

特约专栏

应力-化学介质-冻融循环协同作用下 水泥基材料失效机理及寿命预测的研究

王 玲, 吴 浩, 管学茂, 黄鹏飞

(中国建筑材料科学研究总院 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 针对水泥基材料在应力-化学介质-冻融循环协同作用下的耐久性进行了研究, 并开发了多种材料失效试验方法和装置。砂浆试件应力-化学腐蚀协同作用试验装置的特点是加载稳定, 克服了应力松弛; 协同作用耐久性试验装置可以用于监测协同作用下钢筋混凝土试件性能的衰减过程。研究发现: 矿物掺合料改善抗渗性的能力依次是矿渣粉、活化煤矸石粉、粉煤灰; 随应力比加大和冻融循环次数增加, 水泥基材料中钢筋锈蚀加速、化学介质的渗透速度和深度增大, 协同作用加速了水泥基材料的失效; 可以用一元二次函数来近似预测氯盐-冻融循环-弯曲荷载协同耦合作用下的寿命。

关键词: 失效机理; 寿命预测; 化学介质; 水泥基材料; 冻融循环

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)09-0025-09

Research on Failure Mechanism and Service Life Prediction of High Performance Cementitious Materials under the Synergistic Effect of Stress, Chemical Medium and Freezing-Thawing Cycle

WANG Ling, WU Hao, GUAN Xuemao, HUANG Pengfei

(State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: Research on the durability of cementitious materials under the synergistic effect of stress, chemical corrosion and freezing-thawing cycle was systematically conducted. The strongpoint of equipments for mortar and concrete research under synergistic effect is stable load, non-stress relaxation and performance on-line monitoring. For the improvement on permeability, blast furnace slag was ranked most, followed by activated coal gangue and fly ash. Along with the increase of stress ratio and freezing-thawing cycle, performance failure was expedited because of the acceleration of steel bar corrosion and the penetration degree of chemical medium. A quadratic function was established to estimate concrete service-life under synergistic effect of chloride ion, freezing-thawing cycle and bending load.

Key words: failure mechanism; service life prediction; chemical medium; cementitious material; freezing-thawing cycle

1 前 言

材料研究比较重视环境腐蚀和化学反应所导致的材料性能变化, 结构失效研究通常考虑机械荷载所导致的微观损伤和裂纹扩展, 但实际结构在服役期内往往处于环境腐蚀与力学荷载协同作用的状态, 比如混凝土桥梁结构中的梁构件主要受到冻融、除冰盐腐蚀、钢锈和弯曲荷载4个因素协同作用^[1-4]。

国际著名混凝土专家 Mehta^[5], Neville^[6] 和我国工程院资深院士吴中伟教授^[7-8]都曾指出混凝土耐久性破坏常常是协同作用的结果, 应考虑主次先后和随时间变化的因素。因此, 开展多种破坏因素协同作用下混凝土劣化机理的研究对于解决越来越多的混凝土结构服役期内破坏的问题非常必要和迫切^[9-13]。

2 实 验

2.1 原材料

2.1.1 水泥

973水泥是一种具有较高C₃S含量的高性能水泥, 属于高胶凝性高钙水泥熟料体系, 是国家重点基础发展规划(973计划)项目“高性能水泥制备和应用的基

收稿日期: 2009-12-10

基金项目: 973项目“高性能水泥制备和应用的基础研究”(2001CB610706), “水泥低能耗制备与高效应用的基础研究”(2009CB623100)

通信作者: 王 玲, 女, 1968年生, 教授级高工

基础研究”(编号:2001CB610706)研发的新品种水泥。其化学组成见表 1,矿物组成及物理力学性能见表 2,比表面积为 324 m²/kg。对比水泥选取了华新水泥、高贝利特水泥,化学组成见表 1,矿物组成及物理力学性能见表 2。

2.1.2 矿物掺合料

活化活化煤矸石粉:主要结晶矿物为石英,同时存在大量的无定型非晶态物质。粉煤灰:内蒙古元宝山热电厂,用于对比研究活化粉煤灰、活化活化煤矸石粉的各项性能。矿渣粉:选用的是比表面积为 400 m²/kg 的武钢水淬矿渣粉,主要组成是无定形的非晶态矿物质。3 种矿物掺合料的化学组成见表 3。

表 1 水泥的化学组成 (w/%)
Table 1 Chemical composition of cement (w/%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss
Huaxin Cement	21.06	6.04	3.63	63.98	2.67	0.23	1.06
973 Cement	21.76	5.06	3.31	67.65	1.25	—	—
C ₂ S Cement	24.76	4.52	5.31	62.48	1.39	2.84	—

表 2 水泥的矿物组成及物理力学性能 (w/%)
Table 2 Mineral composition and physical mechanical properties of cement (w/%)

Materials	Mineral composition, w/%				Flexural Strength/MPa		Compressive strength/MPa		Stability
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	3 d	28 d	3 d	28 d	
Huaxin Cement	54.68	19.15	9.85	11.03	5.9	9.6	26.8	63.0	Qualified
973 Cement	70.53	9.58	7.82	10.06	6.6	10.2	38.9	71.0	Qualified
C ₂ S Cement	28.32	49.67	2.97	13.89	3.9	8.9	18.6	54.8	Qualified

表 3 矿物掺合料的化学组成 (w/%)
Table 3 Chemical composition of mineral admixture (w/%)

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss
Activated coal-gangue	57.00	17.38	4.12	14.63	1.56	0.45	2.02
II-fly ash	52.42	34.08	4.91	2.50	1.66	—	1.66
Blast furnace slag	34.35	15.26	1.40	36.8	9.1	—	2.01

