

# 冻融循环作用下混凝土的硫酸盐应力腐蚀特性

张云清<sup>1</sup>, 余红发<sup>1</sup>, 孙伟<sup>2</sup>, 张建业<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学 土木工程系, 南京 210016; 2. 东南大学 材料科学与工程学院, 南京 211189;  
3. 中国土木工程集团有限公司, 北京 100038)

**摘要:**在质量分数为 5.0% 的  $MgSO_4$  溶液条件下, 采用快冻法和常温腐蚀方法研究了高强混凝土 (High Strength Concrete, HSC)、大掺量矿物掺合料混凝土 (High-Volume Mineral Admixture Concrete, HVMAC) 和综合运用引气剂、高效减水剂、混杂纤维和膨胀剂技术的高耐久性混凝土 (High Durable Concrete, HDC) 的应力腐蚀行为。结果表明: 无论是常温条件还是冻融循环条件, 混凝土在应力腐蚀作用下的相对动弹性模量要经历强化和劣化 2 个发展阶段, 强化和劣化阶段的时间长度与实验温度条件密切相关。冻融循环作用显著加速了混凝土的硫酸盐应力腐蚀破坏进程, HSC 在冻融循环作用下应力腐蚀的强化段和劣化段的时间长度比常温条件的相应时间长度分别压缩了 96% 和 88% 以上, HVMAC 的劣化段时间长度则压缩了 98%, 而 HDC 压缩了 71%。在冻融循环作用下, HDC 发生应力腐蚀破坏的冻融循环次数分别比 HSC 和 HVMAC 延长了 1.5 倍和 13 倍, 因此, 在中国寒冷地区, HDC 表现出更强的抗硫酸盐应力腐蚀能力。

**关键词:**混凝土; 化学腐蚀; 应力腐蚀; 冻融循环; 相对动弹性模量

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)06-0147-06

## Stress Corrosion of Concrete Exposed to the Action of Freezing-thawing Cycles

ZHANG Yun-qing<sup>1</sup>, YU Hong-fa<sup>1</sup>, SUN Wei<sup>2</sup>, ZHANG Jian-ye<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China;  
3. China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing 100038, P. R. China)

**Abstract:** Through the method of accelerated freezing-thawing and room-temperature corrosion, the stress corrosion of three kinds of concretes subjected to 5.0%  $MgSO_4$  (in mass) solution was studied. The considered concretes include High Strength Concrete (HSC), High-Volume Mineral Admixture Concrete (HVMAC) and High Durable Concrete (HDC) added with high-volume mineral admixture, air-entraining agent, superplasticizer, fibers and expansion agent. The results showed that the relative dynamic elastic modulus of concrete went through strengthen and deterioration stages subjected to stress corrosion, whether the room temperature or freezing and thawing conditions. The length of time of these two stages are closely related with the experimental temperature. Freezing and thawing action significantly accelerated the process of sulphate stress corrosion damage. Under the action of freezing and thawing, stress corrosion

**收稿日期:** 2010-04-20

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划 973 计划 (2009CB623203); 江苏省自然科学基金前期预研项目 (BK2005216); 2008 年江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目和南京航空航天大学博士生创新基金 (BCXJ07-04)

**作者简介:** 张云清 (1977-), 女, 博士生, 主要从事混凝土结构耐久性设计研究, (E-mail) zhangyunqing@nuaa.edu.cn。

余红发 (联系人), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事混凝土结构耐久性设计研究, (E-mail) yuhongfa@nuaa.edu.cn。

strengthening the period length of HSC shorter 96%, deterioration section of the length of time shorter 88%, compared with the length of time at the corresponding room temperature. Deterioration section of the length of time of HVMAC is reduced by 98%, while the HDC reduced by 71%. The effect of freezing and thawing, HDC freezing-thawing cycles when the stress corrosion damage occurred were longer 1.5 times and 13 times than the HSC and HVMAC. Thus in the cold regions, HDC showed more resistance to sulfate stress corrosion.

