

Corrosion and Protection of Seawater Cooling System of Power Units

Qiang Fu¹, Yang Yang², Ziyue Cao², Rui Wang², Zhao Li², Xuejun Xie^{2*}

¹Guangdong Power Grid Electric Power Science & Research Institute, Guangzhou

²School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan

Email: 446979438@qq.com, *xixuejun@163.com

Received: Aug. 29th, 2014; revised: Sep. 24th, 2014; accepted: Sep. 28th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Composition and main material of seawater cooling systems of power units are stated briefly. Some corrosion and protection examples of seawater cooling systems are summarized. In order to protect totally seawater cooling system, the right material should be chosen, and surface treatment such as coating or lining and cathodic protection should be done well. In order to protect seawater cycling cooling system, beyond that, protection of the seawater cycling cooling tower and biocide treatment of the seawater cycling cooling system should be done well, too. In addition, rubber ball cleaning should be done well; the seawater cycling cooling system, especially the inner surface of condenser tubes should be kept clean.

Keywords

Seawater Cooling, Corrosion, Protection

发电机组海水冷却系统的腐蚀与防护

付 强¹, 杨 洋², 曹子月², 王 瑞², 李 钊², 谢学军^{2*}

¹广东电网公司电力科学研究院, 广州

²武汉大学动力与机械学院, 武汉

Email: 446979438@qq.com, *xixuejun@163.com

*通讯作者。

收稿日期：2014年8月29日；修回日期：2014年9月24日；录用日期：2014年9月28日

摘要

总结了海水冷却系统的组成和主要材质。认为对海水冷却系统进行全面保护，首先是选好材；其次是做好涂层或内衬等表面处理和阴极保护。对于海水循环冷却系统，还要做好海水循环冷却塔的防腐和整个海水循环冷却系统的杀生处理。另外是做好胶球清洗等工作，保持冷却水系统清洁，特别是凝汽器管内表面干净。

关键词

海水冷却，腐蚀，防护

1. 海水冷却系统的组成

海水用作工业冷却，包括直流冷却和循环冷却两种方式。海水直流冷却是抽取海水后经过简单的格栅过滤就进入凝汽器或其它热交换设备、冷却其它介质之后直接排放。冷却系统通常由管道(直管、弯头及大小头等)、设备(如凝汽器、换热器、滤网、蝶阀等)组成。海水循环冷却是以原海水为冷却介质，经换热设备完成一次冷却后，再经冷却塔冷却并循环使用的冷却方式。循环冷却系统在组成上比直流冷却系统多一个冷却塔[1]-[3]。如滨海某电厂 300 MW 发电机组的冷却水为天然海水，冷却水系统包括主厂房内 $\phi 1820 \times 16$ 钢管 32 m，材质为 Q235A；4 个 $90^\circ \phi 1820$ 弯头；DN1800 蝶阀及伸缩器 4 个；DN1800 二次滤网 2 个，材质为 316L；DN1800 收球网 2 个，壳体为碳钢衬胶，其它材质主要是 317LN 不锈钢；DN1800 波纹补偿器 4 个，主要材质为不锈钢；凝汽器水室衬胶，冷凝管为钛管，管板为钛钢复合板。冷却水系统还包括 $\phi 820 \times 7$ 钢管 66 米，材质为 Q235A；电动滤水器 2 台，整体材质为 316L 不锈钢； $\phi 630 \times 7$ 钢管 7 米，材质为 Q235A； $\phi 529 \times 7$ 钢管 6 米，材质为 10CrMoAl；闭式循环热交换器 2 个，材质为钛； $\phi 377 \times 6$ 钢管 75 米，材质为 10CrMoAl；电动蝶阀 9 个； 90° DN800 热压弯头 6 个，DN600 热压弯头 4 个，DN500 热压弯头 2 个；DN800 \times 500 大小头 2 个，DN600 \times 500 大小头 8 个， ϕ DN500 \times 350 大小头 4 个； $\phi 325 \times 6$ 钢管 45 米； $\phi 219 \times 6$ 钢管 48 米。各种阀门 8 个；电动滤水器 1 台；冷油器 2 台；另有弯头、大小头等[4]。

