

混凝土硫酸盐腐蚀损伤的声波与声发射变化特征及机理

刘娟红¹⁾✉, 赵 力¹⁾, 宋少民²⁾, 纪洪广¹⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 北京节能减排关键技术协同创新中心, 北京 100044

✉ 通信作者, E-mail: juanhong1966@hotmail.com

摘要 试验模拟干湿循环作用下混凝土受 10% (质量分数) 硫酸钠溶液侵蚀的腐蚀环境, 测试和分析硫酸盐不同侵蚀时期混凝土单轴压缩试验时波速和声发射的变化特征。采用环境扫描电镜和能谱仪进行微观观测并结合 X 射线衍射测试手段分析受蚀混凝土的损伤机理。结果表明: 受侵蚀 60 d 和 80 d 的试件加载初期会有较明显的压密阶段, 试件受硫酸盐侵蚀和干湿循环作用愈久, 加载中波速急剧下降的突变点愈提前; 受蚀 40 d 以上的试件加载中声发射事件活跃区间较集中, 在腐蚀产生的缺陷和薄弱位置容易出现应力集中和能量集中释放, 声发射事件数量急剧上升的突变点提前。通过数学模型以声发射累积振铃计数为损伤变量建立损伤模型可以表征混凝土中环境腐蚀、荷载及损伤之间的关系。腐蚀阶段钙矾石与石膏的膨胀作用和硫酸钠的结晶压在试件内部形成微破损, 受蚀混凝土表现出不同宏观性能。

关键词 混凝土; 硫酸盐; 侵蚀; 超声波速度; 声发射; 损伤演化; 微观结构

分类号 TU528. 31

Ultrasonic velocity and acoustic emission properties of concrete eroded by sulfate and its damage mechanism

LIU Juan-hong¹⁾✉, ZHAO Li¹⁾, SONG Shao-min²⁾, JI Hong-guang¹⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Beijing Collaborative Innovation Center of Energy Saving & Emission Reduction Key Technologies, Beijing 100044, China

✉ Corresponding author, E-mail: juanhong1966@hotmail.com

ABSTRACT Simulation experiment was performed on the performance of concrete exposed to sulfate attack and dry-wet cycles. Changes in ultrasonic velocity and acoustic emission activities for concrete at different erosion periods were tested by uniaxial compression test. The damage mechanism was analyzed by environmental scanning electron microscopy (ESEM), energy-dispersive X-ray analysis (EDX) and X-ray diffraction (XRD). The results show that at the beginning of loading for concrete after 60 d and 80 d erosion, the specimen exhibits a significant compaction phase. The longer the concrete is exposed to sulfate attack and dry-wet cycles, the earlier the sudden drop in ultrasonic velocity occurs. For concrete after 40 d erosion, the active zone of acoustic emission is narrow during the loading process. The problems of stress concentration and a sudden release of energy tend to occur at the weak position caused by erosion in concrete, and a sharp increase in acoustic emission events appears in advance under sulfate attack. By means of a mathematical model, the damage model of concrete was established based on the cumulative ring-down count of acoustic emission as a variable, which reveals the relations of sulfate attack, load and damage for concrete in complex underground environments. During erosion time, the expansions caused by ettringite and gypsum and the swelling of sodium sulfate crystallization result in the evolution of micro-destruction, leading to the different macroscopic properties of corroded concrete.

KEY WORDS concrete; sulfates; erosion; ultrasonic velocity; acoustic emission; damage mechanisms; microstructure

收稿日期: 2015-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174015)

随着地下空间开发深度和范围不断扩大,矿山井筒、巷道等地下混凝土结构的耐久性问题日益突出,受地质条件制约,混凝土长期受到地下水中富含的可溶性盐,如硫酸盐的化学侵蚀,而地下水位变动又使混凝土受到干湿交替的加速破坏。此外,混凝土结构在服役期间也在承受荷载作用^[1-4]。因此,矿井井筒等地下混凝土结构时常受到化学过程和力学过程的双重破坏作用^[4-5]。服役状态和性能出现劣化现象,而混凝土结构由损伤劣化至失稳失效是逐渐发展的过程,具有时间效应。这就增加了工程灾害的隐蔽性和破坏性,因此研究混凝土在硫酸盐侵蚀和干湿循环特殊环境下的损伤演化规律和机理对判定混凝土结构损伤状态和工程灾害预警具有现实意义^[6-10]。