2.2 实验内容

2.2.1 砂浆试件的协同效应

目前国内常用的是通过压缩弹簧变形的方法来实现砂浆试件在应力作用下的化学腐蚀^[14-15],我们对该装置提出了改进,解决了由于钢筋锈蚀容易带来应力松弛,从而引起加载不稳定的缺陷(专利号 ZL 2006 2 0023122.3)。装置如图 1 所示^[16]。

用图 1 装置进行加载,施加应力比分别为 15% 和 35%,腐蚀氯盐为 2 mol/L NaCl 氯化钠溶液,采用“快冻法”分别进行 10 次、25 次、40 次冻融循环试验。每次达到规定循环次数,取出每组的 3 块试件,在试件中部劈裂,测试渗透深度,取其平均值。

2.2.2 钢筋混凝土环境性能

钢筋混凝土环境性能评价试验装置如图 2 所示,包括专用四点弯曲加载架、混凝土自动快冻快融试验设备、动弹性模量测试仪、智能数字应变仪和 CT-2B 恒电位仪,(专利号 ZL 2004 2009 6292.5)^[17]。为实时得到温度和荷载数据,专门设计制作了双通道(荷载与温度)采集器和专用数据接收软件,可实现实时采集数据和同一界面上实时绘制时间-荷载图、时间-温度图、温度-荷载图。

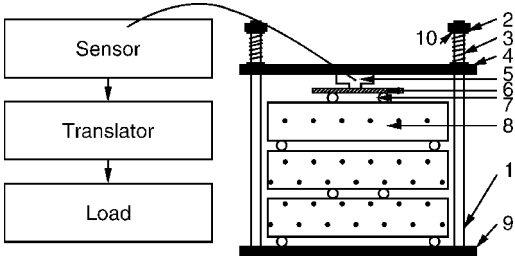


图 1 协同效应加载装置图

Fig.1 Sketch of preloading device: 1 - upright column, 2 - screw nut, 3 - spring, 4 - top board, 5 - pie sensor, 6 - steel frame, 7 - roller, 8 - specimen, 9 - baseboard, and 10 - filler piece

采用 40 mm × 40 mm × 160 mm 的小混凝土试件,利

3 应力 - 化学介质 - 冻融循环协同作用下水泥基材料失效机理

3.1 水泥基材料的抗渗性能

研究用混凝土胶凝材料的组成如表 4 所示,采用的配合比如表 5 所示。

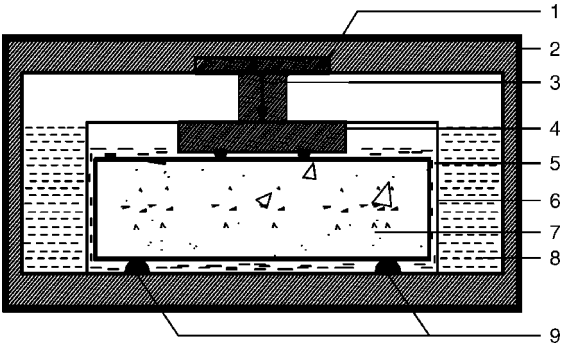


图2 钢筋混凝土环境性能评价试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of preloading reinforced concrete subject to freeze-thaw cycles and chloride salt: 1 - sensor, 2 - freeze-thaw machine, 3 - load, 4 - balancer, 5 - 3% NaCl solution, 6 - tank, 7 - specimen (100 mm × 100 mm × 400 mm), 8 - antifreeze fluid, and 9 - bearing

表4 混凝土的胶凝材料的组成 (w/%)

Table 4 Ingredients of concrete cementitious (w/%)

	973 cement	Huaxin cement	C ₂ S cement	Coal gangue	II -Fly ash
XS1	60	-	-	40	-
XS2	60	-	-	-	40
XS4	-	60	-	40	-

表5 混凝土的配合比 (kg · m⁻³)

Table 5 Mix proportion of concrete (kg · m⁻³)

Cementitious	Sand	Stone	Water	Admixture, w/%
466	672	1 052	210	1

图3 分别是冻融循环10次、25次及40次后混凝土的氯离子渗透深度与应力比的关系。分析图3可知，随着应力比的增大，渗透深度增加，其中XS2的增长梯度最大。随着冻融次数的增加，35%高应力比条件下，混凝土的氯离子渗透深度增长梯度增大。

为了较好的分析影响混凝土渗透性的机理，采用压汞法对对应浆体的孔结构进行了测试，结果如表6所示。分析表6可知，XS1和XS2的总孔隙率相近，但XS2的平均孔径23.8 nm，而XS1的平均孔径只有15.4 nm，XS1的有害孔的数量27.93%，XS2的有害孔是35.93%；少害孔和无害孔的数量XS1的为72.08%，XS2的是64.07%，说明活化煤矸石粉能更好的改善混凝土的孔结构，降低混凝土有害孔的数量。XS4的总孔隙率小于XS1，且其无害孔数量多于XS1，有害孔的数量少，因此，XS4的氯离子渗透速率小，渗透深度相对XS1也较小。

