

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.011



氯氧镁水泥混凝土中钢筋的腐蚀与防护试验研究

巩位¹, 乔宏霞¹, 王鹏辉¹, 陈广峰², 高念常³

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 兰州 730050;

2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 3. 江苏中联铸本混凝土有限公司, 江苏 徐州 221008)

摘要:结合氯氧镁水泥混凝土耐水性,研究氯氧镁水泥混凝土中钢筋的腐蚀与防护,试验变量包括钢筋种类、混凝土保护层厚度和腐蚀龄期等。钢筋种类包括裸露钢筋和美加力涂层钢筋;混凝土保护层厚度包括25、50 mm;腐蚀龄期包括60、120、180、240、300、360 d。试验采用自来水长期浸泡至试块2/3处,并采用扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)对腐蚀后的钢筋微观结构和化学元素组成进行分析,研究钢筋的腐蚀机理。结果表明,通过软化系数分析,氯氧镁水泥混凝土的软化系数处于0.78~0.87,说明试验设计的氯氧镁水泥混凝土可用于干燥地区、受潮较轻地区或次要建筑结构。通过极化曲线及其电化学参数分析,裸露钢筋腐蚀速率为美加力涂层钢筋腐蚀速率的40~80倍,说明涂层防腐效果明显。

关键词:软化系数;美加力涂层;腐蚀速率;寿命预测

中图分类号:TU503 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)02-0084-08

Experimental analysis of corrosion and protection for steel bar in magnesium oxychloride cement concrete

Gong Wei¹, Qiao Hongxia¹, Wang Penghui¹, Chen Guangfeng², Gao Nianchang³

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, P. R. China; 3. Jiangsu Zhonglian Zhuben Concrete Co. Ltd, Xuzhou 221008, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Combined with water resistance of magnesium oxychloride cement concrete, the corrosion and protection for steel bar in magnesium oxychloride cement concrete were experimentally investigated, and the influencing factors included: the type of steel bar, thickness of the concrete protective layer and the corrosion duration. The two types of steel bar were bare steel bar and MAGNI coated steel bar. The two types of thickness of the concrete protective layer were 25 mm and 50 mm. The six types of the corrosion duration were 60 d, 120 d, 180 d, 240 d, 300 d and 360 d. 2/3 height of test block was prolonged soaked in water. By SEM and EDS, microstructure and chemical elements of steel bar with corrosion were

收稿日期:2016-06-29

基金项目:国家自然科学基金(51168031,51468039)

作者简介:巩位(1989-),男,主要从事钢筋混凝土耐久性研究,(E-mail)2213581352@qq.com。

乔宏霞(通信作者),女,教授,博士生导师,(E-mail)qiaohx7706@163.com。

Received:2016-06-29

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51168031,51468039)

Author brief:Gong Wei(1989-),main research interest:durability of reinforced concrete,(E-mail)2213581352@qq.com。

Qiao Hongxia(corresponding author),professor,doctoral supervisor,(E-mail)qiaohx7706@163.com。

analyzed to study corrosion mechanism. Result showed that by softening coefficient, the softening coefficient of magnesium oxychloride cement concrete was from 0.78 to 0.87, and the magnesium chloride cement concrete designed by this experiment could be used as a dry area, damp lighter area or secondary structure. By polarization curves and its electrochemical parameters, corrosion rate of bare steel bar was from 40 to 80 times as large as corrosion rate of MAGNI coated steel bar.

Keywords: softening coefficient; MAGNI coat; corrosion rate; life prediction

在盐湖地区,普通硅酸盐水泥混凝土在 3~5 年内会因严重的盐卤腐蚀而破坏,因此急需一种具有较好抗盐卤侵蚀性能的混凝土^[1]。氯氧镁水泥混凝土具有较好的抗盐卤腐蚀性能,但氯氧镁水泥混凝土含有 1.5%~6% 的氯离子,其 PH 值只有 10~11,对钢筋具有严重的腐蚀作用^[2-3]。钢筋是建筑物中构件的重要组成部分,其耐腐蚀性对建筑物的使用至关重要,在西部盐湖地区由于钢材表面局部电池作用而产生的腐蚀不仅对经济造成损失,更对安全和环境造成威胁^[4-5]。突发性的局部腐蚀如孔蚀或应力腐蚀开裂,常常极易引起安全事故。徐港等^[6]研究表明,混凝土结构中的钢筋锈蚀后,生成体积膨胀率在 2.26~3.00 之间的铁锈,由于体积膨胀会对周围的混凝土产生压应力,减少钢筋混凝土的使用寿命。刘智勇等^[7]研究表明钢筋表面点蚀坑内会发生腐蚀性物质的富集,使蚀坑内的溶液发生酸化,发生快速电化学溶解而使腐蚀加速。如能解决氯氧镁水泥混凝土中钢筋的腐蚀问题,就有可能使氯氧镁水泥混凝土作为结构材料使用。Cannesson 等^[8]指出氯氧镁水泥混凝土虽然有优良的抗盐卤腐蚀性能,但其耐水性差,导致氯氧镁水泥混凝土使用前需要解决其耐水性较差的问题。

