



牺牲阳极方式电化学脱盐效率影响因素

奚圣海¹, 李森林², 刘云飞¹, 吕忆农¹

(1. 南京工业大学, 江苏 南京 210009; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 外加电流方式电化学脱盐能够有效脱除混凝土内的有害氯离子, 但对预应力钢筋混凝土结构不适用, 存在可能引起氢脆和减小握裹力的危险以及安装施工、管理不方便和在脱盐期间现场需要有专业技术人员进行操作等缺点; 使用牺牲阳极方式电化学脱盐法将钢筋混凝土内的有害氯离子脱除出来, 可以克服上述缺点, 既适用于普通混凝土, 又适用于预应力混凝土。研究通电时间、脱盐装置位置以及取样深度对牺牲阳极方式电化学脱盐效果的影响。结果表明, 牺牲阳极方式电化学脱盐在工作 3 个月后仍能有效地将混凝土内的氯离子迁移到外部的活性填充材料中, 且在距阳极 500 mm 处脱盐效率最高, 能达到脱除混凝土试件内有害氯离子的目的, 其中混凝土试件表层脱盐效率最高可达 60% 左右。

关键词: 氯盐腐蚀; 外加电流; 牺牲阳极; 电化学脱盐; 活性填充料

中图分类号: TU 528.07

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0046-04

Factors influencing efficiency of electrochemical chloride extraction by sacrificial anode

Xi Sheng-hai¹, Li Sen-lin², Liu Yun-fei¹, Lyu Yi-nong¹

(1. Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Impressed current electrochemical chloride extraction is effective enough to eliminate the harmful chloride ion in concrete, but it has shortcomings of not applying to the prestressed reinforced concrete structure, being likely to cause the danger of hydrogen embrittlement and decrease bond stress, being inconvenient in installation construction management and needing professional personnels to operate during field desalination. The way of using sacrificial anode electrochemical chloride extraction to move out harmful chloride ion in the reinforced concrete can overcome the above disadvantages, and it is not only suitable for ordinary concrete, but also suitable for prestressed concrete. This paper studies the influence of sacrificial anode electrochemical desalting effect from three aspects including conduction time, desalination device location and sampling depth. The results show that the sacrificial anode electrochemical chloride extraction can effectively remove the chloride ion in the concrete out of the active filler material after 3 months, and at 500 mm from the anode with the highest the desalting efficiency. This method can remove harmful chloride ion out of the concrete sample, and concrete specimen surface desalting efficiency can be raised up to about 60%.

Keywords: chlorine salt corrosion; impressed current; sacrificial anode; electrochemical chloride extraction; active filling material

氯盐会引起钢筋混凝土结构的钢筋锈蚀, 从而导致构件开裂、结构物变形、位移, 甚至突然坍塌, 时刻威胁着钢筋混凝土结构的使用安全^[1]。

目前对钢筋混凝土结构的脱盐方法主要是外加电流方式电化学脱盐。该方法能够脱除有害氯离子, 使钢筋表面重新恢复钝化, 是处理由于氯

离子侵蚀引起的钢筋腐蚀的最有效的方法之一。国内外大量研究表明外加电流方式电化学脱盐保护技术也是一种非常有效的修复技术, 特别是能消除由新老混凝土产生的环阳极腐蚀^[1]。但外加电流方式电化学脱盐也有其局限性, 由于该技术需要的电流较大 ($1 \sim 3 \text{ A/m}^2$), 对混凝土与钢筋

收稿日期: 2014-07-21

作者简介: 奚圣海 (1989—), 男, 硕士, 从事钢筋混凝土结构和钢结构腐蚀破坏研究。

之间的握裹力有一定的影响, 并且会产生析氢反应, 因而此法不适用于预应力混凝土结构^[2], 而且具有现场施工、管理不方便, 在脱盐期间现场需要有专业技术人员进行操作等缺点。

针对外加电流方式电化学脱盐存在的问题和缺陷, 开展了牺牲阳极方式电化学脱盐试验研究。该方法直接将牺牲阳极安装到试件表面, 安装施工简单, 且脱盐期间无需人员操作, 不仅可以应用于普通钢筋混凝土结构, 亦可用于预应力钢筋混凝土结构, 且可定期更换。

