

滨海电厂水工混凝土耐久性分析

段瑞明¹, 钟骏杰²

(1. 华东电力设计院, 上海 200063; 2. 上海市市政工程设计院, 上海 200092)

摘要 确定了滨海电厂的环境类别及作用等级, 分析了影响滨海电厂水工混凝土结构耐久性的各种因素, 结合滨海电厂水工混凝土的特点及工程设计实践, 指出提高混凝土结构耐久性的措施, 基本措施是提高滨海电厂水工混凝土本身抗氯离子扩散渗透性以及延缓混凝土的中性化. 最后, 讨论了水工混凝土防腐材料的选用.

关键词 水工混凝土 耐久性 滨海电厂

中图分类号: TV431

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)S2-0033-04

结构耐久性设计工作才开展了 20 余年, 目前尚在不断研究、补充和完善中. 耐久性设计的基本要求比较粗糙, 在滨海电厂水工混凝土结构中, 对结构耐久性的含义、影响结构耐久性的因素以及应采取哪些相应的措施, 认识不尽相同.

滨海电厂水工混凝土结构耐久性是指在预定作用和预期维修与使用条件下, 结构及其部件能够在预定的期限内维持其所需最低性能要求的能力.

滨海电厂水工混凝土结构在使用过程中, 受到土壤、海水及空气中氯离子的侵蚀, 或混凝土本身组成材料中氯离子的物理化学作用而产生劣化, 主要体现在混凝土材料和钢筋上, 前者表现为强度降低、混凝土开裂、表面剥落和溃散等; 后者则指钢筋钝化膜破坏, 丧失对钢筋的保护作用, 从而引起钢筋锈蚀, 削减其有效断面, 并引起膨胀, 进而破坏钢筋的混凝土保护层, 恶性循环直接减少建筑物正常使用寿命, 严重则会导致结构 10~20 a 就发生损毁. 混凝土结构耐久性问题日益突出, 由此需要对混凝土结构耐久性设计与施工提出明确要求.

《混凝土结构耐久性设计与施工指南》^[1]对当前滨海电厂工程设计与施工中应如何正确界定结构耐久性标准及采取哪些相应措施起到了指导性作用, 非常必要和及时. 本文根据滨海电厂水工混凝土的特点以及工程设计实践, 结合相关文献^[1~3]概述了影响滨海电厂水工混凝土结构耐久性的因素及相应措施.

1 滨海电厂环境类别及作用等级界定

根据文献^[1]对环境类别及作用等级的划分, 环境作用按其对应电厂水工配筋混凝土的侵蚀程度分为 6 级. 可忽略为 A 级, 轻度 B 级, 中度 C 级, 处于近海或海洋环境对结构侵蚀程度严重者为 D 级, 非常严重 E 级, 极端严重 F 级. 其中水下区为 D 级; 大气区在离平均水位 15 m 以上的海上大气区、离涨潮岸线 50 m 外至 200 m 内的陆上室外环境及轻度盐雾区为 D 级; 大气区在离平均水位 15 m 以下的海上大气区、离涨潮岸线 50 m 内的陆上室外环境及重度盐雾区为 E 级; 非炎热水位变化区和浪溅区为 E 级; 南方炎热水位变化区和浪溅区为 F 级.

对环境分类及作用等级划定: 干湿交替环境中水中氯离子质量浓度 100~500 mg/L 时为 C 级、500~5 000 mg/L 为 D 级、5 000~10 000 mg/L 为 E 级; 长期浸水环境中氯离子质量浓度 500~5 000 mg/L 为 C 级、5 000~20 000 mg/L 为 D 级、20 000~40 000 mg/L 为 E 级. 潮湿土中氯离子质量浓度 150~750 mg/L 为 C 级、750~7 500 mg/L 为 D 级、7 500~15 000 mg/L 为 E 级. 根据文献^[4]提供的资料, 渤海氯离子质量浓度为 17 400 mg/L, 黄海氯离子质量浓度为 18 500 mg/L, 长期浸水环境均达到 D 级.