浙江国华宁海电厂二期工程 2×1000 MW 机组的凝汽器为海水循环冷却，采用 2 座双曲线自然通风钢筋混凝土冷却塔。冷却塔由通风筒、人字柱、环型基础、水池、淋水架构、竖井等部分组成。单座冷却塔的淋水面积为 $13,000 \text{ m}^2$ ，高度为 177.20 m，出口内半径为 39.66 m，壳体最大厚度为 1.40 m，最小厚度为 0.28 m，壳体内表面积为 $50,004 \text{ m}^2$ ，壳体外表面积为 $50,361 \text{ m}^2$ [5]。

所以，海水冷却系统的材质，除海水循环冷却系统的冷却塔为钢筋混凝土外，主要是碳钢(如 Q235A、10CrMoAl)、不锈钢(如 316L、317LN)、钛(如 TA₀、TA₁ 和 TA₂)。其中碳钢材质设备众多，主要用在输水管道、阀门阀体、过滤器壳体、换热器水室等设备上，且普遍采用碳钢加内衬技术，包括衬橡胶、衬塑料、衬水泥砂浆和重防腐涂层；我国不锈钢主要用在海水冷却系统的一次滤网和二次滤网等设备上；钛主要用作凝汽器管束、管板，近年来更是如此，因为海水污染情况日益严重，对于使用海水作为冷却水的电厂来说，应考虑到污染的问题，钛是一个很好的选择，我国新建滨海电站冷凝管都选用钛。国外除采用钛管外，还大范围地将超级铁素体不锈钢管应用于海水冷却凝汽器中，美国认为适用于海水的有 AL6XN、254SMO、AL29-4C、SEA-CURE4 种。说明超级不锈钢尤其是超级铁素体不锈钢则是替代

钛的极佳选择, 因为钛在航空航天等领域的需求更大, 节约钛资源很有经济意义。

AL6XN为超级奥氏体不锈钢, 早期在美国电站凝汽器上有过应用, 但因其镍的质量分数较高(高于23.5%), 而镍的价格近些年非常高, 导致AL6XN价格甚至高过钛, 因此, AL6XN管已极少用于电站凝汽器; AL29-4C与SEA-CURE均为超级铁素体不锈钢, 其特点是镍的质量分数较低(低于3.5%), Cr的质量分数较高(高于25%), 因此价格更低, 适合大范围推广应用, 但其制造工艺要求很高(C、N的质量分数必须低于0.06%, 且制管要求高)。SEA-CURE管已大范围地用于滨海电站凝汽器, 而AL29-4C管在滨海电站凝汽器上的应用, 目前只发现了一个失败的案例(美国某电厂应用的AL29-4C管发生泄漏, 后更换为SEA-CURE管)[6] [7]。

2. 海水冷却系统的腐蚀防护原理及方法

2.1. 海水冷却系统的腐蚀防护原理

金属在海水中的腐蚀主要是电化学腐蚀。因为在海水冷却过程中, 海水与空气充分接触, 海水中的溶解 O_2 达到饱和状态, 再加之金属表面的不均一性和海水的强导电性, 金属表面会形成许多腐蚀微电池。但不是所有的金属都会在海水中发生腐蚀, 特别是一些表面形成保护膜的金属, 如钛在海水中由于形成良好保护膜而不易发生腐蚀, 所以说可以通过选用在海水中耐蚀性好的金属来防止海水冷却系统中凝汽器管、管板的腐蚀; 因为是金属与海水直接接触发生的电化学腐蚀, 所以对金属表面进行处理(如涂层或内衬)来隔绝金属和海水, 采用牺牲阳极或外加电流的阴极保护都可以防止海水冷却系统的腐蚀; 如果在海水中金属表面不干净, 如有沉积物, 则沉积物下金属易发生腐蚀, 所以要做好胶球清洗、杀生处理等工作, 保持金属表面干净, 防止腐蚀的发生。

2.2. 海水冷却系统的腐蚀防护方法

由海水冷却系统的腐蚀防护原理可知, 海水冷却系统的腐蚀防护方法, 一是选好材, 如目前我国发电机组海水冷却凝汽器管和管板基本上都选用钛材, 输水管道选用塑料复合管; 二是做好涂层或内衬等表面处理和阴极保护。对于海水循环冷却系统还要做好海水循环冷却塔的防腐和整个海水循环冷却系统的杀生处理。另外是做好胶球清洗等工作, 保持冷却水系统清洁, 特别是凝汽器管内表面干净。

