

硫酸盐侵蚀作用下水泥砂浆水力劈裂特性

李 凌,徐力群,吴 琼,杜 坤,林 文

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究硫酸盐侵蚀作用下水泥砂浆水力劈裂特性,利用三场耦合试验系统,设计4种试验工况进行水力劈裂试验,分析不同pH值的硫酸盐溶液、不同侵蚀时间下水泥砂浆力学性能和抗水力劈裂能力。试验结果表明,不同pH值的硫酸盐溶液对水泥砂浆的水力劈裂力学特性有不同影响,在侵蚀后期,对于0.1 mol/L的Na₂SO₄溶液,pH值分别为7、3、1时,对砂浆试样水力劈裂力学特性的侵蚀劣化程度逐渐减小;硫酸盐侵蚀下的水泥砂浆抗水力劈裂能力和侵蚀时间有较好的三次函数相关关系。

关键词:水泥砂浆;硫酸盐侵蚀;水力劈裂特性;劣化;pH值

中图分类号:TV36 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)03-0083-06

Hydraulic fracture characteristics of cement mortar under sulfate attack//LI Ling, XU Liqun, WU Qiong, DU Kun, LIN Wen(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the hydraulic fracture characteristics of cement mortar under sulfate attack, four test conditions were designed using a three-field coupling test system. The mechanical properties and hydraulic fracture resistance of cement mortars in sulfate solutions with different pH values and with different erosion times were analyzed. The experimental results show that the cement mortars in sulfate solutions with different pH values has different effects on the mechanical properties of hydraulic fracture. In the later stage of erosion, the deterioration degrees of hydraulic fracture properties of mortar in the 0.1 mol/L Na₂SO₄ solution with pH values of 7, 3 and 1 gradually decrease. It was found that the hydraulic fracturing resistance of cement mortar under sulfate attack has a significant cubic function relationship with the erosion time.

Key words: cement mortar; sulfate attack; hydraulic fracture characteristics; deterioration; pH value

水泥砂浆材料在土木、水利等工程领域拥有广泛应用,而水环境中存在的Na⁺、Mg²⁺、H⁺、SO₄²⁻等离子会不可避免地对水泥砂浆结构产生影响,在化学侵蚀作用下,砂浆内部结构中的孔隙和微裂缝会进一步发展、汇聚,进而改变砂浆物理力学性能,而高渗透水压环境会使其损伤区加速劣化,从而发生水力劈裂现象。

针对水泥砂浆水力劈裂问题和水化学溶液侵蚀作用下水泥砂浆物理力学特性,国内外学者通过试验和数值分析等手段进行了研究。王国庆等^[1]采用高压渗流应力耦合试验仪对厚壁圆筒砂浆试件进行了水力劈裂试验,探讨了不同压力环境下砂浆的破坏机理。陈勉等^[2]采用立方体水泥砂浆试件研究了裂纹扩展规律。刘得潭等^[3-4]研究了不同初始

裂缝宽度、长度和材料强度对水力劈裂临界水压力的影响。徐力群等^[5]采用中心带预制裂缝的水泥砂浆立方体试样,研究内水压力和单轴压缩耦合作用下岩体的破坏规律。Ito等^[6]采用中央带井孔的立方体试件,注入高压黏性油进行三轴水力劈裂试验,提出了水力劈裂临界水压力经验公式。唐红侠^[7]对石膏水泥基材料进行内置预裂缝的真三轴力学试验,研究了试件破坏形态和机理。霍润科等^[8-9]采用加速试验的方法对酸性环境条件下砂浆试样的物理性质变化规律进行了试验研究。Yu等^[10]研究了溶液中SO₄²⁻浓度对砂浆力学性能劣化的影响和机理。吴琼等^[11]研究了不同水化学溶液、不同腐蚀龄期下砂浆试样物理力学特性的劣化规律。郭玉柱等^[12-14]研究了低温条件下不同水泥品

