

文章编号:1673-2049(2019)01-0048-08

玄武岩机制砂混凝土抗硫酸盐侵蚀性能

乔宏霞^{1,2}, 陈志超¹, 梁金科¹, 李元可¹, NDAHIRWA Desire¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008)

摘要:为了研究玄武岩机制砂混凝土抗硫酸盐侵蚀性能,采用了河砂(HS)、河砂+机制砂(HS+JZ)、机制砂(JZ)三个配比,设定了7.5%(质量分数) MgSO_4 和15%(质量分数) MgSO_4 两种溶液环境下进行干湿循环试验,通过测试质量损失率、超声波声速、相对动弹性模量和抗压强度比,结合内部裂缝与内部微观结构进行了分析。结果表明:18次干湿循环后在7.5% MgSO_4 和15% MgSO_4 两种溶液中3种混凝土的质量损失率分别增长到6.6%,5.5%,4.5%和8.9%,7.6%,6.5%;超声波声速值分别下降到3.600,3.684,3.800 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和3.238,3.368,3.444 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$;相对动弹性模量分别降到64%,68%,76%和55%,57%,67%;抗压强度比分别降到0.84,0.83,0.88和0.72,0.75,0.78;河砂混凝土最终的侵蚀产物主要以白色纤维状结晶体钙矾石为主,玄武岩机制砂混凝土的侵蚀产物主要以白色石膏为主;玄武岩机制砂含少量石粉和自身的耐侵蚀性可有效提高混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力。

关键词:玄武岩机制砂;超声波声速;动弹性模量;抗压强度比

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Sulfate Erosion Resistance of Basalt Manufactured Sand Concrete

QIAO Hong-xia^{1,2}, CHEN Zhi-chao¹, LIANG Jin-ke¹, LI Yuan-ke¹, NDAHIRWA Desire¹

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Qinghai Institute of Salt Lakes,

Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: In order to study the sulfate corrosion resistance of the basalt manufactured sand to concrete, three kinds of mix proportions including river sand (HS), river sand + manufactured sand (HS + JZ), manufactured sand (JZ) were selected, the dry and wet cycle tests were conducted under two solutions of 7.5% (mass fraction) MgSO_4 and 15% (mass fraction) MgSO_4 . By testing the mass loss rate, ultrasonic velocity, relative dynamic modulus of elasticity and compressive strength ratio, combined with the internal cracks and internal micro structure, comprehensive factors were analyzed. The results show that after 18 dry and wet cycles, the mass loss rates of three kinds of concrete in two kinds of 7.5% MgSO_4 and 15% MgSO_4 are increased respectively to 6.6%, 5.5%, 4.5% and 8.9%, 7.6%, 6.5%. The ultrasonic velocities decrease respectively to 3.600, 3.684, 3.800 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ and 3.238, 3.368, 3.444 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. The relative dynamic moduli of elasticity decrease respectively to 64%, 68%, 76% and 55%, 57%,

收稿日期:2018-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51168031,51468039);

中国科学院盐湖资源与化学重点实验室开放基金项目(KLSLRC-KF-13-HX-8)

作者简介:乔宏霞(1977-),女,山西应县人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:qiaohx7706@163.com。

67%。The ratios of compressive strength decrease to 0.84, 0.83, 0.88 and 0.72, 0.75, 0.78 respectively. The main erosion products of river sand concrete is mainly white fibrous crystals ettringite. The main erosion products of basalt manufactured sand concrete is mainly white gypsum. As a result of a few stone powder and its own corrosion resistance in the basalt manufactured sand, it can effectively improve the ability of concrete to resist sulphate erosion.

Key words: basalt manufactured sand; ultrasonic velocity; relative dynamic elastic modulus; ratio of compressive strength

0 引言

随着机制砂在全国范围的推广,部分地区天然砂已明令禁止开采,多数地区都在寻找本地区生产机制砂的天然优势。目前,中国的机制砂种类多数以石灰岩质机制砂为主^[1-2],对其他岩性机制砂的研究和推广还很不系统^[3],尤其是对玄武岩机制砂的研究很少且缺乏代表性。高润东等^[4]通过微观和宏观两方面综合分析不同配合比混凝土在干湿循环下受硫酸盐侵蚀的劣化规律;贾文亮等^[5]通过硫酸盐干湿循环研究了再生骨料对混凝土耐久性能的损伤特征;刘浩等^[6]采用加速循环对比分析在单一和耦合盐溶液下混凝土的腐蚀特征。结合目前针对混凝土所做的硫酸盐干湿循环研究,本文主要以玄武岩机制砂对比河砂研究硫酸盐干湿循环下机制砂混凝土的腐蚀机理。中国玄武岩分布广泛,储量巨大^[7],且根据玄武岩本身的矿物组成和结构特点,其在特征强度、变形参数、特征应变和破裂面角度方面非常符合作为建筑材料的自身优势^[8-9]。由于不同地区生产机制砂的工艺不同,本身物质组成存在少许差异,且石粉含量不同^[10],因此本文以甘肃兰州地区所生产的玄武岩机制砂为研究对象,通过机制砂与河砂对比,测试其在硫酸盐干湿环境下不同龄期的质量损失率、超声波声速、动弹性模量和抗压强度值,探究玄武岩机制砂混凝土抵抗硫酸盐侵蚀的机理特征。

