

文章编号:1007-9629(2021)05-0946-06

# 碳化与氯盐复合作用下硫氧镁胶凝材料的护筋性

巴明芳<sup>1</sup>, 张丹蕾<sup>1</sup>, 赵启俊<sup>1</sup>, 薛涛<sup>1</sup>, 柳俊哲<sup>2</sup>

(1. 宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211;

2. 青岛农业大学 建筑工程学院, 山东 青岛 266109)

**摘要:**为探究硫氧镁(MOS)胶凝材料的护筋性,研究了自然养护、碳化、氯盐以及碳化和氯盐复合作用下MOS胶凝材料的电化学阻抗、钝化和脱钝钢筋的极化曲线以及锈蚀面积率.结果表明:碳化、氯盐单独作用下,MOS胶凝材料中钢筋的阻抗均低于自然养护下的相应阻抗,且随着龄期的延长,钝化钢筋的阻抗均呈现先减小后增大的趋势,脱钝钢筋的阻抗则持续减小;碳化和氯盐复合作用下MOS胶凝材料中钢筋的锈蚀程度明显增加,碳化和氯盐复合作用对MOS胶凝材料内部钢筋锈蚀程度具有叠加效应;各种腐蚀环境中脱钝钢筋的锈蚀程度均高于钝化钢筋.

**关键词:**硫氧镁胶凝材料;护筋性;钢筋;碳化;氯盐;电化学阻抗

中图分类号:TU526

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.007

## Corrosion Resistance of Steel Bars of Magnesium Oxy-sulfate Cementitious Material under the Combined Action of Carbonation and Chloride Salt

BA Mingfang<sup>1</sup>, ZHANG Danlei<sup>1</sup>, ZHAO Qijun<sup>1</sup>, XUE Tao<sup>1</sup>, LIU Junzhe<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. College of Architectural Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** In order to study the corrosion resistance of magnesium oxy-sulfate (MOS) cementitious materials, the electrochemical impedance, polarization curve and corrosion area ratio of passive and de-passive steel bars were investigated under natural curing, carbonation, chloride salt and combined action of carbonation and chloride salt. The results show that the impedance of steel bars under single carbonation and chloride salt condition is lower than that in natural curing. With the increased age, the impedance of passive steel bars decreases first and then increases, while that of de-passive steel bars decreases continuously. Under the combined action of carbonation and chloride salt, the electrochemical impedance of steel bars in MOS cementitious materials is further reduced, which reflects the superposition effect of combined action of carbonization and chloride on the corrosion degree of steel bars in MOS cementitious materials. The corrosion degree of de-passive steel bars is higher than that of passive steel bars under all curing conditions.

**Key words:** magnesium oxy-sulfate cementitious material; corrosion resistance; steel bar; carbonation; chloride salt; electrochemical impedance

硫氧镁(MOS)胶凝材料具有质量轻、体积稳定性好、导热性低、耐火性好、耐磨性好等优点<sup>[1-3]</sup>,可应用在保温板、装饰装修材料、墙板、空调通风管道等

多个领域<sup>[4-7]</sup>.目前已有许多改性MOS胶凝材料的研究及应用<sup>[8-13]</sup>.为了更好地在土木工程领域推广和使用MOS胶凝材料,有必要对其耐久性进行深入研

收稿日期:2020-06-11; 修订日期:2020-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978346,51778302)

第一作者:巴明芳(1975—),女,山东滨州市人,宁波大学教授,博士生导师,博士.E-mail: bamingfang@nbu.edu.cn

通讯作者:柳俊哲(1964—),男,黑龙江哈尔滨人,青岛农业大学教授,博士生导师,博士.E-mail: liujunzhe@nbu.edu.cn

究,而钢筋锈蚀是钢筋混凝土耐久性失效的重要因素之一<sup>[14-15]</sup>.电化学方法可以在不破坏研究对象的情况下,研究确定水泥基材料的抗钢筋锈蚀能力.Fadyomi<sup>[16]</sup>、Eknavorian等<sup>[17]</sup>、Ngala等<sup>[18]</sup>在此基础上采用电化学阻抗测试方法对硅酸盐类水泥材料抗锈性进行测试.近年来,施锦杰等<sup>[19]</sup>、乔宏霞等<sup>[20-21]</sup>、巩位<sup>[22]</sup>均采用电化学分析方法对不同胶凝材料体系中钢筋锈蚀进行研究.本文通过分析MOS胶凝材料在自然养护、碳化、氯盐以及碳化和氯盐复合作用下的电化学阻抗、钝化和脱钝钢筋的极化曲线等,深入剖析MOS胶凝材料的护筋性.

