

# 碳化及硫酸盐侵蚀对混凝土强度性能的影响研究

缙彦强<sup>1</sup>, 孙阳<sup>2</sup>, 王瑞骏<sup>1</sup>, 徐帆<sup>1</sup>, 李阳<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国水利水电建设工程咨询西北有限公司, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 为研究碳化与硫酸盐侵蚀共同作用下混凝土的强度特性及其演变规律, 分别通过单一硫酸盐干湿循环试验、单一碳化试验以及碳化与硫酸盐干湿循环的交替试验, 分析其对混凝土强度特性的影响机理。试验结果表明: 水灰比越小, 单一硫酸盐侵蚀以及碳化与硫酸盐侵蚀交替作用后混凝土的抗压强度及劈裂抗拉强度降低幅度越小; 随着碳化时间的延长, 混凝土的抗压强度及劈裂抗拉强度呈现先快后慢的增长趋势, 且水灰比越大, 增长幅度越大; 碳化与硫酸盐侵蚀共同作用下, 二者对混凝土强度的影响特征并非各自影响效应的简单叠加, 而是相互影响、相互促进。因此, 在碳化与硫酸盐侵蚀作用同时存在的环境中, 混凝土的水灰比不应太大。

**关键词:** 碳化; 硫酸盐侵蚀; 交替作用; 面板混凝土; 强度特性

中图分类号: TV641.43; TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0173-05

## Study of the influence on the concrete strength properties of carbonation and sulfate corrosion

GOU Yanqiang<sup>1</sup>, SUN Yang<sup>2</sup>, WANG Ruijun<sup>1</sup>, XU Fan<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. China National Water Conservancy and Hydropower Construction Consulting Northwest Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to study the strength characteristics and evolution law of concrete under the combined action of carbonization and sulfate attack, the influence mechanism of the strength characteristics of concrete is analyzed by means of single sulfate wetting-drying test, single carbonization test and carbonization and sulfate wetting-drying alternate test. The test results showed that: the smaller the water cement ratio is, the less the compressive strength and splitting tensile strength of the concrete are when the single sulfate attack and the interaction of carbonization and sulfate corrosion have taken place. With the increase of carbonization time, the compressive strength and splitting tensile strength of concrete begin to increase at first and then slowly, and the larger the water cement ratio is, the greater the growth rate is. Under the combined action of carbonization and sulfate attack, the influence of the two on the strength of concrete is not a simple superposition of their respective effects, but they affect each other and promote each other. Therefore, in the environment where carbonation and sulfate attack exist simultaneously, the water cement ratio of the concrete should not be too large.

**Key words:** carbonization; sulfate erosion; alternating effect; panel concrete; strength characteristics

## 1 研究背景

混凝土面板堆石坝具有安全性好、工程量小、施工方便、工期短等优点, 现已成为许多工程的首选坝型<sup>[1]</sup>。混凝土材料在服役期间由于受到化学腐蚀等自然因素的作用, 导致其强度下降、力学性能退

化, 从而造成重大的经济损失并严重影响人身财产安全。化学腐蚀主要有硫酸盐侵蚀、氯离子扩散、混凝土碳化等, 其严重影响混凝土材料的力学性能。因此, 开展环境因素影响下混凝土力学性能的研究具有重要意义<sup>[2-4]</sup>。

近年来, 不少专家学者对硫酸盐侵蚀和碳化对混

收稿日期: 2017-10-13; 修回日期: 2017-11-18

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS092)