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

本次试验水泥是由甘肃永登水泥厂提供的祁连山牌 42.5 级普通硅酸盐水泥,化学成分见表 1。细集料为甘肃建投矿业公司生产的玄武岩机制砂和产自兰州水阜的河砂,玄武岩机制砂石粉含量(质量分数)为 5.6%,2 种砂具体参数见表 2,颗粒级配见表 3。粗集料为玄武岩碎石,4.95~19.5 mm 颗粒级配连续;粉煤灰是由兰州某钢厂提供的Ⅱ级粉煤灰,

表 1 水泥的化学成分

Tab. 1 Chemical Composition of Cement

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	C ₃ A	烧失量
质量分数/%	54.25	30.54	4.16	3.78	2.83	1.43	—	1.67

表 2 机制砂与河砂的基本物理性能指标

Tab. 2 Basic Physical Properties of Manufactured Sand and River Sand

类型	细度模数	堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	含泥量/%	空隙率/%	亚甲蓝值	压碎指标/%
机制砂	2.8	1 520	2 620	3.0	42.0	1.0	19
河砂	2.7	1 530	2 670	2.5	44.0		

注:含泥量为质量分数。

表 3 机制砂与河砂颗粒级配

Tab. 3 Particle Size Gradations of Manufactured Sand and River Sand

公称粒径/mm	10.000	5.000	2.500	1.250	0.630	0.315	0.160
机制砂筛余率/%	0	0	10	30	54	92	98
河砂筛余率/%	0	3	15	29	55	83	97

45 μm 筛余量为 20.8%,烧失量为 1.92%,需水量比为 101%;减水剂采用江苏苏博特提供的标准型高效减水剂(SBTJM-Ⅱ),固含量 18.2%,减水率 28.6%;水采用兰州当地自来水。

本次试验混凝土强度等级为 C50,配合比如表 4 所示。

表 4 混凝土配合比

Tab. 4 Mix Proportions of Concrete

类型	各材料用量/(kg·m ⁻³)						
	水泥	粉煤灰	碎石	河砂	机制砂	减水剂	水
HS	367	90	1 072	684	0	3.7	160
HS+JZ	367	90	1 072	342	342	3.7	160
JZ	367	90	1 072	0	684	3.7	160

注:HS 表示完全河砂;HS+JZ 表示河砂+机制砂;JZ 表示完全机制砂。

1.2 试验方案

按照以上配合比采用完全河砂、河砂+机制砂、完全机制砂配比组合制作 C50 强度等级混凝土试块,包括尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的混

凝土正方体试块和尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的混凝土棱柱体试块。每个配合比共制作 54 个正方体试块和 3 个棱柱体试块, 设定质量分数为 7.5% 的 MgSO_4 溶液和质量分数为 15% 的 MgSO_4 溶液 2 种浸泡环境, 每种环境分别有 18 个正方体试块和 1 个棱柱体试块, 正方体试块以 3 个试块为准取平均值, 分别测试 2 种环境不同循环次数下的质量、超声波声速和抗压强度, 棱柱体试块以 1 个试块为准, 测试不同循环次数下混凝土的动弹性模量值。

试块均先在标准养护环境下养护 26 d, 之后放入 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干 48 h, 待试块恢复常温后将试块分别置入 7.5% MgSO_4 溶液中和 15% MgSO_4 溶液中。干湿循环模式设定为: MgSO_4 溶液中浸泡 8 d → 取出风干 6 h → 置入烘箱中烘干 12 h → 自然冷却 6 h → MgSO_4 溶液中浸泡 8 d, 每一个循环周期为 9 d。在浸泡前分别取 1 组试块测试质量、超声波声速、抗压强度和动弹性模量作为干湿循环初始值, 之后每干湿循环 3 次即每隔 27 d 测试 1 次, 直至混凝土试块出现严重破坏, 终止干湿循环试验。

2 试验结果与分析

2.1 混凝土质量损失率影响分析

2 种溶液环境下混凝土的质量损失率变化如图 1 所示。从图 1 可以看出, 试块质量损失率从大到小依次为 HS, HS+JZ, JZ, 且在 18 次干湿循环完成后 7.5% MgSO_4 溶液中 HS 的质量损失率达到 7% 左右, JZ 质量损失率达到 4.5% 左右, 15% MgSO_4 溶液中 HS 的质量损失率达到 9% 左右, 而 JZ 达到 6.5% 左右。在 7.5% MgSO_4 溶液中经过 15 次循环后混凝土试块开始有明显的表层脱落, 且出现凹凸不平的骨料损伤, 而在 15% MgSO_4 溶液中循环 12 次时混凝土试块均已出现表层脱落现象。在 3 次循环后测得质量较初始值要高, 之后在 6 次循环结束后测得的值逐渐降低, 这是因为 3 次循环后混凝土试块又经历了 21 d 的自身水泥水化, 且硫酸根离子通过混凝土的表层毛细孔开始渗入混凝土, 使得硫酸根离子与氢氧化钙发生反应生成硫酸钙晶体^[11], 混凝土内部质量逐渐变大。之后随着硫酸根离子的进一步渗入, 腐蚀产物石膏与钙矾石生成越来越多, 其自身的膨胀性使得混凝土内部产生裂缝, 从而加速了内部结构的劣化进程, 导致后期质量损失越来越严重。