## 1 试验

### 1.1 原材料与配合比

天津产工业级 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ,其化学组成<sup>1)</sup>见表1.营口产轻烧MgO粉,其化学组成见表2,其XRD图谱和粒径分布图见图1.钢筋为 $\phi 8 \times 17$  mm

的Q235钢筋,使用前先将钢筋浸泡在饱和柠檬酸溶液中7 d,取出烘干后打磨至表面光滑,进行脱钝处理;取部分脱钝钢筋浸泡在饱和氢氧化钙溶液中7 d进行钝化处理.MOS胶凝材料的水灰比为0.50,其配合比见表3, $M_0$ 、 $M_1$ 分别为自然养护、氯盐作用下内置钝化钢筋的MOS胶凝材料, $M_{p0}$ 、 $M_{p1}$ 分别为自然养护、氯盐作用下内置脱钝钢筋的MOS胶凝材料.

表1  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 的化学组成  
Table 1 Chemical compositions of  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$

w/%					
$MgSO_4$	$MgCl_2$	NaCl	$Na_2SO_4$	$H_2O$	Others
47.85	0.50	0.50	0.50	50.24	0.41

表2 轻烧MgO粉的化学组成  
Table 2 Chemical compositions of light-burned MgO

w/%					
$SiO_2$	MgO	CaO	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	IL
0.40	96.50	0.85	0.19	0.21	1.85

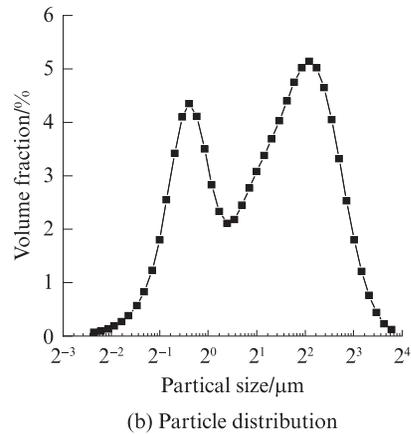
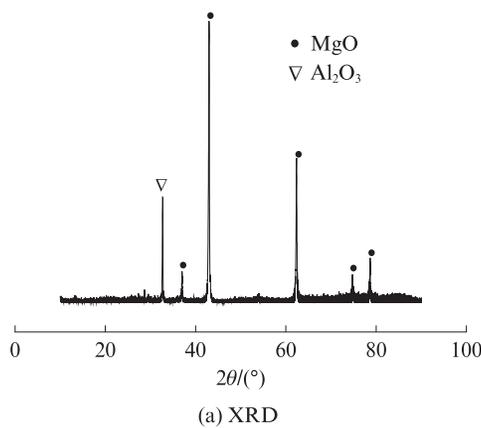


图1 轻烧MgO粉的XRD图谱和粒径分布图

Fig. 1 XRD spectrum and particle distribution of light-burned MgO

表3 MOS胶凝材料的配合比  
Table 3 Mix proportions of MOS cemented materials

Material	Steel treatment	Mix proportion/g			
		MgO	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	$H_2O$	NaCl
$M_0$	Passive	371.0	163.0	142.0	0
$M_1$	Passive	371.0	163.0	142.0	6.5
$M_{p0}$	De-passive	371.0	163.0	142.0	0
$M_{p1}$	De-passive	371.0	163.0	142.0	6.5