以氯氧镁水泥混凝土为研究对象,通过软化系数研究氯氧镁水泥混凝土的耐水性。基于土木工程行业无损检测的基本要求,对钢筋的腐蚀情况实时研究较为困难,本文通过 CS350 电化学工作站测试及其分析软件对钢筋腐蚀与防护进行研究。在推进建筑节能的大环境下,解决氯氧镁水泥混凝土的耐水性和钢筋腐蚀问题,可使具有绿色节能特色的氯氧镁水泥混凝土的发展具有更大的潜力。

1 试验

1.1 试验材料

格尔木市某氯化镁厂提供的轻烧氧化镁和工业氯化镁、兰州某商砼公司提供的石子和河砂、兰州某

钢厂提供燃烧产物粉煤灰,兰州某化工厂提供的外加剂等作为制备氯氧镁水泥钢筋混凝土的原材料。涂层为美加力(MAGNI,美国)涂层,涂层钢筋由宁波某金属表面处理厂代为加工。兰州某钢材公司提供的钢筋,钢筋选用直径 8 mm,HPB300 光圆钢筋,BHC25(混凝土保护层厚度 25 mm)和 BHC50(混凝土保护层厚度 50 mm)两种。氯氧镁水泥(钢筋)混凝土尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,其配合比见表 1。

表 1 氯氧镁水泥混凝土配合比

Table 1 mixture ratio of magnesium oxychloride

cement concrete						%
粉煤灰	工业氯化镁	水	砂	石	轻烧氯化镁	其它
2.7	5.8	5.8	24.4	45.4	15.2	0.7

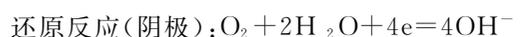
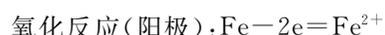
1.2 试验方案

1.2.1 耐水性试验 上海某测试仪器厂生产的 YA-3000 型压力试验机测定抗压强度。试验环境为耐水性标准试验环境:干燥环境和水浸泡环境。氯氧镁水泥混凝土试块标准养护 28 d 性能稳定后,再进行耐水性试验。氯氧镁水泥混凝土试块的抗压强度测试时间为 7、28、56、90、120、180、270、360 d。

1.2.2 电化学试验 CS350 电化学工作站测定极化曲线,参比电极为饱和 KCl 甘汞电极,工作电极为不同处理方式处理的钢筋,辅助电极为薄钢片,试验采用自来水长期浸泡试块 2/3 处且自来水更换周期为 2 个月,三电极测试系统示意图见图 1。使用砂纸除去钢筋表面氧化层,要求表面泛出银白色光泽。用蒸馏水清洗,无水酒精脱水,丙酮除油,烘干。扫描速率 0.167 mV/s,扫描范围为相对腐蚀电位 -0.1~0.1 V。

1.3 钢筋腐蚀与防护

1.3.1 钢筋腐蚀 氯氧镁水泥混凝土中钢筋电化学腐蚀过程可表示为



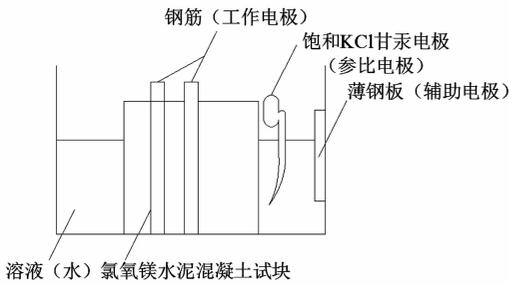
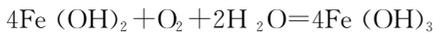