作者简介: 缙彦强(1990-), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

通讯作者: 王瑞骏(1963-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事坝工应力研究。

凝土力学性能的影响做了一些研究,如:董必钦等<sup>[5]</sup>探索了混凝土在硫酸根离子作用下的损伤变化,分别总结出混凝土的抗压强度和抗折强度的曲线图,并得出一定规律,此外也研究了干湿循环对于强度损伤的探索,得出多种周围环境影响条件下混凝土构件性能的演变规律比单一影响条件下更有实际参考意义;乔宏霞等<sup>[6]</sup>及 Hadjsadok 等<sup>[7]</sup>研究发现掺加复合掺合料混凝土在硫酸盐侵蚀后,其抗压强度和抗折强度比普通混凝土变化小;王恽涵等<sup>[8]</sup>研究发现混凝土的抗压强度随硫酸盐干湿循环次数的增加而降低,经 15 次硫酸盐干湿循环后质量明显增大,以后随着干湿循环次数的增加,质量变化不大;赵庆新等<sup>[9]</sup>、巴明芳等<sup>[10]</sup>、赵铁军等<sup>[11]</sup>探索了混凝土损伤后进行在二氧化碳环境下的课题,结果显示,当混凝土的损伤越大时,其对应碳化深度也随之增大;耿欧等<sup>[12]</sup>研究发现碳化后混凝土峰值应变基本保持不变,而峰值应力有所提高,原混凝土等级越高,峰值应力提高幅度越大。赵冰华等<sup>[13]</sup>的试验表明,碳化可以提高混凝土的抗压强度,但同时会降低混凝土的抗折强度,渗透性也会因碳化而降低。张金喜等<sup>[14]</sup>对不同劣化作用下混凝土力学性能的研究发现,碳化后混凝土的抗压强度增大,短期内硫酸盐干湿循环对混凝土力学性能的影响不大。

目前,国内外对单因素作用下混凝土强度特性的研究较为全面,而对多因素共同作用下混凝土强度特性的研究相对不够深入,尤其是在碳化和硫酸盐侵蚀等共同作用下混凝土强度特性的研究相对较少。为此,本文对碳化与硫酸盐干湿循环作用下混凝土的强度特性及其演变规律进行了试验研究,对比分析了单一因素及多因素作用下混凝土力学性能的变化规律,以期考虑碳化及硫酸盐侵蚀共同作用下混凝土工程的设计提供参考。

## 2 试验概况

### 2.1 试验材料

试验所用粗骨料为经过筛分后粒径为 5~30 mm 的天然卵石;细骨料为河砂(细度模数为 2.5);水泥为陕西秦岭水泥总厂生产的秦岭牌 P·O42.5R 普通硅酸盐水泥;试验用水为自来水;中科院生产的高效三萜皂甙引气剂;中科院生产的高效聚羧基酸减水剂。

### 2.2 面板混凝土配合比设计

本次试验设计了 3 种不同水灰比的混凝土,选定混凝土单位用水量为 129 kg,粗骨料为二级配,大

石子与小石子比例为 1:1,砂率为 0.34,减水剂用量为 0.8%。混凝土的配合比设计方法,参照 JGJ55-2011《普通混凝土配合比设计规程》进行。3 种编号混凝土的坍落度、保水性及黏聚性均符合混凝土对和易性的要求。各配合比混凝土均符合 C25 混凝土要求。混凝土的配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比

| 编号 | 水灰比  | 水/kg | 水泥/kg | 粉煤灰/kg | 细骨料/kg | 粗骨料/kg | 减水剂/% | 引气剂/% |
|----|------|------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 1  | 0.45 | 129  | 229   | 57     | 738    | 1261   | 0.8   | 0.03  |
| 2  | 0.40 | 129  | 258   | 65     | 716    | 1251   | 0.8   | 0.03  |
| 3  | 0.35 | 129  | 295   | 74     | 691    | 1234   | 0.8   | 0.03  |

### 2.3 试验方法

试验参照 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》(以下简称《标准》)进行操作。试验均采用尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,混凝土试件均采用机械搅拌,标准钢模成型,振动台振捣密实,24 h 后拆模,在温度为 20±2℃,相对湿度为 95% 的标准养护箱内养护 28 d。在计算机控制的电液伺服试验机上进行试验。分别按照上述配合比试验制作 3 组试件。

2.3.1 硫酸盐侵蚀试验 按照《标准》中的“硫酸盐干湿循环”方法进行试验。将水灰比为 0.45、0.40 和 0.35 的混凝土试件分别编号为 S1、S2、S3,每组 54 个试件,其中抗压和劈裂试验各 27 个,共计 162 个试件,侵蚀溶液均为质量分数 5% 的硫酸钠溶液。将试件养护至 28 d 龄期的前 2 d,从标准养护箱中取,擦干表面后放入烘干箱中,在 80℃ 下烘 48 h,烘干后将试件在干燥环境中冷却至室温,随后将试件放入硫酸盐干湿循环试验机中进行试验。混凝土硫酸盐干湿循环试验如图 1 所示。