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试件的成型及养护

按表3配合比拌制浆体,内置钝化或脱钝钢筋,成型 $\phi 36 \times 160$  mm的圆柱体试件.拆模后用保鲜塑

料膜将试件密封,放置在温度为 $(20 \pm 5)^\circ C$ 、相对湿度为 $(70 \pm 5)\%$ 的室内养护至28 d.取出一批试件,用环氧树脂密封试件的2个圆形端面,然后放置在 $CO_2$ 体积分数为 $(20 \pm 2)\%$ 、温度为 $(20 \pm 2)^\circ C$ 、相对湿度为 $(70 \pm 1)\%$ 的碳化箱内进行加速碳化,在碳化7、14、28 d时对试件进行电化学分析;另一批试件在室温环境下继续自然养护. $M_0$ 、 $M_1$ 、 $M_{p0}$ 、 $M_{p1}$ 对应的碳化试件编号分别为 $CM_0$ 、 $CM_1$ 、 $CM_{p0}$ 、 $CM_{p1}$ .

#### 1.2.2 电化学试验

采用PARSTAT 3 000 A电化学工作站两电极测试系统,进行MOS胶凝材料交流阻抗和极化曲线测试.测试频率范围为1~10 kHz,幅值为5 mV,应

1)文中涉及的组成、水灰比等均为质量分数或质量比。

用电压范围为±6 V.用ZSimpWin软件拟合其电化学阻抗图谱,并解析等效电路结构及各元件参数,同时采用CView软件分析其极化曲线.采用图2所示的等效电路图(R.E.为辅助电极;W.E.为工作电极; $C_1$ 、 $C_2$ 为双电层电容; $R_1$ 为辅助电极至试件表面之间导电溶液的电阻; $R_2$ 为MOS胶凝材料保护层电阻; $R_4$ 为钢筋表面双电层的转移电阻)对自然养护条件下MOS胶凝材料的电化学阻抗进行测试,得到其极差为 $2.25 \times 10^{-5}$ ,由此可以判定所选用等效电路模型是合理的.

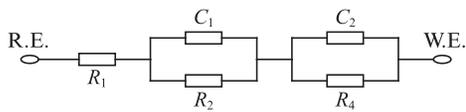


图2 MOS胶凝材料的等效电路图  
Fig. 2 Equivalent circuit diagram of MOS cementitious material

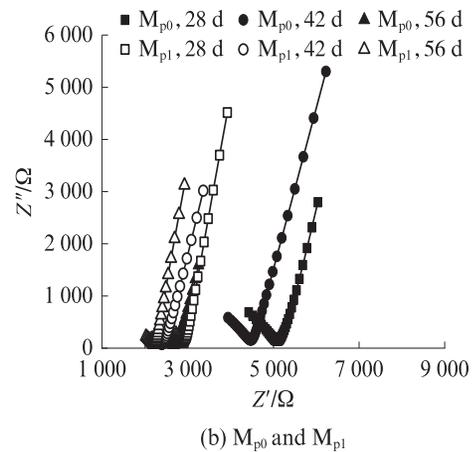
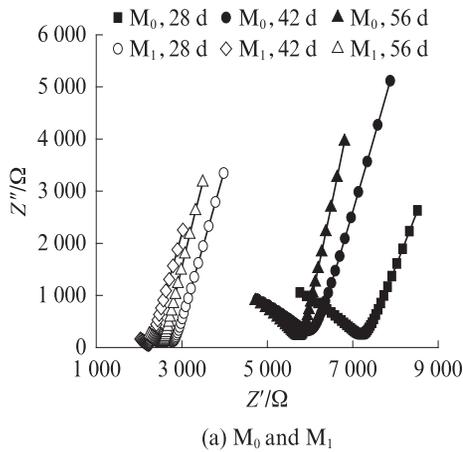


图3 氯盐作用下MOS胶凝材料的电化学阻抗  
Fig. 3 Electrochemical impedance of MOS cementitious materials under action of chloride salt