图 1 三电极测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three electrode test system

铁锈形成过程: $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_2$



$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 脱部分水生成铁锈 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。

1.3.2 涂层防护 美加力涂层是一种无铬锌铝涂层。涂层防腐原理基本一致,主要是固化后的干膜中含量较高且互相联结的锌薄片具有一定的导电性,分散并降低了钢筋产生的腐蚀电流密度,减少了钢筋表面局部红锈过早产生^[9-10]。

1.4 分析基础

1.4.1 耐水性参数 选用软化系数 K 作为评价氯氧镁水泥混凝土耐水性的指标。对于长期处于水中或潮湿环境的重要建筑结构材料,软化系数要求大于 0.85;对于受潮湿较轻或次要建筑结构材料,软化系数不宜小于 0.70;耐水性材料通常是指软化系数大于 0.85 的材料^[11]。软化系数计算公式见式(1)。

$$K = f_w / f \quad (1)$$

式中: K 为软化系数; f_w 为水饱和状态下的抗压强度,MPa; f 为干燥状态下的抗压强度,MPa。

1.4.2 电化学参数 根据腐蚀电化学原理,采用高斯-牛顿-麦夸脱迭代法进行曲线拟合。弱极化区三参数极化曲线方程式用式(2)表示

$$i = i_{\text{corr}} \left[\exp \frac{\Delta E}{\beta_a} - \exp \frac{-\Delta E}{\beta_c} \right] \quad (2)$$

式中: i 为外测极化电流密度; i_{corr} 为腐蚀电流密度; ΔE 为极化电位; β_a 、 β_c 分别为阳极和阴极塔菲尔斜率。

自腐蚀电位的移动衡量钢筋腐蚀发生的难易程度,腐蚀电位向负向移动,说明腐蚀易发生且抗腐蚀性能较弱^[12];腐蚀电流密度作为判断腐蚀速度的依据,腐蚀电流密度越大,腐蚀速率就越大^[13-15];钢筋腐蚀电流密度转化腐蚀速率用式(3)计算

$$C_R = \frac{3.27 \times 10^3 \times i_{\text{corr}} \times M}{\rho \times N} \quad (3)$$

式中: C_R 为腐蚀速率,mm/a; M 为电极材料的分子量, g/mol; ρ 为电极材料的密度, g/cm³; N 为金属离子的价数。

对于碳钢,把腐蚀电流密度转化腐蚀速率用式(4)计算

$$C_R = 11.73 \times i_{\text{corr}} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 氯氧镁水泥混凝土耐水性分析

在干燥环境和水浸泡环境下,不同测试时期氯氧镁水泥混凝土抗压强度及由式(1)计算得到的软化系数 K 见表 2。

表 2 氯氧镁水泥混凝土耐水性评价指标

Table 2 evaluation index of water resistance of magnesium chloride cement concrete

时间/d	干燥/MPa	水浸泡/MPa	软化系数
7	36.8	30.2	0.82
28	41.7	36.2	0.87
56	42.6	33.2	0.78
90	45.1	36.4	0.81
120	45.4	36.4	0.80
180	43.7	35.4	0.81
270	43.5	35.1	0.81
360	42.2	33.0	0.78

由表 2,可知在 360 d 测试周期内,除了浸泡 28 d 时氯氧镁水泥混凝土的软化系数大于 0.85,其余测试时间的氯氧镁水泥混凝土的软化系数处于 0.70~0.85,软化系数基本在 0.80 上下波动。西部盐湖地区以格尔木市为例,年平均降水天数为 27 d,年平均降水量为 45 mm,属于干燥地区。因此,本试验设计的氯氧镁水泥混凝土可用于西部盐湖地区。

2.2 裸露钢筋腐蚀分析

氯氧镁水泥混凝土中 BHC25 裸露钢筋极化曲线见图 2(a),BHC50 裸露钢筋极化曲线见图 2(b),不同时期裸露钢筋腐蚀电流密度见图 3。

结合图 2 和 3,BHC25 裸露钢筋和 BHC50 裸露钢筋的自腐蚀电位虽然有向正向移动的趋势但整体向负向移动,说明裸露钢筋可能已经发生腐蚀。

在腐蚀前期,由于试验准备阶段已将钢筋表面的氧化膜去除,使氯氧镁水泥混凝土中钢筋的腐蚀电流密度升高,易发生腐蚀;中期,由于 Fe 不断溶解,使钢筋表面的 Fe^{2+} 浓度升高,在钢筋表面形成一层较薄的腐蚀产物— $\text{Fe}(\text{OH})_2$,对腐蚀的进一步

