

# 干湿循环与交替荷载作用下混凝土 硫酸盐侵蚀损伤

关博文<sup>1,2</sup>, 邸文锦<sup>1,2</sup>, 王发平<sup>3</sup>, 吴佳育<sup>1,2</sup>, 张硕文<sup>1,2</sup>, 贾治勋<sup>3</sup>

(1. 长安大学材料科学与工程学院, 西安 710061; 2. 长安大学交通铺面材料教育部工程研究中心, 西安 710061; 3. 青海省交通控股集团有限公司, 西宁 810003)

**摘要:** 针对盐富集地区混凝土性能损伤问题, 通过自主研发试验装置模拟干湿循环与交替荷载作用下混凝土硫酸盐侵蚀, 采用超声无损检测、孔结构分析、化学分析法、应力-应变测试分析混凝土受硫酸盐侵蚀宏观性能劣化规律。研究表明: 交替荷载对低强度等级混凝土的侵蚀作用更为严重。交替荷载增加混凝土中有害孔含量, 加速了微裂纹的扩展, 促进了硫酸根离子传输, 加重了受蚀混凝土损伤。基于干湿循环与交替荷载作用下受硫酸盐侵蚀混凝土应力-应变曲线, 以损伤度为变量, 提出了受硫酸盐侵蚀混凝土相对峰值应力以及应变随损伤度变化的拟合方程。

**关键词:** 道路工程; 干湿循环; 硫酸盐侵蚀; 混凝土; 应力-应变曲线; 损伤度

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)04-1112-10

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20210794

## Damage of concrete subjected to sulfate corrosion under dry-wet cycles and alternating loads

GUAN Bo-wen<sup>1,2</sup>, DI Wen-jin<sup>1,2</sup>, WANG Fa-ping<sup>3</sup>, WU Jia-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuo-wen<sup>1,2</sup>, JIA Zhi-xun<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Engineering Research Center of Transportation Pavement Materials, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 3. Qinghai Transportation Holding Group Co., Ltd., Xining 810003, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the damage of concrete in salt-rich areas, the self-developed equipment was used to simulate the environment of concrete subjected to sulfate corrosion under dry-wet cycles and alternating load. Ultrasonic nondestructive testing, pore structure analysis, chemical analysis, and stress-strain testing were used to analyze the macro and micro performance degradation laws of concrete damaged by sulfate erosion. The results showed that: The alternating load has a greater acceleration effect on the sulfate attack of low-strength grade concrete. The alternating load increases the content of harmful pores in the concrete, promotes the transmission of sulfate ions, and accelerates the sulfate corrosion reaction of the concrete. Based on the stress-strain curve of sulfate-eroded concrete under dry-wet cycles and alternating loads, with damage as a variable, a fitting equation for the relative peak

收稿日期: 2021-08-18.

基金项目: 青海省自然科学基金项目(2021-ZJ-765).

作者简介: 关博文(1985-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 混凝土耐久性. E-mail: bguan@chd.edu.cn

stress and strain of sulfate-eroded concrete with the damage degree is proposed.

**Key words:** road engineering; dry-wet cycles; alternating load; sulfate attack; concrete; stress-strain curve; damage degree

## 0 引言

我国新疆、甘肃等西北五省多属干旱地区,盐碱地广泛分布,且东部沿海地区环境中也富含硫酸根离子,大量硫酸盐的存在使得这些地区的部分道路混凝土结构物仅使用几年就遭受严重腐蚀破坏,不得不进行工程修复,造成巨大的经济损失<sup>[1-3]</sup>。在上述硫酸盐富集地区,硫酸根离子经毛细吸水作用与扩散作用入侵道路、桥隧等混凝土建筑物内部,并与其水化产物发生膨胀反应,生成的膨胀产物前期先填充混凝土孔结构,当膨胀产物与砂浆接触后产生应力大于拉应力时,混凝土膨胀开裂,使有害离子更易入侵混凝土内部,最终造成道路混凝土强度损失,缩短道路混凝土的正常使用年限<sup>[4,5]</sup>。根据我国沿海沿湖等硫酸盐环境可知,服役于浪溅区、潮差区的道桥结构面临着高频率的干湿交替,高强度的冲击作用以及光照充足温度上升等苛刻条件<sup>[6]</sup>,使道、桥等混凝土结构深受干湿循环机制的影响<sup>[7-9]</sup>;此外,道面及桥隧等公路设施的主要用途是承载车辆,故车流带来的交替荷载也是混凝土结构面临的一大挑战<sup>[10]</sup>。因此,干湿循环和交替荷载更符合受硫酸盐侵蚀混凝土的真实服役环境,对于该问题的研究具有重要的实用意义。

目前,一些国内外学者已经基于干湿循环机制或荷载条件对受蚀混凝土做出了研究。Ren等<sup>[11]</sup>认为干湿循环机制会加速硫酸盐的侵蚀反应,并提出随着干湿循环次数的增加,生成物会在混凝土孔隙中不断累积,产生结晶压力,使混凝土受损。Li等<sup>[12]</sup>通过建立干湿循环条件下, $\text{SO}_4^{2-}$ 在混凝土中的扩散模型,说明了干湿循环机制会加速 $\text{SO}_4^{2-}$ 的入侵,并加重混凝土的强度退化。Zhang等<sup>[13]</sup>在研究硫酸盐侵蚀混凝土的过程中,发现一些仅基于菲克第二定律建立的数值模型,并不能模拟干湿循环条件引起的 $\text{SO}_4^{2-}$ 加速过程,又提出增添经验公式来模拟此加速过程。Yu等<sup>[14]</sup>提出硫酸盐浓度和荷载应力是加快硫酸盐侵蚀的两个重要因素,其中,动态荷载会使强度损失提前发生。Yin等<sup>[15]</sup>基于菲克定律和化学反应