2.1.2 MOS胶凝材料中钢筋的极化曲线和锈蚀特征

养护龄期为56 d时,氯盐作用下MOS胶凝材料中钢筋的极化曲线见图4(图中E为电位; $i$ 为电流密度),对应的极化曲线参数见表4(表中 $i_{corr}$ 为腐蚀电流密度; $C_R$ 为钢筋锈蚀速率; $E_{corr}$ 为腐蚀电位).由图4和表4可见:氯盐作用下 $M_1$ 和 $M_{p1}$ 的极化曲线均较 $M_0$ 和 $M_{p0}$ 的极化曲线整体向低腐蚀电位和高腐蚀电流密度方向移动;氯盐作用下56 d时钝化钢筋和脱钝钢筋的锈蚀速率要明显高于其自然养护条件下; $M_{p0}$ 、 $M_{p1}$ 的极化曲线腐蚀电位分别低于 $M_0$ 、 $M_1$ ,而其腐蚀电流密度分别高于 $M_0$ 、 $M_1$ ;相同龄期时脱钝钢筋的锈蚀速率要明显高于钝化钢筋;与 $M_0$ 、 $M_{p0}$ 相比, $M_1$ 、 $M_{p1}$ 中钢筋的腐蚀面积率增大,这表明氯盐作用

2 结果与讨论

2.1 氯盐作用下MOS胶凝材料的护筋性

2.1.1 MOS胶凝材料电化学阻抗

图3为氯盐作用下MOS胶凝材料的电化学阻抗.由图3可见: $M_{p0}$ 的高频区容抗弧半径要明显低于 $M_0$ ,且随着龄期的延长 $M_{p0}$ 的阻抗降低速率要明显高于 $M_0$ ,这表明MOS胶凝材料中脱钝钢筋的锈蚀速率要明显高于钝化钢筋,且随养护龄期延长MOS胶凝材料中脱钝钢筋和钝化钢筋的锈蚀速率均呈现出明显的增加趋势; $M_1$ 、 $M_{p1}$ 高频区容抗弧半径均小于 $M_0$ 、 $M_{p0}$ ,这表明氯盐的加入明显增加MOS胶凝材料中钝化钢筋和脱钝钢筋的锈蚀速率;养护至42 d时 $M_1$ 的阻抗要低于其养护至56 d时,这是因为随龄期延长掺加氯盐的MOS胶凝材料中钝化钢筋的锈蚀程度增大,锈蚀产物逐渐在其表面堆积,导致阻抗先减小后增大;脱钝钢筋的阻抗则随龄期持续减小.

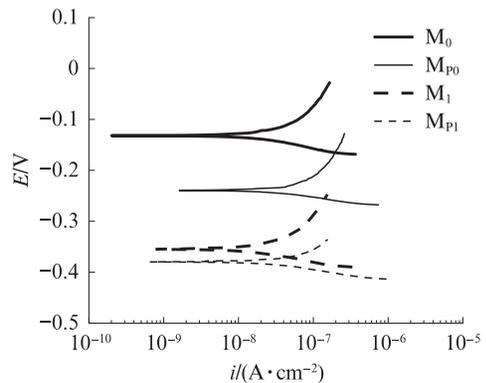


图4 氯盐作用下MOS胶凝材料中钢筋的极化曲线(56 d)  
Fig. 4 Polarization curves of steel bars in the MOS cementitious material under the action of chloride salt (56 d)

下MOS胶凝材料中钢筋的锈蚀程度高于自然养护条件下; $M_{p0}$ 、 $M_{p1}$ 的腐蚀面积率均大于 $M_0$ 、 $M_1$ ,表明氯

表4 MOS胶凝材料中钢筋的极化曲线参数

Table 4 Parameters of polarization curve of steel bar in MOS cementitious material

Material	$i_{corr} \times 10^8 / (A \cdot cm^{-2})$	$E_{corr} / V$	$C_R \times 10^5 / (mm \cdot a^{-1})$	Corrosion area ratio / %
$M_0$	4.02	-0.13	4.66	26.7
$M_{p0}$	5.51	-0.24	6.39	41.7
$M_1$	5.88	-0.36	6.82	70.9
$M_{p1}$	8.74	-0.38	10.10	81.5
$CM_0$	5.15	-0.17	5.97	45.5
$CM_{p0}$	12.70	-0.21	14.70	72.2
$CM_1$	15.60	-0.35	18.10	92.1
$CM_{p1}$	24.10	-0.42	27.90	97.1

盐作用下MOS胶凝材料中钝化钢筋锈蚀程度小于脱钝钢筋.