根据文献^[1]对结构的设计使用年限分级划定, 滨海核电站结构的设计使用年限分级应定为一, 在不同环境作用等级下需要作耐久性设计的范围为混凝土材料、结构构造和裂缝控制、施工要求等

项目从 A 级到 F 级,定期检测使用阶段从 B 级到 F 级,防腐蚀附加措施从 D 级到 F 级.滨海火电站结构的设计使用年限分级应定为二级,在不同环境作用等级下需要作耐久性设计的范围为:混凝土材料、结构构造和裂缝控制、施工要求等项目从 B 级到 F 级,定期检测使用阶段从 C 级到 F 级;防腐蚀附加措施从 E 级到 F 级.

根据侵蚀程度划定环境类别及作用等级,可使混凝土的材料选用、结构的构造措施和裂缝控制、施工要求、定期检测、防腐蚀附加措施等有了明确界定及相应指标,对电厂水工混凝土耐久性设计与施工起到指导作用.

2 影响滨海电厂水工混凝土结构耐久性的因素

参考文献[2~6]以及滨海电厂水工混凝土构筑物的现状,影响滨海电厂水工混凝土结构耐久性的因素主要有:

a. 结构设计不合理.①钢筋的混凝土保护层厚度不够;②水泥品种、水泥使用量、水灰比选择不当,单位用水量未限制,导致混凝土设计强度和抗渗、抗冻指标达不到要求等;③沉降缝、伸缩缝构造不正确;④构件孔洞边缘配筋不当,造成应力集中,边缘破损;⑤滨海地区构筑物抗氯盐渗透和抗腐蚀等措施不当.

b. 材料选用不当.①选用水泥含碱量过大,或水泥中含有较多含碳硫化物,由于其细度过小,加速水化热,使混凝土干燥收缩而开裂;②选用含碱活性矿物的骨料;③骨料级配不当;④外加剂选用不当;⑤滨海地区骨料及水体中氯离子含量偏高.

c. 施工质量低劣.①水灰比过大,导致孔隙率增大,渗透性加大(水灰比越大,混凝土抗氯离子渗透性能越差);②单方水泥用量过大引起收缩,水化热过大导致混凝土开裂;③过早拆模,引起早期开裂;④浇捣、养护不当产生蜂窝麻面和沉降微细裂缝;⑤养护方式选用不正确,不同养护方式对不同配料混凝土抗氯离子渗透性能有影响;⑥施工缝处理不当,产生冷缝;⑦选用了含氯离子的早强剂;⑧使用了氯离子含量偏高的水搅拌混凝土.

d. 外界环境条件.①干湿环境交替频繁;②自然环境恶化、酸雨及空气污染,使结构遭受 CO_2 、 SO_2 和 H_2SO_3 气体的侵蚀;③滨海地区建筑场地氯离子含量高以及含其他碳酸盐、碱溶液等侵蚀性水溶液;④化学侵蚀;⑤混凝土冻裂;⑥表面磨损.

3 提高滨海电厂水工混凝土结构耐久性的措施

美国学者 Sitter 曾在欧洲混凝土委员会 CEB 技术通报第 125 号提出过“5 倍定律”观点,认为在设计、施工时省下 1 美元,在维护、修理、翻建时,为提高混凝土耐久性所需的费用就可能是 5 美元、25 美元甚至 125 美元.提高混凝土结构耐久性,延长结构使用寿命,关键应从设计、施工、运行等各阶段预先采取防范措施,防患于未然.

针对滨海电厂水工混凝土的特点以及工程设计实践,提高水工混凝土结构耐久性的措施主要有以下几方面.

a. 基本措施.最大限度地提高滨海电厂水工混凝土本身抗氯离子扩散渗透性以及延缓混凝土的中性化是混凝土防腐的基本措施.结构类型、结构布置和结构构造设计应尽可能阻挡或减轻环境对结构的作用,力求减少棱角、突变、应力集中,便于施工及提高质量,方便今后检查维修.