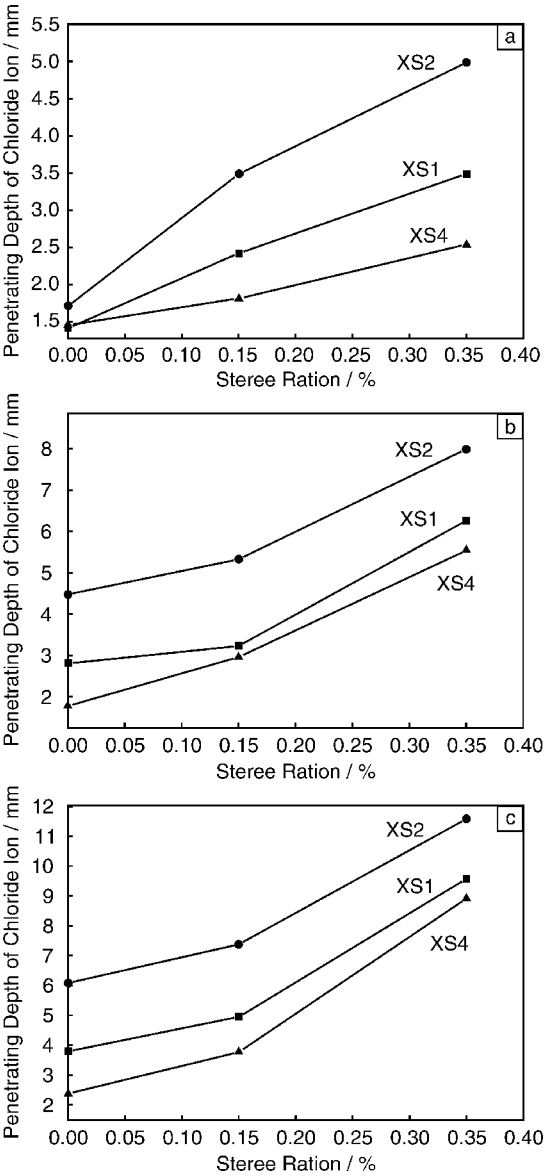


图3 混凝土在“冻融+氯盐+应力”作用下Cl离子的渗透深度与应力比的关系：(a)冻融循环10次，(b)冻融循环25次，(c)冻融循环40次

Fig.3 Effect of stress ratio on antipermeability of concrete under subject to freeze-thaw cycles, preloading and chloride salt; freeze-thaw cycles: (a)10 times, (b)25 times, and (c)40 times

表6 混凝土的孔结构分布数据

Table 6 Distribution of concrete pore structure

NO	XS1	XS2	XS4
Cementitious composition	973 + 40% coal-gangue	973 + 40% II -fly ash	Huaxin + 40% coal-gangue
Most probable pore size/nm	39.8	39.8	39.7
Average pore diameter/nm	15.4	23.8	21.2
Total porosity/%	13.49	13.99	12.45
>200 nm	21.83	22.31	17.11
100 ~ 200 nm	6.1	13.62	7.17
20 ~ 100 nm	52.17	50.55	53.5
<20 nm	19.91	13.52	22.22

采用 EDS 能谱对氯盐侵蚀后混凝土的水泥浆 - 骨料界面区的 Cl 离子分布情况进行分析,如图 4 所示。

混凝土 XS1 的胶凝材料是 973 水泥 +40% 活化煤矸石粉,其水泥 - 胶凝材料界面区的氯元素分布情况如图 4a 所示,Cl 元素在界面区的含量较小,分布较均匀,无富集现象。这说明活化煤矸石粉能改善混凝土的界面结构,由此提高了混凝土的抗渗性能,减小了氯离子渗透性。

混凝土 XS2 的胶凝材料是由 973 水泥 + II 级粉煤灰,界面区元素分布如图 4b 所示,从 Cl 元素的能谱分布图

中可见密集的能谱峰,这说明在界面区 Cl 元素有局部富集的现象。由此反映出 XS2 的界面区的密实度较差,粉煤灰对混凝土界面区的改善效果不及活化煤矸石粉。

图 4c 是混凝土 XS4 的界面区元素分布图,其胶凝材料是华新水泥 + 40% 活化煤矸石粉,Cl 元素能谱图的峰值较稀疏,说明在混凝土界面区 Cl 元素的含量低,同时 Cl 元素能谱图的峰值不显著且分布均匀,表明在界面区 Cl 元素没有富集现象,说明混凝土的界面致密,抗渗透性能较好。

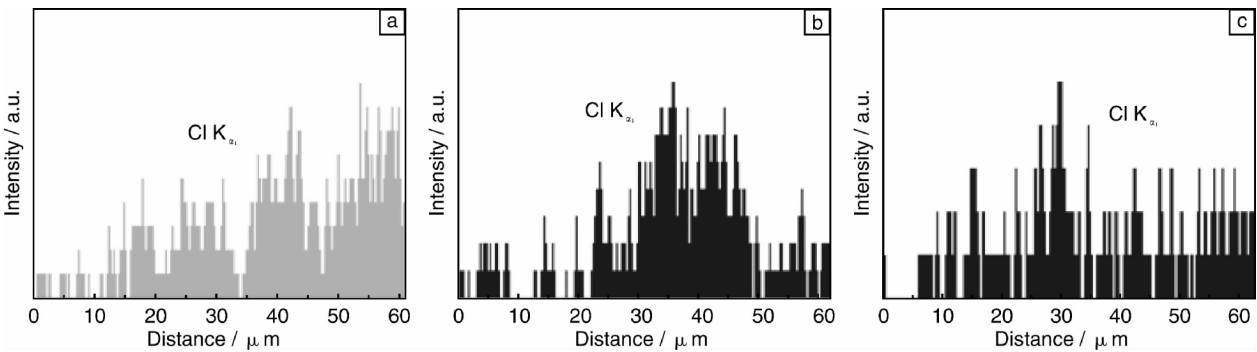


图 4 混凝土的水泥浆 - 骨料界面区 Cl 离子分布的 EDS 谱图: (a)XS1, (b)XS2, (c)XS4

Fig. 4 EDS spectra of chlorine ion distribution of interface transition zone of cement-aggregate of concretes: (a)XS1, (b)XS2, and (c)XS4

3.2 水泥基材料的抗冻性能

本研究主要通过测试动弹性模量来研究混凝土在不同因素协同作用下的损伤演变过程,并认为当混凝土动弹性模量下降到冻融实验前动弹性模量的 60% 时,混

凝土已经冻融破坏。实验用混凝土配合比如表 7 所示,实验结果见表 8 和图 5。其中,FT-W 表示水中冻融; FT-NCL 表示盐冻(3% 氯化钠溶液); RC 表示钢筋锈蚀程度的影响; ST 表示四点弯曲荷载。 E_d 表示协同作用