动力学,建立了混凝土在轴向荷载和硫酸盐侵蚀耦合作用下 $\text{SO}_4^{2-}$ 的传输模型,研究证明,轴向荷载会加重硫酸盐对混凝土的侵蚀。Gao等<sup>[16]</sup>在干湿循环和静态荷载(弯曲荷载)的条件下,通过对比混凝土微观结构和侵蚀产物的变化,说明了在干湿循环和弯曲荷载耦合作用下,混凝土会受到更为严重的侵蚀。综上所述,目前国内外对硫酸盐侵蚀混凝土的研究主要集中在单一因素对硫酸盐侵蚀混凝土的影响,少数涉及干湿循环和荷载作用耦合的研究,荷载作用也主要集中在静态荷载方面<sup>[17]</sup>。然而,根据我国道、桥隧混凝土的实际服役环境可知,道路工程受硫酸盐侵蚀的混凝土结构不仅受干湿循环作用,同时受到交替荷载的作用,混凝土结构在遭受双重作用后的性能劣化过程较单一因素作用更加复杂。

鉴于此,本文在受蚀混凝土已承担干湿循环条件的基础上,增加了交替荷载作用,通过自主研发的干湿循环与交替荷载作用下混凝土硫酸根盐侵蚀试验装置对C50、C40和C30强度等级混凝土开展硫酸盐侵蚀试验,侵蚀制度为湿润24 h,干燥24 h,交替荷载最大、最小应力分别为0.6和0.2,采用超声无损检测、孔结构分析、化学分析法、应力-应变测试分析不同侵蚀龄期下干湿循环与交替荷载作用下混凝土受硫酸盐侵蚀损伤宏微观性能劣化规律,并通过对比损伤度的定义以及损伤度与混凝土力学性能的劣化关系,建立了受硫酸盐侵蚀混凝土力学特性随损伤度变化的拟合方程,研究内容为富盐地区道路混凝土建筑结构的服役寿命预估提供了数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

水泥选用等级为42.5的普通硅酸盐水泥,其化学组成如下: $w(\text{SiO}_2)=21.01\%$ , $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=4.55\%$ , $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)=2.99\%$ , $w(\text{CaO})=63.01\%$ , $w(\text{MgO})=1.79\%$ , $w(\text{SO}_3)=2.93\%$ , $w(\text{Na}_2\text{O})=0.58\%$ , $w(\text{LOSS})=3.14\%$ 。细集料采用河砂,细度模数为2.78。粗集料选用最大粒径为20 mm的连续级配石灰岩碎石,其技术性能指标如

下:密度为 2705 kg/m<sup>3</sup>, 压碎值为 9.82%, 吸水率为 1.43%, 针片状含量为 3.9%。拌合水使用自来水。减水剂选用产自陕西交科新材料有限公司的聚羧酸减水剂。

### 1.2 混凝土配合比及性能

根据普通混凝土配合比设计规程(JGJ55—2011), 选取水灰比分别为 0.55、0.40、0.28, 设计强度分别为 C30、C40 与 C50, 其中 C50 掺加 1.4% 减水剂, 混凝土配合比及试件 28 d 抗压强度见表 1。

表 1 混凝土配合比及性能

Table 1 Concrete proportion and performance

强度等级	水/(kg·m <sup>-3</sup> )	水泥/(kg·m <sup>-3</sup> )	砂/(kg·m <sup>-3</sup> )	碎石/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa
C50	145	518	506	1281	54.2
C40	202	505	593	1150	43.8
C30	193	357	691	1159	33.6

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 干湿循环与交变荷载作用下混凝土硫酸盐侵蚀试验

按照表 1 配合比制备 100 mm×100 mm×400 mm 混凝土试件, 养护 28 d 后采用自主研发的干湿循环与交变荷载作用下混凝土硫酸根盐侵蚀试验装置进行试验, 如图 1 所示。侵蚀溶液选择 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液, 溶液质量分数为 5%。将试块放于化学介质侵蚀装置试验架上, 倒入规定浓度的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液, 实验装置如图 1 所示。干湿循环周期设定为 24 h, 即干燥时间为 12 h, 湿润时间为 12 h<sup>[18]</sup>; 交变荷载的加载频率为 360 次/d, 交变荷载最大应力水平设置为 0.6, 最小应力水平设置为 0.2<sup>[19]</sup>, 交变荷载的荷载谱图如图 2 所示。分别在 15、45、90、180、270、360 个干湿循环周期后测试混凝土试件的宏微观性能。



图 1 干湿循环与交变荷载作用下混凝土硫酸根盐侵蚀试验装置

Fig. 1 Test device for sulfate attack of concrete under dry-wet cycle and alternating load

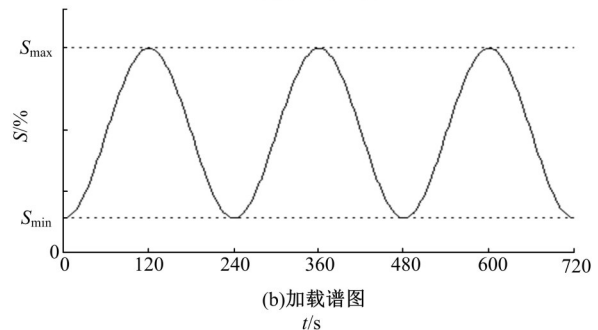
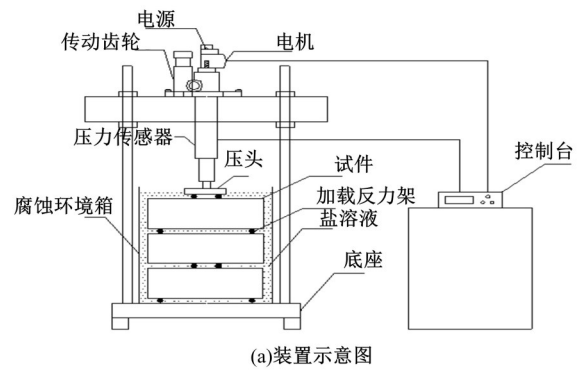


图 2 侵蚀试验装置示意图及加载谱图

Fig. 2 Schematic diagram and loading spectrum of attack test device

#### 1.3.2 相对动弹性模量

本文采用超声波无损检测技术探究受蚀混凝土的动弹性模量, 通过测试超声波波速来计算受蚀混凝土的动弹性模量, 计算公式如下:

$$E = \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} V^2 \quad (1)$$

式中:  $E$  为混凝土的动弹性模量, N/m<sup>2</sup>;  $\rho$  为混凝土密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\nu$  为混凝土泊松比;  $V$  为超声波速, km/s。