**Key words:** concrete, chemical corrosion, stress corrosion, freezing-thawing cycles, relative dynamic elastic modulus

混凝土的耐久性问题一直是人们关注的热点,但是研究多集中于单一耐久性因素的作用,实际混凝土结构往往处于 2 个或者 2 个以上因素的耦合作用,其中至少包含外部荷载的应力作用,目前大量的无应力状态下的耐久性成果并不能合理反映结构所处的状态。1960 年前苏联有文献<sup>[1]</sup>报道了混凝土的压应力腐蚀和拉应力腐蚀。张志兴等<sup>[2]</sup>通过实验发现,外部应力对混凝土在 5.0% 硫酸铵溶液中的化学腐蚀具有加速作用。林毓梅等<sup>[3]</sup>研究混凝土的硫酸盐应力腐蚀,指出应力促进了混凝土的腐蚀膨胀,混凝土结构同时存在内部腐蚀损伤和外部应力的负面效应。慕儒等<sup>[4-5]</sup>则关注了高强混凝土的硫酸盐应力腐蚀问题,发现应力越大,腐蚀作用越强。陈拴发等<sup>[6]</sup>研究了粉煤灰混凝土的硫酸盐应力腐蚀特性,发现掺加粉煤灰可有效地提高混凝土的抗应力腐蚀能力。这些基于常温条件下的应力腐蚀研究成果,虽然极大地丰富了混凝土的化学腐蚀理论体系,但是在我国存在冻融循环破坏作用的华北滨海盐渍土和西北硫酸盐盐渍土环境中,仍然难以得到实际应用。余红发等<sup>[7-12]</sup>进行的调查研究表明,西部盐渍土地区的混凝土结构因受到外部荷载、冻融循环和化学腐蚀作用,服役 3~5 年就遭受严重破坏。因此,选取冻融循环、35% 外部弯曲应力和 5.0%  $MgSO_4$  溶液化学腐蚀为耐久性因素,进行常温和冻融循环作用下的腐蚀试验,研究高强混凝土(High Strength Concrete, HSC)、大掺量矿物掺合料混凝土(High-volume mineral admixture concrete, HVMAC)和综合运用引气剂、高效减水剂、混杂纤维和膨胀剂技术的高耐久性混凝土(High Durable Concrete, HDC)的应力腐蚀规律及其与冻融循环条件之间的规律性。

## 1 实验

### 1.1 原材料

采用江苏嘉新京阳水泥厂生产的 P. II 52.5R 硅酸盐水泥,化学成分见表 1。镇江产风选 I 级粉煤灰(Fly ash, FA),细度 6.8%,含水率 0.04%,需水量比 93%。江苏江南粉磨公司的 S95 级磨细矿渣(Slag, SG),比表面积 461  $m^2/kg$ 。埃肯国际贸易(上海)有限公司提供的埃肯牌微硅粉(Silica Fume, SF),平均粒径为 0.2  $\mu m$ 。安徽巢湖速凝剂总厂生产的铝酸盐混凝土膨胀剂(Aluminate Expansive Agent, AEA),FA、SG、SF 和 AEA 的化学成分见表 1。南京产黄砂,表观密度 2 500  $kg/m^3$ ,堆积密度 1 615  $kg/m^3$ ,含泥量 1.0%,细度模数 2.72,属于 II 区级配,中砂。南京六合产玄武岩碎石,最大粒径 10 mm,表观密度 2 820  $kg/m^3$ ,堆积密度 1 435  $kg/m^3$ ,含泥量 0.3%,针片状颗粒含量 11.4%,压碎指标 6%,基本属于 5~10 mm 连续级配。常州市天怡工程纤维有限公司生产的束状单丝聚丙烯纤维,密度 0.91  $g/m^3$ ,长度 19 mm,直径 0.048 mm,弹性模量  $\geq 3.5$  GPa。北京海达工顺科技有限公司生产的工顺牌 GS-2005-3 哑铃型钢纤维,长度 20 mm,等效直径 0.45 mm,长径比 44.4,弹性模量 200 GPa。上海华登外加剂厂生产的 HP400R 型聚羧酸缓凝高效减水剂,减水率 30% 以上,无氯离子,碱含量小于减水剂干重的 1%。江苏省建筑科学研究院生产的 JM-B 型萘系高效减水剂,减水率达 20% 以上, $Na_2SO_4$  含量小于 2%,氯离子含量小于 0.01%。江苏省建筑科学研究院生产的液体 JM-2000c 高效引气剂,推荐掺量为万分之 0.5~1.0。