种、水灰比、矿物掺合料和温度对砂浆材料抗硫酸盐侵蚀性能的影响。Okochi 等^[15]采用室内喷淋方式模拟酸雨对混凝土的侵蚀,发现酸雨中 H^+ 浓度越大,混凝土受侵蚀越严重。甘磊等^[16]针对不同强度单裂缝混凝土试件,研究了应力状态和荷载施加方式对裂缝扩展过程影响,发现试件水压尖端的发展滞后于干裂缝的发展。

本文选取不同 pH 值的硫酸盐溶液浸泡侵蚀试样,开展不同侵蚀时间下水泥砂浆力学性能和抗水力劈裂能力的试验研究,探讨硫酸盐溶液侵蚀作用下水泥砂浆试样的水力劈裂破坏机理。

1 试验材料与方法

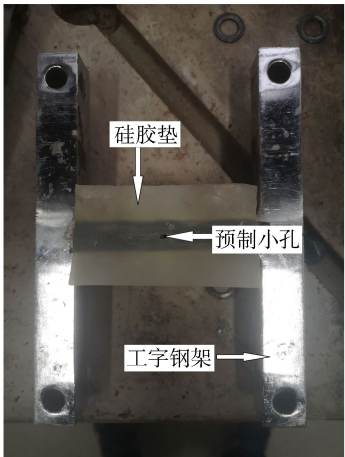
1.1 试样制备

采用水泥砂浆开展试验,水泥选用南京龙潭镇 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,砂选用天然河砂(中砂),对其进行干燥、筛分处理,以保证砂浆试件所用骨料的均匀性,试验水为桶装蒸馏水。采用灰、砂、水比例为 1:3:0.5 的配合比(质量比)制备两种不同尺寸的试样。力学性能试验采用边长为 70.7 mm 的实心立方体试件,水力劈裂试验采用中央含有穿透性预制裂缝的试样,其尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,初始预制裂缝长度为 50 mm,缝宽为 2 mm。

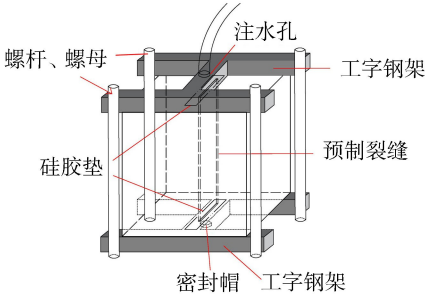
1.2 试验装置

机械加载系统包括电液伺服万能试验机和 TestSoftV1.1 采集分析软件。水压由该系统控制的电动施压泵提供,最大可施加水压力为 3 MPa。耐高压弯管用于连接电动施压泵与水密封装置。水密封装置由上下工字钢密封层和硅胶垫组成(图 1)。上下工字钢架通过螺杆、螺母上下连接而成,钢架中部螺纹孔上下分别与特制进水接口、密封帽连接。防水硅胶垫长 120 mm、宽 20 mm、厚 2 mm,在其中心位置用高强度环氧树脂胶粘贴黑色硅胶块,嵌入在工字钢内侧凹槽,并在环氧树脂胶与黑色硅胶块两者中心预制小孔,具有良好的密封效果。试验时,将粘有应变片的试样置于水密封装置中,将预制裂缝对准工字钢架中央小孔。待加载水流进入预制裂缝并从底部螺纹孔流出后,用密封帽密封底部螺纹孔,确保试样内部高水压力。

动态数据采集系统由应变变调器、东华动态采集分析仪和 DHDAS 采集分析软件组成。采集分析仪可记录并显示多种物理量,如压力、位移、应变等。采用台湾衡欣高精度水质 pH 计测量 pH 值,该 pH 计精度为 0.01,量程为 0.00~14.00。在测量浸泡溶液的 pH 值时,选取 3 个不同区域进行测量,取平均值作为最后结果。