通过对比观察 HS, HS+JZ 和 JZ 三种试块在后期干湿循环下表层形貌的变化, HS 混凝土的表

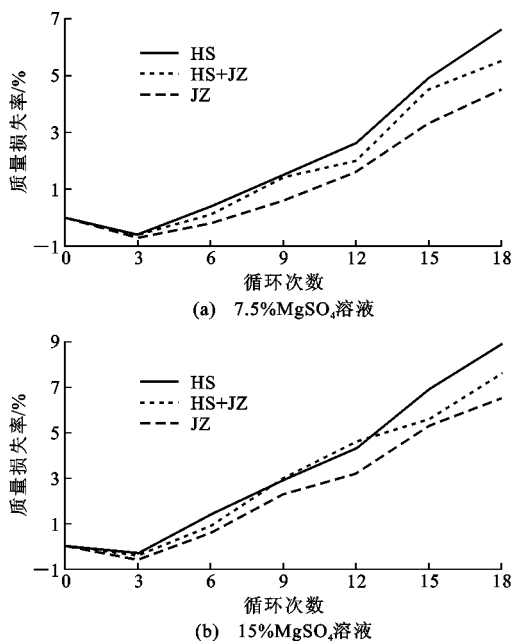


图 1 混凝土质量损失率

Fig. 1 Mass Loss Rates of Concretes

层剥落较快, 且在 18 次循环结束后 HS 混凝土的表层破坏最为严重, 而 JZ 混凝土的表层破坏相对要小。这是因为一方面机制砂自身含有 5.6% 粒径小于 0.075 mm 的玄武岩石粉, 少量的玄武岩石粉颗粒粒径较小, 可有效填充到骨料缝隙当中, 使得混凝土内部结构密实性得到了改善, 导致硫酸根离子渗入混凝土内部的速率较慢, 侵蚀产物石膏和钙矾石的生成量较小, 内部裂缝较少, 从而减缓了硫酸盐对混凝土腐蚀的速率, 而河砂中由于粒径小于 0.075 mm 的粉体颗粒含量较机制砂中石粉颗粒要少, 其密实性没有机制砂混凝土效果明显; 另一方面, 玄武岩机制砂拥有着较高的耐腐蚀性特点^[12], 在硫酸盐溶液浸泡过程中可有效地提高混凝土抵抗硫酸盐侵蚀的能力, 从而 JZ 混凝土的质量损失率较 HS 和 HS+JZ 要低一些。

2.2 混凝土超声波声速变化影响分析

2 种溶液环境下混凝土的超声波声速值变化如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在前期循环中试块超声波声速都是有稍许增长, 且均是 HS 混凝土的超声波声速较大, 但在后期循环中超声波声速下降最快的也是 HS 混凝土, JZ 混凝土超声波声速较初始值下降最小, HS+JZ 在前 12 次循环中的超声波声速均低于 HS 和 JZ, 在后几次循环中处在 HS 和 JZ 之间变化。2 种溶液分别在第 9 次循环和第 6 次循环后超声波声速值出现转折, 且下降速度不断变大。2 种溶液中 HS 混凝土的超声波声速值均在第 15

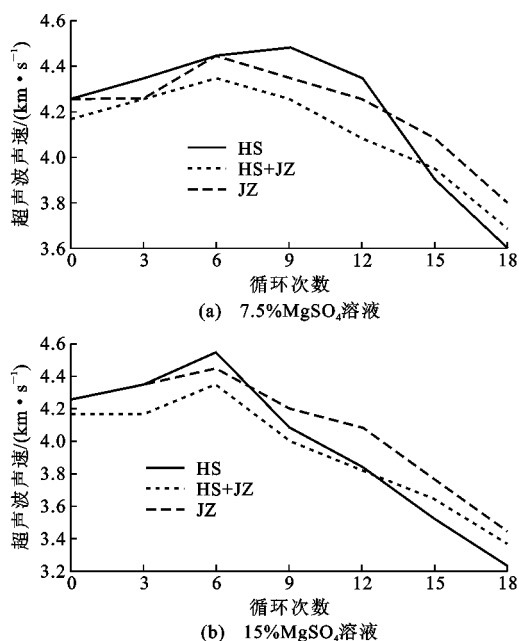


图 2 混凝土超声波声速

Fig. 2 Ultrasonic Velocities of Concretes

次循环结束后由最初的最高下降为三者中最低,可以看出在干湿循环达到一定程度时河砂混凝土内部结构的破坏最为严重,其随着硫酸盐浓度的加大腐蚀越来越严重^[13],而玄武岩机制砂混凝土相对于河砂混凝土超声波声速下降得要慢一些,其内部的密实性相对高一些,在抵抗硫酸盐长期腐蚀过程中有着较为明显的优势,可有效提高混凝土受硫酸盐腐蚀的能力。