2.3.2 碳化试验 按照《标准》中的“碳化”方法进行试验。将水灰比为 0.45、0.40 和 0.35 的混凝土试件分别编号为 T1、T2、T3,每组 24 个试件,其中抗压和劈裂试验各 12 个,共计 72 个试件。当试件到达预定龄期的前 2 d,从标准养护箱中取,放入烘干箱中在 60℃ 下烘 48 h,随后将试件放入二氧化碳浓度(20±3)%,相对湿度(70±5)%,温度在(20±2)℃ 的混凝土碳化试验箱中进行试验。混凝土碳化试验如图 2 所示。

2.3.3 碳化和硫酸盐侵蚀交替试验 将水灰比为 0.45、0.40 和 0.35 的混凝土试件分别编号为 TS1、TS2、TS3,每组 24 个试件,其中抗压和劈裂试验各

12个,共计72个试件。交替试验时,按照前面试验步骤,首先碳化7d,然后立即取出试件进行硫酸盐干湿循环试验,循环15次,以上为一个碳化和硫酸盐侵蚀交替(TS)循环。重复以上循环,一共完成4个TS循环。



图1 混凝土硫酸盐干湿循环试验 图2 混凝土碳化试验

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 硫酸盐侵蚀试验

不同水灰比混凝土试件的抗压强度及劈裂抗拉强度与硫酸盐干湿循环次数的关系分别如图3、4所示。

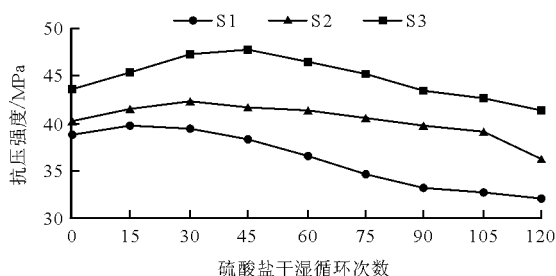


图3 不同水灰比混凝土的抗压强度与硫酸盐干湿循环次数的关系

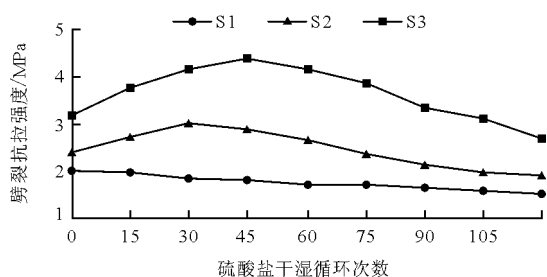


图4 不同水灰比混凝土的劈裂抗拉强度与硫酸盐干湿循环次数的关系

由图3、4可知,水灰比与混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度关系密切,水灰比越大,混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度越小。

由图3可以看出,S1、S2、S3试件组在硫酸盐侵蚀过程中抗压强度均存在一个强度增长期。S1试件组经15次硫酸盐干湿循环后抗压强度上升到最高,为39.8

MPa,增加了2.58%;S2试件组经30次硫酸盐干湿循环后抗压强度达到最大,为42.3 MPa,增加了5.22%;S3试件组经45次硫酸盐干湿循环后抗压强度达到最大,为47.7 MPa,增加了9.40%。经120次硫酸盐干湿循环后,S1、S2、S3试件组的抗压强度分别为32.1、36.2和41.4 MPa,分别比未受硫酸盐侵蚀前降低了17.27%、9.95%和5.05%。

由图4可以看出,与抗压强度一样,S2、S3试件组的劈裂抗拉强度在硫酸盐侵蚀过程中也均存在一个强度增长期,S1试件组的劈裂抗拉强度则一直处于下降趋势,经120次硫酸盐干湿循环后的劈裂抗拉强度为1.52 MPa,降低了24.38%,而S2和S3试件组经120次硫酸盐干湿循环后的劈裂抗拉强度分别降低了20.33%和14.83%;S3试件组的劈裂抗拉强度在硫酸盐侵蚀过程中增长和下降趋势明显,经45次硫酸盐干湿循环后达到最大值4.38 MPa,增加了38.17%;与S3试件组一样,S2试件组的劈裂抗拉强度在硫酸盐侵蚀过程中也呈现为先增长后下降的趋势,经30次硫酸盐干湿循环后达到最大值3.03 MPa,增加了25.73%。由此可以得出,水灰比对混凝土抗硫酸盐侵蚀有一定的影响,水灰比越小,混凝土抗硫酸盐侵蚀能力越强。