(a) 工字钢架及硅胶垫



(b) 试样组装示意图

图 1 水密封装置

1.3 试验方案

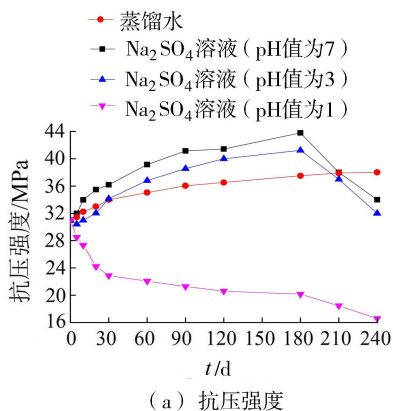
考虑酸雨、工业水污染和试验研究难度等因素,本次模拟试验主要考虑 H^+ 、 SO_4^{2-} 离子对砂浆的影响,采用 0.1 mol/L Na_2SO_4 溶液环境开展试验。同时,为了加速水泥砂浆化学腐蚀过程,分析水泥砂浆材料强度劣化规律,采用 H_2SO_4 调节溶液的 pH 值,一共配置 4 种溶液进行对比试验,分别为 pH 值为 7、3、1 的 0.1 mol/L Na_2SO_4 溶液和 pH 值为 7 的蒸馏水。砂浆试样经养护 28 d 自然风干后,分别放入配制好的 4 种溶液中,并让溶液完全没过表面。当浸泡 5 d、10 d、20 d、30 d、60 d、90 d、120 d、180 d、210 d、240 d 后分别取出试样进行力学强度特性和水力劈裂试验。

2 试验结果与分析

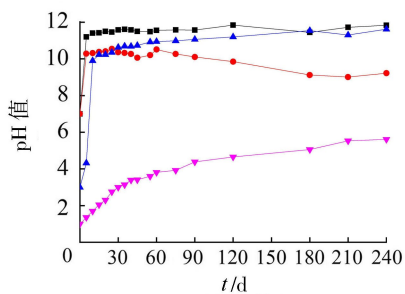
2.1 化学侵蚀作用对水泥砂浆抗压强度的影响

在宏观上化学侵蚀作用的主要表现为砂浆试样力学参数的劣化,取不同溶液及不同侵蚀时间 t 的砂浆试样进行抗压强度试验,得到不同溶液下水泥砂浆抗压强度变化曲线如图 2(a) 所示。初始状态下试样的抗压强度为 31 MPa。

由图 2(a) 可以得出,在蒸馏水环境中,水泥砂浆试样的抗压强度随侵蚀时间增加而增大,侵蚀 180 d 达到 37.51 MPa 后趋于稳定,为初始状态下抗



(a) 抗压强度



(b) pH 值

图2 水泥砂浆试样抗压强度和溶液 pH 值变化曲线

压强度的 1.21 倍。图 2(b) 为溶液 pH 值随侵蚀时间的变化,可以看出,即使在中性蒸馏水环境下,试样仍会发生溶出性侵蚀(Ca^{2+} 和 OH^- 析出),溶液变为碱性,同时生成水化产物 C-S-H 凝胶和 C-H 晶体,这对砂浆结构仍有一定的影响。

在 pH 值为 7 的 Na_2SO_4 溶液环境中,砂浆的抗压强度随侵蚀时间的增加呈先增大后减少的变化趋势,在侵蚀时间 180 d 时达到最大值 43.78 MPa,为初始状态下抗压强度的 1.41 倍,随后抗压强度急剧下降,在侵蚀时间 240 d 时仅为 34.01 MPa,抗压强度较侵蚀时间 180 d 时降低 22.32%。溶液的 pH 值随侵蚀时间的延长而增大,且较蒸馏水环境下增加得更多。这是由于砂浆试样除了发生溶出性侵蚀外,还发生硫酸盐侵蚀,溶液中的 SO_4^{2-} 前期与水泥水化产物反应生成结晶产物石膏、钙矾石等,填充了砂浆试块中孔隙结构,一定程度上提高了砂浆试样结构强度,但随着侵蚀时间增加,侵蚀产物堆积膨胀,试样裂缝发育扩张,抗压强度减小。