表 7 混凝土配合比及相关性能参数

Table 7 Concrete mix proportion and corresponding to properties parameters

No	Mix ratio/kg · m ⁻³				Sand ratio/%	Water to cementitious materials ratio/%	Compressive strength/MPa		Penneability coefficient /10 ⁻¹⁴ m ² · s ⁻¹
	Cement	Fly ash	Admixture	Water			28 d	180 d	
C70	495	55	6.60	171	36	0.31	77	96	202
C60A	343	147	4.90	172	38	0.35	67	88	224
C60B	430	0	3.44	172	40	0.4	64	77	375
C45	296	74	2.22	185	42	0.50	52	62	415

表 8 不同损伤因素协同作用下 4 种混凝土相对动弹性模量下降到 60% 时的冻融循环次数

Table 8 Number of freeze-thaw cycles of reinforcement concrete when relative dynamic elasticity modulus was reduced to 60% in different conditions

Freeze-thaw cendition	C45	C60B	C60A	C70
FT-W	153	184	220	258
FT-NCL	137	155	192	226
FT-NCL + RC	125	139	157	201
FT-NCL + RC + ST(0.35)	74	103	139	176
FT-NCL + RC + ST(0.6)	69	94	129	156

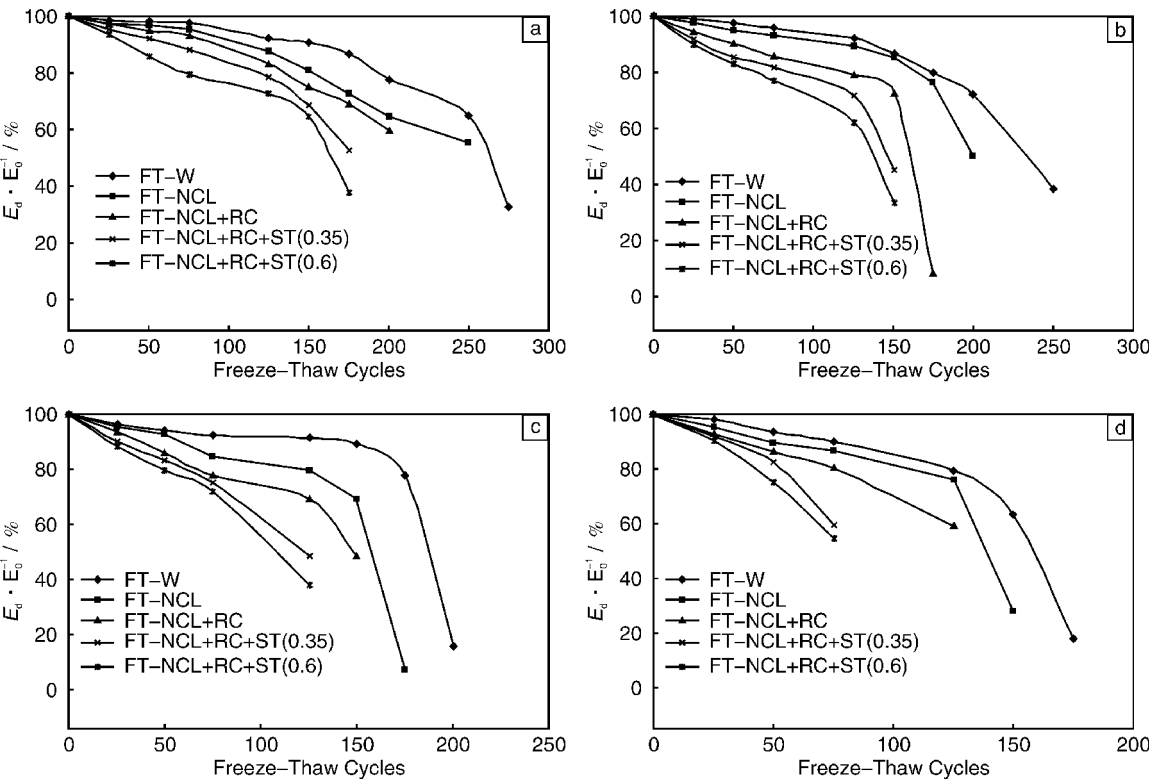


图5 不同损伤因素组合协同作用下，4种混凝土的相对动弹性模量：(a)C70，(b)C60A，(c)C60B，(d)C45
Fig. 5 Relative dynamic elasticity modulus of four kinds of concrete in different freeze-thaw conditions;
(a) C70, (b) C60A, (c) C60B, and (d) C45

下钢筋混凝土的动弹性模量(GPa)； E_0 表示钢筋混凝土的初始动弹性模量(GPa)； E_d/E_0 表示在协同作用下钢筋混凝土的相对动弹性模量。

结果显示：随着冻融循环次数增加、应力比增大、化学介质的加入，水泥基材料的动弹性模量明显下降，即抗冻能力下降。从表8看出，在不同的冻融条件下，

抗冻融的性能依次 $C70 > C60A > C60B > C45$ 。

3.3 混凝土中的钢筋锈蚀

钢筋锈蚀实验中钢筋混凝土配合比如表9所示，配筋如表10所示，混凝土的胶凝材料组成和侵蚀环境如表11所示^[16]。

表9 钢筋混凝土配合比 (kg·m⁻³)

Table 9 Mix proportions of reinforcement concrete(kg·m⁻³)

Cement	Sand	Stone	Water	Water to cementitious materials ratio	Admixture/%
466	672	1 052	210	0.45	1.0

