

免现场硫化的复合橡胶衬里技术 开发及应用

江锋, 龚代涛, 赵卫东, 张维, 金辉

(中核核电运行管理有限公司, 浙江 海盐 314300)

摘要: 核电厂设备冷却水热交换器是核安全相关设备, 管壳式热交换器海水侧水室内壁防腐衬里工艺的可靠性影响设备的安全可靠运行。分析了常用的海水介质设备内壁防腐衬里方案的优缺点, 介绍了免现场硫化的复合橡胶衬里技术开发思路及其在核电厂的应用情况, 指出了该技术的创新性和关键技术指标。十多年的现场应用经验表明该技术具有巨大应用优势, 是常规衬胶防腐工艺的重大改进。

关键词: 硫化; 复合; 橡胶衬里; 核电

中图分类号: TQ331.42

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)04-0039-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.04.009

0 概述

核电厂设备冷却水系统为核电厂多个区域的重要系统设备的提供高质量的冷却水, 保证这些设备在设计工况下安全运行^[1]。设备冷却水系统的热量通过重要厂用水系统热交换器由海水带走。因此, 重要厂用水系统热交换器的稳定运行对整个电厂的安全、稳定运行具有非常重要作用, 该类设备属于核安全相关设备, 是保证核安全的关键设备之一^[2]。

秦山第三核电厂设备冷却水系统安装的热交换器, 为管壳式结构, 其管侧走杭州湾区域的高含砂量海水, 壳侧走设备冷却用的除盐水。海水侧水室本体为碳钢材质, 采用焊接结构与管壳连接, 水室原设计内衬 8mm 厚氯丁橡胶^[2-3]。电厂在实际运行过程中, 多台热交换器海水侧水室在使用了 3~5 年后出现大面积衬胶撕裂和脱落现象, 对电厂的正常运行产生重大安全风险。电厂面临重新选择设备内壁防腐层类型的问题。

1 热交换器水室防护工艺的选择

常用的海水环境防腐衬里工艺, 一般有单层橡胶衬里、1 层硬质橡胶+1 层软质橡胶的双层橡胶衬里、纯自硫化橡胶衬里或纯预硫化橡胶衬里等常规橡胶衬里工艺, 高固态环氧耐磨防腐涂层衬里工艺, 还有使用防腐涂层+牺牲阳极、防腐涂层+外加电流阴极保

护等联合保护工艺。

1.1 常规橡胶衬里防护

橡胶衬里是采用一定厚度的耐蚀橡胶复合在基体表面, 形成连续完整的覆盖层, 以隔离腐蚀介质, 达到防腐蚀的目的^[4]。常规橡胶衬里需要经过高温加压硫化, 以保证橡胶衬里与金属基体的有效附着和良好的耐腐蚀性。橡胶属于高分子有机物, 存在老化劣化的本质特征, 一般无法满足发电厂全设计寿命的使用需求, 需要定期重新衬胶。而核电厂的热交换器体积和重量大, 不具备转运至工厂进行重新衬胶并硫化的条件, 且核电厂现场一般不具备开展现场硫化的环境和条件要求, 故在衬贴后需要实施加温、加压硫化的橡胶衬里工艺在核电厂现场难以实施。

自硫化衬胶技术, 是将成型的胶板直接衬贴在设备内壁, 在自然状态下经过一段时间的停放硫化就可直接投入使用。施工简单、安全可靠, 不需要任何热源, 不受设备尺寸结构和施工地点、时间的限制, 粘接性能好, 施工质量可靠^[5]。但仅使用自硫化胶板时, 设备需要经过数月的自然硫化过程后才可投用, 耽误生产。预硫化衬胶技术, 是将成型好的橡胶板热硫化

作者简介: 江锋(1984-), 男, 正高级工程师, 役检材料工程师, 硕士研究生, 主要从事核电厂设备腐蚀与防护技术方面的研究工作。

后贴到容器内壁。可现场衬胶，胶板便于运输和贮存，衬胶灵活性大，易操作，衬胶后短期内就能达到一定的粘接强度投入使用，但衬胶技术要求高、施工难度大，特别是对于设备的拐角、法兰、进出料口及管件连接处衬胶困难^[5]。这两种工艺虽然不需要现场硫化操作，但因其固有特点，自硫化衬胶技术和预硫化衬胶技术的单独使用也不符合电厂的需求。