分析上述试验结果,混凝土在硫酸盐侵蚀中的破坏主要有两个阶段,第一阶段:干湿循环过程中,烘干时箱内温度较高,处于高温环境下的混凝土会产生干缩裂缝,对硫酸盐渗入混凝土中提供了有利条件;第二阶段:硫酸盐与混凝土中水泥石的某些成分发生化学反应,生成钙矾石和石膏。当硫酸盐干湿循环次数较少时,化学反应后生成的钙矾石和石膏填充了混凝土中的空隙和细小裂缝,因此强度有所增大。随着硫酸盐干湿循环次数的增加,钙矾石和石膏进一步积累产生的压力对混凝土造成破坏,从而强度又逐渐降低。

#### 3.2 碳化试验

不同水灰比混凝土试件的抗压强度及劈裂抗拉强度与碳化龄期的关系分别如图5、6所示。

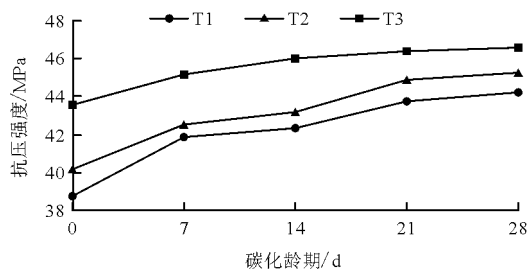


图5 不同水灰比混凝土的抗压强度与碳化龄期的关系

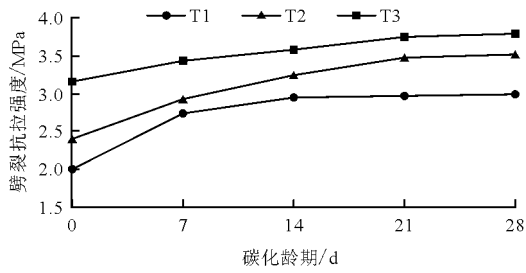


图6 不同水灰比混凝土的劈裂抗拉强度与碳化龄期的关系

分析图 5、6 可知,混凝土的抗压强度及劈裂抗拉强度随碳化时间、水灰比的变化规律相似,皆随碳化时间的延长而增大,且增大呈现先快后慢的趋势。T1 试件组经 14 d 碳化后劈裂抗拉强度基本不变。T1、T2、T3 试件组经过 28 d 的碳化,抗压强度分别达到 44.2、45.3、46.6 MPa,分别增加了 13.92%、12.69%、6.88%;劈裂抗拉强度分别达到 2.99、3.52、3.78 MPa,分别增加了 48.76%、46.06%、19.24%。由此可以得出,碳化可以提高混凝土的抗压强度及劈裂抗拉强度。

影响碳化作用的两个重要因素是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量和环境中  $\text{CO}_2$  的扩散速度。试验刚开始时,混凝土中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量充足,而且内部孔隙相对比较疏松,这样  $\text{CO}_2$  的扩散速度就相对比较快,因此碳化速度也较快,但随着试验时间的延长, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{CO}_2$  发生反应, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量越来越少,而且反应生成的碳酸钙填充了混凝土的孔隙结构,提高了密实度,从而减缓了  $\text{CO}_2$  的扩散速度,导致碳化反应越来越慢,因此混凝土的强度增长也越来越慢。

### 3.3 碳化和硫酸盐侵蚀交替试验

不同水灰比混凝土试件的抗压强度及劈裂抗拉强度与碳化和硫酸盐侵蚀交替次数的关系分别如图 7、8 所示。

由图 7、8 可以看出,在碳化和硫酸盐交替循环作用下,前期 TS2 和 TS3 试件组的抗压强度和劈裂抗拉强度仍然出现增大的过程,经 1 次交替循环后强度才开始降低。TS1 试件组的抗压强度和劈裂抗拉强度则随交替次数的增加一直在减小。TS1、TS2、

