**中国工程建设协会标准**

**混凝土结构耐久性电化学修复技术规程**

Technical specification for electrochemical durability rehabilitation of concrete structures

(征求意见稿)

XXXX出版社

201X年

**中国工程建设协会标准**

**混凝土结构耐久性电化学修复技术规程**

Technical specification for electrochemical durability rehabilitation of concrete structures

(征求意见稿)

**CECS XXXX：201X**

主编单位：

审批单位：

施行日期：

XXXX出版社

201X年

前言

根据中国工程建设标准化协会[2016]建标协字038号文《关于印发<2016 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》的要求，由浙江大学会同有关的科研、高校及企业单位共同制定而成。

本规程的制定总结了近年来我国混凝土结构耐久性电化学修复技术的研究成果和应用实践经验，参考了国内外相关标准。在制定过程中，规程制定组进行了大量的调研工作，与相关的标准进行了协调，对主要问题进行了反复讨论，并经广泛征求意见后定稿。

本规程主要内容包括总则、术语和符号、基本规定、外加电流阴极保护、牺牲阳极阴极保护、电化学再碱化、电化学除氯、电化学沉积法、双向电迁技术等内容。

本规程的由中国工程建设标准化协会混凝土结构专业委员会归口管理，由浙江大学负责解释。在执行过程中如有意见或建议，请寄送解释单位（地址：浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号，邮政编码：310058）。

**主编单位：**

**参编单位：**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **主要起草人：** |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  | （以下按姓氏笔画排序） |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

制定说明

国内外混凝土结构耐久性设计起步时间较晚，大量混凝土结构均存在着不同程度的耐久性问题，其中，钢筋锈蚀是导致混凝土结构性能退化的最主要原因，结构性能变化与混凝土中钢筋锈蚀发展过程有着密切的关系。如何对已发生耐久性能劣化的混凝土结构进行合理可行的修复，以延长其使用寿命，也已成为国内外迫切需要解决的问题。目前，对于已发生钢筋锈蚀的混凝土结构，国内外学者一致公认电化学修复方法是使混凝土结构中钢筋立即停止锈蚀的唯一无损修复方法。但是，由于电化学修复技术存在钢筋氢脆的风险，无法在受力构件中进行应用，大大限制了电化学修复技术在混凝土结构性能提升中的应用范围。这也导致了目前国内没有一本系统的针对混凝土结构整个生命历程中不同劣化特征的电化学修复技术规程。

在国内外创造性地提出了钢筋氢脆控制方法，解决了目前电化学修复技术的关键技术缺陷，极大地拓展了电化学修复技术的应用范围。目前，相关的电化学修复技术已成功应用于杭州湾跨海大桥、舟山跨海大桥等重大基础设施。

本技术规范的编制将有力推广之前存在技术壁垒（钢筋氢脆）的电化学修复技术，有效延长结构的服役寿命，极大降低结构后期维护所带来的巨大财政支出，经济和社会效益显著。

目次

[前言 i](#_Toc497301579)

[制定说明 ii](#_Toc497301580)

[目次 iii](#_Toc497301581)

[1 总则 1](#_Toc497301582)

[2 术语与符号 4](#_Toc497301583)

[2.1 术语 4](#_Toc497301584)

[2.2 符号 6](#_Toc497301585)

[3 基本规定 7](#_Toc497301586)

[4 外加电流阴极保护 12](#_Toc497301587)

[4.1 一般规定 12](#_Toc497301588)

[4.2 系统设计 12](#_Toc497301589)

[4.3 安装与调试 20](#_Toc497301590)

[4.4 质量控制与检验 22](#_Toc497301591)

[4.5 维护管理 24](#_Toc497301592)

[5 牺牲阳极阴极保护 25](#_Toc497301593)

[5.1 一般规定 25](#_Toc497301594)

[5.2 系统设计 25](#_Toc497301595)

[5.3 安装与调试 27](#_Toc497301596)

[5.4 质量控制与检验 28](#_Toc497301597)

[5.5 维护管理 29](#_Toc497301598)

[6 电化学再碱化 30](#_Toc497301599)

[6.1 一般规定 30](#_Toc497301600)

[6.2 系统设计 30](#_Toc497301601)

[6.3 安装与调试 31](#_Toc497301602)

[6.4 质量控制与检验 34](#_Toc497301603)

[6.5 维护与管理 35](#_Toc497301604)

[7 电化学除氯 36](#_Toc497301605)

[7.1 一般规定 36](#_Toc497301606)

[7.2 系统设计 36](#_Toc497301607)

[7.3 安装与调试 38](#_Toc497301608)

[7.4 质量控制与检验 39](#_Toc497301609)

[7.5 维护管理 41](#_Toc497301610)

[8 电化学沉积 42](#_Toc497301611)

[8.1 一般规定 42](#_Toc497301612)

[8.2 系统设计 42](#_Toc497301613)

[8.3 安装与调试 43](#_Toc497301614)

[8.4 质量控制与检验 45](#_Toc497301615)

[8.5 维护管理 45](#_Toc497301616)

[9 双向电迁 46](#_Toc497301617)

[9.1 一般规定 46](#_Toc497301618)

[9.2 系统设计 46](#_Toc497301619)

[9.3 安装与调试 49](#_Toc497301620)

[9.4 验收与检验 50](#_Toc497301621)

[9.5 维护管理 52](#_Toc497301622)

[附录 A 钢筋混凝土电化学修复技术参数 53](#_Toc497301623)

[A.1 阴极保护 53](#_Toc497301624)

[A.2 电化学再碱化 53](#_Toc497301625)

[A.3 电化学除氯 53](#_Toc497301626)

[A.4 电化学沉积 54](#_Toc497301627)

[A.5 双向电迁 54](#_Toc497301628)

[附录 B 施工记录 55](#_Toc497301629)

[本规程用词用语说明 57](#_Toc497301630)

[引用标准名录 58](#_Toc497301631)

1. 总则
	* 1. 为统一混凝土结构电化学修复设计、施工、检验和维护的技术要求，提高混凝土结构的耐久性，使混凝土结构的耐久性电化学修复做到技术先进，经济合理，安全适用，确保质量，制定本规程。
2. 混凝土结构在其使用过程中长期受到外界服役环境中有害介质的侵蚀，其耐久性能受到严重影响，如何对已发生病害的混凝土结构进行修复，延长其使用寿命，已成为一个亟待解决的世界性课题。目前，电化学修复技术作为国内外主要采用的腐蚀混凝土结构修复方法之一，已越来越受到业界的重视，并逐渐成为一套可行、有效的腐蚀混凝土结构修复技术方法。

电化学修复技术最早于20世纪70年代中期由美国联邦公路局提出，90年代开始，欧美发达国家投入大量人力、物力对其进行研究，我国在此方面研究起步较晚。欧洲标准委员会分别于2004年和2011年对电化学再碱化法和电化学除氯法提出了推荐技术规程CEN/TS 14038-1和CEN/TS 14038-2，日本也于2002年制订了相应的标准规范。实际上，我国于上世纪80年起就逐步从事电化学防腐蚀技术的研究，在技术上紧跟欧美等先进国家，其中阴极保护和电化学除氯技术在我国海港码头、跨海大桥上已逐渐开始应用。虽然目前电沉积技术在我国还没有工程应用，但只有制订了相应的规范，才能推动该技术应用。此外，随着与国际的接轨，到国外或外国公司到我国承包类似工程越来越多。

2012年，我国住房和城乡建设部推出《混凝土结构耐久性修复与防护技术规程》(JGJ/T 259)，交通运输部推出《海港工程钢筋混凝土结构电化学防腐蚀技术规范》(JTS 153-2)，为电化学修复技术的推广具有重要意义。但是，JGJ/T 259仅对电化学修复技术的工程应用提出了基本的操作说明和作业指导，关于混凝土电化学修复设计、施工、检验和维护的技术要求尚待细化。JTS 153-2对主要侧重于针对海港工程钢筋混凝土结构的电化学防腐技术规定，对“牺牲阳极阴极保护”、“外加电流阴极保护”、“电化学除氯”和“电沉积技术”等有关内容进行了细化。未将电化学再碱化和双向电迁技术包含在内，本规程进一步丰富电化学修复技术，特别对提高侵蚀混凝土结构的电化学修复效率，降低修复后混凝土结构的安全隐患提出了相关技术。

**1.0.2** 本规程适用于既有钢筋混凝土结构耐久性电化学修复工程的设计、施工、检验和维护，新建钢筋混凝土结构可参照本规程使用。

1. 本规程的适用范围是新建和既有混凝土结构耐久性的修复，强调影响结构耐久性的因素，对由于耐久性引起的承载能力不足而需进行的加固问题，须按照有关加固规范与本规程的规定并行处理。

一般来说，电化学耐久性修复可分为作为：（1）预防保全措施而实施的预防性修复和（2）对外观发生损伤或出现异常而实施修复。例如，以由氯离子侵蚀造成的早期劣化作为例子来说明，前者是指针对腐蚀劣化过程的潜伏期，氯离子侵入对外观变化并不明显时，混凝土结构所采用的较为可靠的防腐蚀措施；后者是指针对一般情况下从腐蚀劣化过程的进展期到劣化期，外观上已经出现腐蚀开裂的异常结构，能使受损的混凝土结构耐久性得以提升的方法。

电化学耐久性修复方法在混凝土的表面或外部设置的阳极和混凝土内部的钢筋之间输入直流电流，利用钢筋表面或是混凝土内部产生电化学反应的方法。主要包括阴极保护、电化学再碱化、电化学除氯、电化学沉积和双向电迁等方法。这些电化学耐久性修复方法的主要作用在于，在混凝土结构劣化发生进展时，当混凝土结构已经出现明显劣化、结构的耐久性能较初建时有所下降时，不仅可适用于实施修复，而且对于将来结构劣化实施预防保全措施的预防性修复也适用；并且对于新建的混凝土结构预防性修复也同样适用。

电化学耐久性修复方法与混凝土表面处理方法、裂缝修复方法等其他方法一样，选择合适的材料、设计和施工对于达到想要的修补效果是非常重要的。电化学耐久性修复过程中，混凝土结构可能出现以下几种问题：①受碱性骨料反应的影响而导致混凝土结构劣化②过量的通电可能使钢筋周边的混凝土被软化，导致混凝土与钢筋的粘结强度下降，③ PC钢材可能出现氢脆现象。对以上问题进行电化学防腐蚀工法处理时，必须充分考虑、本规程适用于普通水泥混凝土结构的电化学。另外，关于今后新开发的电化学耐久性修复方法，根据实例和适当的实验，如果其性能能够得到认可，也同样适用本规程。

**1.0.3** 混凝土结构耐久性电化学修复的设计、施工、检验和维护，除应符合本规程的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

1. 执行本规范涉及国家现行有关规范较多，有关部门己制定的混凝土结构现场检测标准、混凝土结构耐久性评定标准中，对如何评估结构耐久性现状已有详细描述，这些工作构成了科学修复的基础。目前混凝土结构加固等相关规范中部分也涉及耐久性内容，本条主要强调应与上述内容相协调。因此，对混凝土结构进行的电化学防腐蚀设计、施工、验收和维护管理，除应符合本规范规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定，采取相应的防护措施。尤其对极端严重腐蚀环境下的结构耐久性，应与地方或行业中相关的防腐蚀技术规范等内容相符合。
2. 术语与符号
	1. 术语
		1. 电化学修复 electrochemical rehabilitation

对混凝土结构内部钢筋施加一定的阴极电流，通过改变钢筋的电位或钢筋所处的腐蚀环境，抑制钢筋腐蚀的修复和保护方法。阴极保护、电化学再碱化、电化学除氯、电化学沉积和双向电迁等统称为电化学修复。

* + 1. 外加电流阴极保护 impressed current cathodic protection

由直流电源设备通过辅助阳极提供阴极电流，使钢筋释放电子的阳极反应减缓或停止的电化学修复技术。

* + 1. 牺牲阳极阴极保护 sacrificial anode cathodic protection

由牺牲阳极提供阴极电流，使钢筋释放电子的阳极反应减缓或停止的电化学修复技术。

* + 1. 电化学再碱化 electrochemical realkalization

给钢筋短期施加密度较大的阴极电流，提高钢筋周围已中性化（包括碳化）混凝土的pH值，使钢筋再钝化的电化学修复技术。

* + 1. 电化学除氯 electrochemical chloride removal / extraction

短期内施加阴极电流，通过电迁移作用降低混凝土中氯离子含量的电化学修复技术。

* + 1. 电化学沉积 electrodeposition technique

通过短期内施加一定的阴极电流产生难溶性物质，填充混凝土裂缝并封闭混凝土表面以阻止腐蚀介质继续侵入的电化学修复技术。

* + 1. 双向电迁 bidirectional electromigration

通过短期内施加一定的阴极电流，使阳离子阻锈基团在较短时间内电迁到钢筋表面，同时降低混凝土内部氯离子含量，达到抑制钢筋锈蚀和氢脆的电化学修复技术。

* + 1. 阳极系统 anode system

实施电化学修复技术时，设置于混凝土表面或附近，给钢筋提供阴极电流的各材料组成的统称。

* + 1. 辅助阳极 auxiliary anode

使阴极电流流向电解质的电极。

* + 1. 牺牲阳极 sacrificial anode

依靠自身腐蚀使与之耦合的阴极获得保护的金属或合金材料。

* + 1. 极化 polarization

电流流经钢筋与混凝土界面时，钢筋电位发生变化的现象。

* + 1. 氢脆 hydrogen embrittlement

氢原子渗入钢筋使其韧性或延性下降的现象。

* + 1. 析氢电位 hydrogen evolution potential

在电化学修复过程中，钢筋上产生氢气析出时的电位。

* 1. 符号

|  |  |
| --- | --- |
| *W——* | 牺牲阳极的质量 |
| *Eg——* | 牺牲阳极的消耗率 |
| *I——* | 平均保护电流 |
| *In——* | 各阴极保护单元的保护电流 |
| *If——* | 其他附加保护电流 |
| *in——* | 各阴极保护单元的初期保护电流密度 |
| *t——* | 保护年限 |
| *f——* | 牺牲阳极的利用系数 |
| *Pj——* | 单台直流电源的功率 |
| *Ii ——* | 保护单元所需电流量 |
| *R——* | 电缆电阻 |
| *Ri——* | 保护单元回路电阻 |
| *η——* | 直流电源的效率 |
| *P——* | 直流电源的总功率 |
| *V——* | 电缆的允许压降 |
| *S——* | 电缆芯横截面积 |
| *ρ——* | 电缆芯材电阻率 |
| *L——* | 电缆长度 |
| *sn——* | 各阴极保护单元内表层钢筋面积 |

