

# 不同氯盐作用方式下 MCI2020M 对钢筋的腐蚀抑制作用

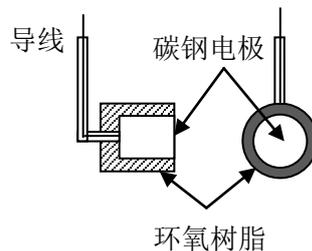
蔡景顺

(江苏省建筑科学研究院有限公司, 高性能土木工程材料国家重点实验室, 南京, 211103)

**摘要:** 应用电化学技术, 在 0.1mol/L 和 0.3mol/L NaCl 模拟混凝土孔隙液中, 研究了不同氯盐作用方式下 MCI2020M 对钢筋的耐腐蚀性能影响以及模拟氯盐侵蚀环境下混凝土结构中涂覆 MCI2020M 对钢筋腐蚀的抑制作用。结果表明: MCI2020M 可以有效抑制低氯盐浓度下钢筋的锈蚀, 对已经锈蚀钢筋起到修复作用。混凝土结构中, 涂覆 MCI2020M 可以有效提高钢筋的线性极化电阻, 增强钢筋的耐腐蚀能力。电化学阻抗谱也表明, 涂覆 MCI2020M 后阻抗谱高频及低频容抗弧增大, 混凝土基体及钢筋表面电阻均增大。

## 一、模拟液中不同氯盐添加方式下 MCI 对钢筋的腐蚀抑制

### 1.1 实验方法



1.1 工作电极示意图

工作电极为 Q235 钢, 尺寸为  $\phi 1.12 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ , 环氧树脂包封, 尾端用铜丝导出 (图 1.1), 依次用 400#, 800#, 1200# 砂纸打磨, 丙酮超声清洗。模拟混凝土孔隙液组成为饱和氢氧化钙添加 0.01mol/L NaOH 和 0.3mol/L NaCl, pH 值 12.50。

电化学测试在 273A 电化学工作站(美国普林斯顿生产)上进行, 铂片为对电极, 饱和甘汞为参比电极。研究了氯盐与阻锈剂同时加入, 先加氯盐后加阻锈剂以及先加阻锈剂后加氯盐三种方式下, 通过电化学线性极化测试 MCI2020 对钢筋腐蚀性能的影响。线性极化曲线扫描速度 0.1667mV/s, 相对开路电位  $\pm 10 \text{ mV}$ 。EIS 测试频率范围 100kHz 到 10mHz, 扰动幅值 10mV。

### 1.2 氯盐与阻锈剂同时加入

在氯盐与阻锈剂同时加入的试验中，模拟液加入 0.3mol/L 的 NaCl 为基准溶液，基准溶液加入质量分数 2% 的 MCI2020 用来测试阻锈剂的作用效果，结果如图 1.2 所示。

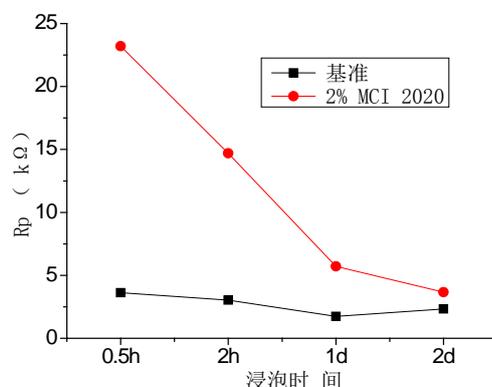


图 1.2 MCI 2020 与氯盐同时加入对模拟液中钢筋线性极化电阻的影响

可见，在浸泡的初期，含 2020 的溶液中钢筋电阻明显高于基准溶液，但随着浸泡时间的延长，两溶液中的线性极化电阻都有明显的下降趋势。含 2020 的溶液中，1d 内钢筋电阻下降速率最大，浸泡 2d 后，两溶液中钢筋电阻下降至非常接近，表明在 2020 与氯盐同时作用于未钝化的钢筋表面时，没有明显的阻锈效果。

### 1.3 先加氯盐后加阻锈剂

图 1.3 所示为含 0.1mol/L、0.3mol/L NaCl 的模拟混凝土孔溶液中钢筋电阻的变化规律，浸泡制度为钢筋电极先在含 NaCl 的孔溶液中浸泡 1d，然后向溶液体系中加入质量分数为 1% 的 MCI 2020M，分别测试加入后 4h、1d、2d、3d 钢筋电极线性极化电阻的变化情况。