相对动弹性模量是混凝土受损伤后的动弹性模量与未受损伤时动弹性模量的比值, 测试混凝土的相对动弹性模量可以分析混凝土受侵蚀损伤的劣化过程。混凝土的相对动弹性模量可表示为:

$$E_r = \frac{E_n}{E_0} = \frac{V_n^2}{V_0^2} \quad (2)$$

式中:  $E_r$  为混凝土的相对动弹性模量;  $E_n$  为混凝土  $n$  次循环后的动弹性模量;  $E_0$  为混凝土的初始动弹性模量;  $V_n$  为混凝土  $n$  次循环后的超声波速;  $V_0$  为混凝土的初始超声波速。

#### 1.3.3 应力-应变曲线

在混凝土遭受一定干湿循环次数后, 以混凝土的相对动弹性模量为损伤度评价指标, 计算不同干湿循环后的混凝土损伤度, 通过切割方式在

不同损伤度的混凝土中心截取 100 mm×100 mm×100 mm 的试件,采用 MTS 多通道结构加载控制系统对受腐混凝土进行应力-应变测试,获取应力-应变曲线。

#### 1.3.4 混凝土硫酸根离子浓度测试

采用重量法测定混凝土中硫酸根的含量。采样方法与混凝土微观结构测试相同,为降低试验误差,在混凝土的侵蚀面取 3 个芯样,将切割好的芯样进行研磨,使研磨好的粉末能够通过 0.08 mm 的筛子,之后取 5 g 粉末样品溶于 100 mL 蒸馏水中,并加入 20 mL 的 1:1 盐酸溶液加热煮沸,冷却后过滤。将滤液溶解至 200 mL,然后煮沸,在搅拌的过程中加入质量分数为 10% 的 BaCl<sub>2</sub> 溶液 10 mL,边搅拌边加入;待反应完全,静置 4 h,使用滤纸过滤。将包裹沉淀物的滤纸放入坩埚,记坩埚质量为  $m_1$ ;将坩埚放入高温炉加热至 400 °C,待滤纸灰化后将坩埚取出冷却至恒重,称量坩埚质量,记为  $m_2$ 。相同深度的 3 个芯样粉末为一组,取其平均值作为不同深度混凝土硫酸根离子的含量,不同深度混凝土中硫酸根离子含量按式(3)计算:

$$W_{\text{SO}_4^{2-}} = 1.2 \times \frac{0.343 \times (m_2 - m_1)}{m} \times 100\% = 0.4116 \times \frac{(m_2 - m_1)}{m} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $m$ 为混凝土粉末试样的质量; $m_1$ 为试验的坩埚质量; $m_2$ 为过滤后沉淀物与坩埚总质量;0.343为 BaSO<sub>4</sub> 换算成 SO<sub>3</sub> 的系数;1.2 为 SO<sub>3</sub> 换算成 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的系数。

#### 1.3.5 微观结构测试

采用 JK-YG2000 压汞仪测试侵蚀深度为 15 mm 处混凝土孔结构,获取孔径分布累计曲线,分别采用 S-4800 冷场发射扫描电镜和 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪获取受蚀混凝土表面形貌及成分数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 干湿循环、交变荷载、硫酸盐侵蚀作用下混凝土性能劣化规律

干湿循环、交变荷载、硫酸盐侵蚀作用下混凝土的相对动弹性模量变化规律见图 3。

据图 3 可知,不同强度等级混凝土的相对动弹性模量的整体变化趋势相同,都是先增大后减小,说明侵蚀前期的生成物对混凝土结构有一定

的填充作用<sup>[20]</sup>,使其相对动弹性模量有所增长,当侵蚀达到一定程度时,侵蚀产物产生的膨胀应力大于水泥浆体抗拉应力时,将发生开裂破坏,相对动弹性模量随之降低<sup>[21]</sup>。对比图 3(a)和图 3(b)可以发现,干湿循环作用下 C50、C40 和 C30 受腐混凝土相对动弹性模量峰值分别出现在 60 d、90 d 和 60 d,而干湿循环与交变荷载作用下 C50、C40 和 C30 受腐混凝土相对动弹性模量分别出现在 30 d、30 d 和 60 d,说明交变荷载作用加速了侵蚀前期的生成物对混凝土微观结构的填充作用。同时,当侵蚀周期为 360 d 时,干湿循环与交变荷载作用下 C50、C40 和 C30 受腐混凝土相对动弹性模量较干湿循环作用下 C50、C40 和 C30 受腐混凝土相对动弹性模量分别降低了 7%、11% 和 18%,也说明了交变荷载会加速混凝土硫酸盐侵蚀破坏。

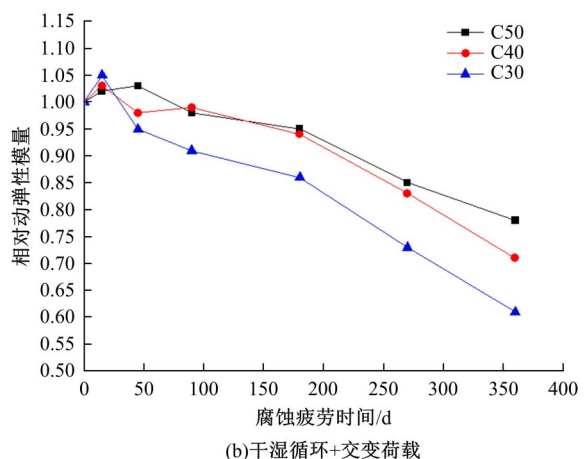
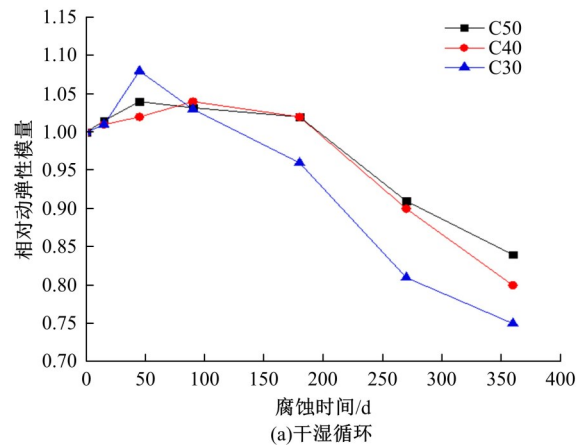