1 试验

1.1 原料与仪器

水泥: PO42.5 水泥 (表 1); 砂: 南京本地Ⅱ区

中砂, 细度模数为 2.5; 水: 南京市自来水; 钢筋: 规格为 $\phi 10\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 与 $\phi 10\text{ mm} \times 1\ 100\text{ mm}$ 光圆钢筋; 牺牲阳极: $400\text{ mm} \times 19\text{ mm} \times 9.5\text{ mm}$ 带状阳极; 填充料: 保持牺牲阳极活性的填充料; 万用表和电阻率仪等。

1.2 试件成型与养护

按中华人民共和国行业标准 JTJ 270—1998《水运工程混凝土试验规程》^[3] 以水灰比 0.45:1、胶砂比 1:2.2 的配比, 成型含氯盐 5%, 尺寸 $1\ 200\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的钢筋混凝土试件, 中心位置布置 $\phi 10\text{ mm}$ 双层网状钢筋, 在钢筋端头处引出导线, 用绝缘胶带封好, 并用万用表检查电连接性。试件在自然条件下养护 28d 后进行氯离子脱除试验。水泥的化学组成和基本性能见表 1。

表 1 水泥的化学组成和基本性能

质量分数/%				比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	初凝时间/min	终凝时间/min	标准稠度用水量/%	28 d 抗压强度/MPa
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO					
20.4	40.7	3.4	64.7	360	135	250	25	63

1.3 牺牲阳极方式电化学脱盐试验

在试件一端安装牺牲阳极, 将牺牲阳极表面打磨光亮, 用酒精擦拭干净, 两端引出导线, 用绝缘胶带封好, 放入 PVC 模具中, 填入阳极活性填充料。将阳极引出线与钢筋引出线用开关连接, 并在钢筋混凝土表面将钢筋网交点的位置标出, 进行编号, 具体模型见图 1。由于采用牺牲阳极方式进行脱盐, 产生的电流较小, 所以对预应力钢筋混凝土结构同样是适用的。

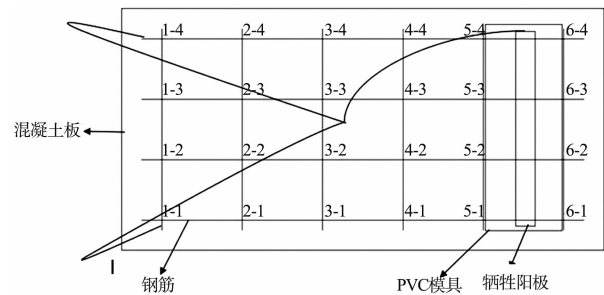


图 1 混凝土试件氯离子脱除试验模型

1.4 氯离子质量分数测定

氯离子脱除试验前和过程中每月测定试件中氯离子的质量分数 (相对于混凝土质量), 参考

JTJ 270—1998^[3] 的混凝土中砂浆的水溶性氯离子含量测定的方法, 测定出试件内氯离子的质量分数。并按公式 (1) 计算脱盐效率, 评价氯离子的脱除效果。氯离子脱除试验半年, 使用荧光分析仪 (ARL ADVANT XP) 测定活性填充料中氯离子质量分数 (相对于填充料质量)。

$$a = \left(1 - \frac{w_i}{w_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: a 为脱盐效率 (%), w_i 为脱盐后砂浆内氯离子质量分数 (%), w_0 为脱盐前砂浆的氯离子质量分数 (%)。

2 结果与分析

2.1 时间对混凝土试件内氯离子脱除效果的影响

为了探讨通电时间与混凝土试件内氯离子脱除效果之间的关系, 分别在通电 30、60、90、120、150 d 时在混凝土试件 4-3 位置附近取样, 测得氯离子质量分数和脱盐效率变化 (图 2)。

由图 2 可以看出: 随着脱盐时间的延长, 混凝土试件内氯离子质量分数逐渐降低, 脱盐效率

亦随之提高。混凝土内剩余氯离子含量在前 90 d 减小速率较快, 90 d 之后氯离子脱除速率明显减小。从脱盐效率变化图中可以看出脱盐效率在前 90 d 升高速度较快, 90 d 之后升高速度开始减缓, 这是由于随着时间的延长, 混凝土板内剩余氯离子含量减小, 电阻率增大, 牺牲阳极提供的工作电流逐步减小所致, 工作电流变小, 氯离子的迁移速率也随之减小, 所以脱盐速率也就降低了。