在 pH 值为 3 的 Na_2SO_4 溶液环境中,砂浆试样在侵蚀时间 5 d 时抗压强度相较初始状态减小 1.91%。由于侵蚀初期阶段溶液为酸性环境,其中的 H^+ 极易与砂浆的水化产物反应,使得砂浆棱角剥落,导致砂浆试样因缺陷产生应力集中,整体抗压强度降低。随着侵蚀时间的增加, H^+ 浓度降低,溶液逐渐由酸性变为碱性,进入了硫酸盐侵蚀阶段。

在 pH 值为 1 的 Na_2SO_4 溶液环境中,由于 H^+ 浓

度很大,溶液的 pH 值随侵蚀时间的延长有所增加,但砂浆试样仍一直处于酸性侵蚀阶段。砂浆强度的劣化程度较其他 3 种溶液环境下明显大得多,在侵蚀时间 240 d 时,砂浆抗压强度仅为 16.60 MPa,较初始状态下抗压强度降低了 46.45%。

2.2 化学侵蚀作用对水泥砂浆临界水压力特性的影响

进行砂浆试样水力劈裂特性试验时,当试样所受水压达到临界水压力 P_c 时,电动施压泵的电调压力会陡降至 0 附近,同时试样预制裂缝会扩展贯通整个试件,从而发生劈裂破坏。

以 pH 值为 7 的 Na_2SO_4 溶液浸泡 5 d 的第一个试样 A-1-1 为例(图 3),可以看出,砂浆试样的水压力由 148 s 的 1.927 MPa 升至 149 s 的 1.948 MPa,随后在 150 s 迅速跌落至 0.887 MPa,并继续下降至 0 附近。由此可以认为试样 A-1-1 在 149 s 发生水力劈裂破坏,水力劈裂临界水压力为 1.948 MPa。

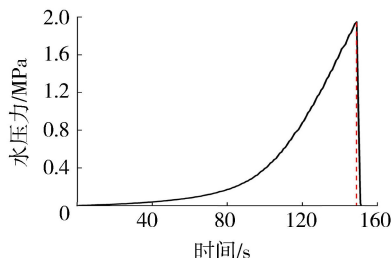


图3 试样 A-1-1 水压加载过程变化曲线

每组工况选取 3 个试样的平均值作为最终的水力劈裂临界水压力,不同溶液中砂浆试样水力劈裂临界水压力变化如图 4 所示。初始状态(未侵蚀)试样的水力劈裂临界水压为 1.69 MPa。

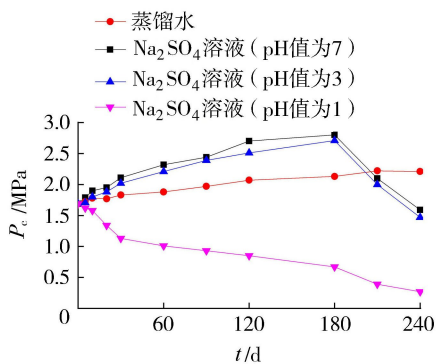


图4 砂浆试样水力劈裂临界水压力变化曲线

从图 4 可以得出,不同溶液侵蚀环境中砂浆试样水力劈裂临界水压力 P_c 较初始状态下均发生变化。在蒸馏水环境中,砂浆试样的 P_c 随侵蚀时间的增加而增大,在 180 d 后变化幅度较小, P_c 值在 2.13 ~ 2.23 MPa 之间,趋于稳定。在 pH 值为 7 的中性环境和 pH 值为 3 的弱酸性环境中,砂浆试样的 P_c 都随侵蚀时间的延长先增大后减小,并在 180 d 时达到峰

值,相较初始状态下分别增加 65. 68% 和 60. 36% ; 180 d 后砂浆试样的水力劈裂临界水压力急剧减小, 240 d 时较初始状态下分别减小 27. 22% 和 33. 73%。值得指出的是,在 pH 值为 3 的弱酸性环境中,砂浆试样的 P_c 变化规律与抗压强度变化规律存在一定差异,在侵蚀时间 0 ~ 10 d 期间,砂浆试样的 P_c 并没有出现先减小后增大的现象,这是因为试样的中心预制裂缝与溶液的接触面积较小, H^+ 对砂浆结构的劣化作用不明显。在 pH 值为 1 的强酸性环境中,砂浆试样的 P_c 随侵蚀时间的延长不断减小,劣化程度最大,240 d 时水力劈裂临界水压力仅为 0. 27 MPa,较初始状态下减小 84. 02%。