图 3 受蚀混凝土相对动弹性模量变化规律

Fig. 3 Relative dynamic elastic modulus of concrete subjected to sulfate attack

将交变荷载的作用系数定义为受侵蚀疲劳作用 360 d 后混凝土相对动弹性模量损失与受侵蚀作用 360 d 后混凝土相对动弹性模量损失之比,

见式(4):

$$K = \frac{(1 - E_{cf360})}{(1 - E_{c360})} \times 100\% \quad (4)$$

式中:K为交变荷载作用系数;E<sub>cf360</sub>为干湿循环与交变荷载作用下硫酸盐侵蚀360 d后混凝土相对动弹性模量;E<sub>c360</sub>为干湿循环作用下硫酸盐侵蚀360 d后混凝土相对动弹性模量。

不同强度混凝土交变荷载作用系数见图4。

从图4可以看出,交变荷载作用系数均小于1,说明交变荷载加速了混凝土侵蚀破坏。随着强度等级由C50降低至C30,交变荷载作用系数降低了33%,表明交变荷载对混凝土侵蚀破坏的加速作用随着混凝土标号的增加而降低。

为了进一步研究交变荷载对硫酸盐离子传输的影响,本文对比不同侵蚀条件下混凝土中硫酸根离子的分布规律,如图5所示。

从图5(a)~(c)可以看出,不同侵蚀条件下混凝土中硫酸根离子的分布规律与无荷载作用时的规律相同,都随着深度的增加而下降。从图5(a)和图5(b)对比分析可以看出,当侵蚀时间为360 d

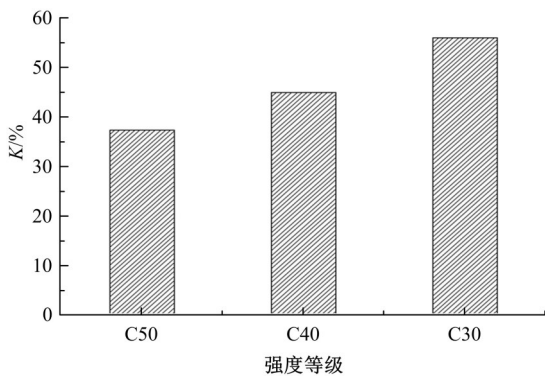
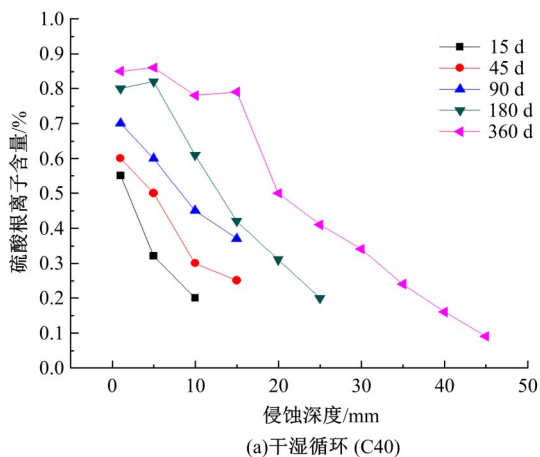
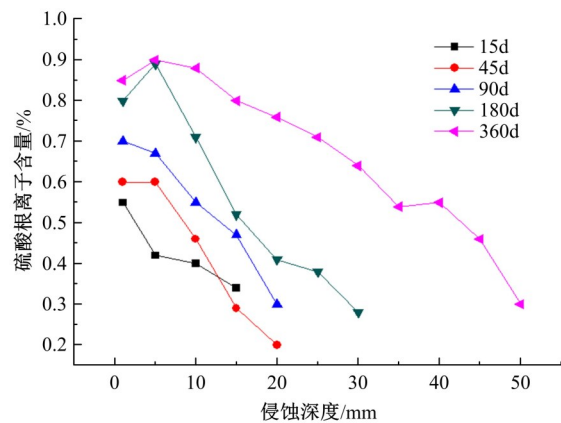


图4 不同强度等级混凝土交变荷载作用系数

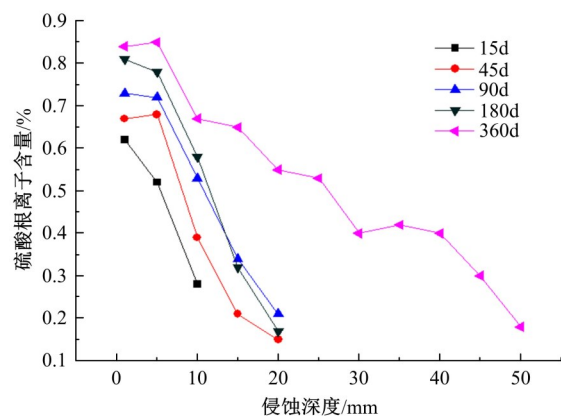
Fig. 4 Alternating load coefficient of concrete with different strength grades



(a)干湿循环(C40)



(b)干湿循环+交变荷载(C40)



(c)干湿循环+交变荷载(C50)

图5 不同侵蚀条件下混凝土中硫酸根离子的分布规律

Fig. 5 Distribution of sulfate ions in concrete under different attack conditions

时,交变荷载作用混凝土侵蚀深度为50 mm,含量为0.25%,而无荷载作用混凝土侵蚀深度为45 mm,含量为0.09%。当外部条件加入交变荷载时,硫酸根离子侵蚀浓度和深度均有所增加。图6和图7分别为侵蚀时间为360 d不同侵蚀条件下