2.2 碳化作用下MOS胶凝材料的护筋性

2.2.1 MOS胶凝材料电化学阻抗

图5为碳化作用下MOS胶凝材料的电化学阻抗.由图5可见:碳化试件在高频区的容抗弧半径小于相同龄期末碳化试件,这表明碳化作用明显降低了MOS胶凝材料的抗锈蚀能力;碳化28 d时 $CM_0$ 高频区容抗弧半径大于碳化14 d时,这主要是因为随着碳化龄期的延长,钢筋锈蚀加剧导致其锈蚀物堆积在钢筋表面,使得钝化钢筋的阻抗随龄期延长呈现先减小后增大的趋势;脱钝钢筋的阻抗在碳化作用下则随龄期延长持续减小.

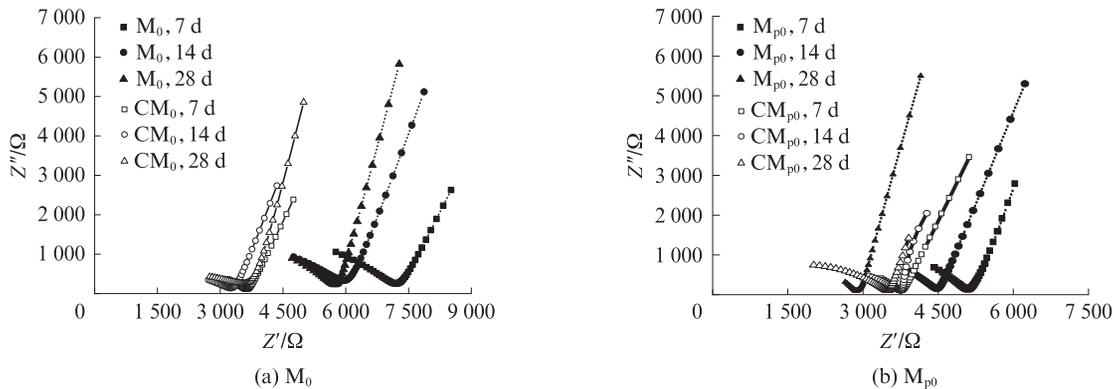


图5 碳化作用下MOS胶凝材料的电化学阻抗

Fig. 5 Electrochemical impedance of MOS cementitious materials under carbonation

2.2.2 MOS胶凝材料中钢筋的极化曲线和锈蚀特征

碳化龄期28 d时,MOS胶凝材料中钢筋的极化曲线见图6,对应的极化曲线参数见表4.由图6和表4可见: $CM_0$ 中钝化钢筋的极化曲线较 $M_0$ 整体向高腐蚀电位和高腐蚀电流密度方向移动; $CM_{p0}$ 中脱钝钢筋的极化曲线较 $M_{p0}$ 整体向低腐蚀电位和高腐蚀电

流密度方向移动;碳化28 d时MOS胶凝材料中钝化钢筋和脱钝钢筋的锈蚀速率均高于其在自然养护条件下,但钝化钢筋的锈蚀速率慢于脱钝钢筋; $CM_0$ 、 $CM_{p0}$ 中钢筋的腐蚀面积率分别大于 $M_0$ 、 $M_{p0}$ ,这表明28 d碳化龄期时钝化钢筋和脱钝钢筋的锈蚀程度均大于相同龄期自然养护条件下.