1. 基本规定
	* 1. 混凝土结构在下列情况下应进行耐久性电化学修复：
			1. 结构已出现一定的耐久性损伤;
			2. 耐久性评定不满足预定设计使用年限要求的结构;
			3. 达到设计使用年限拟继续使用，经评估需要时;
			4. 结构进行维修改造、改建或用途及使用环境改变时;
			5. 结构经耐久性评定需要加强耐久性措施。
		2. 混凝土结构耐久性电化学修复技术措施的选择，应根据结构物现状、腐蚀机理、目标使用年限，技术措施的施工条件、维护管理的技术要求、经济性以及对周边环境影响等因素综合论证确定。
		3. 混凝土结构耐久性电化学修复应根据损伤原因与程度、工作环境、结构的安全性和耐久性要求等因素，按下列基本工作程序进行：
			1. 耐久性调查、检测与评定;
			2. 电化学修复设计;
			3. 电化学修复施工;
			4. 检验与验收;
			5. 维护与管理。
		4. 耐久性调查、检测与评定应根据国家现行相关标准进行并由具有相应工程经验的单位承担。
2. 与一般工程相比，混凝土结构耐久性调查、检测与评定、修复设计与施工的专业性较强，应由具有相应工程经验的单位承担。混凝土结构耐久性评定有关内容可参考国家现行标准《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220-2007)执行。
	* 1. 电化学修复应进行专项设计，并应符合下列规定。
			1. 设计前，应根据需要进行下列相应技术资料的调查：
				1. 原始设计资料（设计图纸、地质勘察报告、气象水文资料、结构类型、工程结构用途、建筑物的相互关系等）；
				2. 施工资料（混凝土配合比、胶凝材料组成及含量、骨料品种、外加剂品种、留盘试件强度、施工工艺等）；
				3. 混凝土结构的建筑物使用历史及维修改造情况。
			2. 设计前应进行结构使用条件调查和结构耐久性现状检测：
				1. 潮沙、温度、湿度、降水量；
				2. 侵蚀性气体（二氧化硫、酸雾、二氧化碳）、液体（各种酸、碱、盐）和固体（硫酸盐、氯盐、碳酸盐等）其他侵蚀介质等的影响范围及程度，必要时应测定有害成份含量；
				3. 混凝土外观损伤类型、位置、大小；混凝土裂缝情况及渗漏水情况；混凝土表面干湿状态、有无污垢；
				4. 混凝土结构型式、外型尺寸、配筋情况、保护层厚度及钢筋电连接性等；
				5. 混凝土强度、弹性模量、钢筋保护层厚度、吸水率、氯离子含量、碳化深度、钢筋锈蚀状况、碱骨料反应、电阻率及钢筋自然腐蚀电位等。
			3. 电化学修复设计应根据不同结构类型及其环境作用等级、耐久性损伤原因及类型、预期修复效果、目标使用年限等，制定相应的修复设计方案，并应包括下列内容：
				1. 设计计算书；
				2. 保护系统平面布置及安装详图；
				3. 材料和设备性能要求及数量；
				4. 安装、调试、试运行、运行管理及维护细则。
3. 钢筋混凝土结构所处的环境条件、结构和构造、混凝土状况等资料，是进行电化学修复设计的重要基础，也是选择电化学修复方法和对电化学修复效果进行评估的依据。本条明确了进行混凝土结构耐久性修复时应综合考虑的因素，并规定了进行耐久性修复的基本工作程序，可根据工程的重要性、规模、复杂程度等特点制定详细的工作流程。应在耐久性调查、检测与评估的基础上进行耐久性修复设计。电化学修复前，应提供修复所需全部技术资料，特别应提供结构耐久性现状鉴定报告。混凝土结构耐久性电化学修复设计方案作为技术性文件，应包括工程概况、建造年代及条文规定的内容，但格式可以不统一。
	* 1. 实施电化学修复时，混凝土结构表面应进行预处理，破损区域应进行必要修复。
4. 对于不同裂缝形式、宽度和所处环境的破损区域，参考《港口水工建筑物修补加固技术规范》（JTS 311-2011）附录B。
	* 1. 钢筋混凝土结构应根据构件类型、所处腐蚀环境和选用阳极的种类，划分为若干独立的修复单元。每个单元内的阳极系统应为本单元内的钢筋提供均匀的阴极电流。保护单元内钢筋之间、钢筋与金属预埋件之间的电阻均应小于1.00Ω。
5. 在一座海港工程钢筋混凝土结构物中，各构件的湿度、氯盐污染程度、保护层厚度和几何尺寸等常有差异，从而造成钢筋自腐蚀电位和混凝土电阻存在较大的差异。为使电化学防腐保护连续有效，将钢筋周围环境存在显著差异的各个区域，分成彼此独立的单元，并与相应的阳极系统，构成独立的电流回路。
	* 1. 含有碱活性骨料或无金属护套的预应力高强钢筋的结构采用电化学修复技术时，应进行专项论证。

条文说明：环氧涂层钢筋是先在工厂流水线上喷涂，然后在工程现场切断、弯曲再组成笼，各环氧涂层钢筋间缺乏电连续性。环氧涂层钢筋在运输、存放、加工、组装、浇筑于混凝土的全过程中难免产生涂层破损，如果采用阴极保护，没有电连接性钢筋的环氧涂层破损处必然会遭受严重杂散电流腐蚀。

* + 1. 当环境温度低于零摄氏度采用电化学修复技术时，应对待修复混凝土结构采取相应的保温措施。

条文说明：研究表明，电化学修复效率与环境温度正相关，在混凝土结构电化学修复过程中，当环境温度低于零摄氏度时，难以在安全电压范围内施加有效的阴极电流，严重降低电化学修复效率，并影响电化学修复效果。此时，应对混凝土结构采取有效的保温措施，合理控制电化学修复过程中电解质温度，以保证电化学修复达到预期修复效果。

* + 1. 在易燃、易爆气体环境中，电化学修复系统应满足防爆要求，备接线点应置于密闭的接线箱中。
		2. 结构环境作用等级的划分原则应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的规定。
		3. 对大型的、重要的或环境复杂的工程，在正式处理前，应在有代表的构件上进行试验。
		4. 施工单位应按本规范的有关设计规定对电化学修复施工质量进行控制与检验，验收时应提交下列资料：
			1. 设计文件及设计变更文件；
			2. 各种材料和设备出厂检验合格证、现场检验文件；
			3. 施工检查检测记录和调试记录；
			4. 施工记录；
			5. 施工图、竣工图和施工总结；
			6. 维护管理原则要求。
		5. 检验与验收应符合下列规定：
			1. 质量检验宜包括材料检验和实体检验：

材料检验：材料应提供型式检验和出厂检验报告，关键材料应进行进场复验。

实体检验：对重要结构、重要部位、关键工序，可在施工现场进行实体检验。

* + - 1. 工程验收应按现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》 GB 50300 的规定执行，应按分部、分项工程验收及竣工验收两个阶段进行。

分部、分项工程验收：在隐蔽工程和检验批验收合格的基础上，应提交原材料的产品合格证与质量检验报告单(出厂检验报告及进场复检验报告等)、现场配制材料配合比报告、施工过程中重要工序的自检验和交接检验记录、抽样检验报告、见证检测报告、隐蔽工程验收记录、分部工程观感验收记录、实体抽样检验验收记录等文件。

竣工验收：除应满足分部、分项工程验收的规定外，尚应提交竣工报告、施工组织设计或施工方案、竣工图、设计变更和施工洽商等文件。

* + 1. 电化学修复后应定期对结构的进行维护管理并进行复验，当复验结果与预期修复效果存在偏差时，应及时采取相关的措施。

条文说明：在电化学修复施工后对结构进行持续维护管理，为掌握其防腐蚀效果，保证修复后结构在剩余服役期间的使用性能具有重要作用。一般而言，通过日常检验和定期检验开展对应用电化学修复后的维护管理，当发现异常时，必须以详细检验为依据实施评价、判定。检验的内容因检验的目的而异。另外，检验频度因维护管理区分、结构的所处环境、应用的结构而有所不同。以阴阳保护为例，通常，最初一年1~2次，之后根据最初的检验结果，大概1～5年1次。除此之外，为了判断所应用的电化学修复是否充分发挥所期待的效果，还可使用其他监控技术手段来维护管理。例如：电化学防护是以混凝土中的钢筋腐蚀过程为对象，所以钢筋的电位以及通电时的电流和电压也成为监控的对象。在应用电化学修复时，为了确认防腐蚀效果，常利用监控装置的校对电极测量钢筋电位。通常在规定的检验时期内，技术人员要到现场测量钢筋的电位、电流、电压等数据；最近的新技术可自动测量到的数据通过线路输送到管理室并运用远程监视控制系统调整通电量和确认防腐蚀效果。

1. 外加电流阴极保护
	1. 一般规定
		1. 外加电流阴极保护可用于钢筋混凝土结构水位变动区及以上部位。
		2. 阴极保护系统不宜对其他构件和结构产生副作用。
		3. 直流电源输出电压大于24V时应采用预警保护措施。
2. 《安全电压》（GB 3805-83）中有关于安全电压的等级描述。“当电气设备采用了超过24V的安全电压时，必须采取防直接接触带电体的保护措施。”。
	* 1. 保护单元内的辅助阳极应满足电连续性，而不同保护单元的辅助阳极之间、辅助阳极和阴极保护的钢筋之间应满足电绝缘性。
		2. 混凝土浇筑时应有妥善措施保护钢筋的电连接性和埋设的参比电极及其他各种探头、电缆、接头完好。
3. 保证钢筋的电连接性是实施阴极保护的基本前提。新建工程在混凝土浇筑时就进行电连接处理是为以后更为方便地实施阴极保护。
	1. 系统设计
		1. 外加电流阴极保护系统应包括辅助阳极系统、直流电源、监控系统和电缆等。
		2. 辅助阳极系统应满足下列要求：
			1. 阳极材料的设计和选用，应满足设计寿命和电流承载能力的要求；
			2. 阳极系统应具有抗酸化能力且与混凝土粘结良好；
			3. 阳极系统应根据设计使用年限、使用条件、混凝土构件形式、材料性能和适用性综合确定。目前实践证实有效的阳极系统有导电涂层阳极系统和活性钛阳极系统，也可选用经实验室以及现场试验验证的新型阳极系统。常用阳极形式与布设见表4.2.2。

表4.2.2-1常用阳极形式与布设方式

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 阳极形式 | 布置方式 | 适用场合 | 常用阳极规格、型号 |
| 网状阳极 | 在混凝土浇筑前，通过塑料夹等直接与钢筋连接 | 构件主箍筋均已锈蚀，整面凿除保护层，适用于介质侵蚀性强，配筋较大的场合 | 混合金属氧化物涂层钛基阳极 |
| 构件表面开槽，用水泥基材料埋入 | 适用于构件遭受某一特定长条状腐蚀破坏的修补；当间隔开槽布设时，亦可用于其他场合 |
| 聚合物砂浆作为粘结材料布置于混凝土外表面 | 适用于同时需要结构加固和电化学修复的场所 | 碳纤维网格布 |
| 丝状阳极+面状次阳极 | 构件表面开槽，导电涂层将丝状主阳极浇筑于槽内，并涂布构件表面 | 适用于介质侵蚀型较轻，配筋量较小，且有装饰性要求的场合 | 镀铂钛丝、铜包铌镀铂丝 |
| 棒状阳极 | 钻孔，内插棒状阳极 | 适用于局部区域遭受氯离子污染的较大体积构件 | 表面涂覆金属氧化物的钛棒与钛管 |
| 带状阳极 | 通过导电涂层紧贴构件混凝土表面，布设于整个构件暴露面 | 适用于介质侵蚀型较轻，配筋量较小的结构 | 小网孔的混合金属氧化物涂层钛基阳极带条 |

1. 外加电流阴极保护系统在长期运行过程中会酸化阳极系统。因此，阳极系统应具有抵抗酸化能力。

外加电流阴极保护是一种用于氯盐侵蚀混凝土结构中控制钢筋腐蚀的保护技术。但是，外加电流阴极保护不能提高结构承载力。混凝土结构经可靠性鉴定或设计复核确定需要提高结构承载能力时，宜按外加电流阴极保护-结构加固复合技术(ICCP-SS)的相关规定进行设计、施工、检验和维护。

作为混凝土结构耐久性的保障策略，外加电流阴极保护和结构加固技术都具有一定的局限性。外加电流阴极保护技术可以抑制钢筋的腐蚀，但是无法恢复前期钢筋腐蚀导致的结构承载能力劣化。结构加固技术虽然可以提高或恢复结构承载能力，但不能从根本上解决混凝土外部环境或内部有害元素（如氯离子、硫酸根离子等）对钢筋的持续侵蚀。实际工程中已有很多结构不止一次地进行加固，出现屡修屡坏的情况。因此，在工程实践中往往需要同时进行结构加固与阴极保护，以达到标本兼治的结构修复和加固效果。然而，外加电流阴极保护和结构加固这两种技术分属结构工程和电化学两个学科，彼此拥有独立的材料系统、技术要求和设计方法。