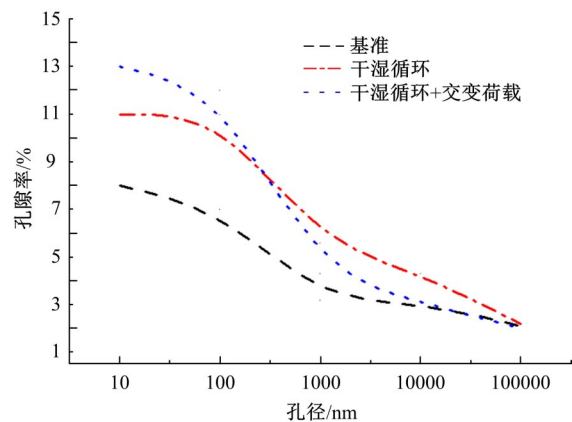


图6 不同侵蚀环境作用下混凝土孔隙率变化

Fig. 6 Effect of attack environment on concrete porosity

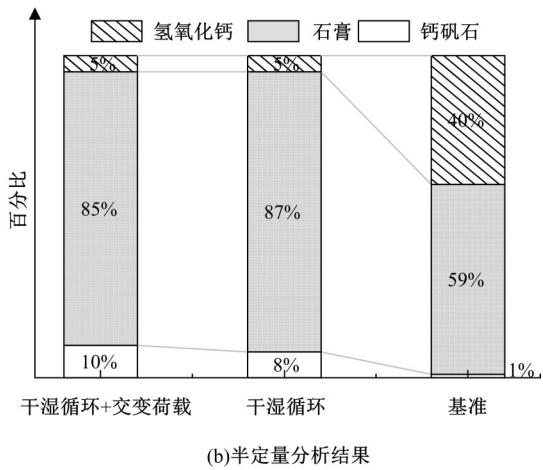
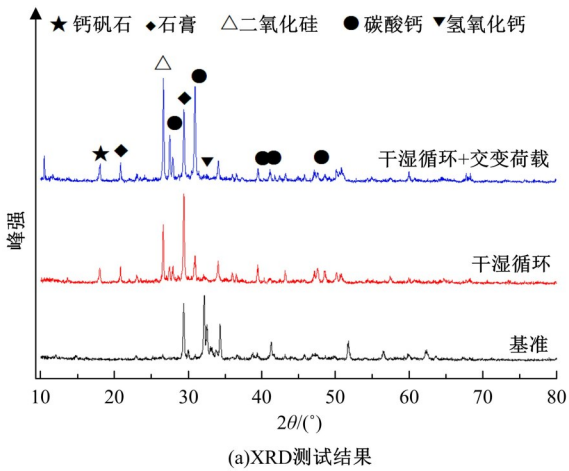


图 7 不同侵蚀环境作用下混凝土侵蚀产物

Fig. 7 Effect of attack environment on concrete products

C40混凝土 20 mm处孔径分布累计曲线图和腐蚀产物物相分析结果。吴中伟<sup>[22]</sup>院士根据不同孔径对混凝土性能的影响将混凝土的孔径分为无害孔(<20 nm)、少害孔(20~50 nm)、有害孔(50~200 nm)和多害孔(>200 nm)。从图 6 压汞试验测得的混凝土孔隙率可知,干湿循环与交变荷载作用增加了混凝土有害孔与多害孔的含量,促进了硫酸根离子传输。从图 7 可以看出,交变荷载与干湿循环作用增加了混凝土中钙矾石的含量,说明硫酸根离子与水化产物反应生成物含量较多,进一步说明了交变荷载作用加速了硫酸根离子侵蚀过程。从图 5(b)和图 5(c)对比分析可以看出,当混凝土标号提高至 C50 时,干湿循环与交变荷载作用下混凝土侵蚀深度为 50 mm,含量为 0.16%,说明提高混凝土标号有助于降低交变荷载作用下硫酸根离子侵蚀作用。分析原因为高标号混凝土水灰比较低,孔隙率及有害孔的含量较低,延缓了硫酸根离子的侵入<sup>[23]</sup>,与此同时,混

土更加密实,降低了交变荷载对内部独立孔扩展为连通孔并逐渐发展为微裂纹的促进作用。干湿循环与交变荷载作用对混凝土硫酸盐侵蚀损伤造成破坏,微观表现为内部独立孔扩展为连通孔并逐渐发展为微裂纹<sup>[24]</sup>,如图 8 所示。当硫酸盐侵蚀导致混凝土结构酥松后,交变荷载使混凝土发生开裂并且使裂纹不断萌生扩展,原始缺陷从独立演变为连通状态(见图 9),最终导致混凝土失效。

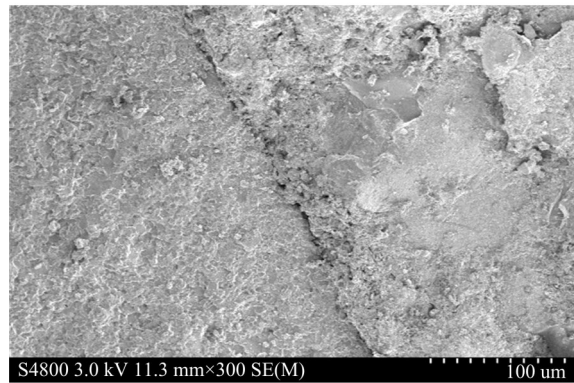
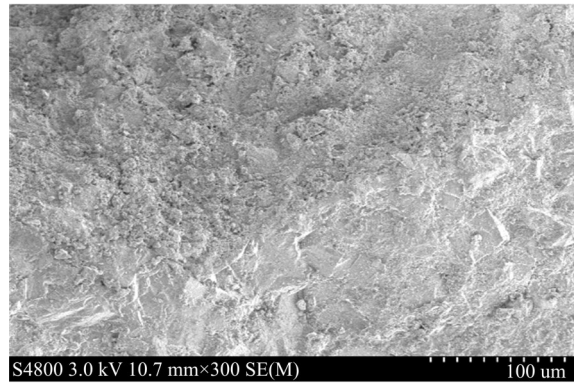


