

装备与防护

气相防锈热收缩包装技术应用于核电设备防锈

姜锐^{1,2}, 谭振洲^{1,2}, 徐欣轶²

(1.沈阳宝金金属防护技术有限公司, 沈阳 110032; 2.沈阳防锈包装材料有限责任公司, 沈阳 110032)

摘要: **目的** 介绍气相防锈热收缩包装技术, 并应用该技术解决大型核电金属设备在三年期封存过程中的锈蚀问题。**方法** 以气相防锈热收缩薄膜为核心的组合封存技术对大型核电设备进行三年期的封存防锈, 并对气相防锈热收缩包装技术在现场应用的效果进行评价。**结果** 通过现场应用效果验证, 采用气相防锈热收缩包装技术进行三年期组合封存的核电设备未发生锈蚀, 核电金属设备表面与三年前无明显差别, 光洁如新, 防锈效果优异。**结论** 气相防锈热收缩包装技术是实现大型核电金属设备在库房内三年期封存防锈的一种有效方法, 操作工艺简单、防锈材料易去除。

关键词: 气相防锈热收缩薄膜; 大型核电设备; 气相防锈技术; 热收缩包装

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)09-0270-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.09.036

Application of Gas-phase Anti-rust Thermal Shrinkage Packaging Technology in Anti-corrosion of Nuclear Power Equipment

JIANG Rui^{1,2}, TAN Zhen-zhou^{1,2}, XU Xin-yi²

(1. Shenyang Baojin Metal Protecting Technology Co., Ltd., Shenyang 110032, China;

2. Shenyang Rustproof Packaging Material Co., Ltd., Shenyang 110032, China)

ABSTRACT: This paper aims to introduce the gas-phase anti-rust thermal shrinkage packaging technology, and apply this technology to solve the rust problem of large-scale nuclear power metal equipment in the three-year storage process. The combination preservation technique with the gas phase antirust thermal shrink film as the core is used for three-year storage and rust prevention of large nuclear power equipment, and the effect of the gas-phase anti-rust thermal shrinkage packaging technology in the field application is evaluated. Through the field application effect verification, the nuclear power equipment that adopts the gas-phase anti-rust thermal shrinkage packaging technology for three-year combined sealing has not been rusted, the surface of nuclear metal equipment and three years ago have no obvious difference, clean as new, and the antirust effect is excellent. Gas-phase anti-rust thermal shrinkage packaging technology is an effective method to achieve three-year sealing and rust prevention of large nuclear power metal equipment in the warehouse, and the operation process is simple and the antirust material is easy to remove.

KEY WORDS: gas phase antirust thermal shrink film; large nuclear power equipment; vapor rustproof technology; thermal shrinkage packaging

随着国民经济的快速稳定发展, 能源需求与日俱增, 而传统能源紧缺的现状却十分严峻, 核电目前是

公认的既可以大规模代替常规能源, 又是一种安全、高效、清洁的现代能源, 正得到越来越广泛的应用;

收稿日期: 2021-07-17

作者简介: 姜锐 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为金属材料腐蚀与防护技术、大气腐蚀机理及气相防锈技术等。

同时“碳达峰、碳中和”目标的提出将进一步助推核电事业的发展。核电站在建设过程中,核电设备从预制到最终安装就位正常需要 2~3 年,同时由于工程进度的影响可能会造成核电金属设备在现场的存储周期更长,导致核电金属设备在长周期存储过程中由于自然大气环境条件下各种腐蚀因素的影响而发生锈蚀,尤其是我国核电站主要建于沿海城市,受海洋大气环境的影响腐蚀更加严重,不仅影响施工进度,增加建造成本,而且存在重大安全隐患,因此减少核电设备的腐蚀问题,对节约资源、降低碳排放、保证设备性能,以及核电站的安全运行均有着极其重要的意义^[1]。

目前,核电金属设备常采用的防锈方法主要包括^[2]:防腐涂层、防锈油、水基防锈剂和可剥离涂膜等,这些常规的防锈方法存在操作工艺复杂、防锈效果差、防锈周期短、后续不容易去除等问题,因此亟须新型的防锈方法满足核电金属设备的防锈需求。