2.3 混凝土相对动弹性模量变化影响分析

2 种溶液环境下混凝土相对动弹性模量如图 3 所示。从图 3 可以看出,在前 3 次循环试验中试块的相对动弹性模量都有明显增长,之后随着循环的进行,其相对动弹性模量逐渐降低。18 次循环结束,试块相对动弹性模量从大到小依次为 JZ, HS+JZ, HS,且在 18 次干湿循环完成后 7.5% MgSO_4 溶液中 HS 的相对动弹性模量降到 65% 左右, JZ 的相对动弹性模量降到 80% 左右, 15% MgSO_4 溶液中 HS 的相对动弹性模量降到 58% 左右,而 JZ 的相对动弹性模量降到 70% 左右。前期动弹性模量的升高是由于少量的石膏和钙矾石等侵蚀产物微小的膨胀和凝结性使得内部产生挤密压力^[14],使得内部结构空隙被填充,在一定程度上可有效提高动弹性模量值。又由于机制砂含有 5.6% 的石粉, JZ 混凝土内部结构本身空隙率要低于 HS 混凝土,提升了混凝土抵抗因结晶而产生的各向压力^[15],且初期生成的侵蚀产物较 HS 混凝土要少,随着后期侵蚀产物所

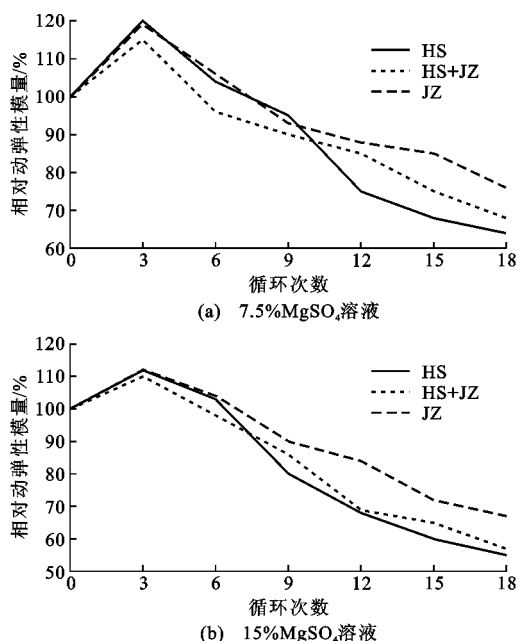


图 3 混凝土相对动弹性模量

Fig. 3 Relative Dynamic Elastic Moduli of Concretes

产生的膨胀应力越来越大, HS 混凝土较 JZ 先达到破坏应力极限值,先于 JZ 出现裂缝和脱落,其动弹性模量值下降也快于 JZ 混凝土,因而玄武岩机制砂的应用可有效改善混凝土在硫酸盐侵蚀下动弹性模量值降低速度快的问题。

2.4 混凝土抗压强度变化影响分析

2 种溶液环境下混凝土的抗压强度比变化如图 4 所示。从图 4 可以看出,在经历 18 次干湿循环后, HS, HS+JZ, JZ 三种试块在 7.5% MgSO_4 和 15% MgSO_4 两种溶液中抗压强度比分别降低到 0.84, 0.83, 0.88 和 0.72, 0.75, 0.78, 玄武岩机制砂对硫酸盐侵蚀有较高的抵抗能力。2 种环境下抗压强度比分别在第 9 次和第 6 次循环结束时出现转折,之前抗压强度比逐渐增大,之后逐渐降低,且均在 12 次循环后降低幅度增大。在前 6 次循环试验中三者抗压强度比从高到低分别为 HS, JZ, HS+JZ,这是因为 HS 混凝土的初始抗压强度要高于 JZ 和 HS+JZ 混凝土,混凝土自身的进一步水化反应使得混凝土本身强度逐渐提高,另外主要原因是在前期的干湿循环中由于初期硫酸根离子渗入混凝土内部较为缓慢,渗入进去的硫酸根离子通过与水泥石中含有的水化铝酸钙以及氢氧化钙结合生成钙矾石和石膏等产物^[16],这些产物使得混凝土内部结构发生膨胀,填充在混凝土内部空隙中,从而提高了混凝土的密实性,在一定程度上使得混凝土在前几次干湿循环中的强度有增高趋势。随着干湿循环的不