外加电流阴极保护和结构加固技术的相似之处在于均通过在混凝土结构外部布置功能材料以实现彼此功能目标。碳纤维网格布具有轻质高强、耐腐蚀、耐疲劳、性能可设计等力学特性，是应用较为成熟的结构加固材料；同时具有优异的导电性和稳定的电化学特性，是一种性能优越的辅助阳极材料，可以将钢筋极化电位稳定地控制在免蚀区，从而有效抑制钢筋腐蚀。聚合物砂浆具有抗高温、高耐久性、高力学强度、高施工性、高体积稳定性、高抗渗性的特点，且与旧混凝土界面粘接较好。以此为基础，采用碳纤维网格布同时作为外加电流阴极保护的辅助阳极材料和结构加固材料，并采用聚合物砂浆作为粘结材料布置于混凝土外表面，可形成外加电流阴极保护-结构加固复合技术(ICCP-SS)。

外加电流阴极保护-结构加固复合技术(ICCP-SS) 的主要目的是减缓或停止混凝土结构中的钢筋腐蚀，并同时修复或提高结构承载能力。ICCP-SS技术适用于沿海及海洋、除冰盐和盐湖等环境中已出现一定耐久性损伤并需要提高承载力的盐害普通钢筋混凝土结构。对大型的、重要的或环境复杂的工程，在正式处理前，应在有代表的建筑物上进行试验。

外加电流阴极保护-结构加固复合技术的设计、施工、检验和维护应同时满足本规范第4章节外加电流阴极保护技术、《混凝土结构加固设计规范》GB50367以及国家现行有关标准的规定。采用ICCP-SS方法修复混凝土结构的设计使用年限，不宜超过25年；到期时，若重新进行可靠性鉴定认为该结构工作正常，可适当延长其使用年限。

此外，当采用聚合物砂浆和碳纤维网格布实现ICCP-SS技术时，具体实施还需注意以下技术要求：

1. 外加电流阴极保护-结构加固复合系统应包括复合阳极系统、直流电源、监测系统和电缆等；
2. 直流电源、监测系统和电缆等应满足第4章节外加电流阴极保护技术的要求；
3. 复合阳极系统应根据设计使用年限、使用条件、构件形式、保护单位的划分、保护电流的分布、材料性能和适用性综合确定，并符合下列规定：（1）复合阳极系统应满足设计保护寿命期内承载发射电流的能力；（2）复合阳极系统应具有抗酸化能力且与混凝土粘结良好；（3）复合阳极系统应在多处与直流电源的正极电缆连接，以保证阴极保护电流的均匀分布；
4. 聚合物砂浆电阻率不应高于原混凝土电阻率，并满足《混凝土结构加固用聚合物砂浆》JG/T289中的材料性能要求。碳纤维网格布应满足《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》CECS146中的材料性能要求；
5. 采用本方法修复混凝土结构，应保证复合阳极系统与原混凝土构件粘结牢固，形成共同工作协同变形的整体，并应避免对原构件及其他构件性能造成不利影响。研究表明，采用聚合物砂浆粘贴碳纤维网格布加固混凝土结构与采用环氧树脂胶粘贴纤维布加固混凝土结构的受力性能和表现不同。当界面剪切试验的破坏模式为混凝土层破坏或混凝土与复合阳极系统的层间破坏时，平均剪切强度不应低于1.38MPa；当界面剪切试验的破坏模式为碳纤维网格布和聚合物砂浆的层间破坏时，平均剪切强度不应低于2.76MPa；
6. 碳纤维网格布的力学强度设计指标宜根据检测得到的实际性能，按国家现行有关标准确定材料初始状态设计值，再进行折减。碳纤维网格布的强度利用系数宜取0.7；
7. 采用外加电流阴极保护-结构加固复合技术修复后的钢筋混凝土结构强度，应采用经利用系数折减后的材料强度，参照《混凝土结构设计规范》GB50010、《混凝土结构加固设计规范》GB50367和《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》CECS146规定的结构分析基本原则进行设计。一般情况下，应采用线弹性方法计算结构的作用效应；
8. 采用外加电流阴极保护-结构加固复合技术对混凝土构件进行修复时，修复后构件的承载力提高幅度应符合下列要求：

表4.2.2-2修复后构件的承载力提高幅度

|  |  |
| --- | --- |
| 修复类型 | 承载力提高幅度不应超过 |
| 轴心受压或小偏心受压构件 | 20% |
| 轴压比大于0.5的大偏心受压构件 | 20% |
| 轴压比小于0.5的大偏心受压构件 | 10% |
| 受弯构件（正截面） | 40% |
| 受弯构件（斜截面） | 50% |
| 剪力墙（斜截面抗剪） | 50% |

1. 电化学保护电流密度除应使保护效果达到本规程第四章外加电流阴极保护的规定外，尚应控制在不降低复合阳极系统和混凝土质量的范围内。具体保护电流密度宜通过经验数据或进行现场试验确定，也可按照表A.1.2选取；
2. 外加电流阴极保护-结构加固复合技术工程施工质量验收的基本规定可参照本规范第四章外加电流阴极保护和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204的基本规定执行。
	* 1. 直流电源应满足下列要求：
			1. 采用技术性能稳定可靠、环境适应性强的特点，其外壳应采用防干扰的金属外壳，并应进行防腐蚀处理；
			2. 根据使用条件、阳极类型、钢筋保护所需电流和保护系统回路电阻等计算确定直流电源的输出电流、输出电压；
			3. 具有恒电流或恒电位控制，并从零到最大额定输出连续可调；
			4. 直流输出不超过50V，人或动物易接近的阴极保护系统不超过24V。最大纹波电压有效值不超过100mV，最小纹波频率100Hz；
			5. 具有提供直流继电系统中断输出的功能，以便于“瞬时中断”电位测量；
			6. 最少应提供一个阳极和一个阴极接线端至电缆箱，所有输出端应与箱内所有金属体间充分绝缘；
			7. 显示交流输入电源和直流输出的运行状态。
		2. 直流电源总功率应按下列公式计算：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （4.2.4-1） |
|  | （4.2.4-2） |

式中*Pj*——单台直流电源的功率（W）；

*Ii*——保护单元所需电流量(A)；

*Ri*——保护单元回路电阻(Ω)；

*η*——直流电源的效率，可取 0.7；

*P*——直流电源的总功率（W）。

* + 1. 监控系统应包括参比电极、其他电极、传感器和监控设备，其组成部分应满足下列要求：
			1. 参比电极宜采用Ag/AgCl/饱和0.5mol/L KCl和Mn/MnO2/0.5mol/L NaOH-双联参比电极，参比电极的精度应达到±5mV（20℃24h），寿命不少于20a；
			2. 每个阴极保护单元宜布置四个以上参比电极，其安装位置应代表结构物的控制电位；对预应力钢筋，在距阳极最近处布置监控参比电极，防止预应力钢筋过极化引起氢脆；对重要或难以再次安装的混凝土结构与部位，考虑安装备用参比电极；
			3. 监控设备具有测量保护电位、电流密度、直流电源的输出电流、输出电压、瞬时断电电位和瞬时断电后一定时间内的电位衰减等功能，并适应所处环境和抵御环境的侵蚀；
			4. 有条件时，监控设备应具有远程遥测、遥控和分析评估的功能。
1. Ag/AgCl/0.5 mol/L KCl电极和Mn/MnO2/0.5mol/L NaOH电极的在碱条件下性能稳定，寿命长。因此，可作为埋入参比电极。

埋入式参比电极或探头布置的位置对测量结果影响较大，为了避免出现“过保护”和“欠保护”，应在保护电位最正的位置或最负的位置均匀布置参比电极或探头。

* + 1. 外加电流阴极保护系统电缆应包括电源电缆、阳极电缆、阴极电缆、参比电极电缆、电位测量电缆和监控系统电缆等，并应符合下列规定：
			1. 电缆均应使用颜色或其他标记区分，且电缆护套应具有良好的绝缘、抗老化、耐海洋环境和海水腐蚀性等；
			2. 电缆用量应根据电缆的类型、保护单元的具体情况、电缆的铺设位置及走向等计算确定；
			3. 阳极电缆和阴极电缆宜采用单芯多股铜芯电缆，每个阴极保护单元应设计2根以上阴极电缆和阳极电缆；
			4. 电缆截面面积应根据125%最大设计电流时允许的温度和压降等因素确定，且阴极保护电源的输出电压值与阳极/阴极所要求的电压值相一致，同时确保为每一个保护区域提供均匀的电流分配；
			5. 单芯电缆的截面积不小于2.5mm2，多芯电缆的阳极和阴极电缆不小于1.0mm2，监控电缆不小于0.5 mm2，所有电缆至少有7股；阴极、阳极电缆芯横截面积可按式（4.2.6-1）和式（4.2.6-2）计算：

|  |  |
| --- | --- |
| *S=ρL/R* | （4.2.6-1） |

式中：*S*——电缆芯横截面积（mm2）；

*L*——电缆长度（m）；

*ρ*——电缆芯材电阻率（Ω·cm）；

*R*——电缆电阻（Ω），由下式计算；

|  |  |
| --- | --- |
| *R=V/I*  | （4.2.6-2） |

式中：*I*——流经电缆的电流（A）；

*V*——电缆的允许压降（V）。

* + - 1. 参比电极电缆应采用屏蔽电缆，屏蔽层应接地，且不应靠近动力电缆；
			2. 电位测量电缆严禁与阴极电缆兼用；
			3. 每个阴极保护单元内至少设计1根监控系统电缆，不得与保护系统中的阴极电缆兼用；
			4. 电缆应避免环境、人类和动物破坏，对于破坏风险大的地域，应将电缆埋入混凝土结构中或用金属丝铠装电缆；
			5. 所有密封于混凝土、导管或护套中的电缆至少有符合现行国家标准《额定电压lkV(*U*m=1. 2kV) 到35 kV( *U*m =40.5 kV) 挤包绝缘电力电缆及附件》 (GB/T 12706)规定的绝缘层和护套各一层。
1. 为避免回路电流干扰保护电位测量结果，严禁用阴极电缆代替测量电缆。

为防止外界磁场对参比电极反馈的电位信号的干扰，参比电极电缆需要采用屏蔽电缆。因为动力电缆交流磁场强，所以参比电极电缆不得紧靠动力电缆。

* + 1. 混凝土结构外加电流阴极保护单元划分应满足设计要求，当设计无要求时，可根据现场条件以同一部位、同一构件的混凝土表面积50m2～200m2作为一个保护单元。

条文说明：独立的阳极区为一保护单位。混凝土外加电流阴极保护的辅助阳极一般为带状，一保护单位内的辅助阳极通过导电条点焊在一起，阳极每个保护单元面积合适，以满足电流分布的均匀性和系统运行的安全性。

* + 1. 保护电位应符合下列规定（相对于Ag/AgCl/0.5mol KCl参比电极）：
			1. 普通混凝土中钢筋，允许瞬时断电的电位不负于-1100mV；
			2. 预应力混凝土中钢筋，允许瞬时断电的电位不负于-900mV；
			3. 混凝土结构任意代表性的测点，其电位实测值应满足下列标准之一：
				1. 瞬时断电的电位（直流电回路断开后0.1~1s测得的）负于-720mV；
				2. 断电瞬间的“初始”极化电位，断电后最长24h的衰减值不小于100mV；
				3. 断电瞬间的“初始”极化电位，断电后电位衰减超过给定时间(一般24h或者更长)的衰减值应不小于150mV。
		2. 初始保护电流密度值，应根据现场检测的结果按附录A.1的规定选取。

条文说明：保护电流密度与被保护结构所处的环境条件（温度、湿度、供氧量、氯盐污染程度）、结构物复杂性、混凝土质量、保护层厚度、钢筋腐蚀程度等因素有关。因此，本条规定初始保护电流密度宜采用经验数据或进行现场试验确定。国内外海港钢筋混凝土结构采用阴极保护方式，保护电流密度值见表4.2.9。

表4.2.9钢筋混凝土外加电流的阴极保护的保护电流密度值举例

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **工程名称** | **保护电流密度（mA/m2）** | **备注** |
| 我国大丰挡潮闸胸墙钢筋混凝土梁 | <10，以表层钢筋面积计 | 平均值 |
| 我国连云港二码头东侧钢筋混凝土梁底板 | 17.6，以表层钢筋面积计 | 平均值 |
| 我国湛江港码头横梁、肋和板 | <20，以表层钢筋面积计 |  |
| 我国渤海码头钢筋混凝土承重梁 | 10~20 | 随潮涨潮落变化 |
| 天津港北港池滚装码头预制拱梁 | 1~2，以表层钢筋面积计 | 阴极防护电流密度 |
| 沙特扎瓦尔港取水口和排水口混凝土结构 | 5，以表层钢筋面积计 |  |
| 杭州湾跨海大桥 | 1~2，以表层钢筋面积计 | 阴极防护电流密度 |
| 澳大利亚悉尼歌剧院下部构件 | 14.44，以混凝土表面积计 | 设计值 |
| 美国维吉尼亚混凝土桥梁面板 | 5.3~13.6，以混凝土表面积计 | 运行897天后不同区域整流器设置值 |
| 德国绕城公路钢筋混凝土结构 | 1~10，以混凝土表面积计 | 运行前6年不同区域 |
| 3~7，以混凝土表面积计 | 调整后不同区域 |
| 俄勒冈州亚奎纳港湾桥 | 6.6，以混凝土表面积计 | 平均值 |