1.2 高固态环氧涂层衬里防护

高固态环氧涂层具有防腐蚀性优异、耐磨、粘接强度高、化学性质稳定等特点，施工简单，维修方便。但是涂层衬里在运行过程中，如果出现防腐层破损、脱落等缺陷，高固态涂层坚硬的碎片卡塞在管壳式换热器的管口或管内时均可能损坏钛管。国内部分核电厂凝汽器钛管已多次出现上游设备的高固态涂层脱落后卡塞在传热管管口而导致降功率检修事件发生。因此，高固态涂层的使用必须要慎重。

1.3 防腐涂层 + 阴极保护联合保护

防腐涂层 + 阴极保护的联合保护技术，包括防腐涂层 + 牺牲阳极、防腐涂层 + 外加电流阴极保护等联合保护措施。防腐涂层面临意外脱落、损伤等问题；牺牲阳极制造质量存在随机性，阳极脱落、成分不均匀导致的腐蚀产物不均匀脱落等问题，往往造成重大的异物风险，影响设备运行。外加电流阴极保护系统需要外部电源、辅助阳极、参比电极、各类电缆，需要在设备上开孔留出电缆通道，给设备的密封性带来挑战；还需要定期巡检、调整，避免过保护或欠保护带来的设备损坏风险，增加了人员工作量。因此，对

于核电厂而言，防腐涂层 + 阴极保护的联合保护技术并不适合用于重要的密闭容器类设备的防腐保护。

1.1 复合橡胶衬里防护

秦山第三核电厂联合橡胶防腐厂家开发了“自硫化胶板为底层 + 预硫化胶板为面层”的双层复合橡胶衬里结构及工艺^[6]。“自硫化胶板为底层 + 预硫化胶板为面层”的双层复合橡胶衬里方案，充分利用了自硫化胶板与预硫化胶板的优点，规避了缺点，不受场地因素和设备结构限制，不需现场硫化，施工时间相对较短，紧急情况下完工后 24 h 即可投用。底层自硫化胶板因为有了面层预硫化胶板的保护，可以在投用后的运行期间在常温下经过 3~6 个月左右时间完成自然硫化过程，产生足够的强度和硬度。面层预硫化胶板具有良好的耐冲刷磨损性能，配合粘胶性能优良的胶黏剂衬贴在自硫化胶板表面时，既保证了胶板之间的粘接强度，又能很好的保护底层自硫化胶板，还避免了部分结构特殊处粘贴不牢的问题。这套方案避免了在电厂现场准备常规硫化装备的问题，更重要的避免了高温加热给设备本体带来的伤害。