材料的波速特征是其物理性质的综合反映,国内外许多学者在材料受力破坏过程中的波速和声发射特征方面进行了大量研究^[11-17]。研究表明,在材料的损伤和破坏过程中,超声波波速将发生改变,同时释放出大量的弹性波,即伴有声发射现象;通过对材料波速和声发射信号的分析,可推断其内部的性态变化,分析其破坏机制。但多数研究集中在混凝土、岩石等材料在力学破坏过程中的声发射特性,针对矿井特殊环境下受硫酸盐腐蚀的混凝土材料的波速和声发射特性有待进一步研究。

本文通过试验模拟干湿循环作用下混凝土受10%质量分数硫酸钠溶液侵蚀,测试和分析不同侵蚀龄期混凝土加载过程中波速和声发射的变化特征,运用损伤力学,以声发射累积振铃计数为损伤变量将腐蚀损伤和受荷损伤用数学模型统一起来,表征混凝土在环境腐蚀和荷载作用下损伤的演化规律;采用环境扫描电镜和能谱仪进行微观观测并结合X射线衍射技术分析受蚀混凝土的微结构演化和腐蚀产物,揭示地下环境不同侵蚀时期混凝土的损伤演化机理。

1 试验方案

1.1 原材料和试件制作

试验采用P. O 42.5金隅牌普通硅酸盐水泥,掺合料选用Ⅱ级粉煤灰和S95级磨细矿渣,水泥主要性能指标见表1,其中水泥细度采用80μm方孔标准筛进行筛析试验。细骨料为天然河砂,细度模数2.8;粗骨料连续级配,粒径范围5~20mm;减水剂为西卡聚羧酸型减水剂;拌合水为自来水。无水硫酸钠采用国药集团生产的AR级分析纯试剂。

试验用混凝土配合比见表2。根据试验需要,试件尺寸为100mm×100mm×100mm。试件成型后自然养护24h后拆模,移入温度(20±2)℃、相对湿度95%的养护室内养护28d,然后进行试验。

表1 水泥的主要性能

Table 1 Performance indicators of cement

凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		细度/%	标准稠度用水量 (质量分数) /%
初凝	终凝	3d	28d	3d	28d		
170	390	29.8	47.8	5.2	8.1	6.6	28.5

表2 混凝土配合比

Table 2 Proportions of the prepared concrete mixture

强度等级	水泥/kg	粉煤灰/kg	磨细矿渣/kg	石/kg	砂/kg	水/kg	减水剂/kg	水胶质量比
C30	220	90	60	1017	833	170	2.59	0.46

1.2 试验方法

试验时,为加速试验进程,腐蚀溶液配制质量分数10%的硫酸钠溶液,其他步骤按照GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行硫酸盐干湿循环腐蚀,干湿循环周期为24h,其中浸泡16h,烘干温度80℃,烘干6h,冷却2h。在混凝土试件侵蚀20d、40d、60d、80d后取出采用液压式屏显万能试验机(型号WEP-600)进行单轴压缩试验,同时测试加载过程中声波传播速度和声发射特征的变化。试验过程中,在混凝土试件侧面布置声波传感器,测量加载过程中试件的声波波速变化规律,采用发射和接收两个传感器测量超声波在试件中传播的时间差,其与

试件长度的比值即为声波传播速度;在混凝土试件侧面固定声发射传感器接收试件破裂的声发射信号,试件在承受外力作用时,内部将会发生损伤破坏,利用声发射探头可以对这一过程进行监测^[13]。采用扫描电镜和能谱仪观测混凝土腐蚀损伤后的微观结构,根据X射线衍射测试结果分析混凝土腐蚀产物的物质组成。硫酸盐干湿循环试验设备为NELD-LSC全自动硫酸盐干湿循环试验机,超声检测设备为康科瑞NM-4A非金属超声检测分析仪,声发射试验采用美国物理声学公司生产的6通道PCI-2声发射检测系统进行声发射监测,通道传感器谐振频率为60kHz,前置放大器增益为40db,噪音门槛值为45db。