从试验结果可以发现，氯离子浓度为 0.1mol/L 时，在浸泡初始的 1d 内，钢筋电阻无明显的变化，加入 MCI 2020 1d 后，钢筋电阻迅速提高至原先的 4 倍以上，腐蚀速率下降 80% 左右。此后，随着浸泡时间的继续延长，电阻略微下降，可能与阻锈剂的挥发散失导致的模拟降低有关。氯离子浓度为 0.3mol/L 时，电极浸泡 1d，电阻下降至 14kΩ 左右，而此后加入 1% MCI 2020，电阻提高至 20kΩ 左右，腐蚀速率下降了约 30%。这一结果表明，MCI 2020 对已锈蚀钢筋具有保护效果，且在氯盐浓度较低时，对钢筋腐蚀的抑制作用更加明显，氯盐浓度提高，阻锈剂对腐蚀反应的抑制效果下降。

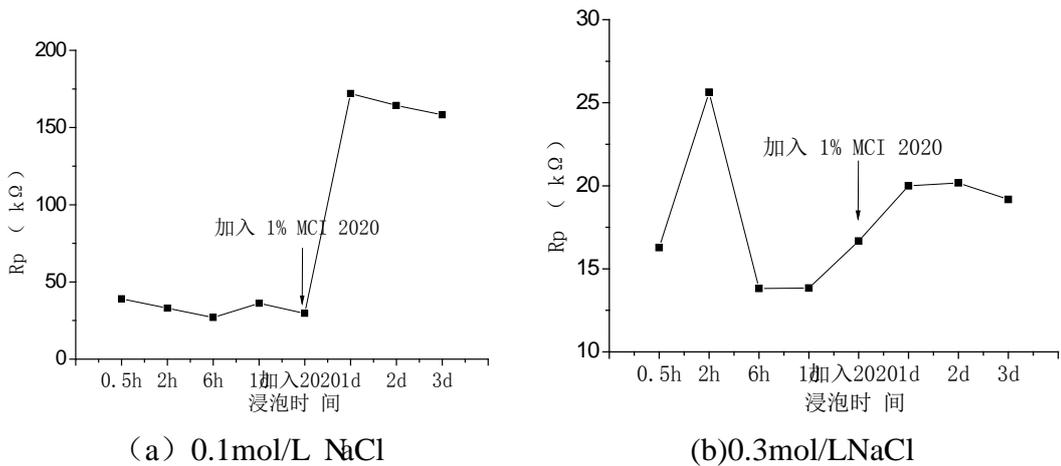


图 1.3 模拟混凝土孔溶液中钢筋线性极化电阻变化

### 1.4 先加阻锈剂后加氯盐

图 1.4 为含阻锈剂的溶液中浸泡 2d 后再加入 0.1mol/L NaCl 时钢筋电阻的变化规律，并与无 MCI 2020 阻锈剂的空白模拟液做对比。从目前的结果看，在无氯盐存在时，空白溶液中钢筋电极的电阻高于含 1% 2020 的模拟液中的钢筋电阻，这可能是由于阻锈剂分子在钢筋表面的吸附阻止了碱性环境中钢筋表面钝化膜的生长有关。并且在浸泡初期，都会出现一段电阻先下降后升高的趋势，具体原因还不清楚。在加入氯盐 1h 后，空白模拟液中钢筋电阻由 160kΩ 迅速下降至 100kΩ，并在 1d 后降至 6 kΩ 的最低值。含 MCI 2020 的溶液中，钢筋电阻的波动范围较小，由 46 kΩ 下降至最低时的 17 kΩ。