TS3 试件组经 4 次交替作用后劈裂抗拉强度分别为 1.41、1.98、2.91 MPa,比未交替作用时分别减小 29.85%、17.84% 和 8.20%。经过 4 次交替循环后,TS3 试件组的抗压强度和劈裂抗拉强度下降幅度最小,分别在 12.2% 和 8.2% 以内;而 TS1 试件组的抗压强度和劈裂抗拉强度下降幅度最大,分别下降 42.27% 和 29.85%。可见水灰比仍然是重要的影响因素,水灰比越小,混凝土在交替循环作用下的抗压强度和劈裂抗拉强度下降越慢;水灰比越大,面板混凝土在交替循环下的抗压强度和劈裂抗拉强度下降越快。

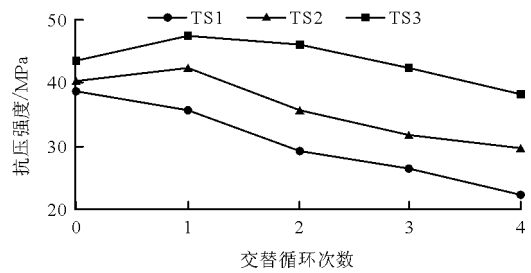


图7 不同水灰比混凝土的抗压强度与碳化和硫酸盐侵蚀交替次数的关系

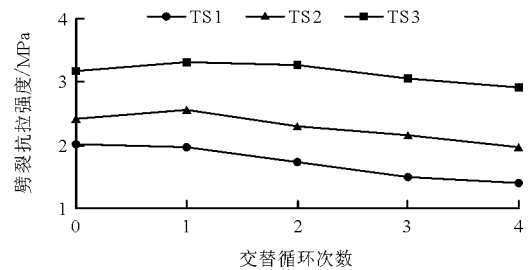


图8 不同水灰比混凝土的劈裂抗拉强度与碳化和硫酸盐侵蚀交替次数的关系

### 3.4 碳化和硫酸盐侵蚀单一试验和交替试验对比分析

本试验碳化和硫酸盐侵蚀交替试验的 3 组试件,总共经历了 60 次硫酸盐干湿循环和 28 d 龄期的碳化。单一因素作用下各组试件的抗压强度损失率、劈裂抗拉强度损失率的叠加结果与双重因素交替作用下各组试件抗压强度损失率和劈裂抗拉强度损失率的结果如表 2 所示。

表2 各组试件经多次单一碳化和硫酸盐侵蚀作用及二者交替作用后抗压强度和劈裂抗拉强度损失率 %

| 水灰比  | 抗压强度损失率      |        |       |                | 劈裂抗拉强度损失率    |        |       |                |
|------|--------------|--------|-------|----------------|--------------|--------|-------|----------------|
|      | 硫酸盐干湿循环 60 次 | 碳化 28d | 叠加结果  | 碳化和硫酸盐侵蚀交替 4 次 | 硫酸盐干湿循环 60 次 | 碳化 28d | 叠加结果  | 碳化和硫酸盐侵蚀交替 4 次 |
| 0.45 | 5.9          | -13.9  | -8.0  | 42.3           | 14.4         | -48.8  | -34.3 | 29.9           |
| 0.40 | -3.0         | -12.7  | -15.7 | 25.9           | -10.0        | -46.1  | -56.0 | 17.8           |
| 0.35 | -6.7         | -6.9   | -13.5 | 12.2           | -31.5        | -19.2  | -50.8 | 8.2            |

注:表中损失率为正值表示强度降低;损失率为负值表示强度增加,下同。

从表2中各组试件抗压强度损失率及劈裂抗拉强度损失率的叠加结果可知,单一因素作用下经60次硫酸盐干湿循环及28d碳化后,水灰比为0.45、0.40、0.35的3组混凝土试件的抗压强度损失率分别为-8.0%、-15.7%和-13.5%,劈裂抗拉强度损失率分别为-34.3%、-56.0%和-50.8%。经硫酸盐侵蚀和碳化双重因素循环交替作用后,水灰比为0.45、0.40、0.35的3组混凝土试件的抗压强度损失率分别为42.3%、25.9%和12.2%,劈裂抗拉强度损失率分别为29.9%、17.8%和8.2%。单一因素作用下各组试件的抗压强度损失率及劈裂抗拉强度损失率的叠加结果都是负值,表示此时各组试件皆处于抗压强度及劈裂抗拉强度增加的状态,而交替循环以后,各组试件的抗压强度及劈裂抗拉强度都出现不同程度的降低。