2 试验结果分析

2.1 声波测试结果

混凝土试件经过不同腐蚀时期后,声波传播速度随加载应力的变化曲线如图1所示。波速的变化主要受裂纹的影响。随着应力增加,混凝土试件开始出现微细裂纹并逐渐扩展,波速逐渐减小,但其变化率较小;而加载后期,变形发展快,裂缝扩展迅速,波速骤减,变化率很大,试件破坏。

波速的变化能够反映试件应力的变化,不同腐蚀时期的试件在加载过程中波速都有较明显的突变点,但波速开始突然下降时对应的相对应力水平不同。图1中,随着腐蚀时间的增加,波速骤减的突变点出现的愈来愈早,未腐蚀和腐蚀80 d的试件分别加载到36 MPa和28 MPa时波速急剧减小,此时对应的应力分别约为峰值应力的85%和78%。可见腐蚀后期,试件在较小的应力水平下即加速破坏。

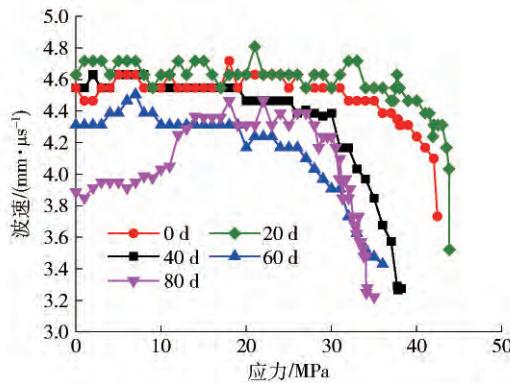


图1 波速随加载应力的变化

Fig. 1 Change of supersonic velocity with stress

混凝土试件的波速变化规律既与混凝土受力过程中不同的变形阶段有关,也与硫酸盐侵蚀有关。未腐蚀和腐蚀20 d、40 d的试件加载前初始波速较大,加载初期波速无较大变化。腐蚀60 d和80 d的试件加载前初始波速较小。在加载初期,波速随应力增加而增加,尤其是腐蚀80 d的试件加载初期波速增加阶段更加明显,其波速峰值比加载前初始波速增加14.8%。这主要是由于未腐蚀或腐蚀初期时,试件密实性和完整性较好。腐蚀初期由于腐蚀产物填充了材料内部的初始裂缝和缺陷,混凝土较腐蚀前还会更加密实;而随着腐蚀的进行,试件内部产生较多裂缝和孔隙,加载初期会有较明显的压密阶段。因此,试件在单轴压缩过程中的应力-波速曲线可以归纳为两种基本类型:I型,出现在未受硫酸盐环境腐蚀或受蚀程度较轻的混凝土试件中,波速变化规律为基本不变-缓慢下降-突然下降;II型,出现在受蚀程度较重的试件中,波速变化规律为缓慢增加-缓慢下降-突然下降。

2.2 应力-应变关系和声发射测试结果

图2为不同腐蚀时期(0、20、40和80 d)混凝土的应力-应变曲线,峰值割线变形模量 E_p 取峰值应力 σ_c 与峰值应变 ε_c 的比值,弹性模量 E_e 取应力 $\sigma=0.4\sigma_c$ 与相应应变 ε 的比值。可以看出,硫酸盐腐蚀过程中, σ_c 、 E_e 和 E_p 都随着腐蚀时间的延长先增大后减小。腐蚀20 d时峰值应力、弹性模量和峰值变形模量较腐蚀前分别增加8.68%、16.3%和15.3%,而腐蚀80 d时峰值应力、弹性模量和峰值变形模量分别减小到腐蚀前的82%、74%和64%,峰值应变较腐蚀前增加26.7%。

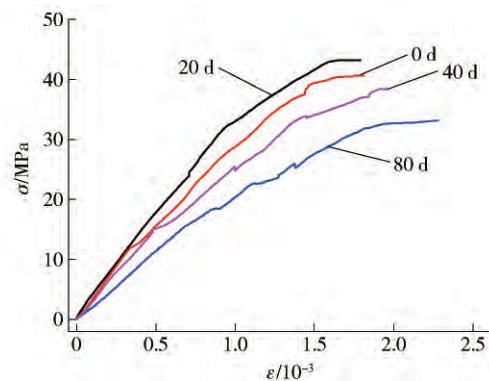


图2 不同腐蚀时期的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves at different erosion periods