为定量研究中央有预制裂缝的砂浆试样水力劈裂临界水压力变化特性,定义损伤变量 K 以反映砂浆试样在不同溶液侵蚀下抗劈裂能力的劣化程度:

$$K = \frac{P_{ct}}{P_{c0}} \tag{1}$$

式中: P_{c0} 为初始状态下中央含有穿透性预制裂缝的砂浆试样水力劈裂临界水压力,MPa; P_{ct} 为 t 时刻中央含有穿透性预制裂缝的砂浆试样水力劈裂临界水压力,MPa。

根据式(1)分别计算不同溶液中不同侵蚀时间下的损伤变量 K 变化过程,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,在蒸馏水环境中,砂浆试样的损伤变量 K 和侵蚀时间 t 在 0 ~ 180 d 时存在较为明显的线性关系,可表达为 $K=1.62\times10^{-3}t+1.019$ 。拟合曲线的决定系数 $R^2=0.9819$,这也证实了一次线性函数可以较好地反映在蒸馏水环境下水泥砂浆试样的抗高水压力劈裂能力和侵蚀时间的关系。

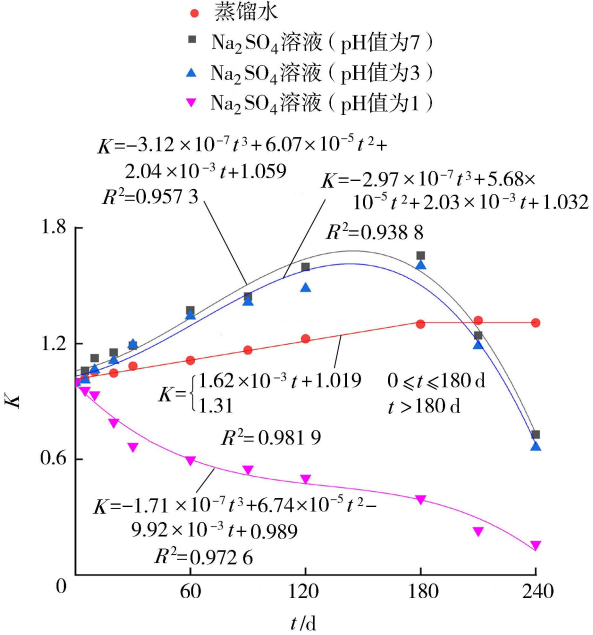


图5 砂浆试样的损伤变量和侵蚀时间关系曲线

在 Na_2SO_4 溶液环境中,采用不同函数拟合砂浆试样的损伤变量 K 和侵蚀时间 t 之间的关系,各函数拟合的决定系数 R^2 如表 1 所示。

表 1 Na_2SO_4 溶液环境下不同函数拟合结果的决定系数

溶液 pH 值	二次函数	三次函数	四次函数	五次函数
7	0. 838 6	0. 957 3	0. 980 8	0. 990 1
3	0. 831 5	0. 938 8	0. 978 9	0. 982 7
1	0. 901 2	0. 972 6	0. 992 9	0. 993 3

从表 1 可以看出,二次函数在 pH 值为 1 的 Na_2SO_4 溶液环境下能基本反映损伤变量 K 和侵蚀时间 t 之间的关系,但在其他溶液环境下的拟合结果不尽人意。三次函数拟合结果的决定系数 R^2 都在 0. 93 以上,且较二次函数拟合结果的 R^2 均有较大增长。当进一步提高拟合函数最高次项时,决定系数 R^2 增长都不大。这表明三次函数已经能够较好地反映在酸性和中性 Na_2SO_4 溶液环境下水泥砂浆试样的抗高水压力劈裂能力和侵蚀时间的关系,其拟合的函数关系可以用下式表达:

$$K = \frac{P_{ct}}{P_{c0}} = at^3 + bt^2 + ct + d \tag{2}$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 为相关参数,具体见表 2。