* + 1. 总保护电流量*I*可按式(4.1.7)计算：

|  |  |
| --- | --- |
|  |  (4.1.7) |

式中： *I*——保护所需的总电流（A）；

*In*——各阴极保护单元的保护电流（A）；

 *in*——各阴极保护单元的初期保护电流密度（A/m2）

 *sn*——各阴极保护单元内表层钢筋面积（m2）

 *If*——其他附加保护电流（A）。

* 1. 安装与调试
		1. 外加电流阴极保护系统的安装应包括保护单元内钢筋电连接、破损区域保护层的凿除和修补、混凝土结构预处理、监控系统的安装、阳极系统安装、各种接头的制作和电缆铺设、直流电源的安装等。
		2. 安装前应确认所用的材料和仪器与设计一致，安装方式应满足设计要求，并符合下列规定：
			1. 保护单元内非预应力钢筋的电连接可采用电焊连接或机械连接等方式，预应力钢筋的电连接应采用机械连接的方式；
			2. 电连接钢筋或电缆外露部分应采取适当的防腐保护措施；
1. 预应力钢筋的电连接采用电焊连接，会引起应力松弛。
	* + 1. 混凝土局部凿除宜人工凿除，凿除范围应大于破损范围，并采用水泥基修补材料恢复至原断面；
2. 风镐等机械方式凿除，可能引起凿除周围混凝土存在微小裂缝，影响电化学保护措施的实施。钢筋锈蚀引起的混凝土破损，其表观破损范围一般小于实际破损范围。因此，在进行局部凿除修补时，凿除范围应适当大于表观破损范围。为使修复材料的性能与本体混凝土的相近，要求采用水泥基材料修补。
	* + 1. 应去除混凝土表面所有的绑扎铁丝、钢筋头、钉子或其他可见的金属物，并用适当的材料修补，厚度宜大于10mm；
3. 为了防止阳极系统与混凝土表面导电材料接触后出现短路，导致阴极保护系统的故障或电流的分布不均等。
	* + 1. 监控系统安装方法应符合产品说明书的要求，户外安装时应采取相应的防护措施。埋入式参比电极应埋设于第一层钢筋附近，并严禁与钢筋短路；
4. 参比电极与钢筋短路会引起测得的保护电位失真。
	* + 1. 阳极系统的安装应满足下列规定：
				1. 阳极系统的安装应牢固，并应避免与任何钢筋、辅助金属构件、绑扎钢筋的金属丝或混凝土表面钢筋残骸以及被保护钢筋之间发生短路；
				2. 网带、条状或带状阳极不应少于有50mm的搭接，每个搭接部分点焊不应少于3点；
				3. 每个阳极区应具有良好的电连接性，其连接电阻不应大于1.00Ω；
				4. 每一个阳极区安装完成后，应对系统各阳极区之间的阳极和阳极的绝缘情况进行测试；
				5. 每个阴极保护单元应提供多个与阳极连接的阳极电缆，电缆与阳极的连接方式和安装方式应通过试验或已有工程证实的方法实施。
5. 每个外加电流阴极保护单元都应提供多个与阳极连接的阳极电缆，这样即使任何一个阳极与电缆的连接失效也不会降低该区域阴极保护的性能。
	* + 1. 各种接头应进行密封防水处理，并满足耐久性使用要求。电缆的铺设应留有适当余量且有唯一性标识，并采取适当的保护措施避免环境、人和动物的破坏；
			2. 直流电源的安装位置及保护方式除应符合设计、产品说明书和本规程第4.2.3节的要求外，尚应符合现行国家标准《电器装置安装工程低压电器施工及验收规范》（GB 50254）的有关规定。
		1. 通电调试前，应测量并记录各保护单元的回路电阻与自腐蚀电位，检查各种电缆的通电连续性、各种接头的绝缘及密封性、仪器设备安装位置的准确和牢固等。
		2. 阴极保护系统的调试应符合下列规定：
			1. 通电调试应在阴极保护系统施工完毕后、提交竣工验收之前进行，通电调试时间应至少连续一个月；
			2. 钢筋阴极保护通电极化应按设计要求逐步调整电流量。初始通电应按设计电流量的10%~20%通电，在钢筋极化稳定后，应根据保护系统运行情况，再对系统增加电流的输出，直至达到保护要求的电流水平；
			3. 通电调试期间应根据参比电极的保护电位、直流电源的输出电流和输出电压等调整阴极保护系统的运行参数；
			4. 监测参比电极的保护电位应采用便携式或备用参比电极校核。在所有参比电极的电位读数满足设计要求并基本稳定后，应对阴极保护钢筋进行一次全面保护电位检测。保护电位不满足设计要求应及时采取补救措施。
6. 阴极保护通电极化是一个逐步的过程。初始通电使用较小电流，逐渐使钢筋极化并且稳定，然后根据保护系统运行情况，对系统增加电流的输出，直至达到保护要求的电流水平
	1. 质量控制与检验
		1. 外加电流阴极保护系统的检验应包括下列内容：
			1. 各种材料和仪器设备的检验与验收；
			2. 所有回路的极性检查；
			3. 所有回路的电连接性检查；
			4. 所有回路的绝缘性检查；
			5. 参比电极安装位置的检验与验收；
			6. 混凝土表面处理质量及保护层厚度检验；
			7. 辅助阳极的制作和安装质量检验；
			8. 各种接头和电缆的制作和铺设、直流电源的安装质量的检验与验收等。
		2. 阴极保护系统电连接检验应符合下列规定。
			1. 电连接检验应采用使用数字直流欧姆表或内阻大于10MΩ、最小分辨率1mV的高内阻数字万用表；
			2. 应检验钢筋和阴极电缆之间，辅助阳极和钛导电条之间，辅助阳极和阳极电缆之间的连接电阻；
			3. 阴极保护系统电连接电阻不应大于1.0Ω。
		3. 阴极保护系统电绝缘检验应符合下列规定。
			1. 辅助阳极接头、连接电缆的电绝缘应采用兆欧表全数检验；
			2. 辅助阳极与钢筋电绝缘检验应满足下列要求：
				1. 阳极与钢筋电绝缘按每个保护单元全数检验；
				2. 系统安装完毕后，全数检测阳极与钢筋间电压差。
7. 混凝土外加电流阴极保护的电连接和电绝缘检验对阴极保护正常运行至关重要，严格检验防止阴极系统和阳极系统出现短路或断路现象。
	* 1. 辅助阳极、参比电极和电缆的安装位置检验应符合下列规定。
			1. 辅助阳极安装位置应采用量测法逐件检查，允许偏差±50mm；
			2. 参比电极安装位置应采用量测法逐件检查，允许偏差±100mm；
			3. 阳极电缆、阴极电缆、参比电极电缆、监测电缆等应采用目视法全数检查；
			4. 辅助阳极、参比电极和电缆的外观、型号和标识应满足设计要求。
		2. 混凝土外加电流阴极保护质量检验应在施工完成后60d内单独进行。
		3. 阴极保护质量检验应全数检验钢筋保护电位、直流电源和监控设备运行状况等。
		4. 钢筋保护电位检验应按每个保护单元随机抽检不少于10个点，相对于Ag/AgCl/0.5mol KCl参比电极，保护电位检验应符合下列规定：
			1. 普通混凝土中钢筋，允许瞬时断电的电位不负于-1100mV；
			2. 预应力混凝土中钢筋，允许瞬时断电的电位不负于-900mV；
			3. 混凝土结构任意代表性的测点，其电位实测值应满足下列标准之一：
				1. 瞬时断电的电位（直流电回路断开后0.1~1s测得的）负于-720mV；
				2. 断电瞬间的“初始”极化电位，断电后最长24h的衰减值不小于100mV；
				3. 断电瞬间的“初始”极化电位，断电后电位衰减超过给定时间(一般24h或者更长)的衰减值应不小于150mV。
8. 阴极保护电位是判断阴极保护系统正常运行的重要参数，应对整个被保护结构进行系统全面的电位等检测。

基于美国腐蚀工程师协会标准NACE SP0290-2007和欧洲标准EN 12696:2016对钢筋混凝土阴极保护准则的规定，结合国内外成功应用的工程实例，提出了本规范的阴极保护电位要求。

高拉伸荷载下的预应力钢筋，对氢脆比较敏感，预应力构件若发生氢脆，故障是灾难性的。其安全保护电位通常取不负于Ag/AgCl/0.5 mol/L KCl的-900mV。NACE-2015-5702中指出预应力可考虑在-730～-850mV范围内，能降低高应力钢筋的应力腐蚀开裂（SCC）和氢脆风险（HE）。

* + 1. 混凝土外加电流阴极保护质量检验若有不合格项时，应及时进行调整或采取补救措施。
	1. 维护管理
		1. 维护管理应制定相应的制度，并由专门的技术人员负责日常运行。
		2. 阴极保护系统的直流电源、监控系统、阳极系统、电缆等所有部件应进行日常检查和维护，并及时修复运行中存在的故障。
		3. 直流电源的输出电压、输出电流、保护电位和保护电流，应定期检查和记录，并评估保护效果。
		4. 保护电位不满足本规程第4.2.8节要求时，应及时进行调整或采取补救措施。
1. 牺牲阳极阴极保护
	1. 一般规定
		1. 牺牲阳极阴极保护可用于已建钢筋混凝土结构水位变动区及以上部位。
	2. 系统设计
		1. 牺牲阳极阴极保护系统应包括牺牲阳极、监控系统和通电连接部件。
		2. 牺牲阳极应具有开路电位较负的特性，电化学性能测试尚应符合现行国家标准《铝-锌-铟系合金牺牲阳极》（GB/T 4948）的有关规定，应符合在使用期内应保持阳极活性、电位和输出电流稳定。
2. 本条已在原条文基础上增加了“电化学性能测试尚应符合现行国家标准《铝-锌-铟系合金牺牲阳极》（GB/T 4948）的有关规定”，主要考虑牺牲阳极材料的化学成分和电化学性能是牺牲阳极的两个最重要的性质，5.2.3条中规定了牺牲阳极的化学成分要求，本条也对应5.2.3条提出关于牺牲阳极电化学性能的具体要求，这也正好与5.4.2（1）条形成对应。
	* 1. 牺牲阳极的化学成分除满足设计要求外，尚应符合现行国家标准《铝-锌-铟系合金牺牲阳极》（GB/T 4948）的有关规定，且应严格控制牺牲阳极的杂质含量。
3. 本条已在原来基础上进行了修改，增加“尚应符合现行国家标准《铝-锌-铟系合金牺牲阳极》（GB/T 4948）的有关规定”，其中“应严格控制牺牲阳极的杂质含量”这句还有没有必要加，请各位专家定夺。
	* 1. 牺牲阳极阴极保护系统应根据结构型式、施工条件和保护年限等进行设计。
		2. 牺牲阳极阴极保护系统宜按表5.2.5选用，并应符合下列规定：
			1. 牺牲阳极阴极保护系统应与混凝土粘结良好；
			2. 保护电流应分布均匀，保护电流密度和保护电位应满足本规程第4.2节有关规定。

表5.2.5 牺牲阳极阴极保护系统

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 阳极形式 | 阳极系统组成 | 布置方式 |
| 面式阳极 | 锌或铝合金喷涂层 | 热喷或电弧喷涂于经清理的混凝土表面，通过引出线连接到钢筋上 |
| 锌销加导电粘结剂 | 将锌销用导电粘结剂粘贴于经清理的干燥混凝土表面，通过引出线连接到钢筋上 |
| 锌网加活性水泥浆护层 | 将锌网固定在结构表面，用活性水泥砂浆包覆，通过引出线连接到钢筋上 |
| 点式阳极 | 棒状或块状锌阳极加水泥基包覆材料 | 将阳极系统埋设到钢筋附近的混凝土中，阳极引出线连接到钢筋上 |

* + 1. 每个保护单元所需牺牲阳极的质量可按下式计算：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.2.6) |