在单轴加载试验过程中,混凝土内部裂纹拓展演化和损伤破裂,蕴含在材料内部的能量将会以弹性波的形式释放,这些微弱的信号可以被声发射传感器所监测和记录^[13]。

图3为不同腐蚀时期(0、20、40和80 d)混凝土试件加载时的声发射事件数量变化图。与未腐蚀混凝土类似,受蚀混凝土加载初期,试件发生线弹性变形,声发射数量较少。随着应力的增大,试件内部裂纹不断形成和扩展,声发射事件数量开始增大。随着内部的裂纹进一步扩展,直至贯通,声发射事件数量急剧上升。

未腐蚀和腐蚀20 d的混凝土,加载的过程间隔出现多个声发射事件活跃区间。腐蚀40 d和80 d的试件,整个加载过程中,声发射事件活跃区间较集中。这主要是因为当试件受外力作用产生微破裂时,内部蕴含的能量得到释放,声发射事件数量上升。未腐蚀试件内部结构致密少缺陷,在能量得到一次释放后,声发射事件骤降,应力重新分配,试件继续承受压力。随着应力进一步增大,试件再次释放能量,声发射事件又开始活跃。经过多次的能量释放和应力重新平衡,最后达到整体破坏;而腐蚀40 d和80 d的试件,由于材料内部在硫酸盐侵蚀下出现较多的微孔隙微缺陷,加载过程中试件内部应力重新分配平衡的能力降低,容易在薄弱位置形成应力集中,出现能量的集中释放,声发射

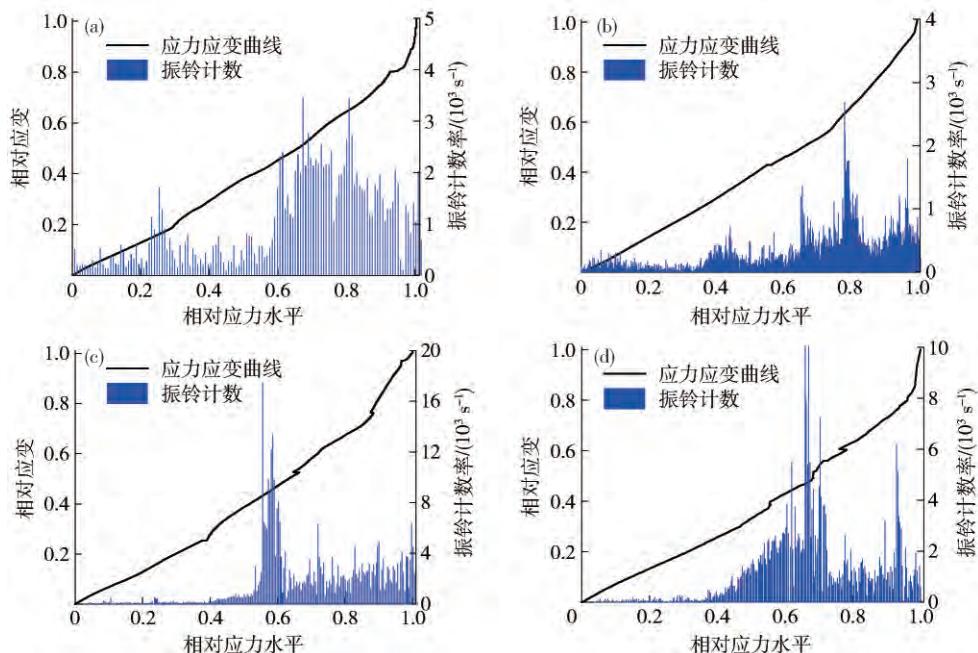


图3 不同腐蚀龄期声发射数量随相对应力水平变化柱状图. (a) 0 d; (b) 20 d; (c) 40 d; (d) 80 d

Fig.3 Histograms of acoustic emission number with relative stress level at different erosion periods: (a) 0 d; (b) 20 d; (c) 40 d; (d) 80 d

事件集中,最后出现局部破坏^[15].