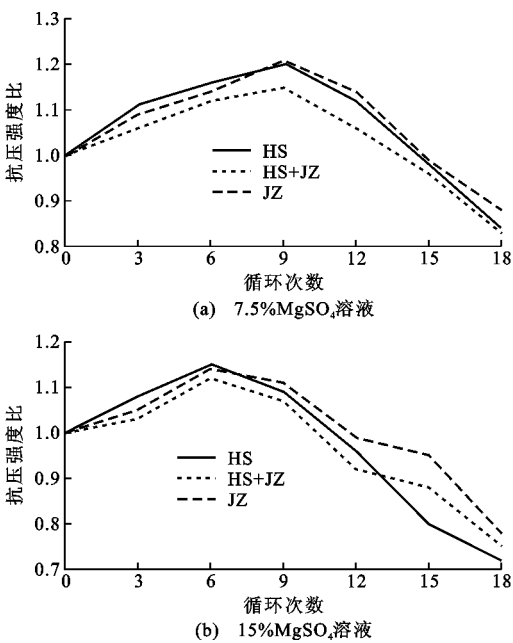


图 4 混凝土抗压强度比

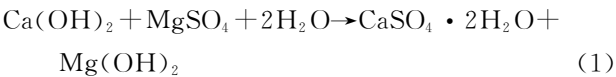
Fig. 4 Ratios of Compressive Strength of Concretes

断进行,混凝土本身水化反应终止,随着硫酸根离子渗入混凝土内部越来越深,反应生成的钙矾石等产物越来越多,内部膨胀越来越大,使其表层逐渐脱落,内部逐渐分裂,从而导致混凝土强度值逐渐下降。

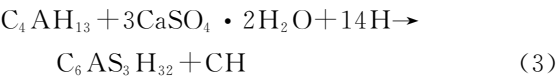
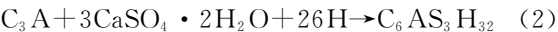
3 硫酸盐侵蚀化学反应机理分析

硫酸镁溶液对混凝土的侵蚀主要分为 3 个过程:硫酸根离子的渗入→硫酸根离子与混凝土水化产物的化学反应(生成钙矾石和石膏)→钙矾石与石膏产生结晶体^[17]。化学反应方程式如下^[18]:

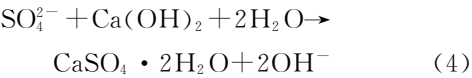
石膏的生成



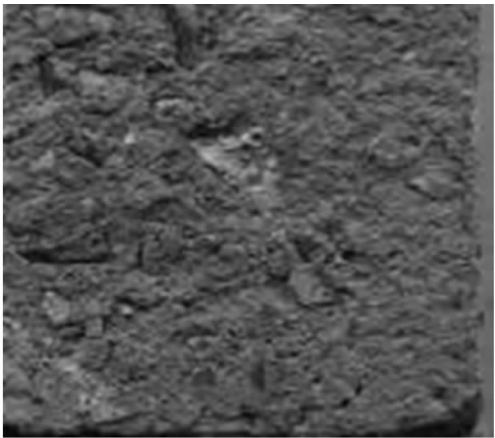
石膏与 C_3A 或水化铝相的进一步反应生成二次钙矾石,即



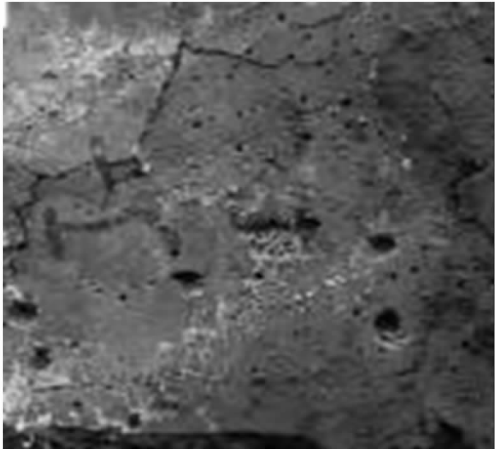
硫酸盐浓度高的时候硫酸根离子与氢氧化钙主要生成石膏,即



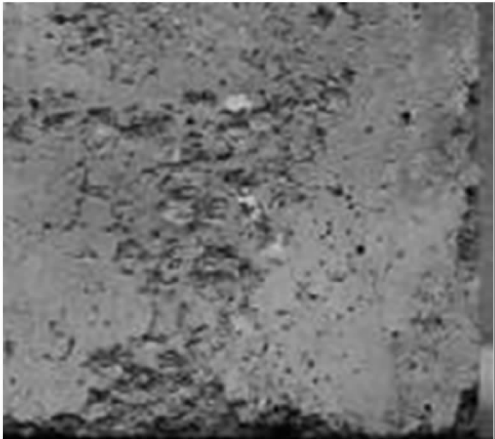
选取 3 种混凝土试块在 7.5% MgSO_4 溶液中的外观与内部微观变化(图 5~7)为例进行微观分析。