图 8 混凝土裂纹形成过程

Fig. 8 Concrete crack formation process

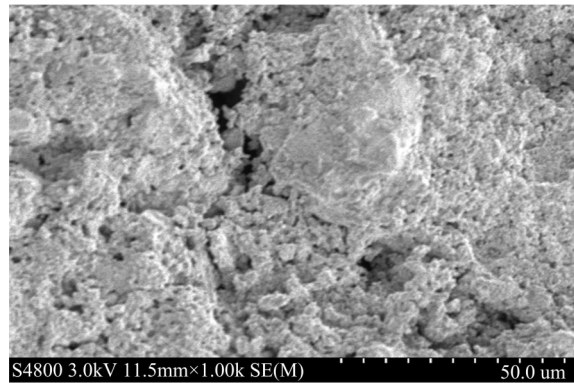


图 9 混凝土孔隙结构连通状态

Fig. 9 Connectivity of concrete pore structure

## 2.2 干湿循环、交变荷载、硫酸盐侵蚀作用下混凝土损伤程度评价

### 2.2.1 损伤度的定义

干湿循环与交变荷载耦合作用下混凝土的结构破坏过程较复杂,要将不同侵蚀周期的裂纹数量、膨胀物生成量等微观损伤转化成为宏观性能衰退就要引入损伤度作为评价混凝土的性能退化指标<sup>[25,26]</sup>。损伤度可定义为某一物理量的变化值与其初始值的比值,本文采用相对动弹性模量来计算损伤度,计算公式如下:

$$D = \frac{1 - E_{ct}}{E_j} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $D$ 为损伤度; $E_{ct}$ 为受干湿循环与交变荷载作用下受硫酸盐侵蚀混凝土相对动弹性模量的变化值; $E_j$ 为未受到损伤时混凝土的相对动弹性模量,一般取值为1。当 $D < 0$ 时,说明硫酸盐侵蚀具有增强作用;当 $D > 0$ 时,说明硫酸盐侵蚀具有劣化作用。

### 2.2.2 侵蚀龄期对不同强度等级混凝土损伤度的影响

图10为干湿循环与交变荷载作用下受硫酸盐侵蚀的不同强度等级混凝土损伤度随侵蚀龄期的变化规律。

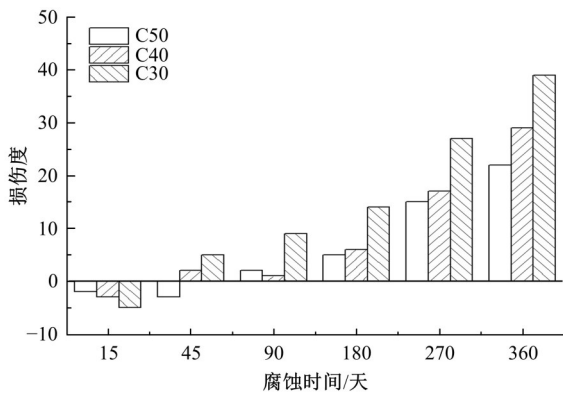


图10 不同强度等级混凝土的损伤度随侵蚀龄期的变化规律

Fig. 10 Damage degree of concrete with different strength grade varies with age of attack

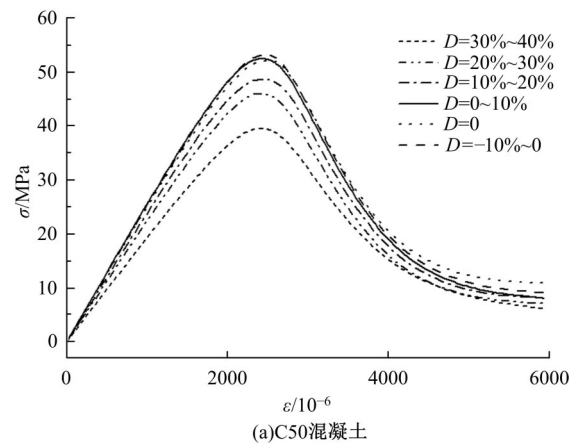
由图10中可以看出,在干湿循环与交变荷载作用下,不同强度等级混凝土的损伤度随着龄期的增加先减小后增大,说明在硫酸盐侵蚀初期,混凝土不断发生水化作用,使自身的内部结构越来越致密,同时硫酸盐侵蚀生成的钙矾石进一步密实了混凝土的孔结构,使混凝土结构得到了增强。当侵蚀产物填满混凝土孔隙产生膨胀应力,混

凝土内部产生裂缝形成损伤,侵蚀损伤随着龄期的增加进一步增大<sup>[27]</sup>。当侵蚀龄期为360 d时,C30混凝土损伤度是C50混凝土1.78倍。低标号混凝土较高标号混凝土更易受到硫酸盐侵蚀损伤。由于硫酸盐对混凝土的侵蚀破坏是较漫长的过程,因此本研究没有对侵蚀龄期与混凝土损伤度间的关系进行拟合。

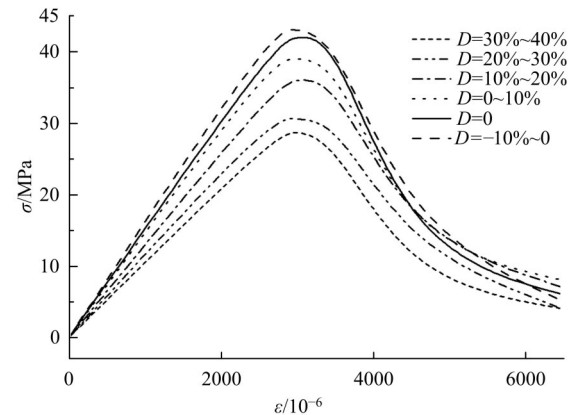
### 2.3 基于损伤度的混凝土应力-应变曲线分析

图11为损伤度范围在-10%~40%时不同强度等级受蚀混凝土的应力-应变曲线。

从图11可以看出,不同损伤度混凝土的应力-应变曲线有着明显的差别,当混凝土的损伤度为负值时,其对应的峰值应力最高,说明混凝土此时具有最高的峰值应力<sup>[28]</sup>。随着损伤度的增加,混凝土的峰值应力表现为逐渐降低并向右移动,表明混凝土的强度与弹性模量均降低,而应变增大。为获取应力-应变曲线与损伤度之间的关系,选择受硫酸盐侵蚀后不同损伤度混凝土的相对峰值应力 $f'_c/f_c$ (混凝土受损后的峰值应力 $f'_c$ 除以未受损的峰值应力 $f_c$ ,相对峰值应变同理)作为指标,采用图11中的应力应变数据,获取干湿循环与交变