2.2.1. 选好海水冷却系统的材料

1) 金属钛比强度高、密度小, 具有良好的综合性能和冠于其他材料之首优异耐腐蚀性能, 尤其能耐海水及污染海水的腐蚀, 耐高速度海水冲刷性能尤为突出, 对凝汽器空抽区的氨腐蚀也有优异的抗蚀性。

薄壁钛焊管具有下列特点: a) 管材表面光滑、明亮, 管子内外的焊缝平整, 过渡均匀; b) 管壁厚度均匀, 传热效果好, 总传热性能可高出铜管5%以上; c) 使用寿命长。一台机组设计的有效运行期一般为30年。钛管寿命在20年以上, 如果平时运行加强维护, 则自安装投运后, 机组无需停机维修。铝黄铜管寿命不足10年, 需更换管子3次, 而铜镍合金管仅为3年, 需更换管子至少9次; d) 弹性模量低。由于钛焊管壁薄, 应增加支撑板数量, 以减小管子之间及管子与支撑板孔之间的相互摩擦、碰撞, 防止因气流引起的激烈振动而导致管壁局部变薄破裂; e) 价格低。钛管凝汽器和铜管凝汽器的主要差价在于管板及管与管板的焊接费用, 但就管材而论, 对同一台机组, 总冷却表面积相同, 按单位长度价格比较, 使用 $\varnothing 25\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 钛焊管与使用 $\varnothing 25\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ BFe30-1-1铜管的价格差不多。

对于钛管凝汽器, 通过技术引进和改进, 国内的大型制造厂均掌握了一套成熟可靠的设计加工工艺, 有效地解决了管束振动、缝隙腐蚀、电偶腐蚀、水滴侵蚀等问题, 但钛凝汽器管易出现生物污堵问题, 需引起重视[8] [9]。

1993年, 浙江定海电厂对3号机组技术改造, 将其原铜管凝汽器更换成钛管凝汽器, 改造所需用的钛

焊管 $\varnothing 25 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 全部由宝鸡钛业公司生产提供。机组投运至今，凝汽器运行正常，钛焊管未发现腐蚀、侵蚀、泄漏等现象。

多年来的实践证明，钛焊管已成为冷却水水质恶劣的沿江滨海地区发电厂凝汽器设备的理想管材。尽管钛管凝汽器一次性投资相对较高，但其安全可靠、使用寿命长，不污染环境，运行和维护费用低和保证凝结水水质的指标等优点，深受电力行业材料专家和电厂运行管理人员的青睐和重视。国家电力公司于1999年底将牌号为TA₀、TA₁和TA₂的国产钛管首次正式纳入“火力发电厂凝汽器管选材导则”，电厂化学标准化技术委员会颁发了质量检测认证书[10]。

2) 塑料管与传统铸铁管、钢管、水泥管相比，有内壁光滑、阻力小，密封性好、耐腐蚀、连接方便等优点，但也存在耐腐不耐压、强度低、对铺设环境要求较高、耐冲击力差、部分管材材质易老化等诸多缺点。

钢骨架塑料复合管为钢塑两种材料复合而成，它除了具有普通塑料管的优点外，还具有耐冲击性好、弹性好、抗地形不均匀沉降的优点。因此，在安装条件较差，防腐要求高的低压常温流体输送场合中得到推广应用。目前该管材管道口径系列为DN 50~DN 600，无大口径管道，采用电熔连接时，需采用专用工具[8]。

当然，选择耐蚀材料，可以从根本上解决腐蚀问题，但一般所花经费太多，因而不可能把所有的设备都换成贵金属材料，通常只在关键部位选用，如用钛制作凝汽器的管束及管板等。

2.2.2. 做好涂层或内衬等表面处理和阴极保护

1) 阴极保护技术包括牺牲阳极和外加电流两种方法，两种方法各有优缺点。

对于电厂海水冷却系统，具体选择哪一种方法，往往要根据所需保护电流的大小，可否获得方便的输入电源，是否会引发危险性以及设备结构空间大小等因素决定。一般对小口径管道，海水流速及介质组成变化较大，需提供较大保护电流情况，较适宜采用外加电流阴极保护。近年来，电厂海水冷却系统越来越多地采用外加电流阴极保护。如外高桥电厂为防止其900 MW超临界机组循环水系统海水电化学腐蚀，采用外加电流阴极保护，以保护凝汽器水箱、冷却水管、拦污栅、钢闸门、循泵进出水管、循环水管的表面，保护效果优良[11]。