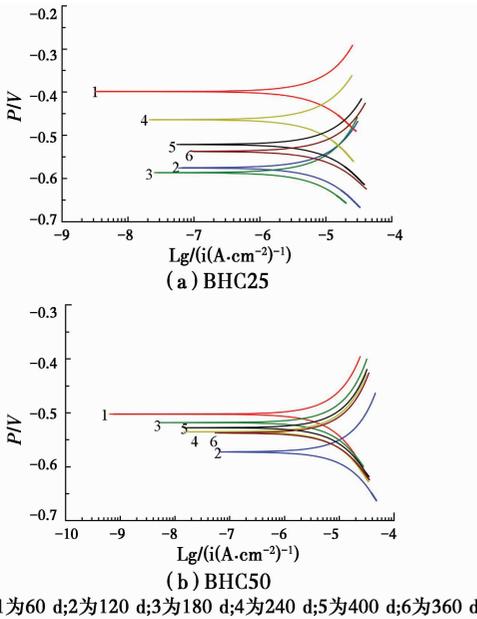


图 2 裸露钢筋极化曲线

Fig. 2 Polarization curve of bare steel bar

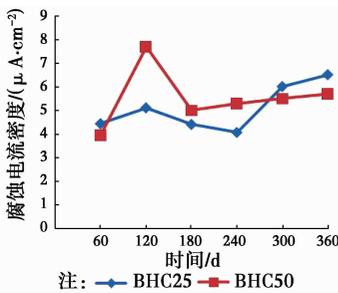


图 3 裸露钢筋腐蚀电流密度

Fig. 3 Corrosion current density of bare steel bar

增加起到阻碍作用,因此,腐蚀电流密度降低;后期,由于 $Fe(OH)_2$ 是一种疏松且多孔的腐蚀产物层,容易在空隙内形成局部活化点,且氯氧镁水泥混凝土中存在的游离 Cl^- 更容易通过这些孔隙富集到阳极活化点附近,导致膜内局部 Cl^- 浓缩,使得该处腐蚀产物膜的动态平衡受到破坏,电极腐蚀速度增大,从而导致测得的腐蚀速率大幅度升高。60~240 d, BHC50 裸露钢筋的腐蚀电流密度大于 BHC25 裸露钢筋的腐蚀电流密度,可能由于氯氧镁水泥混凝土长期浸泡在水中且水溶液更换周期为 2 个月, BHC25 裸露钢筋处游离氯离子扩散到溶液中的程度大于 BHC50 裸露钢筋处游离氯离子扩散到溶液中的程度,而氯离子浓度与腐蚀程度密切相关,使 BHC50 裸露钢筋的腐蚀速率大于 BHC25 裸露钢筋的腐蚀速率^[16]。当水分子和 OH^- 作用于钢筋和涂层界面时,界面的水解稳定性能对钢筋腐蚀也有重要影响;300~360 d, BHC50 裸露钢筋的腐蚀电流

密度小于 BHC25 裸露钢筋的腐蚀电流密度,主要是由于随着腐蚀产物的产生—破坏,钢筋的腐蚀速率随之改变。

2.3 美加力涂层钢筋腐蚀分析

氯氧镁水泥混凝土中 BHC25 美加力涂层钢筋极化曲线见图 4(a), BHC50 美加力涂层钢筋极化曲线见图 4(b),不同时期美加力涂层钢筋腐蚀电流密度见图 5。