(a)C50混凝土



(b)C40混凝土

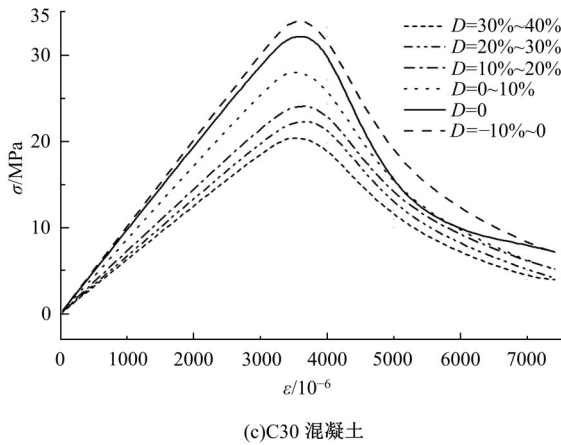


图 11 干湿循环、交替荷载、硫酸盐侵蚀作用下受损混凝土应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of damaged concrete under dry-wet cycle, alternating load and sulfate attack

荷载作用下受硫酸盐侵蚀混凝土相对峰值应力(应变)随损伤度变化的关系图,见图 12 和图 13。

从图 12 可以看出,随着损伤度的增加,不同强度等级混凝土的峰值应力均下降;在受硫酸盐侵蚀初期,不同强度等级混凝土的峰值应力有所提高,与前文试验结果一致。相对峰值应力与损伤度呈指数关系,C30、C40 和 C50 混凝土损伤度与相对峰值应力关系式分别见式(6)(7)(8):

$$\frac{f'_c}{f_c} = 0.61 \exp\left(-\frac{D}{29.19}\right) + 0.45, R^2 = 0.93 \quad (6)$$

$$\frac{f'_c}{f_c} = 0.38 \exp\left(-\frac{D}{13.68}\right) + 0.7, R^2 = 0.81 \quad (7)$$

$$\frac{f'_c}{f_c} = 0.22 \exp\left(-\frac{D}{5.19}\right) + 0.8, R^2 = 0.95 \quad (8)$$

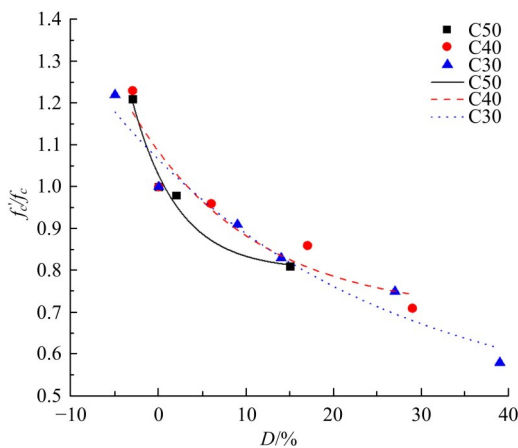


图 12 相对峰值应力与损伤度的关系

Fig. 12 Relationship between relative peak stress and damage degree

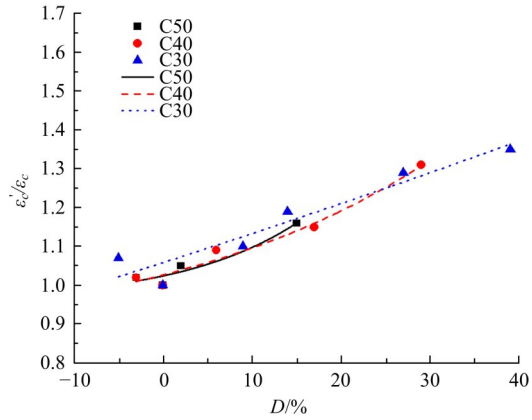


图 13 相对峰值应变与损伤度的关系

Fig. 13 Relationship between relative peak strain and damage degree

从图 13 可以看出,混凝土的损伤度越大,相对峰值应变越大,说明随着损伤度的增加,混凝土内部缺陷逐渐增多,在受力过程中缺陷存在被压实的过程,表现为峰值应变的增大<sup>[29]</sup>。当损伤度为负值时,意味着混凝土整体结构更加密实,刚度提高,峰值应变相对降低。相对峰值应力与损伤度呈指数关系,C30、C40 和 C50 混凝土损伤度与相对峰值应变关系式分别见式(9)(10)(11):

$$\frac{\epsilon'_c}{\epsilon_c} = 2.44 \exp\left(\frac{D}{330.6}\right) - 1.38, R^2 = 0.87 \quad (9)$$

$$\frac{\epsilon'_c}{\epsilon_c} = 0.18 \exp\left(\frac{D}{31.43}\right) + 0.84, R^2 = 0.95 \quad (10)$$

$$\frac{\epsilon'_c}{\epsilon_c} = 0.06 \exp\left(\frac{D}{13.56}\right) + 0.95, R^2 = 0.82 \quad (11)$$

### 3 结 论

(1) 交替荷载加速了混凝土硫酸盐侵蚀破坏。随着强度等级由 C50 降低至 C30, 交替荷载作用系数降低了 33%, 随着混凝土标号的增大, 交替荷载对混凝土腐蚀破坏的加速作用逐渐降低。

(2) 干湿循环与交替荷载的耦合作用增大了混凝土中有害孔含量, 加重了硫酸盐侵蚀, 同时, 交替荷载使受蚀混凝土中原始缺陷从独立演变为连通状态, 并逐渐发展为微裂纹并不断萌生扩展, 从而加重了受蚀混凝土损伤。

(3) 侵蚀时间为 360 d 时, 交替荷载作用下混凝土侵蚀深度为 50 mm, 硫酸根离子质量分数为 0.25%, 而无荷载作用的混凝土侵蚀深度为 45 mm, 离子质量分数为 0.09%。当外部条件加入交替荷载时, 硫酸根离子侵蚀浓度和深度均有所增加, 交替荷载加快了硫酸盐对混凝土的侵蚀

速度。

(4)在干湿循环与交变荷载作用下,不同强度等级混凝土硫酸盐侵蚀损伤度随着龄期的增加先减小后增大。当侵蚀龄期为 360 d 时,C30 混凝土损伤度是 C50 混凝土 1.78 倍。低标号混凝土较高标号混凝土更易受到复杂环境作用下硫酸盐侵蚀损伤。