式中*W*——所需的牺牲阳极质量(kg) ；

*Eg*——牺牲阳极的消耗率( kg/A·a)；

*I*——所需平均保护电流(A) ；

*t*——保护年限(a)；

*f*——牺牲阳极的利用系数，可取0.5～0.8。

* + 1. 监控系统宜包括参比电极、监控设备及其他装置等，其性能与参数应符合下列规定：
			1. 保护电位和极化电位衰减值，可采用便携式参比电极或埋人式参比电极测量、不超过24h的极化电位衰减值也可由石墨、活性铁或锌制作的电位衰减值测量探头测量；
			2. 埋入式参比电极可选用 Ag/AgCl/0.5mol/L KCl 电极或Mn/MnO2/0. 5mol/ LNaOH 电极，便携式参比电极可选用 Ag/AgCl/0.5mol/L KCl电极。且参比电极应极化小、不易损坏、适用环境介质、电位精度宜小于或等于±5 mV（20℃，24h）、埋入式参比电极的寿命宜大于20a；
1. 参考目前牺牲阳极阴极保护系统已经有很多应用20年以上的工程实例，参比电极寿命不应小于20年。
	* + 1. 每个保护单元应在保护电位最正的位置和最负的位置布置不少于2个埋入式参比电极，便携式参比电极测点的选取，应反映出整个结构物的保护状况，必要时应安装保护电流以及腐蚀速率测量装置等；
			2. 对重要或难以再次安装的混凝土结构与部位，宜考虑安装备用参比电极；
			3. 监控设备应具有测量保护电位、电流密度、直流电源的输出电流、输出电压、瞬时断电电位和瞬时断电后一定时间内的电位衰减等功能；电位测量的分辨率达到l mV，精度不低于测量值的±0.1%，输入阻抗不小于10 MΩ；电流测量的分辨率达到1 µA，精度不低于测量值的±0.5%；
			4. 监控设备应适应所处环境，具有稳定、可靠、维护简单、抗干扰、抗盐雾、故障保护等特点。
		1. 阳极电缆、阴极电缆、参比电极电缆和电位测量电缆除应满足本规程第4.2.6节有关规定以外，还应满足下列规定：
			1. 采用点式牺牲阳极阴极保护时，可将阳极铁芯直接电连接到被保护钢筋上，仅在钢筋上引出一根电位测量电缆；
			2. 采用面式牺牲阳极阴极保护时，阳极电缆和阴极电缆的铜芯截面积应提高一个等级配置。
	1. 安装与调试
		1. 牺牲阳极阴极保护系统的安装施工应包括钢筋电连接、混凝土结构预处理、监控系统的安装、牺牲阳极的安装或施工以及各种接头制作和电缆铺设等。
		2. 安装前应确认所用的材料和仪器与设计一致，安装方式应满足设计和下列规定。
			1. 保护单元内非预应力钢筋的电连接可采用电焊连接或机械连接等方式，预应力钢筋的电连接应采用机械连接的方式；
			2. 电连接钢筋或电缆外露部分应采取适当的防腐保护措施；
			3. 混凝土局部凿除宜人工凿除，凿除范围应大于破损范围，并采用水泥基修补材料恢复至原断面；
			4. 安装阳极系统前，混凝土表面不应存在有机涂层和外露金属等影响电流均匀分布的缺陷；
			5. 监控系统安装方法应符合产品说明书的要求，户外安装时应采取相应的防护措施；
			6. 埋入式参比电极应埋设于第一层钢筋附近，并严禁与钢筋短路；
			7. 阳极系统的安装应牢固、可靠；
			8. 牺牲阳极在储存和搬运过程应避免污染，安装应牢固、可靠；
			9. 点式阳极与基体混凝土之间应采用水泥基材料填充密实，严禁存在孔洞等缺陷；
			10. 面式阳极安装前，混凝土表面宜进行喷砂处理；阳极与基体混凝土粘结应牢固，附着力应大于1.0 MPa。
		3. 牺牲阳极阴极保护系统的调试应按设计规定的程序进行，并符合下列规定。
			1. 牺牲阳极与被保护构件短路前，应测量被保护构件的自腐蚀电位；
			2. 牺牲阳极阴极保护系统调试过程中，应定期记录保护电位。
		4. 牺牲阳极阴极保护系统施工完成后，竣工验收应提交下列资料：
			1. 材料的出厂合格证、质量证明书及检验报告；
			2. 进场材料检验报告；
			3. 设计文件或设计变更文件；
			4. 牺牲阳极施工记录；
			5. 保护电位测量记录；
			6. 竣工图纸；
			7. 施工过程中如存在的重大技术问题和其他质量问题的处理记录；
			8. 维护管理建议。
	2. 质量控制与检验
		1. 牺牲阳极阴极保护系统的质量控制与检验应包括以下几方面：
			1. 牺牲阳极的质量控制与检验；
			2. 电缆和监控设备的质量控制与检验；
			3. 通电连接部件的质量控制与检验；
			4. 运行状况和保护效果检验等。
		2. 牺牲阳极的质量控制与检验应符合下列规定：
			1. 牺牲阳极的化学成分检验应按现行国家标准《铝-锌-铟系合金牺牲阳极化学分析方法》（GB/T 4949）的有关规定进行，电化学性能检验应按现行国家标准《牺牲阳极电化学性能试验方法》（GB/T 17848）的有关规定进行，检验结果应符合设计要求和；
			2. 牺牲阳极的外观质量可目视检验，外观应均匀一致，无气泡、裂缝等缺陷；
			3. 对于面式牺牲阳极，每保护单元应随机抽测3个测点的喷涂层厚度，其平均厚度不应小于设计值，最小厚度不应小于设计值的75% 。涂层附着力可采用附着力测试仪测定，每保护单元应随机抽测3个测点，其平均附着力不应小于设计值，最小附着力不周小于设计值的75%；
			4. 锌箔和锌网牺牲阳极的总重量与设计值相比不应出现负偏差。
		3. 电缆和监控设备的质量控制与检验应符合下列规定：
			1. 电缆的外观、规格型号与标识和接头应逐一目测检验，并检测电缆和接头的绝缘性和电连续性；
			2. 仪器和设备应逐件检查其规格型号和是否完好。
		4. 通电连接部件的质量控制与检验应符合下列规定：
			1. 钢筋电连接性检验宜采用直流电阻法。采用数字万用表测量保护单元内不同钢筋之间的电阻，其电阻值应小于1.00Ω；
			2. 参比电极的电位值应采用内阻不低于 l0 MΩ的数字万用表和校核参比电极逐只测量，允许偏差为±10mV。参比电极安装位置采用量测法检查，允许偏差为±100mm。
		5. 运行状况和保护效果检验应符合下列规定：
			1. 监控系统的电位指示值不符合规定或与前次检测结果有较大差异时，应对仪器设备和电路进行检测，查明故障部位及原因并进行处理；
			2. 运行期间阳极系统应无脱开、脱落等缺陷；
			3. 混凝土表面覆盖层应无开裂、空鼓、脱落等缺陷；
			4. 保护电位或极化电位衰减值不符合规定值时，应采取补救措施。
	3. 维护管理
		1. 维护管理应定期检查和记录保护电位，评估保护效果。
		2. 保护电位不满足本规程第4.2.8节相关规定时，应及时采取补救措施。
2. 电化学再碱化
	1. 一般规定
		1. 电化学再碱化适用于已碳化的钢筋混凝土结构。

条文说明：待处理混凝土的碳化程度应比较充分，保证再碱化处理能阻止进一步碳化。

* + 1. 实施电化学再碱化处理后，应采用涂层封闭防腐处理。

条文说明：涂层封闭处理可有效减少外界环境中二氧化碳对混凝土的侵蚀。

* + 1. 直流电源输出电压大于24V时应采用预警保护措施。
		2. 电化学再碱化处理的区域没有易受氢脆化影响的预应力钢筋。
	1. 系统设计
		1. 电化学再碱化保护系统应包括阳极系统、直流电源、监控系统和电缆等。
		2. 阳极系统应包括辅助阳极和电解质等，其性能和参数应符合下列规定：
			1. 辅助阳极应具备在通电期内承载发射电流的能力；
			2. 辅助阳极的形状应满足均匀分布电流的要求，宜采用网格状阳极，适宜的电焊网尺寸为50×50mm或者100×100mm，适宜的钢丝尺寸为直径3~4mm；当采用条状阳极时，应根据结构构件的形状和表层钢筋的表面积均匀布置，间距不宜大于0.5m；
			3. 电解质溶液可选用0.5-1.0mol/L Na2CO3水溶液、K2CO3水溶液或Li2CO3水溶液；当集料存在碱活性时，宜在电解质中加入0.1mol/L的LiOH或0.1mol/L的Li2CO3溶液；

条文说明：网状阳极能为混凝土提供均匀的电流分布。条状阳极的间距不大于0.5m时，也能达到预期的保护效果。

在电化学再碱化期间，阳极反应会使周围电解质溶液不断酸化，故选用碱性电解质。为了抑制碱骨料反应的发生，宜在电解质溶液中加入0.1mol/L的LiOH或0.1mol/L的Li2CO3溶液。

* + - 1. 辅助阳极的布置方式可按表6.2.2选用。

表6.2.2 辅助阳极的布置方式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 布置方式 | 电解质溶液维持材料 | 适用场合 |
| 纤维方式 | 以纤维保水 | 所有场合 |
| 嵌板方式 | 通过嵌板灌注溶液 | 1）电解质溶液的蒸发，泄漏少2）水平面，垂直面均能施工 |
| 片材方式 | 以片材持水 | 水平面 |

* + 1. 直流电源应具有稳定、可靠、维护简单、抗过载、防雷、抗干扰、抗盐雾、故障保护等特点，并满足下列要求：
			1. 长期不间断供电；
			2. 输出电压值不超过50V，波纹量不超过100mVrms，频率不低于100Hz；
			3. 从零到满量程输出连续可调；
			4. 电源的正极与负极不可逆转，并标识明确；
			5. 外壳应采用防干扰的金属外壳，并对其进行必要的防腐蚀处理。
		2. 直流电源的布置应根据直流电源的数量、保护层单元的划分、结构型式、适用条件、维护管理方便和经济等因素确定。
		3. 直流电源的总功率应符合本规程第4.2.4节的相关规定。
		4. 监控设备应适应所处环境，并满足下列要求：
			1. 具有稳定、可靠、维护简单、抗干扰、抗盐雾、故障保护等特点；
			2. 具有测量并显示电位和电流等参数的功能。
		5. 每个典型电化学再碱化单元宜布置不少于3个监控测点，其安装位置应基本反映单元内阴极极化程度。
		6. 电化学再碱化系统电缆应符合本规程第4.2.6节的有关规定。
		7. 任何预应力钢筋都需要监测，以确保预应力钢筋在极化阶段电位不应低于-900mV（Ag/AgCl/0.5mol/L KCl作参比电极）。
		8. 电化学再碱化处理时间一般为7-14d，具体时间应根据混凝土碳化恢复情况确定。电流密度可采用经验数据或通过现场试验确定，亦可按附录A.2选取，但不应超过2A/m2。
	1. 安装与调试
		1. 电化学再碱化保护系统的安装应包括钢筋电连接、破损区域保护层的凿除和修补、混凝土表面预处理、监控系统的安装、阳极系统安装、各种接头的制作和电缆铺设、直流电源的安装等。
		2. 安装前应确认所用的材料和仪器与设计一致，安装方式应满足设计要求，并符合下列规定：
			1. 保护单元内非预应力钢筋的电连接可采用电焊连接或机械连接等方式，预应力钢筋的电连接应采用机械连接的方式；
			2. 电连接钢筋或电缆外露部分应采取适当的防腐保护措施；
1. 预应力钢筋的电连接采用电焊连接，会引起应力松弛。
	* + 1. 混凝土局部凿除宜人工凿除，凿除范围应大于破损范围，并采用水泥基修补材料恢复至原断面；
2. 风镐等机械方式凿除，可能引起凿除周围混凝土存在微小裂缝，影响电化学保护措施的实施。钢筋锈蚀引起的混凝土破损，其表观破损范围一般小于实际破损范围。因此，在进行局部凿除修补时，凿除范围应适当大于表观破损范围。为使修复材料的性能与本体混凝土的相近，要求采用水泥基材料修补。
	* + 1. 应去除混凝土表面所有的绑扎铁丝、钢筋头、钉子或其他可见的金属物，并用适当的材料修补，厚度宜大于10mm；
3. 为了防止阳极系统与混凝土表面导电材料接触后出现短路，导致阴极保护系统的故障或电流的分布不均等。
	* + 1. 监控系统安装方法应符合产品说明书的要求，户外安装时应采取相应的防护措施。埋入式参比电极应埋设于第一层钢筋附近，并严禁与钢筋短路；
4. 参比电极与钢筋短路会引起测得的保护电位失真。
	* + 1. 阳极系统的安装应满足下列规定：
				1. 阳极系统的安装应牢固，并应避免与任何钢筋、辅助金属构件、绑扎钢筋的金属丝或混凝土表面钢筋残骸以及被保护钢筋之间发生短路；
				2. 网带、条状或带状阳极不应少于有50mm的搭接，每个搭接部分点焊不应少于3点；
				3. 每个阳极区应具有良好的电连接性，其连接电阻不应大于1.00Ω；
				4. 每一个阳极区安装完成后，应对系统各阳极区之间的阳极和阳极的绝缘情况进行测试；
				5. 每个电化学再碱化单元应提供多个与阳极连接的阳极电缆，电缆与阳极的连接方式和安装方式应通过试验或已有工程证实的方法实施。
				6. 阳极系统应具有避免电解质溶液的蒸发与泄漏。
5. 某些固定装置和配件结构可能受到碱或酸化电解质的腐蚀，应采取额外的保护措施防止电解液泄漏。
	* 1. 通电调试前，应测量并记录各保护单元的回路电阻、碳化深度与自腐蚀电位，检查各种电缆的通电连续性、各种接头的绝缘及密封性、仪器设备安装位置的准确和牢固等。
		2. 系统调试应按下列规定的程序进行：
			1. 混凝土保护层和阳极系统充分饱水后，应检测记录每个电化学再碱化单元的回路电阻，并避免短路。若出现短路现象则重新铺设阳极系统；
			2. 以电流设计值的20％进行试通电，应记录输出电压、电流和电位，确认所有组件安装、连接是否正确；
			3. 试通电不应少于24h，每8h记录一次输出电压、电流和电位；
			4. 试通电完成后应逐步加大保护电流，直至设计值；
			5. 按上述程序，应对保护单元逐一进行调试。
		3. 电化学再碱化保护系统的过程控制管理应满足以下要求：
			1. 保护系统的过程控制管理由专门的技术人员负责；
			2. 输出电压、电流和电位宜每12h测量记录一次；
			3. 电解质溶液的pH值宜每24h测量记录一次，确保pH值大于10.0，并按需进行补充、循环。
		4. 电化学再碱化实施完成后，应进行后处理，并应符合下列规定：
			1. 拆除混凝土表面阳极系统及其组件；
			2. 采用高压淡水清洗混凝土表面，检查混凝土表面状况并对表面缺陷进行修复；
			3. 按现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》（JTJ275）的有关规定进行涂层封闭处理。
	1. 质量控制与检验
		1. 电化学再碱化的检验应包括下列内容：
			1. 各种材料和仪器设备的检验与验收；
			2. 所有回路的极性检查；
			3. 所有回路的电连接性检查；
			4. 所有回路的绝缘性检查；
			5. 参比电极安装位置的检验与验收；
			6. 混凝土表面处理质量及保护层厚度检验；
			7. 辅助阳极的制作和安装质量检验；
			8. 各种接头和电缆的制作和铺设、直流电源的安装质量的检验与验收等。
		2. 施工过程应控制每道工序的质量，合格后方可进行下道工序施工。
		3. 电化学再碱化处理后，钢筋周围的混凝土pH值应大于11。
		4. 保护单元内钢筋电连接性检验宜采用直流电阻法。采用数字万用表测量保护单元内不同钢筋之间的电阻，其电阻值应小于1.00Ω。
		5. 参比电极的电位值应采用内阻不低于10MΩ的数字万用表和校核参比电极逐只测量，允许偏差为±10mV。参比电极安装位置采用量测法检查，允许偏差为±100mm。
		6. 阳极系统的质量控制与检验方法应符合下列规定：
			1. 辅助阳极外观和规格型号应逐件目视检查，外观应均匀一致，无气泡、裂缝等缺陷；
			2. 辅助阳极的安装位置可用量测法检查，允许偏差为±50mm；
			3. 保护单元内辅助阳极的电连接性检验宜采用直流电阻法，电阻值应小于1.0Ω；
			4. 阳极系统安装后，应检查所有回路电阻，评判所有回路的电连接性和绝缘性；
			5. 注入电解质后，应目视检查阳极系统泄漏情况，泄漏严重时应采取必要措施。
		7. 电缆的外观、规格型号与标识和接头应逐一目测检验，并检测电缆和接头的绝缘。
		8. 仪器和设备应逐件检查其规格型号和是否完好。
		9. 运行状况和处理效果的质量检测应符合下列规定：
			1. 直流电源的输出电压、输出电流值、监控系统的电位指示值不符合规定或与前次检测结果有较大差异时，应对仪器设备和电路进行检测，查明故障部位及原因并进行处理；
			2. 线路的绝缘阻抗应进行检测，绝缘不良好的部位应查明原因并及时进行处理；
			3. 电解质溶液的pH值检验每天不少于1次且应大于10.0；
			4. 选取具有代表性的位置，并避开主筋、预埋铁件、管线以及受力较大或修补区域等，按《水运工程混凝土结构实体检测技术规程》（JTS 239）的相关规定，测定混凝土碳化恢复情况；
			5. 混凝土表面封闭涂层的质量控制与检查应符合现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》（JTJ275）的有关规定。
	2. 维护与管理
		1. 电化学再碱化系统的过程控制管理，应有专门的技术人员负责。
		2. 电化学再碱化后应定期检测涂层劣化情况和碳化深度。
6.
7. 电化学除氯
	1. 一般规定
		1. 电化学除氯可用于已遭受氯盐污染，而结构没有发生严重破坏的钢筋混凝土结构。
		2. 混凝土中钢筋周围初始氯离子含量大于水泥砂浆质量的0.35%时，宜采用双向电迁移技术。