(a) HS



(b) HS+JZ

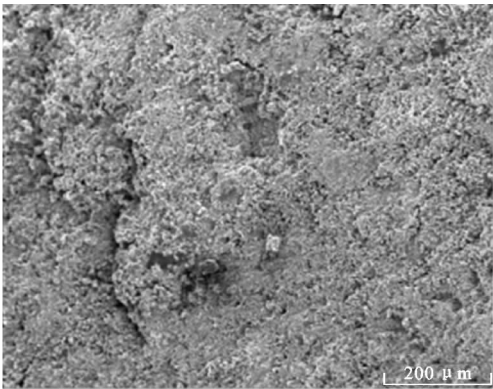


(c) JZ

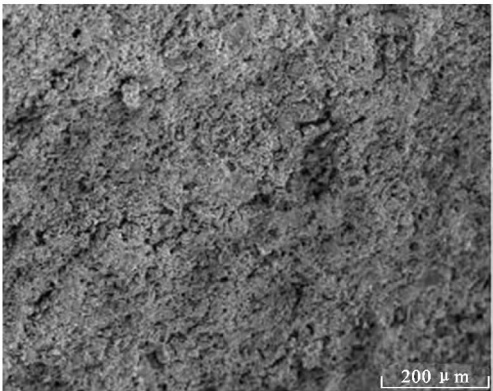
图 5 18 次干湿循环后 3 种混凝土试块的外观 (7.5% MgSO_4)

Fig. 5 Appearances of Three Concrete Specimens After 18 Dry and Wet Cycles(7.5% MgSO_4)

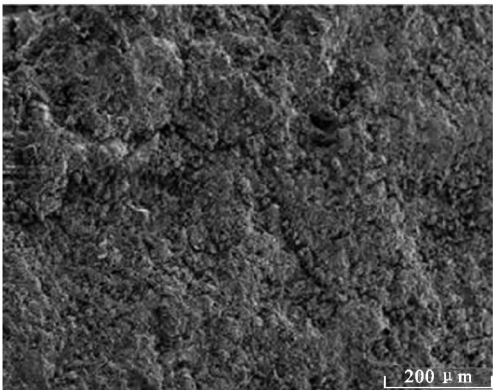
通过以上化学反应方程式,结合图 5~7 三种试块在 7.5% MgSO_4 溶液中干湿循环 18 次结束后的外观图、内部裂缝图和微观图分析可以得知:河砂混凝土的外观侵蚀和裂缝产生最为严重,全机制砂混凝土相对较轻微;河砂混凝土的侵蚀产物生成较多,



(a) HS



(b) HS+JZ

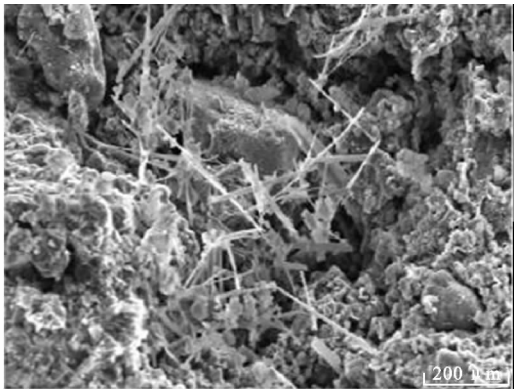


(c) JZ

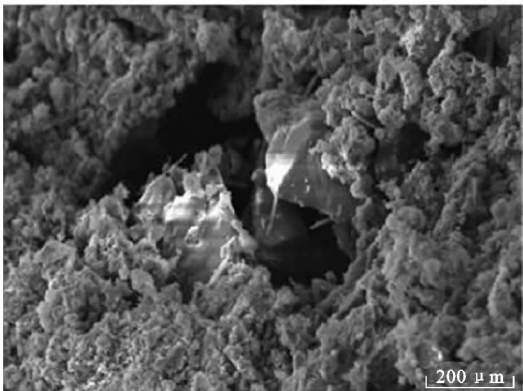
图 6 18 次干湿循环后 3 种混凝土试块的内部裂缝
(7.5% MgSO_4)

Fig. 6 Internal Micro-cracks of Three Concrete Specimens After 18 Dry and Wet Cycles(7.5% MgSO_4)

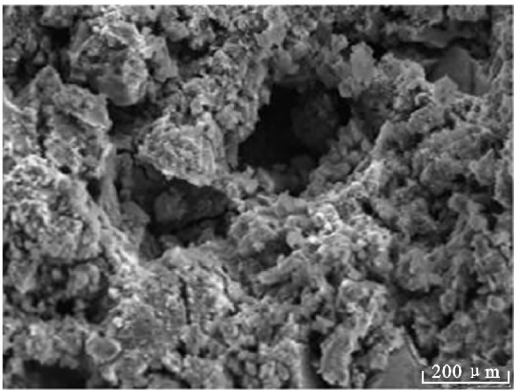
且主要呈现纤维状的白色晶体^[19],其内部结构形态变化较大,河砂+机制砂次之,呈现部分纤维状白色晶体和部分块状结晶体;机制砂混凝土内部多以成块状的白色晶体状物体存在,主要以石膏为主^[20]。由化学反应方程式可知,在硫酸盐干湿循环侵蚀下其主要的侵蚀产物为石膏、钙矾石以及硅灰石膏^[21],且硅灰石膏在 15% 硫酸镁溶液下少量产生。因而机制砂混凝土的白色块状结晶体多以石膏为主,而河砂混凝土的白色纤维状晶体多以钙矾石为