2 热交换器水室复合橡胶衬里施工工艺应用与检测

2.1 复合橡胶衬里施工工艺

在秦山第三核电厂设备冷却水热交换器海水侧水室内壁防腐的具体实施中，复合橡胶衬里工艺选用自硫化溴化丁基胶板与预硫化溴化丁基胶板的搭配，主要的施工过程如下图 1。

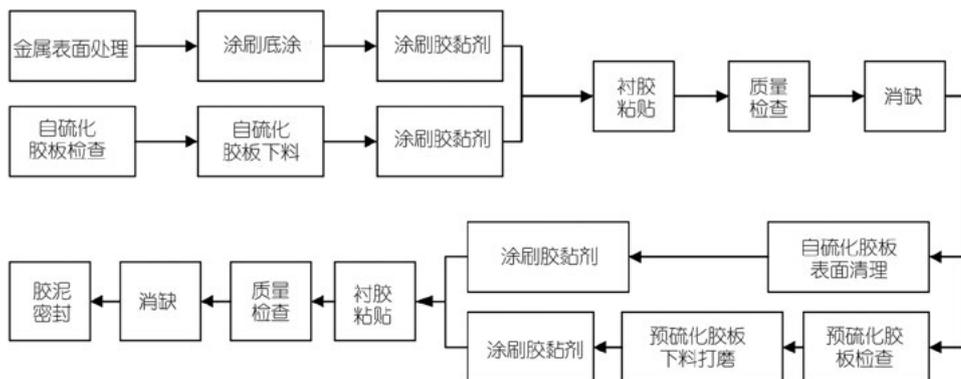


图 1 施工工艺流程

施工过程中的技术要点包括：

(1) 环境条件控制是保证施工质量的前提。施工时，热交换器海水侧水室内温度控制在 15~35℃ 为宜，

相对湿度小于 80%，露点大于 3℃。

(2) 各粘贴面的处理和保护是保证施工质量的关键。金属基体表面喷砂除锈和粗化，喷砂等级须达到

Sa2.5, 表面处理完成后需及时进行除尘和去油污处理, 并涂刷底涂胶黏剂。底层自硫化胶板不需要进行表面打磨粗化, 但需要做好胶板表面保护和清洁工作, 避免胶板被污染。面层预硫化胶板在衬贴之前需对其粘贴面进行 100% 打磨拉毛并清洗, 处在成型翻边处的胶板需适当打磨减薄, 减少翻边处橡胶的拉应力, 避免翻边部位翘起。衬胶施工期间, 施工人员需穿戴干净的鞋套, 确保粘贴面的干净整洁。

(3) 胶板衬贴质量检查是必须可少的工序。在每层衬胶完成后, 需进行衬胶质量的检查, 确保衬胶平整, 无损伤, 无鼓泡现象; 同时需对衬胶搭接缝进行 100% 电火花检查, 确认无漏电、搭接密实。如发现衬胶缺陷, 需及时进行修复。

(4) 胶板搭接处的处理方式也是重要的质量影响因素。面层相邻两片预硫化胶板搭接时需保证搭缝平直、搭接紧密, 搭缝宽度不小于 10 mm, 且与底层胶板的搭接缝错开 100 mm 以上。搭接方向需顺着海水的流向, 确保搭接处不会直接受到海水的冲击导致翻边脱开。搭接缝处增加涂抹一道膏状的封闭胶泥完全覆盖面层胶板边沿切口, 可极大地提高搭接缝的可靠性。

2.2 复合橡胶衬里工艺效果检测

在现场施工期间同步制作了衬胶施工的同步试板, 试板的每一道工序与水室施工同时、同料、同人进行, 最大限度保证同步试板与水室施工的衬胶一致性, 完工后在常温环境存放。参考 GB/T 7760—2003《硫化橡胶或热塑性橡胶与硬质板材粘合强度的测定 90° 剥离法》, 测试橡胶板与金属基体的粘接力都能在 10 kN/m 以上。

不同硫化工艺的橡胶板配合粘贴, 需重点关注面层预硫化胶板与底层自硫化胶板之间粘接力, 可提前发现附着力较差的隐患, 避免面层胶板大面积脱落造成设备损坏。对常温存放的多块同步试板经过连续 12 个月的测试, 获得粘接力数据如下表 1。

表 1 橡胶板附着力测试结果

测试时间 / 月	1	3	5	7	9	10	12
附着力 / (kN·m ⁻¹)	11.4	6.3	7.1	8.7	7.1	7.4	8.1

从表中可以看出, 经过 12 个月的自然存放后, 两层胶板之间的粘接力都能保持在 6 kN/m 以上, 已经超过 GB/T 18241.1—2014《橡胶衬里 第 1 部分: 设备防腐衬里》中软胶板与金属板之间的粘接力要求值 3.5 kN/m。

利用显微镜观察了底层胶板与面层胶板之间的粘贴面横截面, 如图 2, 可以看出两层胶板结合非常紧密, 胶黏剂已经渗入两层胶板内部, 特别是面层胶板粘贴面的打磨微孔内。对应用到现场设备内壁的胶板进行面层和底层的玻璃检查, 剥离面如图 3, 可以看出在剥离过程中发生了面层胶板撕裂。从测试数据、横截面和胶板层间剥离面形貌都可以看出两层胶板的贴合非常紧密, 最终得到了优秀的粘贴附着效果, 保证了复合衬胶工艺的防腐保护效果和安全使用需求。本工艺在秦山第三核电厂已经安全使用十几年, 最长的连续服役时间长达 9 年未发生重大缺陷, 相关的工艺被授予了国家实用新型专利并受理了发明专利^[6]。