具体应注意以下 19 条:①设计使用年限为一级的混凝土结构,在承载力极限状态设计中应将荷载效应值乘以不低于 1.1 的重要性系数.②合理配筋,相同配筋量时配筋应细而密,以提高抗裂能力,但钢筋间距不小于 70 mm,必要时可将 2 根钢筋并筋,切实保证保护层的质量.③加强构造措施,构件阳角要加强保护,以防碰坏露筋.④钢筋的混凝土保护层厚度应大于规定的最小厚度.对于板墙等面型构件,环境作用等级为 A 级、B 级、C 级、D 级、E 级、F 级时,核电站的钢筋保护层最小厚度分别为 20 mm、30 mm、40 mm、45 mm、55 mm、60 mm;火电站的钢筋保护层厚度分别为 15 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm、55 mm.对于梁柱等条型构件,环境作用等级为 A 级、B 级、C 级、D 级、E 级、F 级时,核电站的钢筋保护层最小厚度分别为 30 mm、35 mm、44 mm、50 mm、60 mm、65 mm;火电站的钢筋保护层最小厚度分别为 25 mm、30 mm、33 mm、45 mm、55 mm、60 mm.⑤提高混凝土设计强度及抗渗、抗冻指标.⑥严格控制混凝土抗氯离子侵入性指标.滨海核电站 D 级、E 级、F 级侵入性指标分别为:56 d 龄期电量指标小于 1 200 C,小于 800 C,小于 800 C;28 d 龄期氯离子扩散系数分别小于 $8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,小于 $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,小于 $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.滨海火电站 D 级、E 级、F 级侵入性指标分别为:56 d 龄期电量指标小于 1 500 C,小于 1 000 C,小于 800 C;28 d 龄期氯离子扩散系数小于 $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,小于 $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,小于 $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.⑦用混凝土抗冻性的耐久性指数定义其抗冻性能.抗冻性的耐久性

指数是指 300 次快速冻融循环后的动弹性模量与初始值的比值。根据环境条件抗冻性的耐久性指数分别为：滨海核电站严寒地区的高度饱水、中度饱水、盐或化学腐蚀下冻融分别为 80,70,85；寒冷地区分别为 70,60,80；微冻地区分别为 60,60,70。滨海火电站严寒地区的高度饱水、中度饱水、盐或化学腐蚀下冻融分别为 70,60,80；寒冷地区分别为 60,50,70；微冻地区分别为 50,45,60。⑧配筋混凝土的最低强度等级、最大水胶比、混凝土胶凝材料的最低用量宜分别满足以下要求：滨海核电站环境作用等级 A 级时为 C30,0.55,280 kg/m³；B 级时为 C35,0.50,300 kg/m³；C 级时为 C40,0.45,320 kg/m³；D 级时为 C40,0.40,340 kg/m³；E 级时为 C45,0.36,360 kg/m³；F 级时为 C50,0.32,380 kg/m³。滨海火电站环境作用等级 A 级时为 C25,0.60,260 kg/m³；B 级时为 C30,0.55,280 kg/m³；C 级时为 C35,0.50,300 kg/m³；D 级时为 C40,0.45,320 kg/m³；E 级时为 C40,0.40,340 kg/m³；F 级时为 C45,0.36,360 kg/m³。⑨严格控制拌和水用量，尽可能降低水胶比。环境作用等级为 E 级和 F 级时，拌和水用量不宜高于 150 kg/m³。⑩拌和用水的氯离子含量不宜大于 200 mg/L。⑪正确选择水泥品种，宜选用低水化热和含低碱量的水泥，水泥中铝酸三钙含量应控制在 6% ~ 12%。⑫混凝土拌和物中氯离子含量控制在水泥质量的 0.1% 以内。预应力结构控制在 0.06% 以内。⑬限制碱骨料的使用，混凝土碱含量最大限值应符合 CECS53《混凝土碱含量限制标准》的规定。⑭粗骨料的最大粒径不宜超过 25 mm，且不得超过保护层厚度的 2/3、板厚的 1/3，石子宜采用混合级配，石子黄砂含泥量必须符合有关规范。⑮尽可能使用硅灰、粉煤灰、矿渣等掺合料及优质高效减水剂和引气剂等外加剂，但不得掺加氯盐。⑯当结构处于的环境作用等级为 E 或 F 级时，应在设计中提出定期检测要求。第一次检测在结构竣工使用后的 3 ~ 5 a 内进行，并对结构耐久性做出评估，采取相应措施；以后定期检测的时间间隔一般不超过 10 a。⑰重视养护方式对提高结构耐久性的作用。不同水泥、不同外加掺合料、不同外加剂、不同水胶比所形成的混凝土养护要求及方式均不相同。⑱滨海地区构筑物施工质量控制措施要加强，尽量减少新浇混凝土与氯盐接触或遭受冰冻的时间。⑲使用中加强维护，控制裂缝开展速度。