(a) HS



(b) HS+JZ



(c) JZ

图 7 18 次干湿循环后 3 种混凝土试块的微观扫描图
(7.5% MgSO_4)

Fig. 7 Micro Scanning Diagrams of Three Concrete Specimens After 18 Dry and Wet Cycles(7.5% MgSO_4)

主,混凝土在破坏过程中主要是侵蚀产物的膨胀以及侵蚀产物的无黏结性导致混凝土内部压力增大,部分结构出现开裂,内部结构疏松,致使表层破坏脱落。

通过河砂、河砂+机制砂、机制砂 3 种砂的内部微观结构对比,结合质量损失率、超声波声速值、相对动弹性模量以及抗压强度比的变化趋势可以总结出:含有少量石粉的机制砂在改善混凝土质量损失、结构密实性以及抵抗硫酸盐侵蚀的能力上有显著优

势,虽然机制砂混凝土 28 d 的初始强度要低于河砂混凝土,但在干湿循环的过程中其强度的折损要小于河砂,特别是在侵蚀产生一定程度后其优势更加明显。

4 结 语

(1)在前 3 次干湿循环中,2 种溶液环境下的 3 种混凝土质量均有增大趋势,之后质量不断下降,在 18 次干湿循环后在 7.5% MgSO_4 和 15% MgSO_4 两种溶液中河砂、河砂+机制砂、机制砂混凝土的质量损失率分别达到 6.6%,5.5%,4.5% 和 8.9%,7.6%,6.5% 左右;在 2 种溶液中 3 种混凝土超声波声速值分别在第 9 次循环和第 6 次循环前有逐渐变大的趋势,之后出现明显下降,18 次干湿循环后分别下降到 3.600,3.684,3.800 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 3.238,3.368,3.444 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2)在前 3 次干湿循环中,2 种溶液环境下的 3 种混凝土相对动弹性模量均有增大趋势,之后逐渐下降,且河砂混凝土下降最快,机制砂混凝土下降最慢,在 18 次干湿循环后,2 种溶液环境下的 3 种混凝土的相对动弹性模量分别下降到 64%,68%,76% 和 55%,57%,67%;2 种溶液中 3 种混凝土抗压强度比分别在第 9 次循环和第 6 次循环前有逐渐变大的趋势,之后出现明显下降,在 18 次干湿循环后 3 种混凝土在 2 种溶液中的抗压强度比分别降低到 0.84,0.83,0.88 和 0.72,0.75,0.78。

(3)河砂混凝土在硫酸盐侵蚀的早期其主要侵蚀产物为石膏,之后石膏进一步反应生成白色晶体状钙矾石,硅灰石膏只在高浓度硫酸盐溶液中少量产生。玄武岩机制砂混凝土的侵蚀产物主要为石膏,其外观侵蚀和内部裂缝较河砂混凝土要轻微,可有效提高混凝土抵抗硫酸盐侵蚀的能力。

参考文献:

References:

[1] 郑 怡,张耀庭.石灰岩质机制砂混凝土收缩徐变性能的试验研究[J].土木工程学报,2013,46(12):59-65.
ZHENG Yi,ZHANG Yao-ting. Experimental Study on Shrinkage and Creep Behavior of Crushed Limestone Sand Concrete[J]. China Civil Engineering Journal,2013,46(12):59-65.

[2] 李 军,青志刚,梁德兴.中国西南沿海地区石灰岩机制砂对混凝土性能的影响研究[J].公路,2018(2):213-216.

LI Jun,QING Zhi-gang,LIANG De-xing. Study on the Effect of Limestone Mechanism Sand on the Performance of Concrete in the Coastal Area of Southwest China[J]. Highway,2018(2):213-216.

[3] 颜从进.机制砂特性对混凝土性能的影响研究[D].重庆:重庆大学,2014.
YAN Cong-jin. Research of Effects of Mechanism Sand Characteristics on Concrete [D]. Chongqing: Chongqing University,2014.

[4] 高润东,赵顺波,李庆斌,等.干湿循环作用下混凝土硫酸盐侵蚀劣化机理试验研究[J].土木工程学报,2010,43(2):48-54.
GAO Run-dong,ZHAO Shun-bo,LI Qing-bin,et al. Experimental Study of the Deterioration Mechanism of Concrete Under Sulfate Attack in Wet-dry Cycles [J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(2):48-54.

[5] 贾文亮,张 琴,李 昊.硫酸盐干湿循环对再生骨料混凝土性能的影响[J].硅酸盐通报,2016,35(12):3981-3986.
JIA Wen-liang,ZHANG Qin,LI Hao. Effect of Sulfate Dry-wet Cycles on the Performance of Recycled Aggregate Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2016,35(12):3981-3986.

[6] 刘 浩,石 亮,穆 松,等.干湿循环作用下混凝土硫酸盐、硫酸盐-氯盐腐蚀试验研究[J].新型建筑材料,2016(9):30-32,110.
LIU Hao,SHI Liang,MU Song,et al. Experimental Study of Concrete Deteriorated by Sulfate or Sulfate-chloride Attack in Wet-dry Cycles[J]. New Building Materials,2016(9):30-32,110.