表 2 Na_2SO_4 溶液环境下参数 a 、 b 、 c 、 d 和决定系数取值

溶液 pH 值	a	b	c	d	R^2
7	-3.12×10^{-7}	6.07×10^{-5}	2.04×10^{-3}	1. 059	0. 957 3
3	-2.97×10^{-7}	5.68×10^{-5}	2.03×10^{-3}	1. 032	0. 938 8
1	-1.71×10^{-7}	6.74×10^{-5}	-9.92×10^{-3}	0. 989	0. 972 6

基于损伤变量 K 可以定义损伤变化率 L 来反映砂浆试样在不同水化学溶液侵蚀下抗劈裂能力的劣化速率:

$$L = \frac{dK}{dt} = 3at^2 + 2bt + c \tag{3}$$

根据试验结果,分析砂浆水力劈裂损伤变量 K 和损伤变化率 L 可知,在 pH 值为 7、3 的溶液中试样在侵蚀 150 d 左右达到水力劈裂临界水压力最大值即变化率零点,而在 pH 值为 1 的 Na_2SO_4 溶液中侵蚀的试样不存在变化率零点,水力劈裂临界水压力一直减小。

3 化学侵蚀作用下砂浆水力劈裂机理分析

不同溶液侵蚀下砂浆试样的抗水力劈裂能力呈现出不同的变化趋势,下面从微观角度简要分析其劣化机理。

在蒸馏水溶液浸泡下试样发生溶出性侵蚀, Ca^{2+} 和 OH^- 析出,生成水化产物 C-S-H 凝胶和 C-H 晶体,使得砂浆试样中的预制裂缝缝尖更加致密,砂浆试样的抗压强度增大。如图 6 所示,当进行水力

劈裂试验时,试样在预制裂缝的高渗透水压作用下,缝尖会萌生许多微裂缝,这些微裂缝会随着水压力的增大而发育、贯通形成大裂缝。当缝尖损伤劣化区进一步发展,尖端的应力强度超过砂浆的断裂韧度时,试样便会整体失稳破坏。

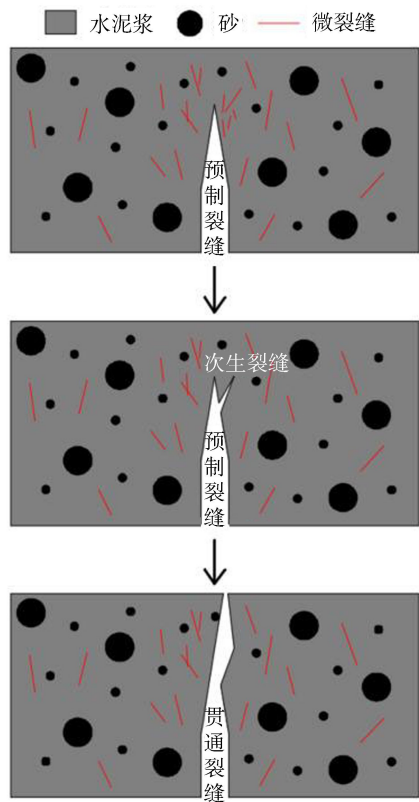
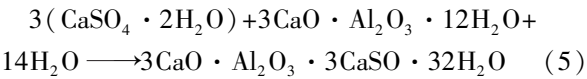
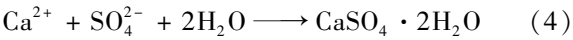
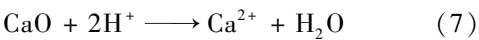
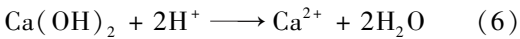