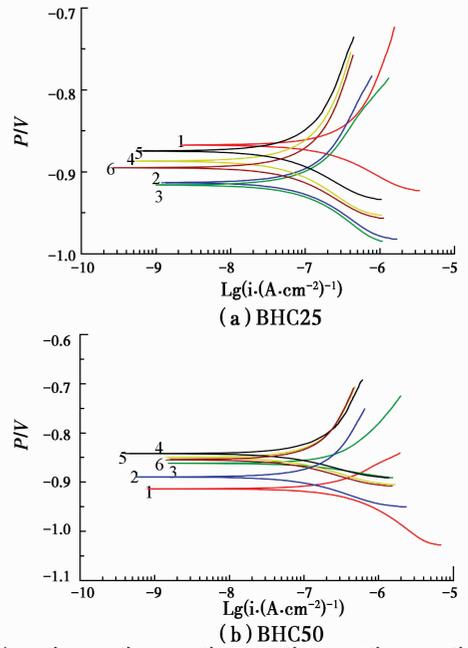


图 4 美加力涂层钢筋极化曲线

Fig. 4 Polarization curve of MAGNI coated steel bar

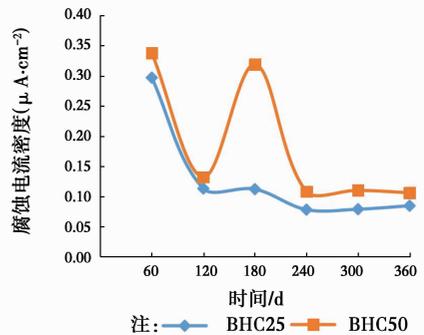


图 5 美加力涂层钢筋腐蚀电流密度

Fig. 5 Corrosion current density of MAGNI coated steel bar

由图 4 和 5, BHC25 美加力涂层钢筋的自腐蚀电位开始阶段负向移动,分析认为 BHC25 美加力涂层钢筋有发生腐蚀的趋势;中间阶段自腐蚀电位正向移动,说明 BHC25 美加力涂层钢筋耐腐蚀性能有所提高;最终阶段自腐蚀电位负向移动,说明中间阶段耐腐蚀性的增强对腐蚀的发生影响较小。而

BHC50 美加力涂层钢筋的自腐蚀电位前中期均保持正向移动,说明美加力涂层的保护作用良好;后期自腐蚀电位负向移动,说明美加力涂层保护下 BHC50 美加力涂层钢筋有发生腐蚀的趋势。BHC25 美加力涂层钢筋和 BHC50 美加力涂层钢筋的腐蚀电流密度在不同时期保持相似变化趋势。在 60 d 时,由于钢筋表面已按规定进行了处理,其表面易发生腐蚀,导致其腐蚀电流密度较高;在 120 d 时,氯氧镁水泥混凝土以及美加力涂层的性能基本已保持稳定,其腐蚀电流密度降低;在 180 d 时,水溶液中的水分子和 OH^- 以渗透的形式进入到涂层内部,使涂层产生溶胀现象,削弱了涂层对钢筋的保护能力。随着进一步的浸泡,越来越多的水分子和 OH^- 进入到涂层内部,涂层内部积累的水分子和 OH^- 会作用于钢筋和涂层的界面,在界面由于内外形成浓度差会产生渗透压;当渗透压大于界面黏结力时,界面就会发生脱粘导致破坏。当 OH^- 进一步作用到钢筋表面时,会对钢筋表面造成破坏。从 240~360 d,由于溶解的铁离子与 OH^- 结合在钢筋表面沉积下来,钢筋表面原来微小的点蚀连成一片,表面形成了大片锈蚀层;由于锈蚀层的存在,在一定程度上阻止了钢筋的继续腐蚀,并且在锈蚀层上存在一些裂纹,这说明所形成的锈层对钢筋虽然对钢筋能起到一定的保护作用,但并不能完全有效阻碍腐蚀的继续发生。

BHC50 美加力涂层钢筋的腐蚀速率始终大于 BHC25 美加力涂层钢筋的腐蚀速率,除了 180 d 时的腐蚀速率,其他龄期的腐蚀速率相差不大。可能由于 BHC25 美加力涂层钢筋处的氯离子外渗程度大于 BHC50 美加力涂层钢筋,导致 BHC25 美加力涂层钢筋的氯离子浓度小于 BHC50 美加力涂层钢筋处的氯离子浓度。而氯离子浓度与腐蚀程度密切相关^[16]。