条文说明：电化学脱盐处理目的是清除混凝土内的氯离子，但处理后或多或少都会有氯离子残留下来。初始氯离子含量越多，氯离子残留的越多，若初始氯离子含量大于0.35%，即使达到70%的脱盐效率，混凝土内残余的氯离子仍然大于0.1%，阻锈剂可有效提高钢筋锈蚀的临界氯离子含量。因此，当混凝土内初始氯离子含量较高时，规定电化学脱盐过程加入适量钢筋阻锈剂。

* + 1. 实施电化学除氯保护处理后，应采用涂层封闭防腐处理。
		2. 直流电源输出电压大于24V时应采用预警保护措施。
	1. 系统设计
		1. 电化学除氯保护系统应包括阳极系统、直流电源、监控系统和电缆等。
		2. 阳极系统应包括辅助阳极和电解质等，其性能和参数应符合下列规定：
			1. 辅助阳极应具备在通电期内承载发射电流的能力；
			2. 辅助阳极为低碳钢时，应采用焊接钢丝网的形式，一般用于修复周期短、结构外表面颜色可污染、除氯过程中可能产生氯气的工程。钢丝网格尺寸宜采用50×50mm或100×100mm，钢丝直径宜为3.0-4.0mm；
			3. 混凝土结构表面要求洁净、阳极液能实时监测以防止阳极液过酸和产生氯气的工程，辅助阳极宜采用催化钛阳极；
			4. 辅助阳极的形状应满足均匀分布电流的要求，宜采用网格状阳极；当采用条状阳极时，应根据结构构件的形状和表层钢筋的表面积均匀布置，间距不宜大于0.5m；
			5. 电解质宜选用碱性电解质溶液，饱和Ca(OH)2溶液或含阳离子型阻锈剂的电解质溶液；
			6. 阳极电解质溶液宜定期更换，至少保证其pH值在6以上。同时产生的氯气宜进行控制收集避免直接排入大气中；
			7. 辅助阳极的布置方式可按表7.2.2选用。

表7.2.2 辅助阳极的布置方式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 布置方式 | 电解质溶液维持材料 | 适用场合 |
| 在辅助阳极的周围喷涂纤维材料 | 纤维 | 所有场合 |
| 在混凝土表面上固定绝缘板，在其间布置辅助阳极与充填电解质溶液 | 绝缘板 | 水平面与垂直面 |
| 在混凝土顶面蓄存电解质溶液并安装辅助阳极 | 水泥砂浆 | 水平上表面 |

* + 1. 直流电源应具有稳定、可靠、维护简单、抗过载、防雷、抗干扰、抗盐雾、故障保护等特点，并满足下列要求：
			1. 长期不间断供电；
			2. 输出电压不超过50V，波纹量不超过100mVrms，频率不低于100Hz；
			3. 从零到满量程输出连续可调；
			4. 单个除氯区域不应超过50 m2或者设计电流输出不超过100 A；
			5. 电源的正极与负极不可逆转，并标识明确；
			6. 外壳应采用防干扰的金属外壳，并对其进行必要的防腐蚀处理。
		2. 直流电源的总功率应符合本规程第4.2.4节的相关规定。
		3. 参比电极应具有极化小、不易损坏和适用环境介质的特性，宜选用Ag/AgCl/0.5mol/LKCl电极。
		4. 每个典型保护单元宜布置不少于3个参比电极，其安装位置应反映单元内电流的分布情况，不同测点的极化电位差宜控制在±300mV范围内。
		5. 监控设备应适应所处环境，并满足下列要求：
			1. 具有稳定、可靠、维护简单、抗干扰、抗盐雾、故障保护等特点；
			2. 具有测量并显示电位和电流等参数的功能；
			3. 电位测量的分辨率达到1mV，精度不大于测量值的±0.1%，输入阻抗不小于10MΩ；
			4. 电流测量的分辨率达到1μA，精度不大于测量值的±0.5%。
		6. 电化学除氯系统电缆应符合本规程第4.2.6节的有关规定。
		7. 电流密度可参照附录A.3选取。

条文说明：除氯电流密度越大、除氯效率越高，但同时将加剧析氢反应、降低钢筋与混凝土间的粘结性能等负面影响。因此应根据实际工程情况及相关研究数据综合确定电化学除氯的电流密度大小。

* 1. 安装与调试
		1. 电化学除氯保护系统的过程控制管理，应有专门的技术人员负责。电化学除氯保护系统的安装应包括钢筋电连接、破损区域保护层的凿除和修补、混凝土表面预处理、监控系统的安装、阳极系统安装、各种接头的制作和电缆铺设、直流电源的安装等。
		2. 电化学除氯系统的安装除符合本规程第4.3.2节以外，还应符合以下规定：
			1. 阳极系统应具有避免电解质溶液的蒸发与泄漏，并应符合本规程第7.2.2节的要求。
		3. 通电调试前，应测量并记录各保护单元的回路电阻与自腐蚀电位，检查各种电缆的通电连续性、各种接头的绝缘及密封性、仪器设备安装位置的准确和牢固等。
		4. 系统调试应按下列规定的程序进行。
			1. 混凝土保护层和阳极系统充分饱水后，应检测记录每个保护单元的回路电阻，并避免短路；
			2. 以电流设计值的20％进行试通电，应记录输出电压、电流和电位，确认所有组件安装、连接是否正确；
			3. 试通电不应少于24h，每4h记录一次输出电压、电流和电位；
			4. 试通电完成后应逐步加大保护电流，直至设计值；
			5. 按上述程序，应对保护单元逐一进行调试。
		5. 电化学除氯保护系统的过程控制管理应满足以下要求：
			1. 保护系统的过程控制管理由专门的技术人员负责；
			2. 输出电压、电流和电位宜每8h测量记录一次；
			3. 电解质溶液的pH值宜每24h测量记录一次，确保pH值大于9.0，并按需进行补充、循环。
		6. 保护系统的各部件宜每天至少检查一次。检查的内容包括：
			1. 电缆绝缘和阳极连接的目测检查；
			2. 电解液的碱度及其补充；
			3. 所有阳极区域设备的正常工作。
		7. 后处理应包括下列内容：
			1. 拆除混凝土表面阳极系统及其组件；
			2. 取样分析典型保护单元混凝土内剩余氯离子含量；
			3. 采用高压淡水清洗混凝土表面，检查混凝土表面状况并对表面缺陷进行修复；
			4. 按《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》（JTJ275）的有关规定进行涂层封闭处理。
	2. 质量控制与检验
		1. 电化学除氯的检验应包括下列内容：
			1. 各种材料和仪器设备的检验与验收；
			2. 所有回路的极性检查；
			3. 所有回路的电连接性检查；
			4. 所有回路的绝缘性检查；
			5. 参比电极安装位置的检验与验收；
			6. 混凝土表面处理质量及保护层厚度检验；
			7. 辅助阳极的制作和安装质量检验；
			8. 各种接头和电缆的制作和铺设、直流电源的安装质量的检验与验收等。
		2. 施工过程应控制每道工序的质量，合格后方可进行下道工序施工。
		3. 保护单元内钢筋电连接性检验宜采用电流电阻法。采用数字万用表测量保护单元内不同钢筋之间的电阻，其电阻值应小于1.0Ω。
		4. 参比电极的电位值应采用内阻不低于10MΩ的数字万用表和校核参比电极逐只测量，允许偏差为±10 mV。参比电极安装位置采用量测法检查，允许偏差为±100mm。
		5. 阳极系统的质量控制与检验方法应符合下列规定。
			1. 辅助阳极外观和规格型号应逐件目视检查，外观应均匀一致，无气泡、裂缝等缺陷；
			2. 辅助阳极的安装位置可用量测法检查，允许偏差为±50mm；
			3. 保护单元内辅助阳极的电连接性检验宜采用直流电阻法，电阻值应小于1.0Ω；
			4. 阳极系统安装后，应检查所有回路电阻，评判所有回路的电连接性和绝缘性；
			5. 注入电解质后，应目视检查阳极系统泄漏情况，泄漏严重时应采取必要措施。
		6. 电缆的外观、规格型号与标识和接头应逐一目测检验，并检测电缆和接头的绝缘。
		7. 仪器和设备应逐件检查其规格型号和是否完好。
		8. 运行状况和处理效果的质量检测应符合下列规定。
			1. 直流电源的输出电压、输出电流值、监控系统的电位指示值不符合规定或与前次检测结果有较大差异时，应对仪器设备和电路进行检测，查明故障部位及原因并进行处理；
			2. 线路的绝缘阻抗应进行检测，绝缘不良好的部位应查明原因并及时进行处理；
			3. 电解质溶液的pH值检验每天不少于1次且应大于9.0。
			4. 氯离子含量检测方法应满足下列要求：
				1. 选取具有代表性的位置取样，并避开主筋、预埋铁件、管线以及受力较大和修补等区域；取样数量不少于保护单元总数量的5%且每类构件数量不少于1件；
				2. 按《水运工程混凝土试验规程》（JTJ 270）的方法测定砂浆的水溶性氯离子含量；
				3. 电化学除氯处理后，钢筋周围混凝土氯离子含量应小于水泥砂浆质量的0.1%或钢筋恢复钝化。
		9. 构件经电化学除氯后内置钢筋应去极化。去极化结束后（宜保证6个月的去极化）应进行钢筋自腐蚀电位检验，其检测方法应符合标准《水运工程混凝土试验规程》（JTJ 270）的有关规定。电化学除氯结束通电的标准应符合以下规定之一：
			1. 判定标准A-氯离子含量：通电结束时钢筋表面氯离子含量应小于水泥砂浆质量的0.1%。样本应防止受到污染且临近钢筋，由于混凝土的不均匀性，样本应进行统计分析以解释氯含量的差异性；
			2. 判定标准B-电通量：单位除氯面积上电通量不宜低于600 A-h/m2，不宜高于1500 A-h/m2；
			3. 判定标准C-电通量：氯离子/氢氧根离子：终止电化学除氯时应满足钢筋表面氯离子浓度与氢氧根含量之比低于0.6。
		10. 构件经电化学除氯后内置钢筋应去极化。去极化结束后（宜保证6个月的去极化）应进行钢筋自腐蚀电位检验，其检测方法应符合标准《水运工程混凝土试验规程》（JTJ 270）的有关规定。
		11. 混凝土表面封闭涂层的质量控制与检查应符合标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275）的有关规定。
	3. 维护管理
		1. 电化学除氯系统的过程控制管理，应有专门的技术人员负责。
		2. 应用电化学除氯防腐措施应保存设计、施工方案，记录并评价检测数据，判定修复结果等。数据记录项目包括：
			1. 修复后钢筋表面混凝土内氯离子含量和其他化学、物理检测分析数据；
			2. 保护层范围内氯离子浓度梯度分布测量数据；
			3. 钢筋表面积和混凝土表面积。
		3. 处理效果应根据输出电压、电位、电流和通电时间等过程参数的检测记录结果进行初步评估。
1.
2. 电化学沉积
	1. 一般规定
		1. 电沉积保护系统可用于钢筋混凝土结构水位变动区及以下部位。对于陆上结构也可采用此方法进行，宜采用醋酸镁或者醋酸锌等附加电解质溶液。