1 气相防锈热收缩包装技术

气相防锈热收缩包装技术是将气相防锈技术与热收缩包装技术相互交叉融合而形成的一种新型防锈包装技术,兼具金属制品在室外贮运过程中的防护功能和储存运输过程中所需的防锈功能,在满足小型金属制品批量化及自动化防锈防护包装的同时,还可应用于大型设备设施的整体防锈防护包装,目前广泛应用于机械加工、军事装备和航空航天等领域^[3-6]。

气相防锈热收缩包装技术的核心材料是气相防锈热收缩薄膜,是将气相缓蚀剂以特殊工艺添加到具有热收缩功能的树脂中制成具有热收缩功能的气相防锈包装材料^[7-8]。气相防锈热收缩薄膜中的气相缓蚀剂可在常温常压下缓慢气化,在封闭的环境中达到饱和状态,并以分子或离子形式吸附于金属表面形成分子级的保护膜,阻隔金属与外界水分、氧气等腐蚀介质的接触,从而防止金属发生锈蚀;同时采用预拉伸和急冷工艺^[9],使气相防锈热收缩薄膜在生产过程中被定向拉伸(单向或双向拉伸),使其对拉伸前的形态具有记忆效应,当再次遇热时能恢复拉伸前形态的功能来达到密封包装的目的,从而能够对水蒸气、氧气等腐蚀因子起到有效的阻隔作用,同时防止包装内气相缓蚀剂因外溢而损失,从而达到稳定、持续、优异的防锈效果。

2 核电设备防锈包装方案设计及应用

2.1 方案设计

2016 年,国内某大型核电设备制造企业制造的核一级设备需要进行三年期的封存防锈,封存地点为沿海地区的库房内,属于海洋性大气腐蚀环境条件。

核电金属设备在存储过程中易受到大气环境中各种腐蚀因素的影响而发生锈蚀,尤其是在沿海地区,长期处于高温、高湿、高盐雾的环境条件下导致核电金属设备腐蚀更加严重,因此,需要对核电金属设备进行防锈保护,解决核电金属设备在长周期存储过程中的锈蚀问题,为核电站的安全运行保驾护航。

为了解决核一级设备在沿海地区库房内封存过程中的锈蚀问题,在综合考虑核电金属设备的材质类型、存储环境、防锈需求等基础上,结合核电金属设备的规格尺寸、结构复杂程度、外观形状等因素,主要采用高阻隔外包装材料与气相防锈技术相结合的方式,同时在包装内部放置干燥剂控制湿度,实现核电金属设备在存储过程中的防锈防护^[10-11]。首先,参考 GB/T 5048—2017《防潮包装》^[12]中一级包装对防潮包装材料透湿度的要求是小于 1.0 g/(m²·24 h),同时考虑外包装材料的力学性能和现场实施的便捷性、经济性,最终确定外包装材料采用高阻隔的气相防锈热收缩薄膜,其物理性能要求详见表 1。其次,参考 GB/T 4879—2016《防锈包装》^[13]和 GB/T 14188—2008《气相防锈包装材料选用通则》^[14]中关于气相防锈材料的要求,采用气相防锈纸作为内包装材料时,为了保证包装内部的气相防锈能力,一般情况下,气相防锈纸的使用面积不小于被包装制品的表面积,同时采用气相防锈纸对核电设备的锐利边角进行缓冲包装,以防止锐利的边角部位造成外包装材料的损坏,气相防锈材料的防锈性能详见表 2。最后,参考 GB/T 5048—2017《防潮包装》^[12]附录 A 干燥剂的计算方法计算干燥剂的用量,考虑使用常规的硅胶、蒙脱石等干燥剂,由于用量大、占用空间大,不便于操作,因此采用吸湿量大的核电用干燥剂,干燥剂的性能指标详见表 3。

干燥剂的用量参照 GB/T 5048—2017《防潮包装》中附录 A.2 硅胶干燥剂,关于硅胶干燥剂的计算选择用量如下。

表 1 气相防锈热收缩薄膜的物理性能
Tab.1 Physical properties of the vapor rustproof thermal shrinkage film