某滨海电厂300 MW发电机组的冷却水为天然海水，其海水冷却系统钢质管道全部采用外加电流阴极保护，相当有效。保护系统由辅助阳极、参比电极、恒电位仪、阳极屏及连接电缆等附件组成。辅助阳极选用铂铱和混合金属氧化物(MMO)两类，以Ag/AgCl和高纯锌复合参比电极作为系统控制和检测电极[4]。

2) 阴极保护是防止或减缓设备腐蚀行之有效的方法，一般与涂层或内衬等表面处理联合保护，如对碳钢材料的保护常采用阴极保护与涂层联合的保护方法，如秦山核电站二回路海水循环水系统的保护；特殊情况下也单独使用，如华能丹东电厂。

a) 秦山核电站二回路海水循环水系统中，循环水系统管道中室外部分均为埋地铺设，管道内表面大部分衬有水泥砂浆衬里，局部为熔融环氧或防腐涂层；为加强对循环水系统管道的保护，该部分管道加有厂区海水管道内壁阴极保护系统，由16个镀铂钛辅助阳极装置向管内海水释放电流对管道内壁进行阴极保护；在输水母管互通闸阀两侧直径1.6 m和2.6 m渐缩管段内壁加有铝合金牺牲阳极进行阴极保护；04号厂房内凝汽器本体至海水进出口蝶阀间的海水管道内壁涂有重防腐环氧沥青漆涂料，并结合铝合金牺牲阳极对管道进行保护；4台二次滤网筒体及凝汽器进出口水室和折回水室内表面衬有橡胶防腐层[12]。

b) 华能丹东电厂1、2号机组厂房内海水循环冷却水管道依据外方原设计，采用内壁裸露的无缝碳

钢管。冷却水采用鸭绿江入海口处海水，碳钢管内壁在海水中以全面腐蚀、垢下腐蚀和电偶腐蚀为主要腐蚀形态，其中后 2 种腐蚀形态造成的危害较为严重。由于外方对电厂厂房内海水循环冷却水管道内壁防腐未提出设计要求，并考虑到管道弯头和焊接连接较多，已安装的管道内壁涂敷防腐涂层较困难，经有关专家论证和参照某些阴极保护工程实践，为防止管内壁腐蚀，延长管道使用寿命，决定对直径大于 150 mm 管道采用不做内防腐涂层的加强级外加电流阴极保护。系统稳定运行后，通电电位检测值达到了技术指标要求，冷却水管处于良好的被保护状态。运行结果表明了冷却水管道外加电流阴极保护设计的合理性和方法的有效性[13]。

在阴极保护设计与实施中，保护电流密度的选择、如何使保护电流均匀分布十分关键；在对与钛电连接的设备实施阴极保护时，要防止钛的氢脆问题，即控制使钛产生氢脆的临界电位值[14] [15]。

2.2.3. 海水循环冷却塔的防腐

海水循环冷却塔主要采用涂层防腐。

1) 浙江国华宁海电厂二期工程 2 × 1000 MW 机组凝汽器的海水循环冷却塔的防腐范围为冷却塔塔筒内壁、人字柱、淋水构架、水池壁以内底板基础、塔筒外壁下部，防腐表面积 73,000 m²。涂层由底层、中间层、面层配套涂料涂膜组成。

在冷却塔防腐施工中，涂层处理及涂漆期时受大气、混凝土湿度、混凝土本身漏点温度、环境等条件控制，必须极大地保持涂料与混凝土的粘结整体强度，提高涂料对混凝土的封闭性，以对防超浓缩海水起决定性作用，确保冷却塔安全运行。为此，需严格把握涂层的厚度和均匀度，湿膜卡、干膜测厚仪要不间断地检测厚度、均匀率，保证 85% 以上的面积符合设计标准，使防腐层达到设计预期拉结要求，满足防腐硬性指标，面漆喷涂做到顺平光滑、无流挂、无气孔、无针孔、无明显间隔痕、不龟裂、不剥落，表面光滑、透明、美观[5]。