表10 钢筋混凝土试件配筋表

Table 10 Reinforcement sheet of reinforcement concrete

Dimension/mm	Form of reinforcement	Tensile longitudinal reinforcement	Compression longitudinal reinforcement	Stirrup	Reinforcement ratio of tensile longitudinal reinforcement/%	Reinforcement ratio of compression longitudinal reinforcement/%	Reinforcement ratio of stirrup/%
100×100×400	1	2φ10	2φ6	φ6@180	1.96	0.71	3.92
	2	2φ6	2φ6	φ6@180	0.71	0.71	3.92

表11 钢筋混凝土的胶凝材料组成和侵蚀环境

Table 11 Corrosion circumstance and cementitious composition of reinforcement concrete

NO	Cementitious composition/%	Corrosion circumstance
3 [#]	Huaxin cement + 30% coal-gangue	2M NaCl + freeze-thaw + preloading
5 [#]	Huaxin cement + 30% II-fly ash	2M NaCl + freeze-thaw + preloading
6 [#]	Huaxin cement + 30% blast furnace slag	2M NaCl + freeze-thaw + preloading

图 6 是 3[#]、5[#]和 6[#]试样在弯曲应力、冻融循环和氯盐侵蚀等协同作用下的钢筋自腐蚀电位随冻融次数变化的关系。从图 6 中可以直观地看出随冻融次数的增加，腐蚀在增大；弯曲应力的存在加速了钢筋的锈蚀，这种加速的破坏作用随应力水平的增大而增大。

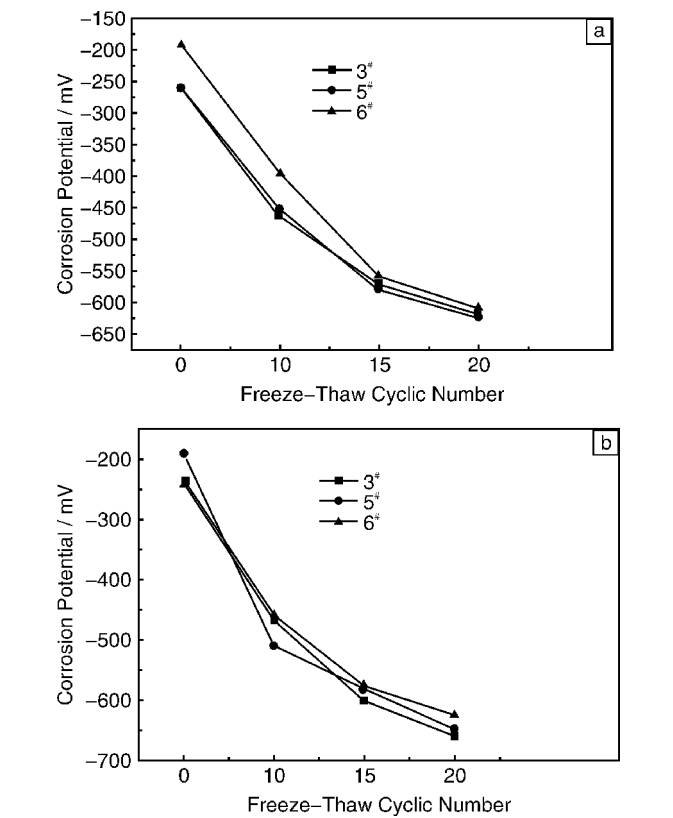


图 6 混凝土中应力比为 15% (a) 和 35% (b) 的钢筋的腐蚀电位和冻融循环数的关系

Fig. 6 Effect of freez-thaw cyclic number on corrosion potential for reinforced bar with stress ratio of 15% (a) and 35% (b)

以无应力作用的 3[#]混凝土冻融 10 次的钢筋腐蚀电流密度为基准，3[#]、5[#]和 6[#]在氯盐 + 冻融 + 应力三因素协同作用下的相对腐蚀电流密度分别如表 12 所示。随着冻融次数增加，腐蚀电流密度增大，这表明钢筋的腐蚀速度增大；随应力比的增大，相对腐蚀电流密度增加。分析表 12 可知，在相同的氯盐 + 冻融 + 应力作用条件下，相对腐蚀电流密度从大到小依次是 5[#]、3[#]和 6[#]，这说明矿渣粉对抑制钢筋锈蚀的效果最好，活化煤矸石粉次之，Ⅱ级粉煤灰最差。

图 7 是应力水平在 15% (a) 和 35% (b) 时，混凝土的电阻的变化与冻融次数的关系图。分析该图可知，在协同作用下，随冻融次数增加，混凝土的电阻愈来愈小，即氯盐在混凝土中渗透性增强。

以无应力作用冻融 10 次的 3[#]试样为基准，混凝土在各种条件下的相对电阻如表 13 所示。各试样随着应

表 12 3[#]、5[#]、6[#]试样在氯盐 + 冻融 + 应力三因素协同作用下的相对腐蚀电流密度

Table 12 The relative corrosion current density of specimens 3[#], 5[#], 6[#] subject to chloride, freeze-thaw cycles and preloading

NO	Cycles of freezing and thawing	Stress ratio/%		
		0	15	35
3 [#]	10	1	2.263 158	2.543 860
3 [#]	15	2.322 807	2.575 439	3.603 509
3 [#]	20	2.919 298	6.743 860	7.052 632
5 [#]	10	1.161 404	2.575 439	2.621 053
5 [#]	15	1.817 544	3.425 965	4.807 018
5 [#]	20	3.305 263	6.863 158	9.738 947
6 [#]	10	0.435 088	1.710 877	2.512 281
6 [#]	15	1.433 509	2.203 509	3.126 316
6 [#]	20	2.884 211	4.266 667	4.807 018

力比的增大和冻融次数增加，相对电阻降低。在相同环境条件，混凝土相对电阻 6[#]最高、3[#]次之、5[#]最小，这反映混凝土渗透性的大小依次是 6[#] < 3[#] < 5[#]，即掺矿渣粉的混凝土渗透性最小，活化煤矸石粉的次之，掺Ⅱ级粉煤灰最大。