2.4 钢筋腐蚀速率

2.4.1 钢筋腐蚀速率对比 不同钢筋在不同时期的腐蚀速率见图 6。

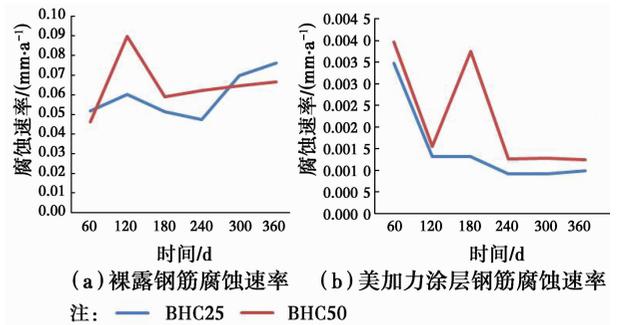


图 6 不同试样在不同时期的腐蚀速率

Fig. 6 Corrosion rates of different samples at different times

由图 6,在 60 d 时,由于氯氧镁水泥混凝土的各项性能未稳定以及涂层防护效果未突显,裸露钢筋的腐蚀速率是美加力涂层钢筋腐蚀速率的 10~15 倍;在 120~360 d,由于氯氧镁水泥混凝土以及涂层的各项性能已稳定,防护效果十分明显,裸露钢筋的腐蚀速率是美加力涂层钢筋腐蚀速率的 40~80 倍。由于氯离子浓度影响,BHC25 钢筋的腐蚀程度略小于 BHC50 钢筋的腐蚀程度。

2.4.2 钢筋腐蚀寿命预测 结合文献[17],腐蚀速率大于 $11.73 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$ 时,钢筋处于严重腐蚀状态;腐蚀速率在 $5.865 \times 10^{-3} \sim 11.73 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$ 时,钢筋处于中等腐蚀状态;腐蚀速率处于 $1.173 \times 10^{-3} \sim 5.865 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$,钢筋处于低腐蚀状态;腐蚀速率小于 $1.173 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$ 时,钢筋处于无腐蚀状态。对图 6 中不同钢筋在不同时期的腐蚀速率按照腐蚀速率与时间进行拟合,并对 BHC50 钢筋的腐蚀速率变化显著的点舍去,其中 $x=t/60$, t 为时间,单位 d,拟合曲线公式见表 3。钢筋腐蚀状态预期使用寿命见表 3。

表 3 腐蚀速率拟合曲线公式和钢筋预期使用寿命

Table 3 formula of fitting curve with corrosion rate and expected service life of steel bar

编号	拟合曲线公式	无腐蚀状态时间/d	低腐蚀状态时间/d	中等腐蚀状态时间/d	严重腐蚀状态时间/d
LG (BHC25)	$CR = (x^2 - 5x + 32)/500$				0~+∞
LG (BHC50)	$CR = (11\text{Ln}(x) + 46)/1\ 000$	1	1~2	2~3	3~+∞
MGL (BHC25)	$CR = (x^2 - 9x + 24)/5\ 000$	183~357	0~183 357~573	573~715	715~+∞
MGL (BHC50)	$CR = (2x^2 - 20x + 53)/10\ 000$	175~425	0~175 425~616	616~754	754~∞

LG(BHC25)代表保护层厚度 25 mm 的裸露钢筋, LG(BHC50) 代表保护层厚度 50mm 的裸露钢筋; MGL(BHC25) 代表保护层厚度 25 mm 的美加力涂层钢筋, MGL(BHC50) 代表保护层厚度 50 mm 的美加力涂层钢筋。

由表 3,可知氯氧镁水泥混凝土中裸露钢筋基本在干燥养护 28 d 后,已发生严重腐蚀。而有美加力涂层保护的钢筋,即使在水浸泡环境下,360 d 的测试周期内处于低腐蚀或无腐蚀状态;通过对钢筋腐蚀速率的预测,在水浸泡环境下,至少 715 d 后有美加力涂层保护的钢筋才有可能处于严重腐蚀状态。西部盐湖地区以格尔木市为例,年平均降水天数为 27 d,年平均降水量为 45 mm,属于干燥地区。理论上推定氯氧镁水泥混凝土—美加力涂层钢筋的使用寿命达到 26.5 a,说明涂层防腐效果明显。由于实际环境的复杂性,受到影响因素较多,需要通过大量的试验数据对氯氧镁水泥钢筋混凝土使用寿命进行预测。由于试验数据相对较少,本文仅提供一种寿命预测的方法。通过采用涂层技术解决氯氧镁水泥钢筋混凝土中钢筋的腐蚀问题是可行的,只要找到合适的涂层,有利于氯氧镁水泥钢筋混凝土的推广。