条文说明：若技术足够成熟或相关研究较完善，可考虑将电沉积法应用范围扩大至浪溅区、大气区及陆上结构的修复，相应的修复参数及材料需要重新考虑。

* + 1. 电沉积处理后沉积物应填充裂缝，封闭表面孔隙，沉积物应具有良好的耐久性和附着力。

条文说明：电沉积物要求具有良好的耐久性和附着力，否则，难以达到长期防腐保护效果。

* + 1. 最大输出电压超过24V或其他相关限值时，应采取预警保护措施。
	1. 系统设计
		1. 电沉积保护系统应包括辅助阳极系统、直流电源、监控系统和电缆等。
		2. 阳极系统应包括辅助阳极和电解质溶液，其性能和参数应符合下列规定：
			1. 辅助阳极应能配送和承受电化学沉积法所需要的电流，且应有一定抗酸腐蚀的能力，可用钛金属电极；
			2. 辅助阳极应根据构件型式、允许工作电流密度、保护电流和通电时间等选用，且应符合现行行业标准《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》（JTS153-3）附录F的规定；
			3. 辅助阳极布置应满足保护电流在保护单元内均匀分布的要求；
			4. 辅助阳极的绝缘座、绝缘密封件、阳极电缆、靠近阳极的支架和保护护套等安装组件应采用耐海水、耐碱和耐氯气腐蚀的材料；
			5. 辅助阳极的接头应进行绝缘密封防水处理；
			6. 对海工结构电解质溶液可采用海水。对于无法直接利用周边环境电解质的结构，可采用人工配置电解质溶液，如醋酸锌、硫酸锌等；
			7. 电解质溶液应完全覆盖被修复的混凝土结构裂缝；
			8. 电解质溶液应对环境因素（如阳光、雨水、风和霜冻等）的作用进行必要的防护处理。
		3. 直流电源应具有稳定、可靠、维护简单、抗过载、防雷、抗干扰、抗盐雾、故障保护等特点，并满足下列要求：
			1. 长期不间断供电；
			2. 输出电压不超过50V，波纹量不超过100mVrms，频率不低于100Hz；
			3. 从零到满量程输出连续可调；
			4. 电源的正极与负极不可逆转，并标识明确；
			5. 外壳应采用防干扰的金属外壳，并对其进行必要的防腐蚀处理。
		4. 直流电源的总功率应符合本规程第4.2.4节的相关规定。
		5. 参比电极应具有极化小、不易损坏和适用环境介质的特性，可用Ag/AgCl/0.5mol/L KCl电极。
		6. 参比电极测点的选择应避开裂缝，其安装位置应反映混凝土结构中电位分布的特点，总数应不少于4个。
		7. 监控设备应适应所处环境，并满足下列要求：
			1. 具有稳定、可靠、维护简单、抗干扰、抗盐雾、故障保护等特点；
			2. 具有测量并显示电位和电流等参数的功能；
			3. 电位测量的分辨率达到1mV，精度不低于测量值的±0.1%，输入阻抗不小于10MΩ；
			4. 电流测量的分辨率达到lµA，精度不低于测量值的±0.5%；
			5. 对于某些特殊的环境（如密封环境），宜同时监测电极反应释放的氢气、氧气等物质含量。
		8. 电沉积系统电缆应符合本规程第4.2.6节的有关规定。
		9. 电流密度宜采用经验数据或现场试验确定，也可按照附录A.4选取。
	2. 安装与调试
		1. 电沉积保护系统的安装应包括钢筋电连接、混凝土结构预处理、监控系统的安装、辅助阳极的安装、各种接头的制作和电缆铺设、直流电源的安装等。
		2. 安装前应确认所用的材料和仪器与设计一致，安装方式应满足设计要求，并符合下列规定：
			1. 钢筋连接可采用焊接连接；
			2. 预处理应符合下列要求：
				1. 清除裂缝部位表层海生物、松散混凝土和其他不牢固附着物等；
				2. 用高压淡水冲洗待修复部位。
			3. 监控系统安装方法应满足产品说明书的要求，并采取相应的防护措施；
			4. 辅助阳极的安装应满足设计要求，并应根据阳极的规格、品种和安装方式采取相应的防护措施；
			5. 接头应进行密封防水处理，并满足耐久性要求；参比电极电缆不得有水中接头，路上接头应修复屏蔽层并进行绝缘密封。电缆应采取适当的保护措施，避免环境、人和动物的破坏；电缆水中部分应留有足够的长度余量；
			6. 直流电源的安装位置及保护方式除应满足设计、产品说明书和本规程第8.2.3节的有关规定外，还应符合现行国家标准《电器装置安装工程低压电器施工及验收规范》（GB50254）的有关规定。
		3. 系统安装完毕应进行全面检查。
		4. 系统调试应包括下列内容：
			1. 检测记录每个保护单元的回路电阻，避免短路；
			2. 以电流设计值的20%进行试通电，记录输出电压、电流和电位，确认所有组件安装、连接是否正确；
			3. 试通电不少于48h，每8h记录一次输出电压、电流和电位；
			4. 试通电结束后，调整其电流值到设计值，如没有意外情况，应保持该电流值直至电化学沉积法修复裂缝完成。
		5. 电沉积实施完成后，应进行后处理，并应符合下列规定：
			1. 拆除混凝土表面阳极系统及其组件；
			2. 采用高压淡水清洗混凝土表面，检查混凝土表面状况并对表面缺陷进行修复；
			3. 检查评估电化学沉积法修复裂缝的效果。
	3. 质量控制与检验
		1. 电沉积的检验应包括下列内容：
			1. 各种材料和仪器设备的检验与验收；
			2. 所有回路的极性检查；
			3. 所有回路的电连接性检查；
			4. 所有回路的绝缘性检查；
			5. 参比电极安装位置的检验与验收；
			6. 混凝土表面处理质量及保护层厚度检验；
			7. 辅助阳极的制作和安装质量检验；
			8. 各种接头和电缆的制作和铺设、直流电源的安装质量的检验与验收等。
		2. 施工过程应控制每道工序的质量，合格后方可进行下道工序施工。
		3. 质量控制与检验的方法应按附录B的规定执行。
		4. 对于处于严重环境下的重要工程或构件，宜通过现场表层混凝土抗渗性测试仪，测定修复后的混凝土抗渗性。
1. 当结构对于抗渗性能要求较高时，需要通过抗渗性测试来评价电沉积修复后的抗渗性是否达标。
	1. 维护管理
		1. 电沉积保护系统的过程控制管理，应由专门的技术人员负责。
		2. 保护系统的各部件宜每天检查一次。
		3. 输出电压、电流和电位宜每天记录三次。
		4. 修复效果应根据记录的输出电压、电流和钢筋混凝土电位等参数进行初步的评估。
2. 双向电迁
	1. 一般规定
		1. 双向电迁技术适用于受氯盐腐蚀的普通钢筋混凝土结构与预应力混凝土结构。对大型的、重要的或环境复杂的工程，在正式处理前，应在有代表的构件上进行试验。
3. 受氯盐腐蚀的普通钢筋混凝土结构与预应力混凝土结构包括沿海环境、海洋环境、盐湖环境、除冰盐作用、海砂建筑材料等工况下的混凝土结构。
	* 1. 当电解液中含有析氢抑制作用的阳离子阻锈剂时，双向电迁技术可用于预应力混凝土，但在施加正常电流密度前，应确保预应力筋表面已积聚一定浓度的阳离子阻锈基团。

双向电迁技术可将电迁型阳离子阻锈剂迁移至预应力筋表面，研究表明，该类型阻锈剂能隔绝双向电迁过程产生的氢气进入预应力筋微裂缝，减小预应力筋氢脆风险。针对预应力混凝土结构应采用阴极极化曲线测试预应力筋的析氢电流密度，在此安全电流密度下应用双向电迁技术，并定期检测预应力筋的析氢电流密度并逐步提高双向电迁技术的电流密度值，提高混凝土结构耐久性修复效率。

* + 1. 直流电源输出电压大于24V时，应采用预警保护措施。
		2. 双向电迁技术的外加电流密度值应按附录A.5选取。
1. 对于普通钢筋混凝土结构，双向电迁技术的外加电流密度宜控制在3A/m2以内。对于预应力混凝土结构，双向电迁技术的外加电流密度宜控制在2A/m2以内。研究表明，双向电迁技术可使阳离子阻锈剂迁移至钢筋或预应力筋表面，能有效降低钢筋或预应力筋的氢脆程度。普通钢筋混凝土结构的电流密度处在3A/m2以内时，钢筋氢脆现象不明显。预应力混凝土结构的预应力筋所处的应力水平高，对氢脆更敏感，外加电流密度处于2A/m2以内时，钢筋氢脆现象不明显。
	1. 系统设计
		1. 双向电迁修复装置应包括辅助阳极系统、电流控制系统、监控系统和电缆等。
		2. 阳极系统中辅助阳极的性能和参数应符合下列规定：
			1. 辅助阳极应采用耐腐蚀性能好的金属材料，其厚度应能满足在通电期内提供持续电流载体的要求；
2. 双向电迁过程中辅助阳极会在持续电流作用下发生锈蚀，应选择合适厚度，保障辅助阳极在双向电迁过程中不出现锈穿。
	* + 1. 辅助阳极的形状应满足均匀分布电流的要求，宜采用网格状或片状阳极；当采用条状阳极时，应根据结构构件的形状和表层钢筋的表面积均匀布置，间距不宜大于0.5m；
3. 双向电迁过程中辅助阳极和钢筋之间的电场分布特征决定了离子电迁路径，电场分布特征取决于辅助阳极和钢筋的相对位置，应合理布置辅助阳极位置，尽可能构建均匀的电场分布。
	* + 1. 不同位置辅助阳极的布置方式及要求可参考《海港工程钢筋混凝土结构电化学防腐技术规范》（JTS153-2-2012）。当辅助阳极的安装位置位于水位变化区及以下时，还应采取防水措施避免海水等腐蚀性液体进入辅助阳极；
4. 水位变化区及以下部位可在低潮位时安装辅助阳极装置，高潮位时海水会淹没辅助阳极，需保证辅助阳极具备防水功能，避免海水进入电解液影响双向电迁效果。
	* + 1. 混凝土表面各辅助阳极之间宜采用串联方式接入直流电源，辅助阳极尺寸以及串联入线路的辅助阳极数量应依据混凝土电阻、直流电源功率计算得到。
5. 辅助阳极和钢筋之间流过的电通量大小是影响双向电迁效果的主要因素，各双向电迁单元之间电流相同或接近是评估双向电迁效果的关键，宜采用串联方式保证各双向电迁单元电流密度相同或接近。
	* 1. 阳极系统中电解液的性能和参数应符合下列规定：
			1. 电解液应选用电迁移性能良好的阻锈剂，应采用能解离出阳离子阻锈基团的阻锈剂；
6. 适用于双向电迁技术的阻锈剂应能在通电过程中解离出阳离子阻锈剂基团，才能在电场作用下迁移至钢筋或预应力筋表面。，适用于双向电迁技术的常用阻锈剂如三乙烯四胺溶液、咪唑啉季铵盐溶液等。
	* + 1. 电解液应用磷酸、亚磷酸或焦磷酸调节其pH值大于10。当集料存在碱活性时，应在电解质中加入0.1mol/L LiOH或0.1mol/L Li2CO3溶液。
7. 在双向电迁过程中，阳极电化学反应会使周围电解液溶液不断酸化，故选用碱性电解质。为了抑制碱骨料反应的发生，宜在电解质溶液中加入0.1mol/L LiOH或0.1mol/L Li2CO3溶液。
	* 1. 钢筋电连接、混凝土结构预处理、各种接头的制作和电缆铺设、直流电源的安装等应符合《海港工程钢筋混凝土结构电化学防腐技术规范》（JTS153-2-2012）的相关要求。
		2. 监控系统应覆盖电解液pH值、电流、电流密度、析氢电流密度、辅助阳极外观等参数，应符合下列规定：
			1. 监控系统应具有稳定、可靠、维护简单、抗过载、防雷、抗干扰、抗盐雾、故障保护等特点；
			2. 电解质溶液pH值宜每天测量一次并记录；
			3. 电解质溶液pH值宜每天测量一次并记录，当pH值低于7时，应更换电解液；
8. 双向电迁过程中，电解质的pH值应跟踪监测。若电解质溶液转为酸性，就有可能导致混凝土表面酸化、阻锈剂解离不充分、辅助阳极锈蚀加速等不利情况。
	* + 1. 电流测量的分辨率应达到1μA，精度不低于测量值的±0.5%；
			2. 辅助阳极外观监测应包括辅助阳极电解液盛放装置密封性、辅助阳极和电缆接头可靠性；
			3. 预应力混凝土结构双向电迁修复过程中的电流密度应低于析氢电流密度，析氢电流密度通过分析动电位极化法测得的阴极极化曲线得到。
9. 双向电迁修复过程中，作为阴极的钢筋附近可能发生的电极反应包括耗氧反应和析氢反应，其中耗氧反应本身交换电流密度小，优于析氢反应发生。因此电流密度较小时，阴极反应中耗氧反应占据主导。随着过电位增加，电流`密度逐渐增加达到析氢电流密度，析氢反应开始发生。此时，阴极反应由析氢反应和耗氧反应共同控制。当电流密度逐渐达到耗氧反应的极限扩散电流密度后，耗氧反应控制力达到极限，随后的阴极反应由析氢反应控制。双向电迁修复过程中典型的阴极极化曲线如图9.2.5所示：