由以上结果可知,交替作用中碳化和硫酸盐侵蚀相互起促进作用,加速了混凝土的劣化。经过交替试验的试件,其强度降低幅度比单一因素碳化和硫酸盐侵蚀作用下的简单叠加更大。主要有以下两方面原因:一方面是在硫酸盐侵蚀过程中,混凝土试件在干湿循环以及高温烘烤作用下,混凝土试件表面会产生干缩裂缝。这些干缩裂缝会加速硫酸盐离子的入侵量,导致混凝土内部孔隙中产生较多钙矾石以及石膏等晶体,大量的晶体产生会在混凝土孔隙内壁形成拉应力导致孔隙破坏形成裂缝,在宏观表现为混凝土的力学性质的降低;另一方面,因为硫酸盐干湿循环过程中产生大量的干缩裂缝,就会加速 $\text{CO}_2$ 通过外部进入到混凝土内部,从而与混凝土中的碱性物质 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等物质发生反应,从而导致混凝土内部结构发生变化,因此混凝土的强度会有所降低。这两个方面的原因相互影响、共同作用加速了混凝土的破坏。

## 4 结 论

(1)水灰比越小,硫酸盐侵蚀后混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度下降幅度越小,混凝土抗硫酸盐侵蚀能力越强;劈裂抗拉强度较抗压强度对硫酸盐侵蚀产生的损伤更为敏感。

(2)随着碳化龄期的延长,混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度越来越大。水灰比越大,混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度增加的速度越快。随着碳化

时间的延长,混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的增大呈现先快后慢的趋势。

(3)混凝土碳化与硫酸盐侵蚀双因素作用下,水灰比越小,混凝土在交替循环下的抗压强度和劈裂抗拉强度下降幅度越小。

(4)碳化与硫酸盐侵蚀共同作用下,二者对混凝土强度的影响特征并非各自影响效应的简单叠加,而是相互影响、相互促进。

## 参考文献:

- [1] 王瑞骏. 高等水工结构[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [2] 李阳,王瑞骏,闫菲,等. 粉煤灰对混凝土抗冻及抗硫酸盐性能的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017,45(2):219-226.
- [3] 李金玉,曹建国. 水工混凝土耐久性的研究和应用[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [4] 李阳,王瑞骏,程金标,等. 冻融循环及硫酸盐侵蚀双因素下面板混凝土耐久性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015,26(5):177-181.
- [5] 董必钦,罗帅,邢锋. 多因素作用对混凝土硫酸盐腐蚀的影响研究[J]. 混凝土,2007(9):33-36.
- [6] 乔宏霞,何忠茂,余红发,等. 混凝土硫酸盐腐蚀的力学性能和微观结构研究[J]. 建筑科学,2011,27(Z1):25-28.
- [7] HADJSADOK A, KENAI S, COURARD L, et al. Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity[J]. Cement & Concrete Composites, 2012,34(5):671-677.
- [8] 王怿涵,李维红. 硫酸盐-干湿循环作用下混凝土力学性能研究[J]. 大连大学学报,2016,37(3):13-16.
- [9] 赵庆新,许宏景,闫国亮. 应力损伤对混凝土抗碳化性能的影响[J]. 建筑材料学报,2013,16(3):503-507.
- [10] 巴明芳,钱春香. 拉应力对低水胶比混凝土抗碳化性能的影响[J]. 建筑材料学报,2011,14(5):586-590.
- [11] 赵铁军,李淑进. 碳化对混凝土渗透性及孔隙率的影响[J]. 工业建筑,2003,33(1):46-47+16.
- [12] 耿欧,袁广林. 碳化混凝土全应力-应变关系及梁受弯承载性能研究[J]. 工业建筑,2006,36(1):44-46+79.
- [13] 赵冰华,费正岳,赵宇,等. 碳化对混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2012,31(6):1641-1644.
- [14] 张金喜,王建刚,冉晋. 不同劣化作用对混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土,2016(11):52-55.