3 腐蚀产物分析

由于美加力涂层钢筋状态良好,为了进一步研

究,故对氯氧镁水泥混凝土中腐蚀状况较严重的裸露钢筋进行 SEM 和 EDS 实验,裸露钢筋的宏观与 SEM 像见图 7。试验前和试验后裸露钢筋的 EDS 见图 8,元素扫描结果见表 2。

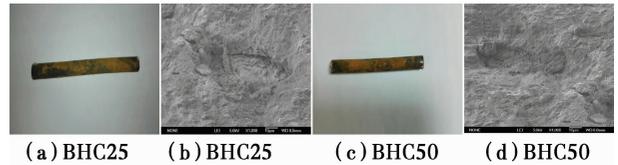


图 7 裸露钢筋的宏观与 SEM 像

Fig. 7 macrograph and SEM chart of bare steel

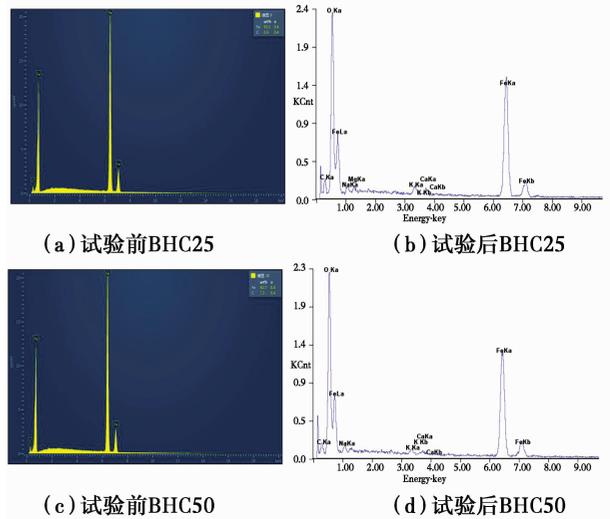


图 8 裸露钢筋的 EDS

Fig. 8 EDS of bare steel

表 4 实验前裸露钢筋和实验后裸露钢筋锈层的 EDS 元素扫描结果

Table 4 EDS results of bare steel bar before experiment and the rust layer after experiment

实验前	元素						Fe
	质量百分比/%						92.7
BHC25	元素	C	O	Na	K	Ca	Fe
	质量百分比/%	9.50	38.25	2.06	1.06	0.80	47.23
实验前	元素						Fe
	质量百分比/%						93.1
BHC50	元素	C	O	Na	K	Ca	Fe
	质量百分比/%	8.51	40.04	2.61	0.78	0.53	47.54

根据图 7,宏观下锈层呈层状结构,表面为棕红色,较为疏松脆硬,棕红色锈蚀层较容易清理;棕红色锈蚀层经清理后,靠近内层的产物呈黑灰色,锈层较紧密,较难清理。微观形貌下腐蚀产物呈条状或片状结构显示,是全面的点蚀,但实际上在宏观上表

现为均匀腐蚀。

结合图 8 和表 4,试验前对裸露钢筋 EDS 分析,钢筋由 C 和 Fe 两种元素组成,试验后裸露钢筋锈蚀层主要由 C、O 和 Fe₃ 种元素组成,且夹杂着来自氯氧镁水泥混凝土中少量的 Na、K 和 Ca 等少量元素,

由此可知锈蚀层主要成分是铁的氧化物,且从其元素含量不难看出 BHC50 的腐蚀程度要略大于 BHC25 的腐蚀程度。

4 结论

1) 在 360 d 测试周期内,除了浸泡 28 d 时氯氧镁水泥混凝土的软化系数大于 0.85,其余测试时间的氯氧镁水泥混凝土的软化系数处于 0.78~0.82,基本在 0.80 上下波动。因此本试验设计的氯氧镁水泥混凝土可用于干燥地区、受潮湿较轻或次要建筑结构。

2) 通过腐蚀速率分析,除了 60 d 时,由于氯氧镁水泥混凝土的各项性能未稳定以及涂层防护效果未突显,裸露钢筋的腐蚀速率是美加力涂层钢筋腐蚀速率的 10~15 倍;120~360 d,由于氯氧镁水泥混凝土以及涂层的各项性能已稳定,防护效果十分明显,裸露钢筋的腐蚀速率是美加力涂层钢筋腐蚀速率的 40~80 倍。

3) 宏观下锈层呈层状结构,表面为棕红色,较为疏松脆硬;靠近内层的产物呈黑灰色,锈蚀层较紧密。微观形貌下腐蚀产物呈条状或片状结构,微观上钢筋表面发生的是全面的点蚀,但在宏观上呈现为均匀腐蚀。

参考文献:

[1] ZHOU Z, CHEN H S, LI Z J, et al. Simulation of the properties of MgO-MgCl₂-H₂O system by thermodynamic method [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 68: 105-111.