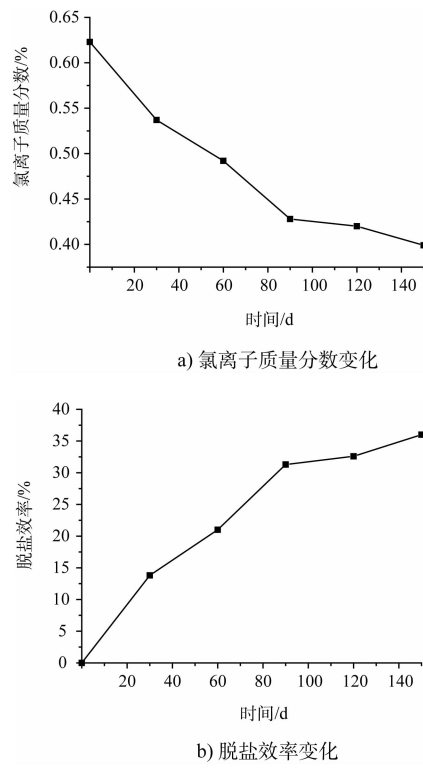


图 2 时间对混凝土试件氯离子脱除效果的影响

牺牲阳极在各月的平均工作电流大小见图 3, 混凝土板在氯离子脱除试验过程中的电阻率变化见图 4。通过图 3 可以看到牺牲阳极工作电流在氯离子脱除试验过程中逐步减小, 在工作 90 d 后电流有较大幅度的降低; 通过图 4 可以看出混凝土板的电阻率随着时间的延长逐步增大, 后期电阻率增大较明显, 这与图 2 中混凝土板内氯离子质量分数和脱盐效率的变化是一致的。

2.2 距离对混凝土试件内氯离子脱除效果的影响

为了探讨脱盐位置和阳极之间距离远近与混凝土试件内氯离子脱除效果之间的关系, 氯离子迁移试验 5 个月后, 在试件不同位置取粉样, 测得氯离子质量分数和脱盐效率见图 5。

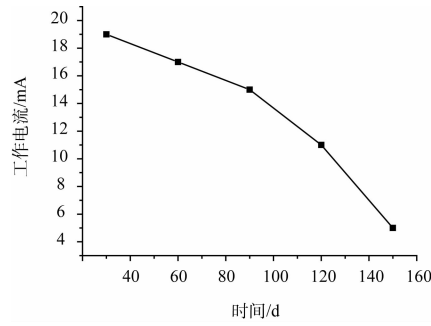


图 3 牺牲阳极工作电流

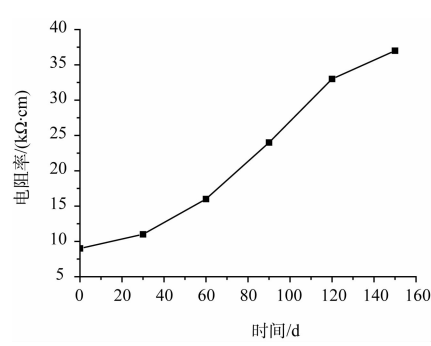


图 4 混凝土板电阻率

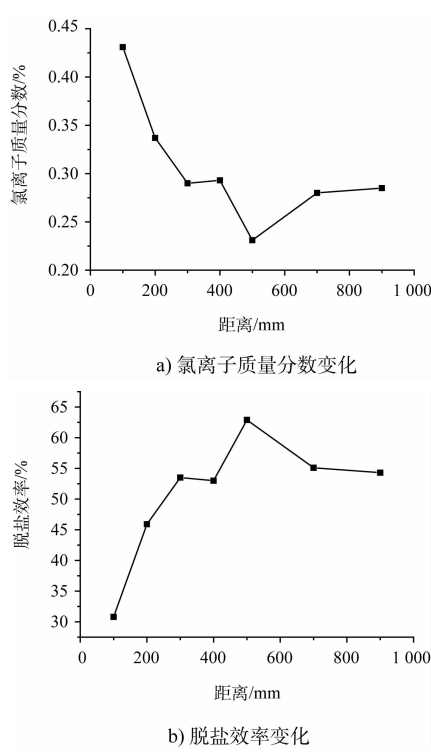


图 5 距离对混凝土试件氯离子脱除效果的影响

由图 5 可以看出, 混凝土试件内氯离子质量分数与距阳极远近的脱盐位置有关, 距离由远到近, 氯离子含量先减小后升高。可知脱盐效果与距离成反比, 所以氯离子含量先是减小, 但达到最低点后氯离子含量又升高, 这是由于离牺牲阳

极较近会有氯离子积聚的现象，迁移到牺牲阳极周围的氯离子并没有全部进入到活性填充料中，而是在阳极附近的混凝土内积聚。氯离子迁移效果最好的位置是距阳极 500 mm 左右，这对今后应用于工程中具有指导意义。从脱盐效率与距离关系图中也可以同样看出上述现象。