随着腐蚀时间的增加,试件受腐蚀程度加重,加载过程中声发射事件数量开始急剧上升的突变点出现得更早,未腐蚀和腐蚀80 d的试件分别加载到相对应力水平0.6~0.8和0.4~0.7时声发射密集出现,表明腐蚀后期,试件在较小的应力水平下就开始加速破坏.

2.3 基于声发射特征的受腐蚀混凝土损伤演化分析

材料在承受荷载的过程中,内部缺陷萌生、拓展演化,为了分析该过程的损伤演化规律,Kachanov将损伤变量定义为^[17]

$$D = \frac{A_d}{A}. \quad (1)$$

式中 A_d 为承载断面上微缺陷的所有面积, A 为初始无损时的断面积.

在此基础上,刘保县等^[17]选用振铃计数和累积振铃计数描述单轴压缩岩石材料损伤特性,推导得出

$$D = \frac{C_d}{C_0}. \quad (2)$$

式中 C_0 为无损材料整个截面 A 完全破坏的累积声发射振铃计数, C_d 为断面损伤面积达 A_d 时累积声发射振铃计数.本文将试件加载到峰值强度视为破坏,即试件达到峰值破坏的累积声发射振铃计数记为 C_0 .

将硫酸盐干湿循环引起的腐蚀损伤后的状态作为第一种损伤状态,腐蚀后受荷引起的损伤状态作为第二种损伤状态,应用由Lemaitre应变等价原理推广后的应变等价^[18],可得材料内部腐蚀受荷损伤本构关系为

$$\sigma = E_t(1 - D) \varepsilon. \quad (3)$$

式中 D 为受荷损伤因子, E_t 为腐蚀一段时间的弹性模量.

用腐蚀和受荷总损伤变量 D_m 表示的混凝土腐蚀受荷应力-应变关系为^[18]

$$\sigma = E_0(1 - D_m) \varepsilon, \quad (4)$$

$$\text{其中 } D_m = D_t + D - D_t D. \quad (5)$$

式中 D_t 为腐蚀引起的损伤因子, E_0 为未受腐蚀时的弹性模量, $D_t D$ 为耦合项.

随着腐蚀时间的增加,混凝土结构的力学性能逐渐降低,为了能够反映材料内部的劣化程度,选取便于测量的弹性模量作为损伤变量,定义硫酸盐干湿循环腐蚀引起的损伤

$$D_t = 1 - \frac{E_t}{E_0}. \quad (6)$$

由式(2)、式(5)和式(6)可得到混凝土腐蚀受荷的总损伤演化方程为

$$D_m = 1 - \frac{E_t C_0 - C_d}{E_0 C_0}. \quad (7)$$

当仅考虑腐蚀损伤时,加载累积振铃计数 $C_d = 0$,此时 $D_m = D_t$;当仅考虑受荷损伤时, $E_t = E_0$,此时 $D_m = D$.图4为利用试验数据由式(7)计算得到的混凝土材料腐蚀受荷损伤模型演化曲线.

利用声发射累积振铃计数来表征混凝土损伤演化规律能够较好地描述腐蚀损伤对混凝土性能的影响.由图4可以看出:对于受硫酸盐腐蚀的试件,腐蚀引起混凝土材料内部初始损伤的形成,且随着腐蚀的进行,初始损伤不断增大.腐蚀20 d时,腐蚀产物起到填充微孔隙的密实作用,混凝土性能得到强化(图4中损伤

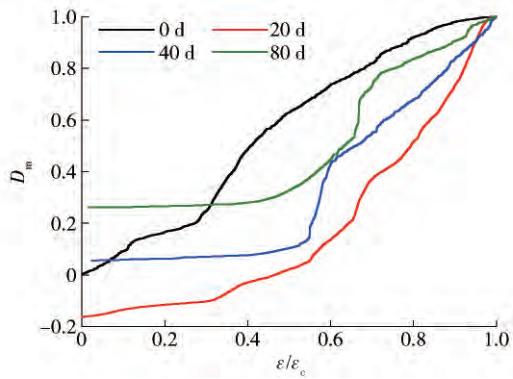


图 4 受蚀混凝土受荷损伤模型演化曲线

Fig. 4 Damage model evolution curves of corroded concrete

值 D_m 为负数)。腐蚀 40 d 和 80 d 时对应的初始损伤分别增大到 0.055 和 0.261。随着应变的逐渐增大, 未腐蚀试件损伤发展比较均匀, 而受蚀混凝土损伤发展较