图9.2.5 双向电迁修复过程中典型的阴极极化曲线

由阴极极化曲线可知，当电流密度逐渐接近耗氧反应的极限扩散电流密度时，电流密度将不随电位增加而增大。而电流密度达到耗氧反应的极限扩散电流密度之前析氢反应已发生，使得电流密度仍能随电位的增加而增大，可通过对阴极极化曲线进行一阶求导得到电流密度随电位增加的变化速率，电流密度变化速率开始波动并逐步稳定，该波动起始位置所对应的电流密度即为临界析氢电流密度。

* + 1. 双向电迁系统电缆应符合本规程第4.2.6节的有关规定。
	1. 安装与调试
		1. 双向电迁修复施工应包括钢筋电连接、破损区域保护层的凿除和修补、混凝土结构预处理、监控系统的安装、阳极系统安装、各种接头的制作和电缆铺设、直流电源的安装、结构表面后处理等。
		2. 安装前应确认所用的材料、仪器设备与设计一致，施工前应进行材料和仪器设备性能的检验，合格后方可进行安装施工。
		3. 施工前应对施工队伍进行岗前培训，合格后方可进行安装施工。
		4. 钢筋电连接的安装方式应满足本规程4.3.2节有关规定外，还应符合下列规定：
			1. 电缆和钢筋连接处应对凿出孔洞进行环氧树脂等密封处理，防止潮湿环境导致接头锈蚀，上述孔洞宜设置在辅助阳极之外和水位变动区以上；
			2. 处于水位变化区的辅助阳极装置安装好后应进行养水试验，达到完全密封后允许灌入电解液；
			3. 阳极系统中电解液高度不应超过辅助阳极和电缆的接头位置；阳极系统应避免电解质溶液的蒸发与泄露，且应满足本规程第9.2.2节的有关规定。
1. 若阳极系统中电解液高度辅助阳极和电缆的接头位置，则辅助阳极和接线不同金属会发生电化学反应，造成断路。
	* 1. 通电调试前，应测量并记录各保护单元的回路电阻与自腐蚀电位。
		2. 检查各种电缆的通电连续性、各种接头的绝缘及密封性、仪器设备安装位置的准确和牢固等。
		3. 系统调试应满足基本规定本规程第6.3.4节相关规定外，还应符合下列规定：
			1. 对于预应力混凝土结构应测试其阴极极化曲线，测得其析氢电流密度值，外加电流密度控制在析氢电流密度值以内；
			2. 针对预应力混凝土结构应定期检测预应力筋的析氢电流密度并逐步提高双向电迁技术的电流密度值，提高混凝土结构耐久性修复效率。
		4. 双向电迁修复系统的施工过程控制管理，应符合下列规定：
			1. 双向电迁修复系统的过程控制管理，应由专门的技术人员负责；
			2. 双向电迁修复系统的各部位宜每天至少检查一次；
			3. 输出电压、电流和电位宜每8h测量记录一次；
			4. 电解质溶液pH值宜每天测量记录一次，确保pH值大于7.0；
			5. 处理效果应依据输出电压、电位、电流和通电时间等过程参数的检测记录结果进行初步评估。
		5. 双向电迁修复后的后处理应符合本规程第8.3.6节相关规定。
	1. 验收与检验
		1. 双向电迁混凝土耐久性修复的质量控制与检验应包括下列内容：
			1. 混凝土结构预处理；
			2. 保护单元内钢筋电连接线；
			3. 参比电极的性能及安装；
			4. 阳极系统的性能及安装；
			5. 电解液的性能；
			6. 接头制作及电缆铺设；
			7. 仪器和设备性能；
			8. 运行状况及处理效果。
		2. 处理效果应依据输出电压、电位、电流和通电时间等过程参数的检测记录结果进行初步评估。
		3. 双向电迁修复的效果应通过测试混凝土内残余氯离子浓度、阻锈剂浓度、钢筋腐蚀电位等参数进行验收，应符合以下规定：
			1. 取样分析典型耐久性修复单元混凝土内剩余氯离子含量，取样和测试过程参考《混凝土中氯离子含量检测技术规程》（JGJ/T 322）；
			2. 取样分析典型耐久性修复单元混凝土迁入的阻锈剂含量，测试过程参考《元素分析仪方法通则》（JY/T017）；
			3. 双向电迁修复后，应对每一处理单元中的钢筋电化学参数进行测试，检测数量不应少于3个。其中，腐蚀电势不应小于-250 mV（相对于硫酸铜参比电极），腐蚀电流密度不应大于0.15μA/cm2。
2. 同一处理单元是指某一构件上施加电流密度相同的区域。
	* 1. 双向电迁技术修复后，钢筋周围混凝土内部氯离子含量应低于水泥砂浆质量的0.1%或钢筋恢复钝化，混凝土中钢筋表面混凝土中氮元素和氯离子的摩尔浓度比值不应小于1。
3. 混凝土内的有害氯离子浓度低于使钢筋锈蚀的临界氯离子浓度，钢筋就不会锈蚀。但是，钢筋锈蚀的临界氯离子浓度并非定值，其大小取决于孔隙液pH值、胶凝材料C3A、C4AF含量、水灰比等因素。据此为了评判除氯效果，规定了混凝土内氯离子含量相对于水泥砂浆应低于0.1%。阻锈剂可有效提高钢筋锈蚀的临界氯离子含量，当混凝土内初始氯离子含量较高时，电迁进入的阻锈剂有利于提高钢筋抗腐蚀性能，研究表明，钢筋表面混凝土中氮元素和氯离子的摩尔浓度比值不应小于1时效果较好。
	1. 维护管理
		1. 双向电迁系统的过程控制管理，应有专门的技术人员负责。
		2. 预应力混凝土结构应定期检测预应力筋的析氢电流密度，并使外加电流密度控制在析氢电流密度以内。
		3. 双向电迁过程应保存设计、施工方案，记录并评价检测数据，判定修复结果等。数据记录项目包括：
			1. 钢筋表面积和混凝土表面积。
			2. 测试修复过程钢筋析氢电流密度值；
			3. 修复后钢筋表面混凝土内氯离子含量；
			4. 保护层范围内氯离子浓度梯度分布测量数据；
			5. 修复后钢筋表面阻锈剂浓度；
			6. 修复后其他化学、物理检测分析数据；
		4. 处理效果应根据输出电压、电位、电流和通电时间等过程参数的检测记录结果进行初步评估。
4.
5. 钢筋混凝土电化学修复技术参数
	1. 阴极保护

表A.1.1 阴极保护技术参数

|  |  |
| --- | --- |
| 项目 | 阴极保护 |
| 通电时间 | 在防腐期间持续通电 |
| 电流密度i（mA/m2） | 0.1≤i≤50 |
| 通电电压U（V） | U≤15 |
| 确认效果的方法 | 测定电位或电位衰减值 |
| 确认效果的时间 | 在防腐期间定期检测 |

表A.1.2 不同环境下阴极保护电流密度参考值

|  |  |
| --- | --- |
| 钢筋周围的环境及钢筋的状况 | 电流密度（mA/m2） |
| 碱性、供氧少、钢筋尚未锈蚀 | 0.1 |
| 碱性、露天结构、钢筋尚未锈蚀 | 1~3 |
| 碱性、干燥、有氯盐、混凝土保护层厚，钢筋轻微锈蚀 | 3~7 |
| 潮湿有氯盐、混凝土质量差，保护层薄或中等厚度，钢筋普遍发生点蚀或全面锈蚀 | 8~20 |
| 氯盐含量高，潮湿，干湿交替，富氧，混凝土保护层薄，气候炎热，钢筋锈蚀严重 | 30~50 |

* 1. 电化学再碱化

表A.2.1 电化学再碱化技术参数

|  |  |
| --- | --- |
| 项目 | 电化学再碱化 |
| 通电时间 | 7～14d |
| 电流密度i（mA/m2） | 300≤i≤1000 |
| 通电电压U（V） | 5≤U≤50 |
| 电解质溶液 | 0.5~1.0mol/L Na2CO3水溶液、K2CO3水溶液或Li2CO3水溶液 |
| 确认效果的方法 | 测定混凝土碳化情况 |
| 确认效果的时间 | 通电结束后 |

* 1. 电化学除氯

表A.3.1 电化学除氯技术参数

|  |  |
| --- | --- |
| 项目 | 电化学脱盐 |
| 通电时间 | 30～60d |
| 电流密度i（mA/m2） | 1000≤i≤2000 |
| 通电电压U（V） | 5≤U≤50 |
| 电解质溶液 | Ca(OH)2饱和溶液和自来水 |
| 确认效果的方法 | 测定混凝土的氯离子含量和钢筋电位 |
| 确认效果的时间 | 通电结束后 |

* 1. 电化学沉积

表A.4.1 电化学沉积技术参数

|  |  |
| --- | --- |
|  | 《海港工程钢筋混凝土结构电化学防腐蚀技术规范》 |
| 通电时间 | 60~180d |
| 电流密度i（mA/m2） | 500≤i≤1000 |
| 通电电压U（V） | 10≤U≤30 |
| 电解质溶液 | 海水 |
| 确定效果的方法 | 测定裂缝愈合率、填充深度和混凝土透水系数的测定 |
| 确定效果的时间 | 通电结束后 |

1. 目前已有的关于电化学沉积的规范均采用海水作为电解质溶液，但考虑到电沉积法适用范围可扩大至陆上结构，可不必选用海水进行陆上结构的修复。根据文献调研得到的实验研究成果，可采用0.05-0.1mol/L的硫酸锌或硫酸镁溶液作为电解质溶液进行修复，通电时间及电流密度等也可适当调整。关于确定效果的方法，国内规范通过裂缝愈合率和填充深度进行评价，日本规范评价指标还包括透水系数及钢筋电位的测定。若考虑加入透水系数检测作为评价指标，具体的操作以及评价参数需另外列出。
	1. 双向电迁

表A.5.1 双向电迁技术参数

|  |  |
| --- | --- |
| 项目 | 双向电迁 |
| 通电时间 | 15~30d |
| 电流密度i（mA/m2） | i≤3000（普通混凝土）i≤2000（预应力混凝土结构） |
| 通电电压U（V） | U≤50 |
| 电解质溶液 | 阳离子型阻锈剂溶液 |
| 确认效果的方法 | 测定混凝土的氯离子含量、钢筋电位和阻锈剂浓度 |
| 确认效果的时间 | 通电结束后 |

1.
2. 施工记录

B.0.1混凝土结构耐久性修复过程应填写施工记录。施工记录见表B.0.1。

表B.0.1 ×××工程施工记录表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 主项 | 分项名称 | 检测设备及型号 | 部位 | 记录内容 | 备注 |
| 混凝土表面处理 | 混凝土外观裂缝 |  |  |  |  |
| 修补范围 |  |  |  |  |
| 凿除范围 |  |  |  |  |
| 混凝土耐久性指标 | 保护层厚度 |  |  |  |  |
| 碳化深度 |  |  |  | 再碱化专项记录 |
| 混凝土电阻率 |  |  |  |  |
| 钢筋腐蚀电位 |  |  |  |  |
| 氯离子浓度 |  |  |  | 除氯专项记录 |
| 阻锈剂浓度 |  |  |  | 双向电迁技术专项记录 |
| 辅助阳极安装与维护 | 电解液盛放装置密封性 |  |  |  |  |
| 辅助阳极锈蚀状况 |  |  |  |  |
| 电流控制系统安装与维护 | 钢筋析氢电流密度 |  |  |  | 双向电迁技术专项记录 |
| 钢筋电连接线 |  |  |  |  |
| 短路测试 |  |  |  |  |
| 电绝缘性测试 |  |  |  |  |
| 保护电流 |  |  |  |  |
| 保护电位 |  |  |  |  |
| 监控系统安装与维护 | 输出电流 |  |  |  |  |
| 输出电压 |  |  |  |  |
| 断电时长 |  |  |  |  |
| 电解液pH值 |  |  |  |  |
| 后处理过程 | 腐蚀电位 |  |  |  |  |
| 腐蚀电流密度 |  |  |  |  |
| 混凝土表面清理 |  |  |  |  |
| 裂缝修复效果 |  |  |  |  |

本规程用词用语说明

1为便于在执行本标准条文时区别对待，对执行标准严格程度的用词说明如下：

1）表示很严格，非这样做不可的用词

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2 ）表示严格，在正常情况下均应这样做的用词

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 标准中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

1. 《混凝土结构加固设计规范》GB50367
2. 《混凝土结构设计规范》GB50010
3. 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204
4. 《准建筑工程施工质量验收统一标准》 GB 50300
5. 《电器装置安装工程低压电器施工及验收规范》GB 50254
6. 《安全电压》GB 3805
7. 《电器装置安装工程低压电器施工及验收规范》GB50254
8. 《额定电压lkV(Um=1. 2kV) 到35 kV( Um =40.5 kV) 挤包绝缘电力电缆及附件》 GB/T 12706
9. 《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476
10. 《铝-锌-铟系合金牺牲阳极》GB/T 4948
11. 《铝-锌-铟系合金牺牲阳极化学分析方法》GB/T 4949
12. 《牺牲阳极电化学性能试验方法》GB/T 17848
13. 《混凝土结构耐久性修复与防护技术规程》JGJ/T 259
14. 《混凝土中氯离子含量检测技术规程》JGJ/T 322
15. 《海港工程钢筋混凝土结构电化学防腐蚀技术规范》JTS 153
16. 《水运工程混凝土结构实体检测技术规程》JTS 239
17. 《港口水工建筑物修补加固技术规范》JTS 311
18. 《水运工程混凝土试验规程》JTJ 270
19. 《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ275
20. 《混凝土结构加固用聚合物砂浆》JG/T289
21. 《元素分析仪方法通则》JY/T017
22. 《混凝土结构耐久性评定标准》CECS 220
23. 《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》CECS146