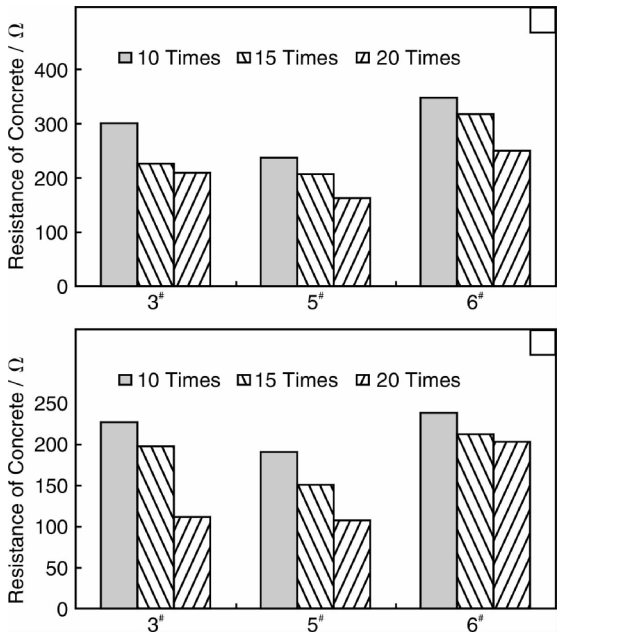


图 7 应力比为 15% (a) 和 35% (b)，冻融数为 10，15，20 次条件下，混凝土的电阻变化情况

Fig. 7 Resistance of concrete under number of freeze-thaw cycles of 10, 15 and 20 times in stress ratios of 15% (a) and 35% (b)

表 13 在氯盐+冻融+应力3因素协同作用下混凝土的相对电阻

Table 13 Relative resistance of concrete subject to chloride salt, freeze-thaw cycles, and preloading

Number of freeze-thaw cycles	Stress ratio of 15%			Stress ratio of 35%		
	3 [#]	5 [#]	6 [#]	3 [#]	5 [#]	6 [#]
10	1	0.783 797	1.158 27	0.751 388	0.631 965	0.792 676
15	0.745 395	0.682 354	1.057 271	0.657 714	0.503 885	0.704 107
20	0.692 565	0.537 403	0.828 636	0.373 752	0.355 161	0.677 914

通过对钢筋混凝土的腐蚀电位、腐蚀速度、混凝土电阻变化进行研究,可得出:①氯盐侵蚀和弯曲应力协同作用下,外部弯曲应力的存在加速了钢筋混凝土的破坏,且这种腐蚀速度的增加随应力水平的增大而增大;在混凝土配合比相同的条件下,掺Ⅱ级粉煤灰的腐蚀速度最大,其次是活化煤矸石粉,最好的是矿渣粉。②氯盐侵蚀和冻融循环协同作用下时,冻融循环加速了钢筋的锈蚀,在混凝土配合比相同的条件下,使钢筋腐蚀速度最小的是矿渣粉,其次是活化煤矸石粉,较差的是Ⅱ级粉煤灰;但活化煤矸石粉掺量超过30%时,使钢筋混凝土的劣化,加速了钢筋锈蚀。

3.4 水泥基材料的失效机理分析

在应力-化学介质-冻融循环协同作用下的失效过程中,高性能水泥基材料性能参数的变化具有一定的规律性:①动弹性模量是反映混凝土损伤程度和失效过程的极为敏感的指标,其与混凝土强度等级和应力比大小密切相关;同应力比条件下,混凝土损伤程度的影响是强度越低,混凝土损伤程度越大;同一配比混凝土,应力比越大,混凝土损伤程度破坏程度随应力比增大而加剧;②产生质量损失的根本原因与混凝土基体强度和水泥灰比有关,且质量损失主要由表层剥落和开裂损坏引起,混凝土强度越高,质量损失越小。

应力-化学介质-冻融循环协同作用下,钢筋混凝土的失效机理主要有三种模式:①氯盐侵蚀使钢筋混凝土试块在冻融后,结冰体积膨胀,进而在基体材料中形成均匀的微裂缝。②荷载在混凝土中微裂缝处形成应力集中,使微裂缝发展加快。③钢筋锈蚀体积膨胀,使混凝土内部产生新的微裂缝,同时伴随原有裂缝的扩展。

这3个过程同时作用,且会形成超叠加效应,加速各种破坏的速度和程度。

4 应力-化学介质-冻融循环协同作用下水泥基材料寿命预测

4.1 寿命预测模型的建立

混凝土动弹性模量下降到冻融试验前动弹性模量的60%时,认为混凝土已经冻融破坏,本研究以此判断混

凝土在不同破坏因素协同作用下的寿命。通过研究盐冻、钢筋锈蚀与弯曲荷载等环境荷载与机械荷载协同作用下钢筋混凝土的损伤演变过程,发现钢筋混凝土在这种协同作用条件下的寿命可分为两个阶段,即稳态衰减阶段和加速衰减阶段,其中稳态衰减阶段对于寿命预测是起主要作用的。一旦寿命超过稳态衰减阶段与加速衰减阶段的交点(称为拐点),损伤就进入加速衰减阶段,类似于失稳状态,导致寿命随机性很大,因此模拟稳态衰减阶段的寿命较为可行且有实用价值。

基于以上原因,本研究对钢筋混凝土在盐冻循环、钢锈与弯曲荷载协同作用下混凝土动弹性模量变化的试验数据进行拟合^[18],最终发现采用一元二次函数可以很好地模拟钢筋混凝土梁构件在盐冻循环、钢锈与弯曲荷载协同作用下的稳态衰减阶段,如图8所示。图8中, S 为钢筋混凝土服役荷载; t_1 为已知的服役年限; R_1 、 R_2 和 R_3 分别为钢筋混凝土强度性能的上限、平均值和下限; t_2 、 t_3 和 t_4 分别为钢筋混凝土强度衰减到服役荷载 S 时对应服役年限的下限、平均值和上限。