[2] LI Z J, CHAU C K. Influence of molar ratios on properties of magnesium oxychloride cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(6): 866-870.

[3] ZHENG W Z, ZHU J. Progress of research on concrete structures strengthened with CFRP sheets bonded with inorganic cementitious materials [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(6): 1-12.

[4] 王皓,徐善华,苏磊. 加速腐蚀环境下钢板表面坑蚀形貌统计规律[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(1): 23-29.

WANG H, XU S H, SU L. Statistical regularity of surface pitting morphology of steel in accelerated corrosion environment [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38

(1): 23-29. (in Chinese)

[5] BLUNT J, JEN G, OSTERTAG C P. Enhancing corrosion resistance of reinforced concrete structures with hybrid fiber reinforced concrete [J]. *Corrosion Science*, 2015, 92: 182-191.

[6] 徐港,鲍浩,王青,等. 混凝土结构中钢筋锈蚀物体积膨胀率研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(9): 105-109.

XU G, BAO H, WANG Q, et al. Research on volumetric expansion ratio of corrosion products in concrete structure [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(9): 105-109. (in Chinese)

[7] 刘智勇,董超芳,贾志军,等. X70 钢在模拟潮湿存储环境中的点蚀行为 [J]. *金属学报*, 2011, 47(8): 1009-1016.

LIU Z Y, DONG C F, JIA Z J, et al. Pitting corrosion of X70 pipeline steel in the simulated wet storage environment [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, 47(8): 1009-1016. (in Chinese)

[8] CANNESON E, MANIER S, NICHOLSON J W. Water loss from magnesia-based cements [J]. *Ceramics-Silikaty*, 2010, 54(4): 341-344.

[9] 徐中,王兴镇,朱孟磊,等. 涂层中玻璃鳞片平行度控制与抗渗性能研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2015, 36(9): 1276-1280.

XU Z, WANG X Z, ZHU M L, et al. Association study of self-assembly parallel degree and permeability of glass flake coatings [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36(9): 1276-1280. (in Chinese)

[10] WAN K, LI C C, XING C J, et al. Enhanced anticorrosion properties of epoxy coatings from Al and Zn based pigments [J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2015, 31(4): 573-580.

[11] 乔宏霞. *土木工程材料* [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

QIAO H X. *Civil engineering materials* [M]. Beijing: China Power Press, 2014. (in Chinese)

[12] QIN H L, ZHANG H, SUN D T, et al. Corrosion behavior of the friction-stir-welded joints of 2A14-T6 aluminum alloy [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2015, 22(6): 627-638.

[13] LUKASZ S, MEHDI N. Corrosion current density prediction in reinforced concrete by imperialist

- competitive algorithm [J]. *Neural Computing and Applications*, 2014, 25(7/8): 1627-1638.
- [14] WANG H P, DING S C, ZHU J, et al. Corrosion behavior of 907 steel under thin electrolyte layers of artificial seawater [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(3): 806-814.
- [15] 姚武,夏强,左俊卿. 基于温差发电的混凝土模拟液中钢筋阴极保护[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(1): 76-81.
YAO W, XIA Q, ZUO J Q. Cathodic protection of reinforcing steel in simulated concrete pore solution based on thermoelectric generation [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18 (1): 76-81. (in Chinese)
- [16] 王金磊. 氯氧镁水泥混凝土配合比设计及其试验研究 [D]. 兰州:兰州理工大学, 2015:90-92.
- WANG J L. Design of mixture proportions and experimental research of magnesium oxychloride cement gravel concrete [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015:90-92. (in Chinese)
- [17] 马志鸣,赵铁军,巴光忠,等. 冻融环境下引气混凝土的抗钢筋锈蚀能力研究[J]. *建筑科学与工程学报*, 2014, 31(3):85-89.
MA Z M, ZHAO T J, BA G Z, et al. Study on ability of resistance to steel corrosion of air entraining concrete under freeze-thaw environment [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2014, 31(3):85-89. (in Chinese)

(编辑 胡玲)