在氯离子迁移试验过程中，通过荧光分析仪 (ARL ADVANT XP) 测定保持牺牲阳极活性的填充料中氯离子的质量分数，测得填充料中氯离子质量分数为 0.211%，可以说明牺牲阳极确实可以将混凝土试件内的氯离子脱除，迁移到了活性填充料中。

2.3 取样深度对试件内氯离子脱除效果的影响

为了探讨脱盐深度与混凝土内氯离子脱除效果之间的关系，氯离子脱除试验 5 个月后，分别在砂浆试件上 7 处不同位置分 2 层取样，每层 10 mm。各位置内外层混凝土氯离子质量分数和脱盐效果见图 6。

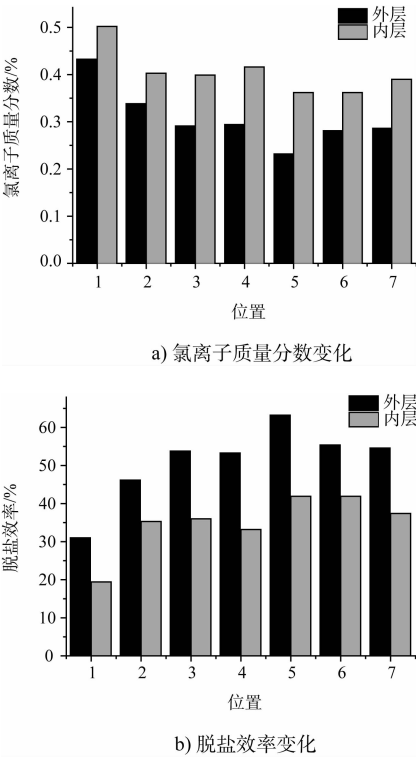


图 6 深度对混凝土试件氯离子脱除效果影响

由图 6 可知，混凝土试件上 7 个位置内层氯离子含量均比外层氯离子含量要高，即外层混凝土内氯离子脱除效率比内层混凝土内氯离子脱除效率要高。这是由于牺牲阳极安装在混凝土试件的表面，其对外层混凝土中氯离子有更大的迁移

力，外层混凝土中的氯离子能较快地脱离出混凝土进入到填充料中，因此最外层混凝土中的氯离子浓度急剧降低，脱盐效率最高可达 60% 左右；而在内层混凝土中，牺牲阳极对氯离子的迁移力小且混凝土试件较深处氯离子会迁移到内层中，造成氯离子在内层混凝土产生一定的淤塞效应，这种淤塞效应将不利于氯离子的进一步排出^[4]。所以，外层氯离子含量减小更明显，脱盐效率更高。

3 结论

1) 牺牲阳极方式电化学脱盐工作运行 3 个月仍能有较高的脱盐效率，但是 3 个月之后由于混凝土板的电阻率增大，导致牺牲阳极工作电流减小，所以脱盐效率也有所下降。但只要牺牲阳极能产生工作电流，就会源源不断地将混凝土试件内的氯离子脱除，迁移到填充料中。

2) 脱盐效率与脱盐位置距阳极的距离有明显的关系，距阳极 500 mm 处脱盐效率最高；距离超过 500 mm，由于牺牲阳极迁移力的减小距阳极越远脱盐效率就越低；距离小于 500 mm，由于阳极附近位置氯离子的聚集，离阳极越近氯离子含量越高。

3) 牺牲阳极方式电化学脱盐对混凝土试件的表层具有更好的脱盐效果，最高可以达到 60% 以上，效果显著。

4) 将牺牲阳极安装在混凝土试件表面，用活性填充料进行保护，可以有效地脱除混凝土试件内的氯离子，具有很好的工程应用前景，可以进行深入的系统研究。

参考文献：

[1] 陈龙,李海洪,方翔. 大气区被氯盐污染的钢筋混凝土外加电流阴极保护电流分散的研究[J]. 水运工程, 2012(8): 38-42.

[2] 沈尔卜,方达经,王亚平,等. 钢筋混凝土结构电化学脱盐效率的影响因素研究[J]. 腐蚀研究, 2013, 27(3): 40-44.

[3] JTJ 270—1998 水运工程混凝土试验规程[S].

[4] 郑靓,韦江雄,余其俊,等. 电化学除盐中混凝土内氯离子的迁移特征研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(2): 42-45.