b. 附加措施。①采用涂层钢筋，如环氧涂层钢筋、镀锌钢筋等。②采用特殊钢筋，如合金钢钢筋、不锈钢钢筋等。③采用非金属钢筋，如塑料钢筋、树脂钢筋等。④钢筋与混凝土中加钢筋阻锈剂。⑤混凝土中掺加聚丙烯等纤维材料，以增加防裂性能。⑥凝

土表面加外涂层，如硅酮类、涂料类、聚合物砂浆类及其他防水层，尽可能避免水和氯盐等有害物质直接接触混凝土表面。⑦采用阴极保护。⑧电化学除盐。⑨混凝土重新碱化。

c. 组合措施。对于严重环境作用下的重要工程，宜采用多重防护对策，这样即使一种措施失效后可以马上启动下一个措施，如混凝土碳化后启动阴极保护，或同时采用面层防腐涂料和阻锈剂或涂层钢筋，但涂层钢筋不得与外加电流阴极保护联合使用。合理选用防腐材料也是提高混凝土耐久性的有效措施。

4 水工混凝土防腐材料的选用

4.1 混凝土表面涂层

被涂装的混凝土结构应确保质量合格，没有好质量的基面，便没有好的涂装效果。混凝土属于强碱性的建筑材料，选用的涂料应具有良好的耐碱性、附着性、湿固化、耐蚀性、耐磨损、耐冲击和耐老化性。环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸树脂、氯化橡胶、乙烯树脂、复合聚合物材料等涂料均可适用。

混凝土表面涂层系统应由底层、中间层和面层等配套涂料涂膜等组成。底层涂料应具有低黏度、高渗透能力，可直接渗透到混凝土内起到封闭孔隙和提高后续涂层附着力的作用。中间层应有很强的防腐蚀能力，面层也应具有抗老化能力。

上海合流污水等工程采用两种高分子合成乳液配制的系列复合聚合物厚浆涂料(ST)，底面层涂料结合使用已 13 a，至今运行良好。目前，不少沿海电厂循环水系统、废水系统、污水系统等用 ST 复合聚合物厚浆涂料取代原花岗岩、环氧玻璃钢、橡塑衬胆等防腐材料，提高了水工混凝土的耐久性，节省了工程成本。

4.2 混凝土表面硅烷浸渍

把硅烷系的液态憎水剂浸渍混凝土表面，即使这种憎水剂渗入混凝土毛细孔中的深度只有数毫米，它与已水化的水泥发生化学反应，反应物使毛细孔壁憎水化，使水分和水分所携带的氯化物难以渗入混凝土，提高了防腐蚀能力。

4.3 环氧涂层钢筋

使用环氧涂层钢筋的钢筋混凝土能有效地阻止氯盐腐蚀，它与优质混凝土或阻锈剂联合使用，具有双重的保护作用。

环氧涂层钢筋的黏结强度取无涂层钢筋的 80%，钢筋锚固长度、受拉绑扎搭接长度分别为无涂层的 1.25 倍及 1.5 倍^[5]。偏安全考虑，环氧涂层钢筋的钢筋混凝土构件承载力裂缝宽度和刚度的计算

方法不变,但计算刚度和裂缝宽度计算值分别乘以 0.9 和 1.2 的系数^[5]。

由于使用环氧作为涂层,隔开电流的连续性,故环氧涂层钢筋不得与外加电流阴极保护联合使用。施工时必须保护好钢筋的环氧涂层,否则起不到应有效果。

4.4 钢筋阻锈剂

因条件限制钢筋保护层偏薄或混凝土中氯离子含量超过规定以及恶劣环境中的重要工程、核电站等宜参加钢筋阻锈剂。阻锈剂可与高性能混凝土、环氧涂层钢筋、混凝土表面涂层、硅烷浸渍、聚丙烯纤维网纤维等联合使用,具有叠加保护效果。但钢筋阻锈剂只能作为辅助手段,根本还要靠混凝土本身的质量及足够的钢筋保护层。