图6 砂浆试样裂缝扩展示意图

在 pH 值为 7 的 Na_2SO_4 溶液中,砂浆试样除了发生溶出性侵蚀外,还发生硫酸盐侵蚀。在侵蚀初期,溶液中的 SO_4^{2-} 与试样内部的矿物成分反应生成石膏、钙矾石等侵蚀产物,见式(4)(5),同时溶液中的水也会使砂浆结构产生 C-S-H 凝胶和 C-H 晶体等水化产物。这些产物会使砂浆试样内部微观结构更加密实,试样强度较蒸馏水溶液下增加得更快,此时试样在高渗透水压力作用下的水力劈裂过程与在蒸馏水时相同。



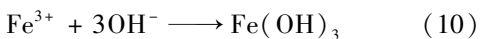
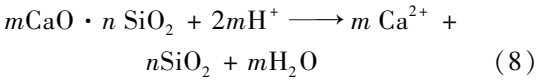
在 pH 值为 3 的 Na_2SO_4 溶液中,由于反应初期 H^+ 占主导地位,还会进行式(6)(7)的化学反应,但预制裂缝与溶液接触面积不大,其受 H^+ 的影响低于受 SO_4^{2-} 和水化作用的影响,所以砂浆试样水力劈裂临界水压力增大。



在侵蚀后期,由于石膏、钙矾石等侵蚀产物的大

量堆积,这些膨胀性产物会使裂缝尖端劣化,较原始状态产生更多的微裂缝。在高渗透水压作用下,缝尖损伤劣化区会更快发展,使得砂浆试样水力劈裂临界水压力减小。

在 pH 值为 1 的 Na_2SO_4 溶液中, H^+ 浓度很高,酸性腐蚀一直处于主导地位,进行式(8)~(10)的化学反应,生成大部分可溶于水的盐,对砂浆微观结构骨架形成破坏,反应生成的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀物附着在试样表面使其外观成红褐色。同时, SO_4^{2-} 的侵蚀产物石膏会进一步对已经破坏的微观结构扰动劣化,使得预制裂缝尖端扩展,砂粒脱落,试样砂化严重。当高渗透水压作用时,这些砂化结构会加速微裂缝发育、贯通形成大裂缝,使试样劈裂破坏。



式中: m 、 n 为系数。

4 结 论

a. 不同 pH 值的硫酸盐溶液对砂浆试样的物理力学特性侵蚀劣化作用不相同。在 pH 值为 7 的中性环境中,砂浆试样的抗压强度随侵蚀时间先增大后减小,并在侵蚀 180 d 时达到峰值;在 pH 值为 3 的弱酸性环境中,砂浆试样的抗压强度在侵蚀 5 d 时相较初始状态减小 1.91%,之后随侵蚀时间先增大后减小;在 pH 值为 1 的强酸性环境中,砂浆抗压强度的劣化程度较其他两种溶液环境下明显大得多,在 240 d 时抗压强度较初始状态减小 46.45%。

b. 不同砂浆试样的水力劈裂临界水压力在不同 pH 值的硫酸盐溶液侵蚀下呈现明显的时间依赖性和阶段性。在 pH 值为 7 的中性和 pH 值为 3 的弱酸性环境中,砂浆试样的水力劈裂临界水压力在前 150 d 时为增长阶段,之后为劣化降低阶段;在 pH 值为 1 的强酸性环境中,砂浆试样宏观性能逐渐劣化,相比其他水化学溶液环境下劣化程度更大。

c. 在 Na_2SO_4 溶液环境中水泥砂浆试样的损伤变量和侵蚀时间之间有很好的三次函数关系,为研究化学溶液环境下水泥砂浆的抗劈裂性能提供了思路。

d. 通过分析砂浆试样在不同水化学溶液侵蚀下的水力劈裂机理可知,在 pH 值为 7 和 3 的 Na_2SO_4 溶液中,初期水化产物和侵蚀产物填充砂浆试样内部孔隙,提高抗水力劈裂能力;后期大量堆积膨胀的侵蚀产物使砂浆试样裂缝尖端劣化,加速水力劈裂破坏。在 pH 值为 1 的 Na_2SO_4 溶液中,酸性腐蚀一直处于主导地位,水化产物对砂浆微观结构