测试方向	收缩率/ %	拉伸强度/ MPa	断裂伸长率/ %	直接撕裂强度/ (kN·m ⁻¹)	水蒸气透过率/ [g·(m ² ·24 h) ⁻¹]
纵向	45~70	≥12	≥400	≥50	<1
横向	30~45	≥12	≥400	≥50	

表 2 气相防锈材料的防锈性能
Tab.2 The rust prevention properties of the vapor rustproof materials

序号	材料类型	气相缓蚀能力 (VIA)	接触腐蚀
1	气相防锈热收缩膜	0 级或 1 级	0 级: 无腐蚀
2	气相防锈纸	0 级	0 级: 无腐蚀

表 3 核电用干燥剂的性能指标
Tab.3 Performance indicators of the desiccant for nuclear power

序号	测试项目	测试结果
1	吸湿率	55% (温度为 25 °C、相对湿度为 60%)
2	腐蚀性	无腐蚀 (点蚀、侵蚀)
3	袋子耐用性	无泄漏或损坏

当使用聚乙烯等塑料薄膜包装材料制成的袋子作为外包装时, 硅胶干燥剂的用量计算见式 (1)。

$$m=100AR_1Y+0.5m_{\text{总}} \quad (1)$$

式中: m 为硅胶干燥剂用量, g; A 为包装材料的总面积, m^2 (取量值); Y 为预定的储存时间, a; R_1 为温度 40 °C、相对湿度 90% 条件下包装材料的水蒸气透过率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h})$; $m_{\text{总}}$ 为包装内含湿性材料质量 (包装纸、衬垫、缓冲材料等), g。

核电用干燥剂的用量 (m_1) 计算见式 (2)。

$$m_1=m \times (K/K_1)=m \times (30\%/55\%)=m \times 0.55 \quad (2)$$

式中: m_1 为核电用干燥剂的用量; K 为细孔硅胶吸湿率, 在温度为 25 °C、相对湿度为 60% 的条件下, 细孔硅胶的吸湿率按 30% 计; K_1 为核电用干燥剂吸湿率, 在温度为 25 °C、相对湿度为 60% 的条件下, 核电用干燥剂的吸湿率按 55% 计。

核一级设备的尺寸以长度 12 m、直径 4 m、外表面积 175.84 m^2 为例, 包装内无含湿性材料, 因此核电用干燥剂的用量 $m_1=9\,439.11 \text{ g}$ 。在温度为 40 °C、相对湿度为 90% 条件下, 气相防锈热收缩膜 (SF/DF.SS-180) 的水蒸气透过率为 0.67 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h})$ 。

2.2 现场应用

针对核一级设备采用高阻隔外包装材料与气相防锈技术相结合的方式三年期的封存防锈, 具体施工工艺为: 首先采用气相防锈纸对核电设备外表面进行缓冲包装, 同时加强气相防锈能力, 见图 1; 然后将干燥剂分散的固定在气相防锈纸或设备外表面用于控制包装内湿度; 最后采用高阻隔的气相防锈热收缩薄膜形成相对密封环境, 见图 2。技术方案涉和材料详见表 4。

3 年后对大型核一级设备的气相防锈热收缩包装进行拆包装检查, 由包装前 (见图 3) 与拆开包装后 (见图 4) 核一级设备的外观状态对比可得, 核一级设备的外观无明显变化, 与 3 年前的外观状态基本一



图 1 采用气相防锈纸对核一级设备的包装过程

Fig.1 Packaging process of nuclear first-class equipment with vapor rustproof paper



图 2 气相防锈热收缩包装后的核一级设备

Fig.2 Nuclear first-class equipment after vapor rustproof thermal shrinkage packaging

表 4 核一级设备防锈包装方案涉及材料
Tab.4 The anti-rust packaging scheme involves the materials for nuclear first-class equipment

序号	材 料 名 称	型号	作用及单位用量
1	干燥剂	SF/HD	控制湿度, 用量参照 GB/T 5048, 一般推荐用量为 200 g/(m ³ ·a)
2	气相防锈纸	SF/H104-PC	气相防锈, 缓冲作用
3	气相防锈热收缩膜	SF/DF.SS-180	气相防锈, 密封包装