快, 在较小应力水平下损伤突然加速发展, 且随着腐蚀加剧, 损伤度急剧增大的拐点也愈早到达(图 4 中虚线所示)。这是由于腐蚀引起混凝土内部微缺陷不断增加, 在较小应力水平下即产生局部破坏。

2.4 混凝土腐蚀劣化的微观机理分析

如图 5 所示, 腐蚀初期, 试件棱角开始酥松, 轻微劣化(图 5(a))。随着腐蚀的进行, 细小的裂纹从棱边向内部延伸(图 5(b))。裂纹逐渐拓宽增多, 棱角受损加重, 伴有软化剥落(图 5(c))。直到出现粗大、贯通裂缝(图 5(d))。

图 6 为腐蚀前后试件的微观结构。可以看出, 未受硫酸盐腐蚀的混凝土存在大量的水化产物 C—S—H 凝胶, 结构完整、密实。腐蚀 80 d 时, 试件内部裂缝增多, 局部可见明显的贯通裂缝, 裂缝和孔隙被大量的石膏、钙矾石等晶体填充。

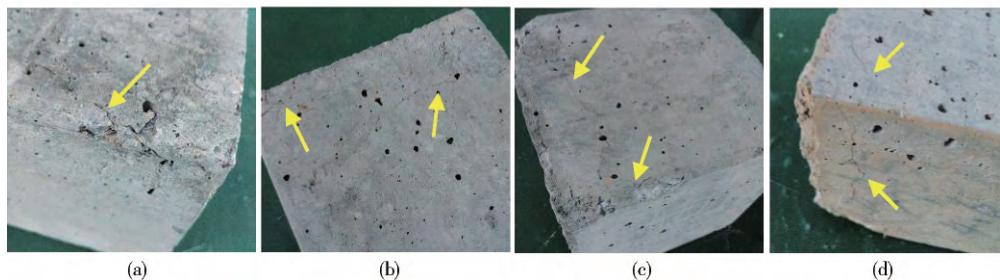


图 5 受蚀试件的外貌演化

Fig. 5 Physical appearance of corroded concrete

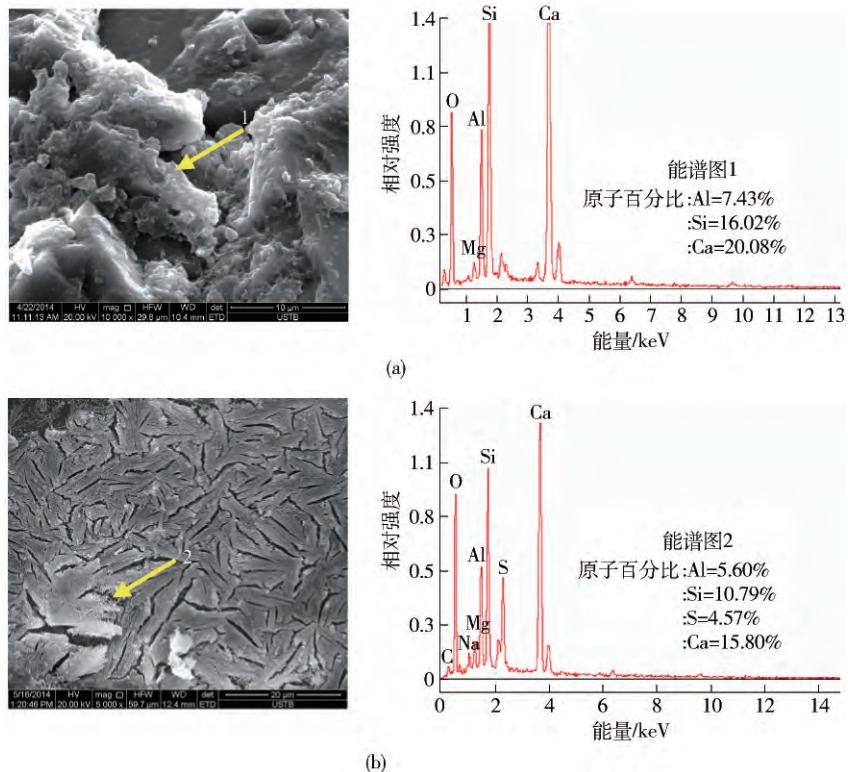


图 6 试件腐蚀前后的微观结构和能谱分析。(a) 0 d; (b) 80 d

Fig. 6 ESEM images and EDX spectra of concrete before and after erosion. (a) 0 d; (b) 80 d