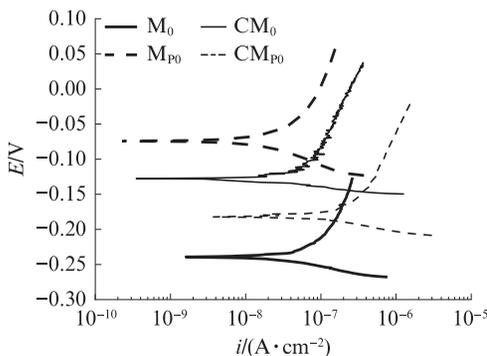


图6 碳化作用下MOS胶凝材料中钢筋的极化曲线(28 d)

Fig. 6 Polarization curves of steel bars in MOS cementitious material under carbonation (28 d)

2.3 碳化与氯盐复合作用下MOS胶凝材料护筋性

2.3.1 MOS胶凝材料电化学阻抗

图7为碳化与氯盐复合作用下MOS胶凝材料的电化学阻抗.由图7可见:碳化与氯盐复合作用下, $CM_1$ 、 $CM_{p1}$ 在高频区容抗弧半径小于相同龄期末碳化试件 $M_1$ 、 $M_{p1}$ ,这表明碳化与氯盐的复合作用明显降低了MOS胶凝材料的护筋性,抗锈蚀能力减弱;碳化7~14 d, $CM_1$ 高频区容抗弧增大,而碳化14~28 d高频区容抗弧半径明显减小,并且在低频区容抗弧拖尾长度逐渐变短,这主要是因为碳化7~14 d时,钝化钢筋快速锈蚀,锈蚀物堆积在钢筋表面,使得钢筋的阻抗增大,同时随着碳化龄期的进一步增加,基

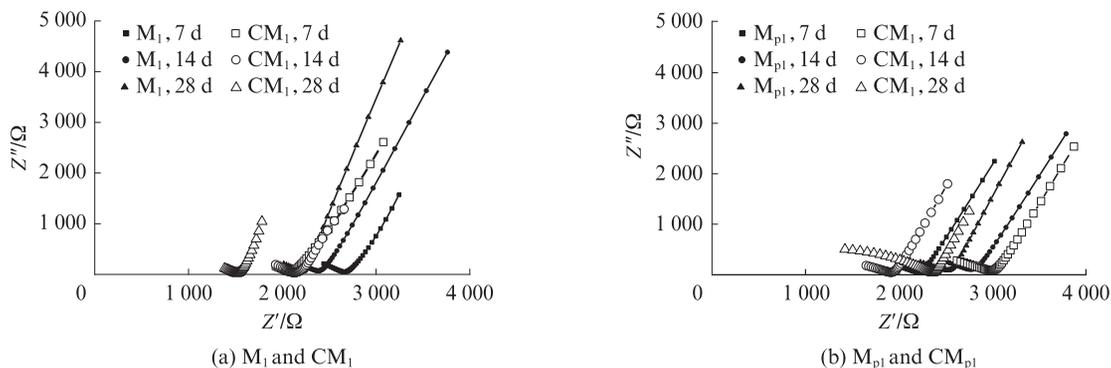


图7 碳化和氯盐复合作用下MOS胶凝材料的电化学阻抗

Fig. 7 Electrochemical impedance of MOS cementitious materials under carbonization and chloride salt

体中氯离子持续向钢筋内部侵蚀,钢筋表面锈蚀物增加导致阻抗降低;脱钝钢筋的阻抗随碳化龄期延长呈现先减小后增大的趋势,说明脱钝钢筋由于表面锈蚀产物堆积而造成的阻抗增大时间要晚于同等养护条件下的钝化钢筋。

### 2.3.2 MOS胶凝材料中钢筋的极化曲线和锈蚀特征

龄期为28 d,碳化和氯盐复合作用下MOS胶凝材料的中钢筋的极化曲线见图8。由图8和表5可见:碳化和氯盐复合作用下,CM<sub>1</sub>中钝化钢筋的极化曲线较单独氯盐作用下M<sub>1</sub>整体向低腐蚀电位和高腐蚀电流密度方向移动;CM<sub>pi</sub>中脱钝钢筋的极化曲线较单独氯盐作用下M<sub>pi</sub>整体向高腐蚀电位和高腐蚀电流密度方向移动;氯盐和碳化复合作用下钝化钢筋和脱钝钢筋腐蚀速率高于其单独氯盐作用下;在碳化和氯盐复合作用下,CM<sub>1</sub>中钝化钢筋的腐蚀面积率大于氯盐作用下M<sub>1</sub>中的钝化钢筋,CM<sub>pi</sub>中脱钝钢筋腐蚀面积率大于氯盐作用下M<sub>pi</sub>中的钝化钢筋,这表明碳化和氯盐复合作用下钝化钢筋锈蚀程度大于单独氯盐作用下钝化钢筋。

