^{2+} , Mg^{2+} value of solutions with time in 0.01mol/L pH=3 Na_2SO_4 and Distilled water

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的变化幅度较蒸馏水大,这说明,中性环境对砂浆也存在一定的腐蚀作用,并且 SO_4^{2-} 离子对砂浆试样的腐蚀作用较强。

2.5 砂浆试样孔隙率及纵波波速变化规律

本文定义了反映试样状态的物理量:孔隙率变化率 a 、纵波波速变化率 b ,具体如下所示:

$$a = \frac{\phi_t - \phi_0}{\phi_0} \times 100\% \quad b = \frac{v_0 - v_t}{v_0} \times 100\%$$

式中: ϕ_0 、 v_0 为第 i 块砂浆试样腐蚀前的孔隙率、纵波波速; ϕ_t 、 v_t 为第 i 块砂浆试样被腐蚀 t 天后的孔隙率、纵波波速。

砂浆试样的孔隙率变化率和其纵波波速变化率均随着化学腐蚀时间的加长而增大;砂浆试样的孔隙率随着腐蚀时间的演化而增大,而其纵波波速反而随着化学腐蚀时间的加长而减小。

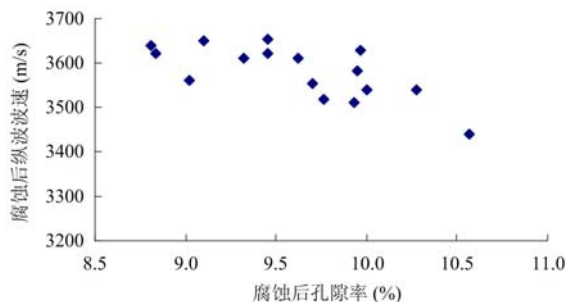


图 8 腐蚀后的试样孔隙率与纵波波速的关系

Fig. 8 Relationship between porosity and velocity of longitudinal wave after sample corroded

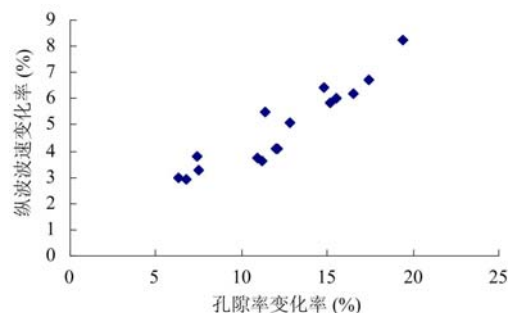


图 9 腐蚀后试样孔隙率变化率与纵波波速变率的关系

Fig. 9 Relationship between variation rate of porosity and velocity of longitudinal wave after sample corroded

从图 8、图 9 中可以看出:随着砂浆试样孔隙率的增大,其纵波波速降低;而试样孔隙率的变化率与其纵波波速变化率之间的一致性比较明显。这说明可以用试样纵波波速的变化来反映其内部孔隙率的变化。

对比腐蚀前后的纵波波速(如图10~图13所示)可知,不同水化学溶液腐蚀后,砂浆试样的孔隙率呈现不同程度的增大,而其纵波波速有所降低;随着化学腐蚀时间的加长,砂浆试样的纵波波速降低幅度越大,其孔隙率增加幅度越大。

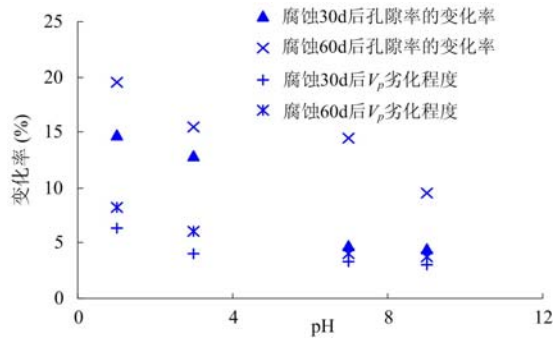


图10 0.01mol/L Na_2SO_4 pH=1,3,7,9 时, 变化率-pH 关系

Fig. 10 Curves of change rate-pH of mortar sample in 0.01mol/L Na_2SO_4 of pH=1,3,7,9