上述研究表明，MCI 2020M 在已锈蚀的结构中作用效果最显著，而在与氯盐同时作用时效果并不明显。

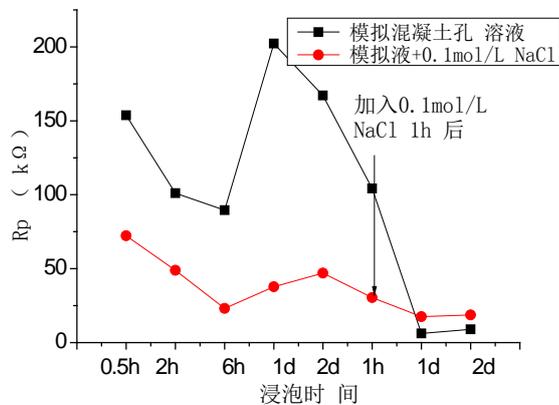


图 1.4 含 MCI2020M 的模拟液中加入氯离子对钢筋腐蚀电阻的影响

## 二、混凝土结构中 MCI2020M 对钢筋的腐蚀抑制作用

### 2.1 实验方法

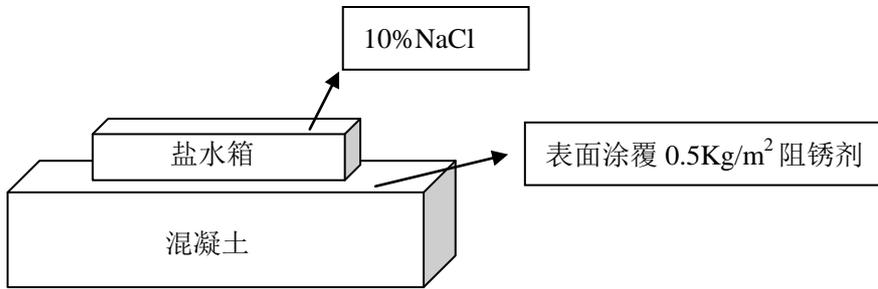


图 2.1 实验装置

实验示意如图 2.1 所示，混凝土成型一周后，在其表面涂覆  $0.5\text{Kg/m}^2$  Cortec 公司 MCI2020M 阻锈剂，再过一周后在涂覆阻锈剂的混凝土表面粘结一个水槽，用于盛放盐水，以便盐水渗透进入混凝土内部，同时考察涂覆型阻锈剂对钢筋耐腐蚀性能的影响。采用干湿循环的方式使盐水渗入混凝土内部，两天盛满盐水，两天干燥为一个循环。为保持干湿循环不受外界气候变化影响，混凝土试件一直放置于标准干养室中，温度  $40^\circ\text{C}$ ，湿度  $50\%$ 。每隔一个循环测试一次线性极化和电化学阻抗谱。

### 2.2 结果与讨论

#### 2.2.1 线性极化

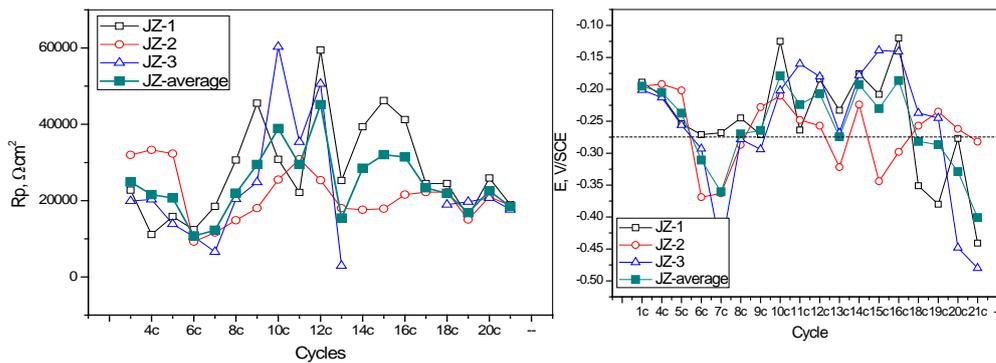


图 2.2 基准砂浆中钢筋线性极化电阻和腐蚀电位变化图

图 2.2 为基准混凝土中钢筋的线性极化电阻与腐蚀电位随循环周期的变化。空心为三组平行试验数据，实心为三组数据所得平均值。18 个干湿循环后，延长了测试前混凝土在水中的浸泡时间，减小因混凝土自身干湿状态的差异性导致电化学测试数据的波动。从钢筋的线性极化电阻大小可以看出，平行样间的波动性减小，从 18 个循环开始，极化电阻逐渐减小，腐蚀电位显著降低，最低达到

-450mV 左右，表明基准钢筋表面钝化膜有腐蚀破裂的倾向。通过 stern-Geary 公式  $i=B/R_p$ ,取  $B=52mV$  计算第 21 个循环时钢筋的腐蚀速率，可以得出钢筋表面的平均腐蚀速率在  $0.13\mu A/cm^2$  左右，钢筋处于钝化膜破裂的临界点。而实际通过线性极化所测的电阻包括混凝土电阻和钢筋表面因其他极化原因所产生的电阻，故实际引起钢筋表面腐蚀的电荷转移电阻远小于 20000 欧，所以钢筋表面的腐蚀电流密度大于  $0.13\mu A/cm^2$ ,表明钢筋表面已经处于钝化膜破裂状态。