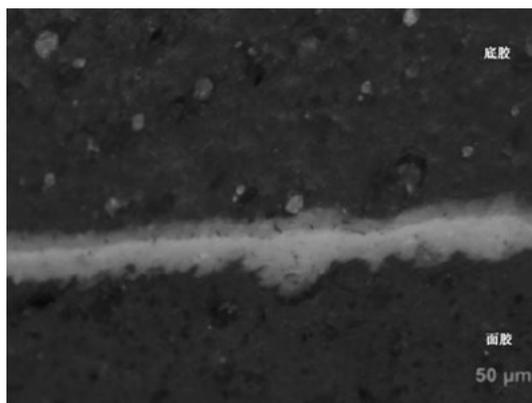


图 2 橡胶板粘贴面横截面



图 3 现场橡胶板剥离面

3 结论

核电厂管壳式热交换器海水侧水室的防腐保护工艺, 直接影响设备运行的安全性, 在防腐工艺的选择上必须遵循安全第一的原则, 确保防腐层不会发生重大缺陷而影响设备正常运行。

自硫化橡胶底层 + 预硫化橡胶面层构成的复合衬胶防腐工艺, 可以避免电厂现场衬胶高温硫化的需求,

在施工过程质量受控、胶黏剂质量优良的情况下能获得可靠性极高的衬胶防腐层，投用等待时间短，是容器类设备免硫化现场衬胶防腐保护的优秀选项。

参考文献：

[1] 彭可馨, 袁璐, 江锋. 核电厂循环冷却水系统热交换器海水侧腐蚀机理与防护 [J]. 全面腐蚀控制, 2022,36(8):121-124.
[2] 龚代涛, 江锋, 王欣, 等. 秦山第三核电厂闭式冷却水系统热交换器损坏分析及全面维修 [J]. 核动力工程, 2017,

38(4):112-115.

[3] 龚代涛, 胡建群, 江锋. 秦山第三核电厂海水系统衬胶评估 [J]. 中国核电, 2019,12(1):92-95,113.
[4] 万德立, 郭光伟, 于翠艳, 等. 大型设备的橡胶衬里技术及应用 [J]. 材料保护. 2000,33(12):7-8.
[5] 谢国泉. 室温自硫化丁基橡胶衬里防腐蚀技术 [J]. 化工设备与防腐蚀, 1998(5):20,47-49.
[6] 江锋, 龚代涛, 赵卫东, 等. 一种复合橡胶衬里防腐结构: 中国, ZL 2019 2 1734388.2[P].2020-08-25.

Development and application of composite rubber lining technology without on-site vulcanization

Jiang Feng, Gong Daitao, Zhao Weidong, Zhang Wei, Jin Hui

(CNNC Nuclear Power Operation Management Co. LTD., Haiyan 314300, Zhejiang, China)

Abstract: As a nuclear safety related equipment, the anti-corrosion lining process reliability of the seawater side water chamber inner wall of the shell and tube heat exchanger in nuclear power plant equipment cooling water heat exchangers is directly related to the safe and stable operation of the equipment. This article provides an in-depth analysis of the advantages and disadvantages of commonly used anti-corrosion lining schemes for the inner walls of seawater medium equipment. It details the development ideas and practical application of composite rubber lining technology without on-site vulcanization in nuclear power plants, and highlights the innovation points and key technical indicators of this technology. Through more than ten years of on-site application experience, it has been proven that this technology has significant advantages over traditional lining and anti-corrosion processes, and is an important technological improvement.

Key words: vulcanization; reunite with; rubber lining; nuclear power

(R-03)

橡胶树 40K 育种芯片研制成功

Rubber tree 40K breeding chip has been successfully developed

近日, 中国热带农业科学院橡胶所分子育种团队, 成功研制出基于靶向基因型检测技术的橡胶树 40K 育种芯片。

这对建立橡胶树高效生物育种体系、提高天然橡胶育种自主创新能力, 具有积极意义。

据悉, 橡胶树 40K 育种芯片, 具有分布均匀、多态性高等特点。

该芯片可广泛应用于橡胶树遗传多样性评估、遗传图谱构建, 以及全基因组选择育种等研究领域。

其有助于缩短橡胶育种周期, 提升育种效率, 加快中国橡胶树育种技术体系升级。

这项研究得到国家重点研发计划、海南省科技人才创新项目、国家自然科学基金的资助。

摘编自“轮胎世界网”

(R-03)