表 1 原材料化学成分

/(Wt · t<sup>-1</sup>)

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	I. L
Cement	20.60	5.03	65.06	0.55	2.24	4.38	—	—	—	—	1.30
FA	52.37	32.13	2.16	0.47	0.33	4.13	—	—	0.25	0.61	1.30

续表 1

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	I. L
SG	33.48	12.21	36.35	10.59	0.66	1.40	0.34	2.17	1.27	0.56	0.36
AEA	19.82	16.62	28.60	1.58	26.86	2.66	—	—	0.32	0.30	3.02
SF	93.1	0.61	0.52	—	—	0.22	—	—	—	—	5.55

注: Fly ash—FA; Slag—SG; SF—Silica fume; AEA—Aluminate expansion agent.

### 1.2 混凝土配合比

实验制备了 HSC、HVMAC 和 HDC, 其中, HSC 掺加了 20% FA, 水胶比为 0.43; HVMAC 掺加了 40% FA、10% SG 和 5% SF, 水胶比为 0.23; HDC 是在 HVMAC 基础上引气、并掺加 10% AEA, 同时运用混杂纤维(0.1% 聚丙烯纤维 +

0.7% 钢纤维)增强技术, 水胶比为 0.24。表 2 是不同混凝土的配合比和基本性能, 矿物掺合料和外加剂的计量采用总胶体材料的质量比, 纤维的计量采用混凝土混凝土的体积比, 28 d 抗压强度的立方体试件边长为 100 mm, 耐久性试件为标准养护 28 d 的 40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体。

表 2 混凝土的配合比和性能

Sample	Mixed proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )							Superplasticizer/ %	Slump /mm	Compressive strength (28 d)/MPa	
	Cement	FA	SG	SF	AEA	Fine aggregate	Coarse aggregate				Water
HSC	304	76	0	0	0	775	1235	171	0.8 <sup>(1)</sup>	65	59.5
HVMAC	270	240	60	30	0	669	1104	139	0.85 <sup>(2)</sup>	80	50.7
HDC	210	240	60	30	60	669	1104	142	1.2	100	60.6

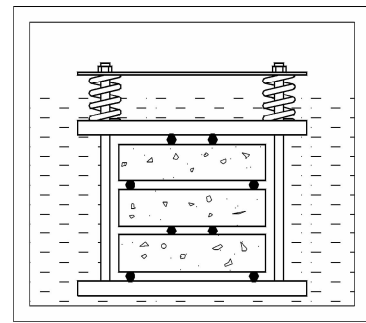
注: (1) JM-B type Superplasticizer; (2) HP400R type Superplasticizer; HSC—High strength concrete; HVMAC—High-volume mineral admixture concrete; HDC—High durable concrete, with 0.1% polypropylene fiber, 0.7% steel fiber and 0.008% JM-2000c type high-range air-entraining agent.

### 1.3 实验方法

常温腐蚀实验在实验室内的塑料腐蚀池中进行, 室内温度范围控制在 20℃±5℃。冻融循环实验执行 GBJ 82—85《普通混凝土长期性能和耐久性能实验方法》中的“快冻法”, 冻融设备采用 CDR-2 型混凝土快速冻融试验机。试件中心温度分别控制在 -17℃±2℃ 和 8℃±2℃。在腐蚀实验周期内, 每天进行 6 次冻融循环次数。腐蚀介质为质量浓度 5.0% 的 MgSO<sub>4</sub> 溶液。应力腐蚀的加载装置采用慕儒等<sup>[5]</sup>设计的双弹簧加载架(图 1), 每组加载 3 个试件, 施加的弯拉应力比、即弯曲应力与破坏应力的比值为 0.35。测试参数是试件的相对动弹性模量, 采用 NM-4B 型非金属超声波检测分析仪测定混凝土试件的动弹性模量, 混凝土的相对动弹性模量  $E_r$  可用下式计算<sup>[13]</sup>:

$$E_r = \frac{E_t}{E_0} = \frac{v_t^2}{v_0^2} \quad (1)$$

其中,  $E_0$  和  $v_0$  分别为混凝土实验前的初始动弹性模量和超声波速度,  $E_t$  和  $v_t$  分别为混凝土经过一定腐蚀阶段或者冻融循环次数的动弹性模量和超声波速度。当相对动弹性模量下降到 60% 或者发生脆性断裂时, 认为混凝土试件发生了耐久性破坏。

图 1 试件加载装置<sup>[5]</sup>

## 2 结果与讨论

### 2.1 冻融循环对 HSC 应力腐蚀的影响规律

图 1 是 HSC 在常温和冻融循环作用下应力腐蚀过程中的相对动弹性模量变化规律。由图可见, 在 5.0% MgSO<sub>4</sub> 溶液的应力腐蚀作用下, 无论是常温条件还是冻融循环条件, HSC 的相对动弹性模量的变化要经历 2 个发展阶段: 强化段和劣化段。在腐蚀实验的初期, 因腐蚀产物在混凝土毛细孔内部的填充密实效应以及 FA 的火山灰活性水化效应, 混凝土试件都存在相对动弹性模量的增长阶段, 对于常温应力腐蚀, HSC 达到最高相对动弹性模量

115%时,这种初期强化段的时间长度为 105 d;对于冻融循环下的应力腐蚀,达到最高相对动弹性模量 113%的初期强化段的时间长度是 27 次冻融循环,相当于 4.5 d。当混凝土试件达到最高相对动弹性模量之后,随着应力腐蚀实验进入劣化段。在劣化段,混凝土相对动弹性模量的降低速度与温度条件有密切的关系,在常温条件下的降低速度比较缓慢,而且在 300 d 之后出现波动性下降,在 600 d 时其相对动弹性模量降低到了 89%,还没有达到破坏指标;在冻融循环作用下,相对动弹性模量快速下降,在 425 次冻融循环(对应于 71 d)时下降到 63%,随后混凝土试件很快发生了断裂破坏。分析表明,混凝土应力腐蚀进入劣化段的发展结果,就是混凝土发生耐久性破坏,因而,混凝土发生劣化的速度越慢,从开始劣化到破坏的时间长度就越长,混凝土的耐久性就越好。

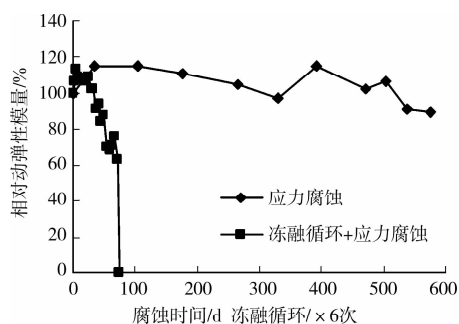


图 1 HSC 在常温和冻融循环作用下应力腐蚀过程中的相对动弹性模量变化

上述实验结果表明,HSC 在快速冻融循环作用下, $MgSO_4$  应力腐蚀的强化段和劣化段的时间长度比常温条件的相应时间长度分别压缩了 96% 和 88% 以上,因此,冻融循环作用大大地加剧了 HSC 在 5.0%  $MgSO_4$  溶液条件下的应力腐蚀破坏进程,其破坏机理是:混凝土结构内部存在界面、孔隙等原生微裂缝,外加应力在混凝土结构内部引发新的微裂纹,并使原生微裂纹扩展和相互连通<sup>[14]</sup>,成为一个空间微裂纹网络,硫酸盐腐蚀产物在微裂纹面上和裂尖处结晶生长、结晶应力,从而推动微裂纹的继续扩展、最终导致混凝土的脆性破坏。当应力腐蚀发生在冻融循环的温度环境中,混凝土内部微裂纹网络的裂纹面和裂尖同时存在了腐蚀产物的结晶应力、冻融循环时溶液结冰的冻胀力<sup>[15-17]</sup>的疲劳作用。