4.5 合成纤维材料

合成纤维材料在国外使用时间已较长,国内也已广泛应用。合成纤维材料有钢纤维、玻璃纤维、纤维网纤维等材料。由于钢纤维增加了混凝土导电性,助长了电解化学反应,因而不适合滨海电厂工程。聚丙烯纤维网纤维是非腐蚀的化学填入物,对矿质酸碱基质和无机盐有很好的化学阻抗作用,能有效阻止混凝土的塑性收缩和龟裂。目前不少滨海电厂污水处理系统、废水系统、化学系统等构筑物以及海岸建筑外墙抹灰、取排水构筑物、油煤码头、护坡护堤、挡浪墙等构筑物采用聚丙烯纤维网纤维,既能有效地降低海水中氯离子渗透对钢筋的侵蚀,同时还能提高抗波浪及其他重物冲击的能力。

实验表明加入 0.6 ~ 0.9kg/m³ 维克(VICK)抗裂抗渗聚丙烯纤维,同比混凝土或砂浆的抗裂能力提高 90% 以上,抗渗能力提高 70% 以上。聚丙烯纤维材料对混凝土性能的增强是一种物理作用,因此并不影响其他混凝土外加剂的使用,但是不可取代结构性加强材料,不可减小结构尺寸或单独用于解决结构沉降的问题,不能解决大体积混凝土水化热、强大外力冲击的问题。

使用聚丙烯纤维材料必须注意先与水泥等干料充分拌和均匀,拌和混凝土时间及振捣时间根据产品要求适当延长。

5 结 语

a. 预防滨海电厂水工混凝土耐久性病害的主要目的是解决混凝土劣化问题。氯盐环境中混凝土

保护层的碳化是钢筋钝化膜破坏的主要原因,钢筋腐蚀是影响耐久性的主导因素。

b. 最大限度地提高水工混凝土本身抗氯离子扩散渗透性以及延缓混凝土的中性化是提高滨海电厂水工混凝土抗腐蚀能力的基本措施。基本措施与防腐附加措施的组合,对于滨海电厂水工混凝土耐久性的提高可起到叠加效果。

c. 滨海电厂水工混凝土耐久性设计与施工应参照文献[1,5]要求执行,取标准高者为依据。

d. 随着研究与实践的深入,滨海电厂水工混凝土耐久性的设计与施工认识水平将得到深化和提高。

参考文献：

[1] 中国工程院土木水利与建筑学部工程结构安全性与耐久性研究咨询项目组. 混凝土结构耐久性设计与施工指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
[2] 张誉, 蒋利学, 张伟平, 等. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
[3] 邢锋, 明海燕, 曹征良, 等. 沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
[4] 窦照英. 电力工业的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 1995.
[5] JTJ275—2000, 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范[S].
[6] GB50046—95, 工业建筑防腐蚀设计规范[S].

(收稿日期 2005-09-15 编辑 骆超)

中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会成立

中国水力发电工程学会第五届四次常务会议决定, 批准成立“中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会”。该专业委员会目前挂靠河海大学, 中国水利水电科学研究院陈厚群院士任专业委员会主任, 大连理工大学林皋院士、清华大学张楚汉院士、河海大学李同春教授、中国水利水电科学研究院胡晓教授任专业委员会副主任, 秘书长由河海大学张燎军教授担任。专业委员会秘书处设在河海大学水工结构研究所内。“中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会”的成立, 将为我国水电工程抗震防灾研究提供了一个良好的交流平台和发展机遇, 并和国际大坝委员会抗震专业委员会相配合, 促进水电工程抗震防灾方面的国内外交流, 推动相关前沿课题的协作研究, 形成科技创新的整体合力。

(本刊编辑部供稿)