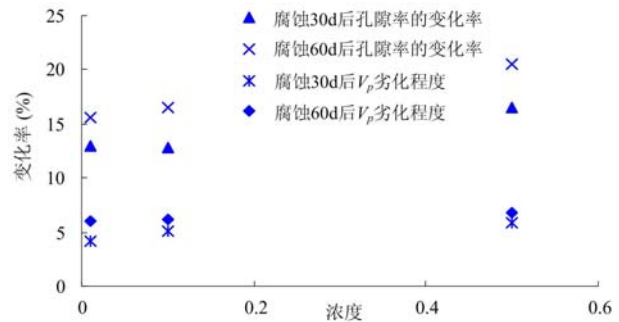


图11 0.01mol/L,0.1mol/L,0.5mol/L Na_2SO_4 pH=3 时,变化率-浓度关系

Fig. 11 Curves of change rate-concentration of mortar sample in pH=3 Na_2SO_4 of 0.01mol/L,0.1mol/L,0.5mol/L

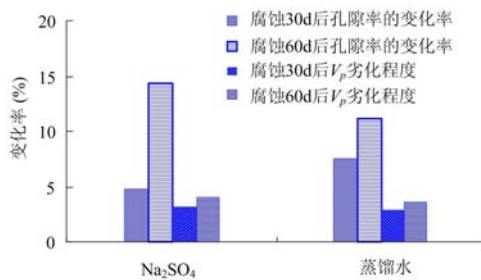


图12 0.01mol/L Na_2SO_4 pH=7 和 蒸馏水 pH=7 时的变化率关系曲线

Fig. 12 Curves of change rate of mortar samples in 0.01mol/L pH=7 Na_2SO_4 and Distilled water

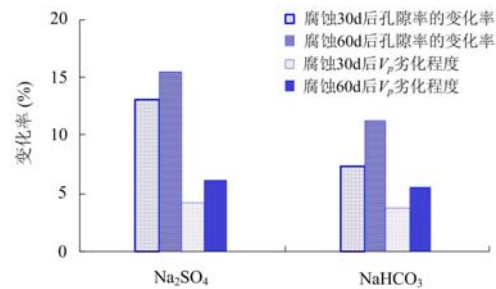


图13 0.01mol/L Na_2SO_4 和 NaHCO_3 pH=3 时, 变化率关系曲线

Fig. 13 Curves of change rate of mortar samples in 0.01mol/L pH=3 Na_2SO_4 and NaHCO_3

3 化学腐蚀机理的探讨

浸泡在不同 pH 值、不同浓度和不同离子成分化学溶液中的砂浆试样,随着化学腐蚀时间的加长,其内部并没有产生裂隙,仅仅呈现出试样的表面变得疏松,并在浸泡试样的磨砂口试剂瓶底部出现砂颗粒脱落物,导致试样的孔隙率增多,不同的水化学溶液对砂浆试样的腐蚀程度各有不同,下面结合砂浆试样的物理力学性质的变化情况,来分析水化学溶液对砂浆试样的腐蚀机制。

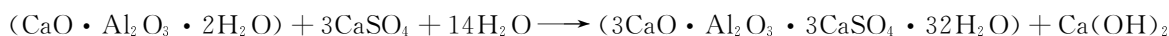
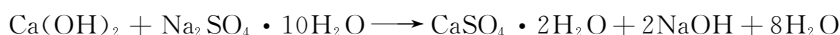
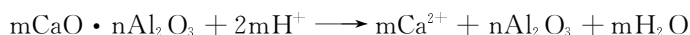
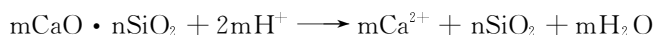
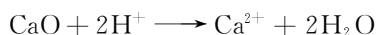
化学溶液中的腐蚀介质通过砂浆试样的孔隙和毛细管等扩散至试样表面,与水泥浆的水化产物发生溶蚀作用,导致试样的孔隙率增加。试样孔隙率的增加,导致相互接触的颗粒及其接触面积减少,表现为试样的强度的降低。因此,与自然状态下砂浆试样相比,经不同水化学溶液腐蚀后的砂浆试样,其强度参数均呈现不同程度的降低,如表3所示。