[7] 陈霞玉,陈立辉,陈 暘,等.中国中-东部地区新生代玄武岩的分布规律与面积汇总[J].高校地质学报,2014,20(4):507-519.
CHEN Xia-yu,CHEN Li-hui,CHEN Yang,et al. Distribution Summary of Cenozoic Basalts in Central and Eastern China[J]. Geological Journal of China Universities,2014,20(4):507-519.

[8] 崔光耀,王道远,倪嵩陟,等.玄武岩纤维混凝土隧道衬砌承载特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(2):311-318.
CUI Guang-yao,WANG Dao-yuan,NI Song-zhi,et al. Model Tests on Bearing Characteristics of Basalt Fiber-reinforced Concrete Tunnel Linings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(2):311-318.

[9] 江 权,崔 洁,冯夏庭,等.玄武岩力学参数的随机性统计与概率分布估计[J].岩土力学,2017,38(3):

- 784-793.
- JIANG Quan, CUI Jie, FENG Xia-ting, et al. Stochastic Statistics and Probability Distribution Estimation of Mechanical Parameters of Basalt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 784-793.
- [10] 刘战鳌, 周明凯, 姚楚康. 机制砂中细粉的危害性及评价研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 150-155.
- LIU Zhan-ao, ZHOU Ming-kai, YAO Chu-kang. Research on Harmfulness and Evaluation of Various Microfines in Manufactured Sand[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 150-155.
- [11] SUZUKI M, FUKUURA N, TAKEDA H. Establishment of Coupled Analysis of Interaction Between Structural Deterioration and Reinforcement Corrosion by Salt Damage[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2016, 14(9): 559-572.
- [12] 周俊龙, 江世永, 李炳宏, 等. 玄武岩纤维增强塑料筋耐腐蚀性研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(增1): 218-222.
- ZHOU Jun-long, JIANG Shi-yong, LI Bing-hong, et al. On Corrosion-resistance Properties of Basalt Fiber Reinforced Plastics Bars[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(S1): 218-222.
- [13] 王海龙, 董宜森, 孙晓燕, 等. 干湿交替环境下混凝土受硫酸盐侵蚀劣化机理[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(7): 1255-1261.
- WANG Hai-long, DONG Yi-sen, SUN Xiao-yan, et al. Damage Mechanism of Concrete Deteriorated by Sulfate Attack in Wet-dry Cycle Environment[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(7): 1255-1261.
- [14] 杨永敢, 张云升, 余伟, 等. 带初始损伤混凝土受硫酸盐侵蚀劣化的机理分析[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(5): 705-711.
- YANG Yong-gan, ZHANG Yun-sheng, SHE Wei, et al. Deterioration Mechanism of Concrete with Initial Damage Exposed to Sulfate Attack[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(5): 705-711.
- [15] 乔宏霞, 师莹莹, 陈丁山, 等. 混凝土在硫酸盐溶液中的腐蚀模型[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(6): 129-137.
- QIAO Hong-xia, SHI Ying-ying, CHEN Ding-shan, et al. A Corrosion Model of Concrete in Sulfate[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(6): 129-137.
- [16] SANTHANAM M, COHEN M D, OLEK J. Mechanism of Sulfate Attack: A Fresh Look: Part 2. Proposed Mechanisms [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3): 341-346.
- [17] 郑晓宁, 刁波, 孙洋, 等. 混合侵蚀与冻融循环作用下混凝土力学性能劣化机理研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 111-116.
- ZHENG Xiao-ning, DIAO Bo, SUN Yang, et al. Study of Deterioration Mechanism of Concrete in Multi-aggressive and Freeze-thaw Environment[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 111-116.
- [18] 孙迎召. 混凝土在硫酸盐侵蚀和干湿循环共同作用下耐久性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- SUN Ying-zhao. Concrete Durability Under Combined Action of Sulfate Attack and Dry/Wet Cycling[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [19] 钱觉时, 马英, 杨莎, 等. 硅酸盐水泥中硫酸盐特性及其对混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(10): 1430-1440.
- QIAN Jue-shi, MA Ying, YANG Sha, et al. Characteristics of Sulfates in Portland Cement and Their Influence on Concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(10): 1430-1440.
- [20] 陈达, 俞小彤, 廖迎娣, 等. 混凝土硫酸盐侵蚀研究进展[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2016, 35(2): 24-30.
- CHEN Da, YU Xiao-tong, LIAO Ying-di, et al. Progress of Study on Sulfate Attack on Concrete Materials [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2016, 35(2): 24-30.
- [21] 姜磊, 牛荻涛. 硫酸盐侵蚀与干湿循环下混凝土本构关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 66-73.
- JIANG Lei, NIU Di-tao. Study of Constitutive Relation of Concrete Under Sulfate Attack and Drying-wetting Cycles [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(1): 66-73.