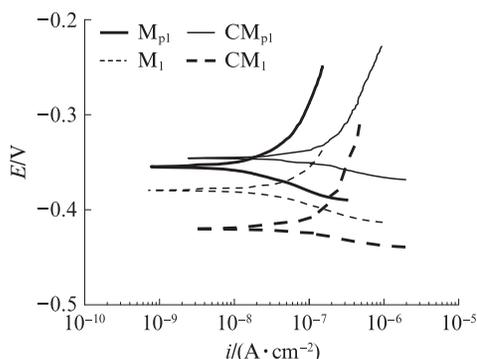


图8 碳化和氯盐复合作用下MOS胶凝材料中钢筋极化曲线(28 d)

Fig. 8 Polarization curves of steel bars in MOS cementitious materials under action of carbonization and chloride salt (28 d)

## 3 结论

(1) 碳化或氯盐单独作用下,MOS胶凝材料中钝化钢筋和脱钝钢筋的阻抗均小于自然养护条件下,碳化和氯盐作用均降低了MOS胶凝材料的护筋性.随着龄期的延长,由于锈蚀产物的堆积钝化钢筋的阻抗先减小后增大,而脱钝钢筋的阻抗则持续减小。

(2) 碳化和氯盐复合作用明显降低了MOS胶凝材料中脱钝和钝化钢筋的电化学阻抗,锈蚀程度明显增加,碳化与氯盐复合作用对MOS胶凝材料中脱钝和钝化钢筋的锈蚀程度具有明显的叠加效应。

(3) 氯盐、碳化以及碳化和氯盐复合作用下,脱钝钢筋的锈蚀程度均高于钝化钢筋。

### 参考文献:

- [1] 王兆敏. 中国菱镁矿现状与发展趋势[J]. 中国非金属矿导刊, 2006(5):6-9.  
WANG Zhaomin. Current situation and development trend of magnesite in China [J]. China Non-metallic Minerals Guide, 2006 (5):6-9. (in Chinese)
- [2] URWONGSE L, SORRELL C A. Phase relations in magnesium oxysulfate cements [J]. Chemischer Informationsdienst, 1981, 63(9-10):523.
- [3] DENG D H. The mechanism for soluble for phosphate to improve the water resistance of magnesium oxychloride cement [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(1):1311-1317.
- [4] 梁媛媛, 关岩, 毕万利, 等. 改性硫氧镁复合墙板抗翘曲变形试验研究 [J]. 教育教学论坛, 2019, 426(32):269-270.  
LIANG Yuanyuan, GUAN Yan, BI Wanli, et al. Experimental research on anti-warping deformation of modified magnesium thioxo composite wall panel [J]. Education and Teaching Forum, 2019, 426 (32): 269-270. (in Chinese)
- [5] 朱玉杰, 朱效甲. 硫氧镁水泥制品试验研究与生产新进展 [J]. 上海建材, 2014(3):28-29.  
ZHU Yujie, ZHU Xiaojia. New progress in experimental re-