对比砂浆试样强度参数与其物理参数、化学溶液中离子浓度的变化可知,砂浆试样的强度参数与孔隙率、纵波波速及其从试样中溶出的离子浓度的大小存在一定的关系,即经腐蚀后,试样的孔隙率增加越大或纵波波速降低越多或溶出的离子浓度越多,其强度参数降低程度越大。这主要是由于化学溶液与水泥浆的水化产物发生化学作用(部分化学反应方程式见下文所示),改变了砂浆试样的组分及内部结构特征,使得其孔隙率和损伤增大,导致砂浆试样的强度和纵波波速有所降低。

在其他条件相同的情况下,溶液的酸性越强,化学溶液与试样之间水化学反应越来越充分,反应生成物随着溶液而流出,溶出的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子浓度越大(详见 2.4 节),使得颗粒之间胶结物的胶结作用、相互接触矿物颗粒数量和接触面积减小,最终导致砂浆试样的孔隙率增大,宏观上表现为力学参数的劣化。

酸性条件下, Na_2SO_4 溶液中砂浆试样物理化学性质的影响要比 NaHCO_3 溶液大,这说明: Na_2SO_4 溶液对砂岩试样的腐蚀作用较 NaHCO_3 强。中性环境对砂浆试样也有一定腐蚀作用,与纯净的蒸馏水相比, Na_2SO_4 溶液对砂浆试样的腐蚀作用要强一些。

硫酸盐对砂浆试样腐蚀的部分反应式:



从以上的化学反应式可以知道:溶液中的 H^+ 离子被砂浆试样表面的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中和,生成大量的 Ca^{2+} 离子,导致了砂浆试样内部的孔隙水的碱度下降。同时,砂浆试样中的水化铝酸钙及水化硅酸钙经过化学反应而分解,引起砂浆表面颗粒的脱落,导致其表面结构组分发生变化,破坏了砂浆试样的物理性质,可以从前面砂浆试样物理化学性质分析的物理状态指标中得到全面的反映。

4 结论

通过对溶液 pH 值、浓度和化学溶液成分对砂浆试样化学腐蚀的研究,得到:不同的水化学溶液对其物理化学性质都有不同程度的影响。将初步的结论归纳如下:

(1) 在相对封闭的环境条件下,无论是哪种水化学溶液,随着化学侵蚀时间的加长,溶液的 pH 值均趋于碱性。

(2) 无论在何种溶液中,不同时间段溶出的 Ca^{2+} 离子和 Mg^{2+} 离子的浓度变化趋势基本相同,并具有明显的阶段性和累积性特点,即试验初期,其变化速率很快,之后其变化速率逐渐减慢并有减小的趋势,直到某一值以后基本保持不变。

(3) 随着腐蚀时间的加长,砂浆试样的延性增强脆性减弱。这主要是由于化学侵蚀使得试样的孔隙率增大而产生加长的压密阶段,弹性阶段则相应变短,屈服阶段变得越来越明显。

(4) 在其他条件相同的情况下,水化学溶液的离子成分对砂浆试样的腐蚀程度各不相同。酸性条件下, Na_2SO_4 溶液中砂浆试样物理化学性质的影响要比 NaHCO_3 溶液大;中性条件下,与纯净的蒸馏水相比, Na_2SO_4 溶液对砂浆试样的腐蚀作用要强一些。