钢筋混凝土失效时(即混凝土的相对动弹性模量衰减到小于 α)所经受过的冻融循环次数 x (即混凝土服役寿命)的解析表达式如式(1)所示。

$$x = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4A(C - \alpha)}}{2A} \quad (1)$$

由式(1)即可解出针对某种钢筋混凝土材料、某一服役荷载和特定服役环境等因素综合影响下钢筋混凝土的服役寿命。

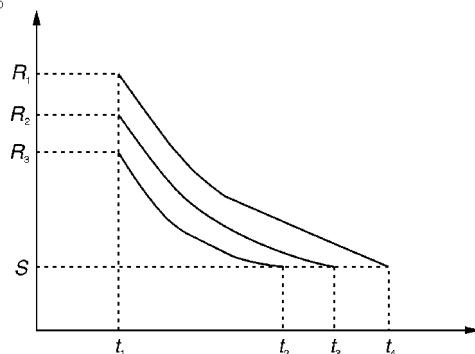


图8 钢筋混凝土在多种损伤因素协同作用下的寿命预测模型

Fig.8 Model of life prediction of reinforced concrete in different conditions

4.2 寿命预测模型的验证

表 14 是利用本研究提出的模型进行寿命预测的结果,从表 14 看出,一元二次函数可以较好地模拟稳态衰减阶

段。从统计规律上看,采用本模型时,混凝土冻融循环破坏的临界相对动弹性模量 α 定为 0.6 较为合理,这时计算结果绝大部分与实验数据吻合良好,误差在 10% 以内。

表 14 盐冻循环、钢锈与弯曲荷载协同作用下, 稳态衰减阶段的冻融循环数(应为比为 35%)
Table 14 Life prediction of concrete subject to freeze-thaw cycles, steel corrosion, preloading and chloride salt attack in steady attenuation period (stress ratio 35%)

Grade of Concrete	Prediction equation $Ax^2 + Bx + (C - \alpha) = 0$	Theoretic result			Actual result	Error of theoretic to actual result/%		
		α				α		
		0. 6	0. 7	0. 8		0. 6	0. 7	0. 8
C70	$-7E-06x^2 - 0.001x + (0.9911 - \alpha) = 0$	175	145	108	176	-0.6	-17.6	-38.6
C60A	$1E-06x^2 - 0.0048x + (0.9959 - \alpha) = 0$	150	128	106	139	7.9	-7.9	-23.7
C60B	$-1E-05x^2 - 0.0024x + (0.9887 - \alpha) = 0$	111	88	62	103	7.8	-14.6	-39.8
C45	$-6E-05x^2 - 0.0009x + (0.9937 - \alpha) = 0$	75	63	50	74	1.4	-14.9	-32.4

5 结 论

(1) 水泥基材料的抗渗性能与其水化产物结构密切相关。矿物掺合料通过改善水泥基材料的孔结构,能够提高水泥基材料抗渗性,并降低氯离子在其中的渗透、扩散速度,但活化煤矸石粉的效果要优于粉煤灰。

(2) 在协同作用下,水泥基材料的氯离子渗透速率提高,渗透深度加大。

(3) 协同作用下混凝土中的钢筋腐蚀一方面是混凝土保护层由于各外部因素使混凝土内部微裂纹的扩展、断裂加速了氯盐侵蚀,从而使腐蚀速度愈来愈大,另一方面,钢筋锈蚀后体积不断膨胀,产生新的微裂纹,同时伴随着原有裂纹的进一步扩张、断裂,使氯离子的渗透越来越强,钢筋的锈蚀也愈来愈厉害。在协同作用下,钢筋的锈蚀是内外因素相互叠加结果,而且这种叠加是超叠加作用。

(4) 建立了钢筋混凝土在“化学介质 + 冻融循环 + 钢锈 + 弯曲荷载”协同作用下的衰减阶段的室内试验寿命预测模型,该模型可以较好地模拟稳态衰减阶段;从统计规律上看,寿命预测模型的计算结果与试验数据吻合良好,误差在 10% 以内。

参考文献 References

[1] Adam Neville. Consideration of Durability of Concrete Structures: Past, Present, and Future[J]. *Materials and Structures*, 2001, 34(3): 114-118.

[2] Shigen Li, Gregory C. Frantz. Bond Performance of Rapid-Setting Repair Materials Subjected to Deicing Salt and Freezing-Thawing Cycles[J]. *ACI Structural Journal*, 1999, 96(6): 692-697.

[3] Zivia V. The Behavior of Cement Composite under Compression Load at Sulphate Attack [J]. *Cement and Concrete Research*,

1994, 24(8): 1475-1484.

[4] Metha P K, Burrows R W. Building Durable Structures in the 21st Century[J]. *Concrete International*, 2001, 23(3): 57-61.

[5] Metha P K, Burrows R W. Building Durable Structures in the 21st Century [J]. *Concrete International*, 2001, 23(3): 57-61.

[6] Adam Neville. Consideration of Durability of Concrete Structures: Past, Present, and Future [J]. *Materials and structures*, 2001, 34(3): 114-118.

[7] Wu Zhongwei(吴中伟), Lian Huizhen(廉惠珍). 水泥基复合材料科学研究中的辨证思维[J]. *Concrete(混凝土)*, 2000(4): 133-135.

[8] Wu Zhongwei(吴中伟), Lian Huizhen(廉惠珍). *High Performance Concrete(高性能混凝土)* [M]. Beijing: China Railway Press, 1999: 218-219.

[9] Richard E Wayers. Service Life Model for Concrete Structure in Chloride Laden Environments[J]. *ACI Materials Journal*, 1998, 95(4): 445-453.