- search and production of magnesium oxysulfide cement products [J]. Shanghai Building Materials, 2014 (3): 28-29. (in Chinese)
- [ 6 ] 朱效甲,朱玉杰,朱效涛,等. 国内硫氧镁水泥外加剂的研究现状及展望. [J] 建材技术与应用, 2018(5): 1-4.  
ZHU Xiaojia, ZHU Yujie, ZHU Xiaotao, et al. Research status and prospect of domestic magnesium oxysulfide cement admixture. [J] Building Materials Technology and Application, 2018 (5): 1-4. (in Chinese)
- [ 7 ] DEMEDIUK T, COLE W F. A study on magnesium oxy sulfates [J]. Australian Journal of Chemistry, 1957, 10 (3): 287-294.
- [ 8 ] SAM A W, JOHN L P. Magnesium-based cements: A journey of 150 years, and cements for the future [J]. Chemical Reviews, 2016, 116 (7): 4170-4204.
- [ 9 ] DEMEDIUK T. A method for overcoming unsoundness in magnesian limes [J]. Nature, 1952, 170 (4332): 799.
- [ 10 ] 张巨松,董孟肖. 复合改性硫氧镁水泥的性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 324-329.  
ZHANG Jusong, DONG mengxiao. Study on properties of composite modified magnesium oxysulfide cement [J]. Journal of Shenyang University of Architecture (Natural Science), 2019, 35 (2): 324-329. (in Chinese)
- [ 11 ] 陈方宇,吴成友. 改性硫氧镁水泥性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2018(6): 56-62.  
CHEN Fangyu, WU Chengyou. Study on properties of modified magnesium oxysulfide cement [J]. New Building Materials, 2018 (6): 56-62. (in Chinese)
- [ 12 ] 李国栋,毕万利,孙恩禹,等. 改性硫氧镁的研制与性能研究 [J]. 耐火材料, 2016, 50(6): 469-472.  
LI Guodong, BI Wanli, SUN Enyu, et al. Development and performance research of modified magnesium oxysulfide [J]. Refractories, 2016, 50 (6): 469-472. (in Chinese)
- [ 13 ] 张兴福,王自福,王明英,等. 改性硫氧镁复合墙板研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(6): 66-69.  
ZHANG Xingfu, WANG Zifu, WANG Mingying, et al. Study on modified sox composite wallboard [J]. New Building Materials, 2017, 44(6): 66-69. (in Chinese)
- [ 14 ] 罗旭红. 氯盐对钢筋混凝土的影响 [J]. 工程与材料科学, 2014(6): 82.  
LUO Xuhong. Influence of chloride on reinforced concrete [J]. Engineering and Materials Science, 2014 (6): 82. (in Chinese)
- [ 15 ] 袁伟静. 氯盐和碳化双重腐蚀对钢筋混凝土强度的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(10): 94-96.  
YUAN Weijing. The influence of chloride and carbonation on the strength of reinforced concrete [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45 (10): 94-96. (in Chinese)
- [ 16 ] FADYOMI J. Corrosion inhibitors [J]. Concrete, 1997, 31 (8): 21-22.
- [ 17 ] EKNAVORIAN A, CHIN D, SAIDHA L. Determination of a nitrite based corrosion inhibitor in plastic and hardened concrete [J]. Cement Concrete Aggregates, 1995, 17(1): 48-54.
- [ 18 ] NGALA V T, PAGE C I. Effects of carbonation on pore structure and diffusion properties of hydrated cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(27): 995-1007.
- [ 19 ] 施锦杰,孙伟. 用电化学阻抗谱与X射线CT研究混凝土中钢筋的腐蚀行为[J]. 硅酸盐学报, 2011, 10(39): 1694-1700.  
SHI Jinjie, SUN Wei. Using electrochemical impedance spectroscopy and X-ray CT to study the corrosion behavior of rebar in concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 10(39): 1694-1700. (in Chinese)
- [ 20 ] 乔宏霞, 巩位, 陈广峰, 等. 基于极化曲线的镁水泥混凝土中钢筋腐蚀试验 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2016 (1): 6-10.  
QIAO Hongxia, GONG Wei, CHEN Guangfeng, et al. Corrosion test of steel bars in magnesium cement concrete based on polarization curve [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2016 (1): 6-10. (in Chinese)
- [ 21 ] 乔宏霞, 巩位, 王鹏辉, 等. 硫酸盐环境氯氧镁水泥混凝土中钢筋防护试验 [J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(2): 247-253.  
QIAO Hongxia, GONG Wei, WANG Penghui, et al. Steel bar protection test of magnesium oxychloride cement concrete in sulfate environment [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52 (2): 247-253. (in Chinese)
- [ 22 ] 巩位. 氯氧镁水泥混凝土中钢筋防腐试验与综合评价 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.  
GONG Wei. Corrosion test and comprehensive evaluation of reinforcement in magnesium oxychloride cement concrete [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017. (in Chinese)