骨架形成破坏,侵蚀产物进一步对已经破坏的微观结构扰动劣化,使得试样砂化严重,抗水力劈裂能力加速劣化。

参考文献:

- [1] 王国庆,谢兴华,速宝玉. 岩体水力劈裂试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4):480-484. (WANG Guoqing, XIE Xinghua, SU Baoyu. Experimental study of hydraulic fracturing of rock mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(4):480-484. (in Chinese))
- [2] 陈勉,庞飞,金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊1):868-872. (CHEN Mian, PANG Fei, JIN Yan. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large-size triaxial simulator[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Sup1):868-872. (in Chinese))
- [3] 刘得潭,沈振中,徐力群,等. 岩体水力劈裂临界水压力影响因素及机理研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(4):30-37. (LIU Detan, SHEN Zhenzhong, XU Liquan, et al. Experimental studies on influence factors and mechanism of critical water pressure of hydraulic splitting in rock mass[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4):30-37. (in Chinese))
- [4] 刘得潭,沈振中,徐力群,等. 裂隙岩体水力劈裂临界水压力试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2):140-145. (LIU Detan, SHEN Zhenzhong, XU Liquan, et al. Experimental study on critical internal water pressure of hydraulic fracturing of fractured rock mass[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2):140-145. (in Chinese))
- [5] 徐力群,陶韵成,刘得潭,等. 单轴压缩状态下类岩石材料水力劈裂试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4):28-34. (XU Liquan, TAO Yuncheng, LIU Detan, et al. Hydraulic fracture test of rock-like materials under uniaxial compression[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4):28-34. (in Chinese))
- [6] ITO T, HAYASHI K. Analysis of crack reopening behavior for hydrofrac stress measurement[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7):1235-1240.
- [7] 唐红侠. 水力劈裂条件下裂隙介质水力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [8] 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: 西安理工大学, 2006.
- [9] 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 Soil Mechanics, 2006, 27(9):1541-1544. (in Chinese))
- [10] YU X, ZHU Y, LIAO Y, et al. Study of the evolution of properties of mortar under sulfate attack at different concentrations[J]. Advances in Cement Research, 2016, 28(10):617-629.
- [11] 吴琼,强晟,徐力群,等. 化学腐蚀下砂浆物理力学性能劣化的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7):2033-2043. (WU Qiong, QIANG Sheng, XU Liquan, et al. Experimental study on deterioration of physical and mechanical properties of mortar under chemical corrosion[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7):2033-2043. (in Chinese))
- [12] 郭玉柱,王起才,代金鹏,等. 5℃环境下水泥砂浆抗硫酸盐侵蚀性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(9):3082-3087. (GUO Yuzhu, WANG Qicai, DAI Jinpeng, et al. Sulfate resistance of cement mortar at 5℃[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(9):3082-3087. (in Chinese))
- [13] 王云天,王起才,郭玉柱,等. 低温对水泥砂浆硫酸盐侵蚀速率的影响试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(10):3368-3372. (WANG Yuntian, WANG Qicai, GUO Yuzhu, et al. Experimental study on the effect of low temperature on the rate of sulfate attack of cement mortars[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(10):3368-3372. (in Chinese))
- [14] 谢超,王起才,于本田,等. 低温硫酸盐侵蚀下水泥砂浆抗折强度预测模型[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6):1520-1527. (XIE Chao, WANG Qicai, YU Bentian, et al. Prediction model of flexural strength of cement mortar under sulfate attack at low temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6):1520-1527. (in Chinese))
- [15] OKOCHI H, KAMEDA H, HASEGAWA S, et al. Deterioration of concrete structures by acid deposition-an assessment of the role of rainwater on deterioration by laboratory and field exposure experiment using mortars specimens[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(20):2937-2945.
- [16] 甘磊,沈心哲,王瑞,等. 单裂缝混凝土结构水力劈裂试验[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4):30-35. (GAN Lei, SHEN Xinzhe, WANG Rui, et al. Hydraulic fracturing test of concrete structures with single crack[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4):30-35. (in Chinese))

(收稿日期:2020-06-06 编辑:雷燕)