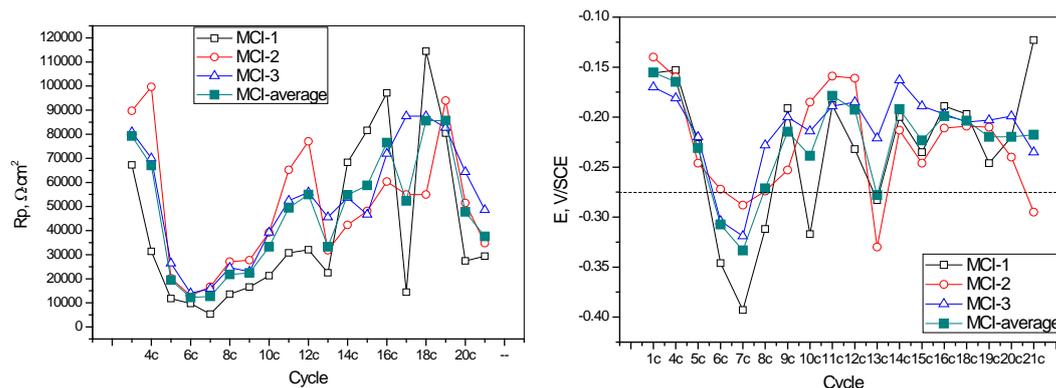


图 2.3 涂覆 MCI2020M 阻锈剂混凝土中钢筋线性极化电阻和腐蚀电位变化

图 2.3 为涂覆 MCI2020M 后钢筋的线性极化电阻与腐蚀电位随循环周期的变化，初始状态下，涂覆 MCI 后钢筋的线性极化电阻和腐蚀电位均较大，但其降低幅度也非常大。6 个循环后极化电阻降低 80% 左右，腐蚀电位也随之显著降低。之后线性极化电阻和腐蚀电位均又逐渐增加，直到维持相对稳定状态，此时钢筋腐蚀的电流密度均小于  $0.1\mu A/cm^2$ ，腐蚀电位也大于 -275mV，表明涂覆阻锈剂钢筋仍处于钝化状态。

### 2.2.2 电化学阻抗谱

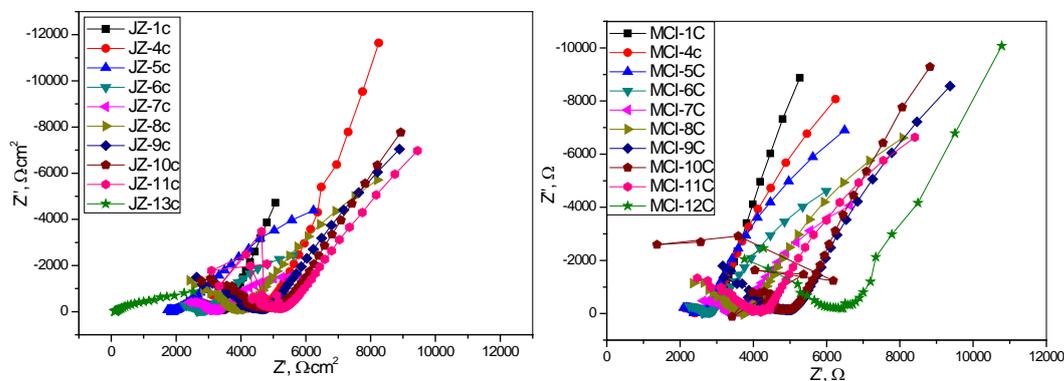


图 2.4 砂浆中钢筋电化学阻抗谱随干湿循环的变化

图 2.4 所示分别为基准砂浆以及涂覆阻锈剂后混凝土中钢筋电化学阻抗谱变

化。从图中可以看出阻抗谱 Nyquist 图中至少有两个容抗弧或电解质扩散，高频容抗弧可能对应混凝土电阻，低频容抗弧对应钢筋表面电阻变化情况或扩散过程对应电解质在砂浆中的传输。从图中的变化规律可以看出，涂覆 MCI2020M 后，混凝土基体电阻不断增加，表明 MCI 可以增强混凝土的密实性，抑制侵蚀性介质向混凝土内部的渗透。同时低频容抗弧的不断增大也表明钢筋的电阻逐渐增大，可能的原因是由于 MCI2020M 迁移至钢筋表面，在钢筋表面形成吸附膜，抑制钢筋的腐蚀电化学反应。

上述研究表明，通过混凝土表面涂覆 MCI2020M，可以有效降低钢筋腐蚀的速率，提高耐腐蚀性能。而且经过干湿盐水循环后，MCI2020M 不仅可以抑制钢筋表面电化学反应，同时可以增强混凝土基体电阻，增强基体抗渗性。