(5)根据干湿循环、交变荷载、硫酸盐侵蚀作用下受损混凝土应力-应变曲线,以损伤度为变量,提出了受硫酸盐侵蚀混凝土相对峰值应力与应变随损伤度变化的拟合方程。

#### 参考文献:

- [1] Zhao G W, Guo M Z, Cui J F, et al. Partially-exposed cast-in-situ concrete degradation induced by internal-external sulfate and magnesium multiple coupled attack[J]. Construction and Building Materials, 2021, 294(3): No. 123560.
- [2] Zou D J, Qin S S, Liu T J, et al. Experimental and numerical study of the effects of solution concentration and temperature on concrete under external sulfate attack[J]. Cement and Concrete Research, 139: No. 106284.
- [3] 关博文, 吴佳育, 陈华鑫, 等. 再生骨料残余砂浆覆盖率测试及其对混凝土渗透性的影响[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 155-165.  
Guan Bo-wen, Wu Jia-yu, Chen Hua-xin, et al. Test of coverage rate of residual mortar on recycled aggregate and its influence on permeability of concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 155-165.
- [4] Liao K X, Zhang Y P, Zhang W P, et al. Modeling constitutive relationship of sulfate-attacked concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: No. 1191902.
- [5] 关博文. 交变荷载与硫酸盐腐蚀作用下水泥混凝土疲劳损伤机制[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2012.  
Guan Bo-wen. Study on the fatigue damage of cement concrete subjected to sulfate corrosion and alternating stresses[D]. Xi'an: College of Highway Engineering of Chang'an University, 2012.
- [6] Chang H L, Jin Z Q, Wang P G, et al. Comprehensive resistance of fair-faced concrete suffering from sulfate attack under marine environments[J]. Construction and Building Materials, 2021, 277: No. 122312.
- [7] Wei Y M, Chai J R, Qin Y, et al. Effect of fly ash on mechanical properties and microstructure of cellulose fiber-reinforced concrete under sulfate dry-wet cycle attack[J]. Construction and Building Materials, 2021, 302: No. 124207.
- [8] Xu F, Wang S L, Li T, et al. The mechanical properties of tailing recycled aggregate concrete and its resistance to the coupled deterioration of sulfate attack and wetting-drying cycles[J]. Structures, 2020, 27: 2208-2216.
- [9] Wang K, Guo J J, Wu H, et al. Influence of dry-wet ratio on properties and microstructure of concrete under sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: No. 120635.
- [10] 关博文, 杨涛, 吴佳育, 等. 交变荷载作用下损伤混凝土中氯离子传输行为[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 304-308.  
Guan Bo-wen, Yang Tao, Wu Jia-yu, et al. Chloride transport behavior of damaged concrete under alternating load[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 304-308.
- [11] Ren J G, Lai Y M, Bai R Q, et al. The damage mechanism and failure prediction of concrete under wetting-drying cycles with sodium sulfate solution[J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: No. 120525.
- [12] Li J P, Xie F, Zhao G W, et al. Experimental and numerical investigation of cast-in-situ concrete under external sulfate attack and drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: No. 118789.
- [13] Zhang J R, Sun M, Hou D S, et al. External sulfate attack to reinforced concrete under drying-wetting cycles and loading condition: numerical simulation and experimental validation by ultrasonic array method[J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 365-373.
- [14] Yu D M, Guan B W, He R, et al. Sulfate attack of Portland cement concrete under dynamic flexural loading: a coupling function[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 478-485.
- [15] Yin G J, Zuo X B, Tang Y J, et al. Numerical simulation on time-dependent mechanical behavior of concrete under coupled axial loading and sulfate attack [J]. Ocean Engineering, 2017, 142: 115-124.
- [16] Gao J M, Yu Z X, Song L G, et al. Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials, 2013, 39: 33-38.

- [17] Liu F, You Z, Diab A, et al. External sulfate attack on concrete under combined effects of flexural fatigue loading and drying-wetting cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: No. 118224.
- [18] Swamy R N, Tanikawa S. An external surface coating to protect concrete and steel from aggressive environments[J]. *Materials and Structures*, 1993, 26(162): 465-478.
- [19] 常艳婷, 田丰, 张震. 动态疲劳荷载对路面砼不同部位抗渗性影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2014, 36(11): 53-57.  
Chang Yan-ting, Tian Feng, Zhang Zhen. Dynamic fatigue loading effects on the impermeability of different parts of concrete pavement[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(11): 53-57.
- [20] Sahoo S, Mahapatra T R. ANN modeling to study strength loss of fly ash concrete against long term sulphate attack[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(11): 24595-24604.
- [21] Ikumi T, Cavalaro S H P, Segura I, et al. Alternative methodology to consider damage and expansions in external sulfate attack modeling[J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 63: 105-116.
- [22] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 38-43.
- [23] Li T, Wang S S. Modeling diffusion coefficient of sulfate ion in concrete using probabilistic approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 215: 435-446.
- [24] Cao T, Zhang L, Sun G, et al. Simulation of chloride ion transport in concrete under the coupled effects of a bending load and drying-wetting cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 241: No. 118045.
- [25] Xiao Q H, Li Q, Cao Z Y, et al. The deterioration law of recycled concrete under the combined effects of freeze-thaw and sulfate attack[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 200: 344-355.
- [26] 关博文, 刘佳楠, 吴佳育, 等. 基于侵蚀损伤的混凝土硫酸根离子传输行为[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(10): 3169-3174, 3183.  
Guan Bo-wen, Liu Jia-nan, Wu Jia-yu, et al. Transport behavior of sulfate ions in concrete with attack damage[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(10): 3169-3174, 3183.
- [27] Chen Y, Liu P, Yu Z. Study on degradation of macro performances and micro structure of concrete attacked by sulfate under artificial simulated environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: No. 119951.
- [28] Nie L X, Xu J Y, Bai E, et al. Dynamic stress-strain relationship of concrete subjected to chloride and sulfate attack[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 232-240.
- [29] Liao K X, Zhang Y P, Zhang W P, et al. Modeling constitutive relationship of sulfate-attacked concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: No. 119902.