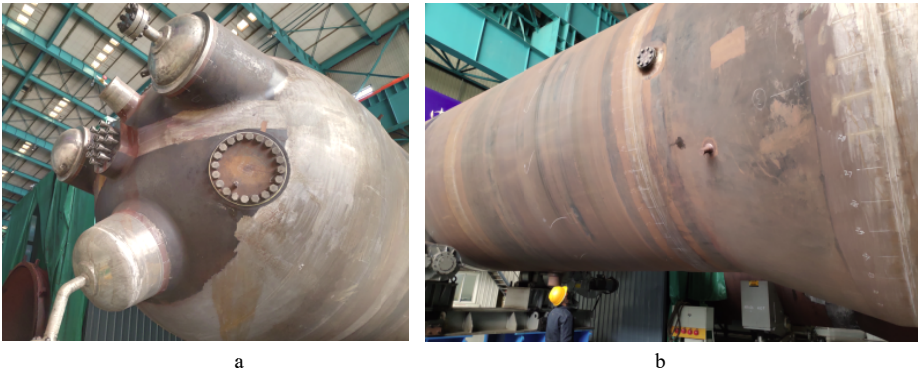


图 3 核一级设备包装前的外观状态
Fig.3 Appearance status of nuclear first-class equipment before packaging



图 4 核一级设备拆开包装后的外观状态
Fig.4 Appearance status of nuclear first-class equipment after unpacking

致, 而且无锈蚀发生, 由此可见, 气相防锈热收缩包装技术方案在严格规范现场操作的前提下可以满足大型核电设备三年期的封存防锈要求。

3 气相防锈热收缩包装技术实施要点

3.1 注意事项

- 1) 注意包装现场环境条件, 应在清洁、干燥、环境温差变化小的环境条件下进行; 不可在户外或温度大于 35 ℃、相对湿度大于 75%的环境下作业。
- 2) 金属制品在包装前表面应清洁干燥、无油污、手汗、灰尘、锈迹、机械杂质等异物, 操作过程中严禁裸手接触工件。
- 3) 气相防锈材料应密封保存, 在使用过程中尽量做到随取随用, 暴露时间不得超过 4 h, 否则应重新密封包装。

- 4) 干燥剂在使用过程中尽量做到随取随用, 在空气中的暴露时间不大于 40 min, 否则应重新密封包装, 在包装内部要均匀分散放置且尽量不与零部件直接接触。

3.2 实施过程

- 1) 被包装物如有锐利的边角及凸起部位, 应对此部位进行缓冲保护, 如用气相防锈纸、气相防锈珍珠棉、气相防锈无纺布等进行衬垫或缠绕保护。
- 2) 包装过程中应注意轻拿轻放, 不要划伤包装材料, 如有破损应采用一块大一倍以上相同材质的热收缩膜 (比破洞边缘大 100 mm 以上) 放在破洞上, 采用加热收缩修补破损处; 如果破洞较小, 也可采用热收缩胶带粘合补漏。
- 3) 包装过程中为了保证气相防锈热收缩膜在热收缩过程中的密封性, 在气相防锈热收缩膜的搭接部

位应留有足够的搭接宽度,一般为400~500 mm。

4)密封气相防锈包装前应尽量排净气相防锈包装空间内的空气;密封气相防锈包装后,检查外包装的密封情况,良好的密封性可提升防锈包装的使用效果。

5)当包装后的产品在30℃以上室外露天短期存放时,收缩率可不必太大,被包装物可保持一个相对松散状态,因为在露天高温状态下还有约5%左右的自然收缩^[15]。

4 结语

气相防锈热收缩包装技术可以满足大型核电金属设备在库房内三年期的封存防锈需求,并表现出优异的防锈防护可靠性,也推荐在其他高温、高湿、高盐雾等恶劣环境条件下进行库内的封存防锈,因此,气相防锈热收缩包装技术及产品可广泛应用于大型核电金属设备在三年期以内储存过程中的防锈防护包装。