## 2.2 HVMAC 在常温和冻融循环作用下的应力腐蚀特性

图 2 是 HVMAC 在常温和冻融循环作用下应力腐蚀过程中的相对动弹性模量变化规律。由图可

见,HVMAC 在 5.0%  $MgSO_4$  溶液的应力腐蚀过程中的相对动弹性模量规律与 HSC 类似,同样存在强化段和劣化段。HVMAC 常温应力腐蚀的强化段时间长度为 105 d,由于掺入了更多的矿物掺合料,火山灰效应产生的水化产物更多,因而强化段的最高相对动弹性模量比 HSC 要高,达到了 121.9%。在冻融循环作用下,HVMAC 应力腐蚀强化段的时间长度为 15 次冻融循环,相当于 2.5 d,对应的最高相对动弹性模量为 109.9%。

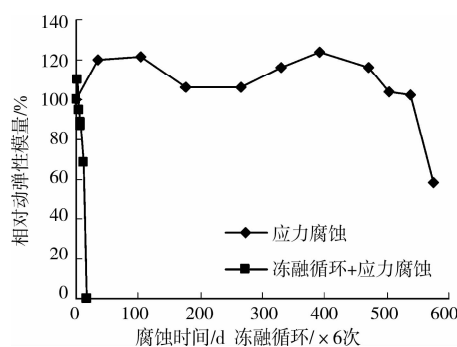


图 2 HVMAC 在常温和冻融循环作用下应力腐蚀过程中的相对动弹性模量变化

在应力腐蚀的劣化段,冻融循环作用下 HVMAC 的相对动弹性模量急剧下降,在 75 次冻融循环(相当于 12.5 d)时,相对动弹性模量降低到 68.1%,之后混凝土试件发生突然的脆性断裂。相对而言,常温条件下,HVMAC 的相对动弹性模量经过很长时间的应力腐蚀之后,到 500 d 才开始快速降低,在 600 d 时下降到 58.4%,达到了耐久性破坏标准。可见,与常温条件相比,冻融循环作用下 HVMAC 的应力腐蚀的劣化段时间长度压缩了 98%。这同样证明,冻融循环作用加速了 HVMAC 的  $MgSO_4$  应力腐蚀破坏。

比较图 2 与图 1 的结果,我们发现,无论是常温条件,还是冻融循环条件,低水胶比(0.23)的 HVMAC 的抗应力腐蚀能力,明显不如较高水胶比(0.43)、低掺量矿物掺合料的 HSC。这表明,即使采用低水胶比和大掺量矿物掺合料的技术方案,并不能显著改善混凝土在  $MgSO_4$  溶液环境中的应力腐蚀行为。

## 2.3 应力腐蚀作用下 HDC 的抗冻性能

图 3 示出了 HDC 在常温和冻融循环作用下应力腐蚀过程中的相对动弹性模量变化。结果表明,HDC 的  $MgSO_4$  应力腐蚀同样存在相对动弹性模量的强化段和劣化段,因而属于一种普遍规律。由于 HDC 采用了(膨胀剂+引气剂+混杂纤维)的复合技术,尽管 HDC 的常温应力腐蚀的强化段时间长

度仍然是 105 d,但是在冻融循环作用下其应力腐蚀的强化段时间长度则大大延长,达到了 600 次冻融循环,相当于 100 d,分别比 HSC 和 HVMAC 延长了 21 倍和 39 倍,强化段的最高相对动弹性模量则与 HVMAC 类似。