2) 天津北疆电厂一期工程 2 × 1000 MW 超超临界火电机组凝汽器采用 2 座双曲线自然通风冷却塔循环海水冷却，塔筒标高 180 m，环基直径 128 m，顶部直径，淋水面积为 12,000 m²。海水冷却塔的防腐施工，采用先进的高性能防腐蚀保护材料，是新一代国际环保防腐技术的代表。该材料具有优异的耐候性、耐酸碱盐性、耐老化性、防水抗渗性，及在混凝土表面良好的附着力，对海水冷却塔起到很好的保护作用。在高空喷砂防腐施工中，通过现场技术攻关，合理解决了吊篮在双曲线水塔上的靠挂、高空压力损失、磨料添加等技术难题，顺利完成了海水塔的防腐蚀保护[15]。

3. 结论

综上所述，将我国海水冷却系统的主要设备、管道及其材质和防腐蚀方法汇总如表 1，可得到如下两点结论。

Table 1. The main equipment, pipeline and its materials and anti-corrosion methods in china seawater cooling system
表 1. 我国海水冷却系统的主要设备、管道及其材质和防腐蚀方法

海水冷却系统的主要设备、管道	材质	防腐蚀方法
凝汽器换热管	钛材	选好材，做好胶球清洗、杀生处理等工作
管板	钛材或钛钢复合板	选好材
水室	碳钢	涂层 + 阴极保护
海水输送管道(直管、弯头及大小头等)	碳钢、铸铁	
冷却塔	钢筋混凝土	表面涂刷防腐层

1) 海水冷却系统通常由管道(直管、弯头及大小头等)、设备(如凝汽器、换热器、滤网、蝶阀等组成)。海水循环冷却系统还包括冷却塔。海水冷却系统的材质主要是碳钢(如Q235A、10CrMoAl)、不锈钢(如316L、317LN)、钛(如TA₀、TA₁和TA₂)等。

2) 对海水冷却系统进行全面保护,首先是选好材;其次是做好涂层或内衬等表面处理和阴极保护。对于海水循环冷却系统,还要做好海水循环冷却塔的防腐和整个海水循环冷却系统的杀生处理。另外是做好胶球清洗等工作,保持冷却水系统清洁,特别是凝汽器管内表面干净。

参考文献 (References)

- [1] 张玉忠, 彭晓敏 (2004) 浅谈海水循环冷却处理技术. *工业水处理*, **8**, 14-17.
- [2] 徐明 (2002) 海水用于电厂循环冷却系统的探讨. *电力建设*, **5**, 12-13.
- [3] 杨春艳, 周永璋, 刘敏, 郭凯伟 (2011) 缓蚀阻垢剂 WJF-6 在海水循环冷却水中的应用和研究. *腐蚀与防护*, **7**, 532-534, 561.
- [4] 曲政, 庞其伟, 孟超 (2004) 电厂海水循环水系统外加电流阴极保护. *全面腐蚀控制*, **4**, 14-17.
- [5] 孙成江, 韩亮 (2009) 冷却塔防浓缩海水涂料防腐施工技术的应用与推广. *武汉大学学报(工学版)*, **S1**, 482-486.
- [6] 徐峰 (2009) 滨海电站凝汽器管材的选择. *华电技术*, **6**, 39-42.
- [7] 汪长春, 王成铭, 郑文远 (2009) 大亚湾和岭澳核电站海水冷却系统的腐蚀与控制. *电力安全技术*, **2**, 18-21.
- [8] 范永春 (2007) 滨海电厂海水冷却系统的防污防腐. *热力发电*, **3**, 81-83, 86.
- [9] 范永春 (2006) 滨海电厂厂内循环水系统防污防腐. *电力勘测设计*, **4**, 69-72.
- [10] 孙鹏飞 (2000) 薄壁钛焊管——凝汽器首选材料. *金属世界*, **4**, 31.
- [11] 周志敏 (2004) 900MW 超临界机组循环水系统阴极保护介绍. *上海电力*, **4**, 306-308.
- [12] 卢洪涛, 郑宏练, 杨国栋 (2010) 秦山核电站海水系统防腐蚀措施及管理. *中国核电*, **1**, 64-69.
- [13] 刘景海, 战广深 (2000) 电厂海水循环冷却水管道阴极保护工程设计. *中国电力*, **12**, 21-24.
- [14] 刘秀英 (2004) 火力发电厂循环水系统的腐蚀与防护. *东北电力技术*, **5**, 31-32, 36.
- [15] 侯纯扬, 武杰, 赵楠, 吴芸芳, 刘淑静, 王维珍 (2002) 海水循环冷却系统腐蚀、污垢和菌藻控制技术研究. *海洋技术*, **4**, 46-50.