受干湿循环作用,当试件处于干状态时,混凝土内部盐溶液中的水分迅速蒸发,一旦达到过饱和便会有盐析出,再吸水后形成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$,体积膨胀4.0~5.0倍^[10],因此干湿循环作用加速混凝土中的腐蚀损伤。



图7 试件受腐蚀阶段膨胀产物的生长

Fig. 7 ESEM images of expansion products in concrete during sulfate attack

图8为不同腐蚀时期(0、20、40和80 d)试件的X射线衍射测试结果。可以看出:腐蚀前,主要为水化反应产物水化硅酸钙,腐蚀20 d时,除了水化产物,还可清晰观察到钙矾石的衍射峰,此时钙矾石生成量有限,恰好填充了试件微孔隙,优化了孔结构;随着腐蚀的进行,钙矾石和石膏逐渐增多,腐蚀到80 d时,由于试件孔隙溶液中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不断消耗,碱度下降,试件内部生成大量的石膏晶体,腐蚀加重,积聚的钙矾石和石膏在试件内部产生膨胀应力,当膨胀应力大于内部抗拉应力时形成微裂缝,内部结构受到破坏。

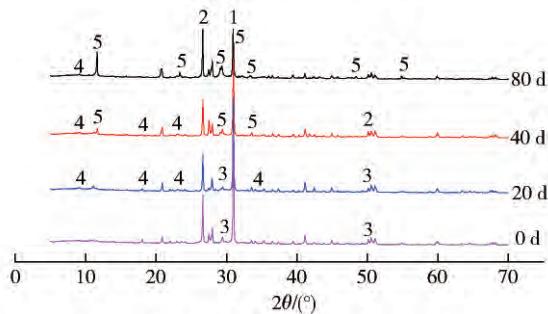


图8 不同侵蚀时期试件的X射线衍射图

Fig. 8 XRD patterns of concrete at different corrosion periods

3 结论

(1) 单轴加载过程中,受蚀混凝土试件随着裂纹的产生、扩展和贯通,波速不断减小,变化率由小到大。腐蚀较久的试件加载初期波速缓慢增加,伴有较明显的压密阶段,在较小的应力水平下波速即突然减小。

(2) 硫酸盐腐蚀环境长期作用下,混凝土内部由于存在腐蚀产生的缺陷和薄弱位置,声发射事件活跃区间集中,且在较小应力水平下声发射事件数量即急

图7为腐蚀产物的生长聚集过程,随着腐蚀时间增加,针棒状的钙矾石和薄片状石膏在裂缝和孔隙内部继续由边缘向内部生长,不断聚集搭接成网状,逐渐对孔隙内壁产生膨胀应力,导致混凝土内部结构损伤和开裂。

剧上升。

(3) 基于声发射累积振铃计数的受蚀混凝土损伤演化方程能够较好地表征混凝土受环境腐蚀、荷载及损伤之间的关系。与未腐蚀混凝土相比,受蚀混凝土的初始损伤值较大,加载过程中损伤发展较快。