在  $MgSO_4$  应力腐蚀的劣化段,常温条件下 HDC 的相对动弹性模量逐渐下降,在 250 d 之后出现波动性降低,在 600 d 时降低到 65.6%,仍然高于 HVMAC 的数值(58.4%)。在冻融循环作用下, HDC 相对动弹性模量的劣化段降低速度虽然比常温条件加速了,但是与相同条件下的 HSC 和 HVMAC 相比较,仍然是放慢了速度,到 1 050 次冻融循环(相当于 175 d)时相对动弹性模量为 68%,随后发生断裂破坏。因此,冻融循环作用仍然加快了 HDC 的  $MgSO_4$  应力腐蚀破坏进程,其劣化段的时间长度比常温条件压缩了 71%。对照两种温度条件, HDC 的  $MgSO_4$  应力腐蚀的劣化段时间长度之间的差异已经大大缩短了,表明 HDC 在冻融循环作用下的抗应力腐蚀能力大大增强。

将图 3 与图 1 和图 2 进行比较,可看出,在常温条件(对应中国温暖地区)下,较高水胶比(0.43)、低掺量矿物掺合料的 HSC 具有较强的抗硫酸盐应力腐蚀能力。但是,在冻融循环(对应于中国的寒冷地区)作用下,采用(膨胀剂+引气剂+混杂纤维)复合技术的低水胶比(0.24)、大掺量矿物掺合料的 HDC,发生应力腐蚀破坏的冻融循环次数分别比 HSC 和 HVMAC 延长了 1.5 倍和 13 倍,表现出更强的抗硫酸盐应力腐蚀能力。

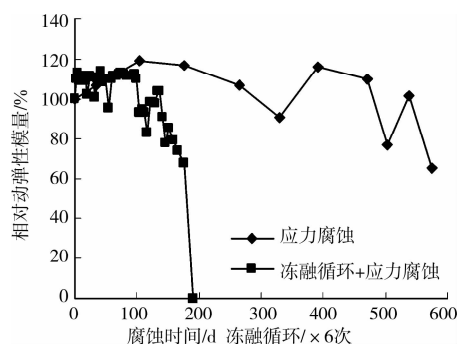


图3 HDC在常温和冻融循环作用下应力腐蚀过程中的相对动弹性模量变化

### 3 结论

1) 在  $MgSO_4$  应力腐蚀作用下,混凝土相对动弹性模量的变化要经历强化和劣化 2 个发展阶段。强化段和劣化段的时间长度与耐久性实验的温度条件有关。腐蚀产物对毛细孔内部的填充密实效应以

及矿物掺合料的火山灰活性水化效应,是混凝土产生应力腐蚀强化段的根本原因。混凝土应力腐蚀进入劣化段的发展结果,必将导致混凝土发生耐久性破坏。

2) 在  $MgSO_4$  溶液环境条件下,冻融循环作用大大地加剧了混凝土的应力腐蚀破坏进程,其破坏机理是:外加应力引起混凝土结构内部微裂纹的引发、扩展和贯通,在形成的微裂纹网络的裂纹面和裂尖,同时存在腐蚀产物的结晶应力以及溶液冻胀力的疲劳作用。

3) 无论是常温条件,还是冻融循环条件,低水胶比 HVMAC 的抗应力腐蚀能力,明显不如较高水胶比、低掺量矿物掺合料的 HSC。

4) 采用高效引气、混杂纤维增强和膨胀剂的综合技术方案制备的 HDC,发生硫酸盐应力腐蚀破坏的冻融循环次数高达 1 050 次,分别比 HSC 和 HVMAC 延长了 1.5 倍和 13 倍,因而能够显著地提高低水胶比 HVMAC 的抗硫酸盐应力腐蚀能力。因此,在我国存在冻融循环破坏作用的华北滨海盐渍土和西北硫酸盐盐渍土环境中,建议采用高效引气、混杂纤维增强和膨胀剂的复合技术配制混凝土。