(5) 对腐蚀后的试样进一步观察分析得出:从试样的表面到未被腐蚀区,其沉淀的颜色分别为:腐蚀区的弱褐色(主要为铁的化合物)、浅紫色(其主要的物质是氢氧化物: $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$)、未被腐蚀区域的深灰色或深青灰色。

参考文献:

- [1] Fattuhi N I, Hughes B P. The performance of cement paste and concrete subjected to sulphuric acid attack[J]. Cement Concrent Research, 1988, 18:545—553.
- [2] Kong L H, James G. Concrete deterioration due to acid precipitation[J]. ACI Materials Journal, 1987, 84:110—116.
- [3] Chandra S. Hydrochloric acid attack on cement mortar—an analytical study[J]. Cement Concrent Research, 1988, 18:193—203.

- [4] Attiogbe K, Rizkalla S H. Response of concrete to sulfuric acid attack[J]. ACI Materials Journal, 1988, 85:481—488.
- [5] 郑楠. 环境侵蚀下水泥砂浆力学性能的试验研究[D]. 沈阳工业大学, 2008 (ZHENG Nan. Experimental Study for Cement Mortar's Mechanical Capability under Environmental Erosion [D]. Shenyang University of Technology, 2008(in Chinese))
- [6] 李鹏, 刘建, 李国和 等. 水化学作用对砂岩抗剪强度特性影响效应研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):380—386 (LI Peng, LIU Jian, LI Guohe, et al. Experimental study for shear strength characteristics of sandstone under water-rock interaction effects[J]. Rock and Mechanics, 2011, 32(2):380—386(in Chinese))
- [7] 霍润科. 酸性环境下砂浆、砂岩材料的受酸腐蚀过程及其基本特性劣化规律的试验研究[D]. 西安理工大学, 2006 (HUO Runke. Experimental research on progressive and deteriorative characteristics of sandstone and mortar materials subjected to hydrochloric acid corrosion[D]. Xi'an University of Technology, 2006(in Chinese))
- [8] Grube H, Rechenberg W. Durability of concrete structures in acidic water[J]. Cement Concrete Research, 1989, 19:783—787.
- [9] 谢绍东, 周定. 模拟酸雨对砂浆强度、物相和孔结构影响的研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1):25—31 (XIE Shaodong, ZHOU Ding. Influence of simulated acid rain on strength, crystal and pore structures of sand-lime slurry[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(1):25—31(in Chinese))
- [10] 霍润科, 李宁, 张浩博. 酸性环境下类砂岩材料物理性质的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9):1541—1544 (HUO Runke, LI Ning, ZHANG Haobo. Experimental study on physical characteristics of mortar subjected to Hydrochloric acid attack[J]. Rock and Mechanics, 2006, 27(9):1541—1544 (in Chinese))

Experimental Study of the Influence of Hydrochemical Corrosion on Mechanical Characteristics of Concrete Materials

HAN Tie-lin^{1,2}, CHEN Yun-sheng^{1,2}, SHI Jun-ping¹, MA Wen-tao³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Xi'an University of Technology, Xi'an 7100483, Shaanxi, China; 3. School of Mathematics and Computer Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Experimental study of mechanical characteristics of mortar samples subjected to hydrochemical erosion in different environments was carried out. The influence of pH values, concentration and hydrochemical composition of solution on corrosion of mortar specimen was analyzed; and the mechanism of hydrochemical erosion of mortar sample was explored. Experimental results show that under relatively closed environment condition, no matter what kind of hydrochemical solution, their pH values tend to alkaline with longer erosion time; at the same time, dissolved out Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ions present cumulative feature. Under the same conditions, the ion's composition of hydrochemical solution exerts different corrosion extents on mortar samples. Under acidic condition, the influence on physico-chemical characteristics of Na_2SO_4 solution mortar samples is larger than that of NaHCO_3 solution; under neutral conditions, compared with pure distilled water, Na_2SO_4 solution exerts stronger erosion on mortar samples.

Keywords: mortar; hydrochemical erosion; porosity; corrosion mechanism