(4) 混凝土在腐蚀过程中生成了钙矾石、石膏等膨胀产物,产生膨胀应力,引起内部微裂缝的形成和扩展,从而使得混凝土在加载受荷时声波和声发射变化特征有所不同。

参 考 文 献

- [1] Leemann A, Loser R. Analysis of concrete in a vertical ventilation shaft exposed to sulfate-containing groundwater for 45 years. *Cem Concr Compos*, 2011, 33(1): 74
- [2] Bassuoni M T, Nehdi M L. Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading. *Cem Concr Res*, 2009, 39(3): 206
- [3] Li D L, Zhou Z A. The possibility of seepage corrosion damage of concrete. *J China Coal Soc*, 1996, 21(2): 158
(李定龙,周治安.井壁混凝土渗水腐蚀破坏可能性分析.煤炭学报,1996,21(2): 158)
- [4] Liu J H, Bian L B, He W, et al. Investigation and destruction mechanism on corrosion of concrete shaft in coal mine. *J China Coal Soc*, 2015, 40(3): 528
(刘娟红,卞立波,何伟,等.煤矿矿井混凝土井壁腐蚀的调查与破坏机理.煤炭学报,2015,40(3): 528)
- [5] Jin Z Q, Sun W, Jiang J Y, et al. Damage of concrete attacked by sulfate and sustained loading. *J Southeast Univ Engl Ed*, 2008, 24(1): 69
- [6] Zuo X B, Sun W. Full process analysis of damage and failure of concrete subjected to external sulfate attack. *J Chin Ceram Soc*, 2009, 37(7): 1063
(左晓宝,孙伟.硫酸盐侵蚀下的混凝土损伤破坏全过程.硅

酸盐学报, 2009, 37(7): 1063)

[7] Yu Z X, Gao J M, Song L G, et al. Damage process of concrete exposed to sulfate attack under drying-wetting cycles and loading. *J Southeast Univ Nat Sci Ed*, 2012, 42(3): 487
(余振新, 高建明, 宋鲁光, 等. 荷载-干湿交替-硫酸盐耦合作用下混凝土损伤过程. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(3): 487)

[8] Feng P, Garboczi E J, Miao C, et al. Microstructural origins of cement paste degradation by external sulfate attack. *Constr Build Mater*, 2015, 96(15): 391

[9] Gao R D, Zhao S B, Li Q B, et al. Experimental study of the deterioration mechanism of concrete under sulfate attack in wet-dry cycles. *China Civ Eng J*, 2010, 43(2): 48
(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. 土木工程学报, 2010, 43(2): 48)

[10] Wang H L, Dong Y S, Sun X Y, et al. Damage mechanism of concrete deteriorated by sulfate attack in wet-dry cycle environment. *J Zhejiang Univ Eng Sci*, 2012, 46(7): 1255
(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. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(7): 1255)

[11] Li Y H, Zhao X D, Zhao Y G, et al. Propagation law of wave velocity in granite sample under different conditions. *J Northeast Univ Nat Sci*, 2006, 27(9): 1030
(李元辉, 赵兴东, 赵有国, 等. 不同条件下花岗岩中声波传播速度的规律. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(9): 1030)

[12] Zheng G P, Zhao X D, Liu J P, et al. Experimental study on change in acoustic wave velocity when rock is loading. *J Northeast Univ Nat Sci*, 2009, 30(8): 1197
(郑贵平, 赵兴东, 刘建坡, 等. 岩石加载过程声波波速变化规律实验研究. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(8): 1197)

[13] Li H R, Yang C H, Liu Y G, et al. Experimental research on ultrasonic velocity and acoustic emission properties of granite under failure process. *Chin J Geotech Eng*, 2014, 36(10): 1915
(李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 花岗岩破裂过程中声波与声发射变化特征试验研究. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1915)

[14] Chmel A, Sheherbakov I. A comparative acoustic emission study of compression and impact fracture in granite. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2013, 64(6): 56

[15] Zhang L W, Zhao Y H, Fan Y F, et al. Damage investigation of corroded concrete under compression by AE test. *J Build Mater*, 2013, 16(5): 763
(张力伟, 赵颖华, 范颖芳, 等. 腐蚀混凝土损伤特征的声发射试验研究. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 763)

[16] Ji H G, Zhang T S, Cai M F, et al. Experimental study on concrete damage by dynamic measurement of acoustic emission. *Chin J Rock Mech Eng*, 2000, 19(2): 165
(纪洪广, 张天森, 蔡美峰, 等. 混凝土材料损伤的声发射动态检测试验研究. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 165)

[17] Liu B X, Huang J L, Wang Z Y, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression. *Chin J Rock Mech Eng*, 2009, 28(Suppl 1): 3234
(刘保县, 黄敬林, 王泽云, 等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3234)

[18] Li X P, Lu Y N, Wang Y J. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(11): 2307
(李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2307)