### 参考文献:

- [1] 莫斯克文 BM,伊万诺夫 5M,阿列克谢耶夫 CH,等. 混凝土和钢筋混凝土的腐蚀及其防护方法[M]. 倪志森,何进源,孙昌宝,等. 译. 北京:化学工业出版社,1988.
- [2] 张志兴,张根亮,冷发光. 5%硫酸铵溶液中混凝土应力腐蚀试验研究[J]. 中国建材科技,2002(3):26-30. ZHANG ZHI-XING, ZHANG GEN-LIANG, LENG FA-GUANG. Experimental investigation corrosion of concrete in 5% ammonium sulfate solution under stress [J]. China Building Materials Science & Technology, 2002(3):26-30.
- [3] 林毓梅,姜国庆. 在 5%硫酸钠溶液中混凝土应力腐蚀试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,1996(2):22-25. LIN YU-MEI, JIANG GUO-QING. Experimental investigation corrosion of concrete in 5% sodium sulfate solution under stress [J]. China Concrete and Cement Products, 1996(2):22-25.
- [4] SUN WEI, MU R, LUO X, et al. The effect of Chloride Salt, Freeze-thaw cycling and externally applied load on the performance of the concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(12):1859-1864.
- [5] RU MU, CHANGWEN MIAO, XIN LUO, WEI SUN. Interaction between loading, freeze-thaw cycles, and chloride salt attack of concrete with and without steel fiber reinforcement [J]. Cement and Concrete

- Research, 2002, 32 (7): 1061-1066.
- [6] 陈拴发, 郑木莲, 王秉纲. 粉煤灰混凝土应力腐蚀特性试验研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 14-17.  
CHEN SHUAN-FA, ZHENG MU-LIAN, WANG BING-GANG. Experimental research on stress corrosion character of fly-ash-cement concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18 (3): 14-17.
- [7] 余红发, 孙伟, 屈武, 等. 盐湖地区的环境条件与混凝土和钢筋混凝土结构的耐久性[J]. 工业建筑, 2003, 33 (3): 1-4.  
YU HONG-FA, SUN WEI, QU WU, et al. Circumstance of salt lakes and the durability of concrete or reinforced concrete [J]. Industrial Construction, 2003, 33(3): 1-4.
- [8] YU HONGFA, SUN WEI, ZHANG YUNSHENG, et al. Durability of concrete subjected to the combined actions of flexural stress, freeze-thaw cycles and bitter solutions [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 23(6): 893-900.
- [9] 余红发, 孙伟, 李美丹. 荷载对混凝土在腐蚀—冻融作用下强度的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42 (2): 297-301.  
YU HONG-FA, SUN WEI, LI MEI-DAN. Effect of flexural stress on strength development of concrete subjected to combined actions of freezing-thawing cycles and chemical attack[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(2): 297-301.
- [10] 燕坤, 余红发, 麻海燕, 等. 硫酸镁腐蚀与弯曲荷载对碳化混凝土抗冻性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36 (7): 877-883.  
YAN KUN, YU HOONG-FA, MA HAI-YAN, et al. Effects of magnesium sulfate attack and flexural stress on freeze-thaw durability of carbonized concretes [J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2008, 36(7): 877-883.
- [11] 张建业, 余红发, 麻海燕, 等. 盐腐蚀与应力作用下混凝土的冻融损伤及抑制[J]. 混凝土, 2009(12): 32-36.  
ZHANG JIAN-YE, YU HONG-FA, MA HAI-YAN, et al. Action of salt corrosion and stress concrete freezing-thawing damage and its restrain [J]. Concrete, 2009(12): 32-36.
- [12] 燕坤, 余红发, 麻海燕, 等. 氯盐与弯曲荷载对碳化混凝土的抗冻性的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(6): 20-22.  
YAN KUN, YU HOONG-FA, MA HAI-YAN, et al. Effects of NaCl solution and flexural stress on freezing-thawing durability of carbonized concretes [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(6): 20-22.
- [13] ABABNEN A N. The Coupled Effect of Moisture Diffusion, Chloride Penetration and Freezing-thawing on Concrete Durability [D]. Denver: University of Colorado, 2002.
- [14] ZHANG B. Relationship between pore structure and mechanical properties of ordinary concrete under bending fatigue [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(5): 699-711.
- [15] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened Portland cement pastes during freezing [J]. Proceeding of the Highway Research Board, 1953, 32: 285-297.
- [16] POWERS T C. The air requirement of frost-resistant concrete [J]. Proceeding of the Highway Research Board 1949, 29: 184-202.
- [17] POWERS T C. Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1954, 50(9): 741-760.

(编辑 胡玲)