[10] Shamsad Ahmad, Bishwajit Bhattacharjee, Rajeev Wason. Experimental Service Life Prediction of Rebar-Corroded Reinforced Concrete Structure[J]. *ACI Materials Journal*, 1997, 94(4): 311-316.

[11] Stephen L Amey, Dwayne A Johnson, Matthew A Miltenberger, et al. Predicting the Service Life of Concrete Marine Structures: an Environmental Methodology [J]. *ACI Materials Journal*, 1998, 95(2): 205-214.

[12] Magne Maage, Steinar Helland, Ervin poulson, et al. Service Life Prediction of Existing Concrete Structure Exposed to Marine Environment[J]. *ACI Materials Journal*, 1996, 93(6): 602-608.

[13] Hookham C J. Service Life Prediction of Concrete Structure——Case Histories and Research Needs[J]. *Concrete International*, 1992, 14(11): 50-53.

- [14] Fagerlund. On the Service Life of Concrete Exposed to Frost Action, FTDOC, *Proceedings of the International Workshop in the Resistance of Concrete to Scaling Due to Freezing in the Presence of De-icing Salt*[C]. Quebec, Canada: 1997: 23-41.
- [15] Leng Faguang(冷发光). *Research on Permeability and Its Testing Method of Chlorine Ion of Concrete under Load Acting*(荷载作用下混凝土氯离子渗透性及其测试方法研究)[D]. Beijing: Qinghua University, 2003.
- [16] Mu Ru(慕 儒). *Prediction on Durability and Life of Concrete under Synergetic Effect of Freeze-Thaw Cycle, Applied Flexural Stress and Salt Solution*(冻融循环与外部弯曲应力、盐溶液复合作用下混凝土的耐久性与寿命预测)[D]. Nanjing: Southeast University, 2000.
- [17] Guan Xuemao(管学茂). *Research on Service Behaviour and Mechanism of Cement Basic Materials in Chlorine Salt Environment*(水泥基材料在氯盐环境中的服役行为及机理研究)[D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2005.
- [18] Huang Pengfei(黄鹏飞). *Research on Damage Failure of Reinforced Concrete under Synergetic Effect of Environment Corrosion and Flexural Load*(钢筋混凝土在环境腐蚀与弯曲荷载协同作用下的损伤失效研究)[D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2004.



专栏特约编辑姚 燕

姚 燕: 女, 1957 年生, 教授级高工、博士生导师, 享受国务院政府特殊津贴; 现任中国建筑材料集团公司总经理、中国建筑材料科学研究总院院长, 兼任中国建筑材料工业联合会副会长、中国硅酸盐学会副理事长等; 长期从事新型混凝土外加剂, 特种混凝土, 高强高性能混凝土的研究、开发与应用; 近年来主持完成了包括国家重点科技攻关项目 973 计划课题、国家自然科学基金重点课题在内的多项国家级项目; “九五”重点科技攻关项目“重点工程混凝土安全性的研究”成果获国家科技进步二等奖; 在国内外刊物上发表论文 100



特约撰稿人李清海

多篇, 主编 3 部学术论文集, 2006 年出版专著《高性能混凝土》。

李清海: 男, 1967 年生, 工学博士, 教授级高工; 现任中国建筑材料科学研究总院房建材料研究室主任; 主要从事建筑保温、防水及新型房建材料的研发; 主持或参加过 7 项国家级科研项目(课题)的研究工作, 其中作为第一负责人主持国家级项目(课题)有: 国家技术创新计划项目“多功能新型墙体材料的生产及应用技术的研究与开发”、国家科技支撑课题“地震灾区重建用板-柱-轻钢结构体系房屋示范”、国家“十一五”科技支撑课题“乡村建筑用经济型屋



特约撰稿人张文生

面材料的研发与应用”; 申请国内专利 9 项(其中发明专利 8 项); 合著专著 4 部, 参编专业工具书 6 部, 表学术论文 40 余篇; 荣获部级(行业级)科技进步奖 3 项、技术革新奖 1 项。

张文生: 男, 1969 年生, 博士、教授级高工、博士生导师; 长期从事水泥工艺及化学、废渣资源化利用等方面的研究工作; 先后主持了国家“973”计划课题、国家“863”计划项目和国家自然科学基金项目等多项国家级重点课题的研究工作, 并在高胶凝性熟料、水泥用混合材、水化硅酸钙结构及结构模拟、碱激发胶凝材料制备技术、废渣资源化



特约撰稿人杨英姿

利用等方面开展了富有成效的研究工作; 获第八届中国硅酸盐学会青年科技奖; 已公开发表学术论文 70 余篇, 其中 EI、SCI 收录多篇, 获得授权国家发明专利 5 项。

杨英姿: 女, 1967 年生, 博士, 教授; 主要从事寒冷地区混凝土耐久性、先进水泥基复合材料、混凝土性能检测仪器和方法等研究; 2005 赴美国密执根大学做访问学者 1 年; 主持或参加完成国家自然科学基金、“十一五”科技部支撑计划、教育部回国人员启动基金等科研项目 20 余项; 已获国家发明专利 12 项, 发表论



特约撰稿人王 玲

王 玲: 女, 1968 年生, 教授级高工; 1990 年于同济大学无机非金属材料专业本科毕业, 1993 年于武汉工业大学北京研究生部研究生毕业; 1993 年至今工作于中国建筑材料科学研究院工作; 现任国家建筑材料工业房建材料质量监督检验测试中心混凝土检测室主任; 主要从事高性能混凝土和混凝土外加剂的研究、开发和检测工作; 参加 10 余项国家级科研项目的工作, 主持和参加了 8 项国家和行业标准的制修订工作; 2005 年获得中国硅酸盐学会青年科技奖; 发表论

文近 50 篇。