针对大型核电金属设备的长周期贮存提供一套成熟、可靠、系统的防锈包装解决方案至关重要,并且值得在核电领域进行普遍推广,为大型核电金属设备和部件的长周期封存防锈提供借鉴依据,同时对提高大型核电金属设备和部件长周期封存防锈技术水平具有积极的意义。

参考文献:

- [1] 魏小宝,张琰. AP1000 施工现场典型腐蚀问题探讨与预防[J]. 全面腐蚀控制, 2014, 28(1): 44-48.
WEI Xiao-bao, ZHANG Yan. Prevention and Discussion for Typical Corrosion Problems at the AP1000 Construction Site[J]. Total Corrosion Control, 2014, 28(1): 44-48.
- [2] 姜锐,谭振洲,徐欣轶,等. 核电机组重要物项在贮运过程中的气相防锈包装技术研究[J]. 中国包装, 2020, 40(8): 16-19.
JIANG Rui, TAN Zhen-zhou, XU Xin-yi, et al. Study on Vapor Rustproof Technology of Important Items in Nuclear Power Units during Storage and Transportation[J]. China Packaging, 2020, 40(8): 16-19.
- [3] 沈萍,赵玉凯,孟素媚,等. 气相防锈热收缩包装技术及应用[J]. 橡塑技术与装备, 2017, 43(2): 63-65.
SHEN Ping, ZHAO Yu-kai, MENG Su-mei, et al. Introduction and Application of Vapor Phase Anti-Rust Thermal Shrinkage Packaging Technology[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2017, 43(2): 63-65.
- [4] 张大全. 气相防锈技术的环境安全因素探讨及其应用展望[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(7): 11-16.
ZHANG Da-quan. Discussion on Environmental and Safety Factors of Vapor Rustproof Technology and Its Application Prospect[J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(7): 11-16.
- [5] 刘刚连,强明礼. VCI 气相防锈包装技术[J]. 中国包装, 2010, 30(9): 41-44.
LIU Gang-lian, QIANG Ming-li. VCI Gas-Phase Anti-rust Prevention Packaging Technology[J]. China Packaging, 2010, 30(9): 41-44.
- [6] 李志广,黄红军,万红敬,等. 金属气相防锈技术的应用进展[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(11): 654-656.
LI Zhi-guang, HUANG Hong-jun, WAN Hong-jing, et al. Development Status of Volatile Corrosion Inhibitors for Metals[J]. Corrosion & Protection, 2008, 29(11): 654-656.
- [7] KUNIGAHALLI L V. An Overview of Structure, Mechanism and Applications of Volatile Corrosion Inhibitors[J]. Electrochem Soc, 2002, 51: 39-49.
- [8] 高国,梁成浩. 气相缓蚀剂的研究现状及发展趋势[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(4): 252-256.
GAO Guo, LIANG Cheng-hao. Present Situation and Development of Volatile Corrosion Inhibitors[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(4): 252-256.
- [9] 柳峰,徐冬梅. 塑料热收缩膜的发展[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 213-215, 218.
LIU Feng, XU Dong-mei. On Development of Plastic Thermal Shrinkage Film[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 213-215.
- [10] 张康夫,黄本元,王余高. 暂时防锈手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 395-410.
ZHANG Kang-fu, HUANG Ben-yuan, WANG Yu-gao. Handbook of temporary rust prevention[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 395-410.
- [11] 唐艳秋,张建伟,王福成. 防锈防护组合技术在装备器材防锈封存中的应用[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 117-122.
TANG Yan-qiu, ZHANG Jian-wei, WANG Fu-cheng. Application of the Rust Protection Combination Technology in the Equipment Preservation[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 117-122.
- [12] GB/T 5048—2017, 防潮包装[S].
GB/T 5048—2017, Moisture-Proof Packaging[S].
- [13] GB/T 4879—2016, 防锈包装[S].
GB/T 4879—2016, Rustproof Packaging[S].
- [14] GB/T 14188—2008, 气相防锈包装材料选用通则[S].
GB/T 14188—2008, General Rules for Selection and Using of Packaging Materials with Volatile Corrosion Inhibitor[S].
- [15] 孙凯. 大型金属设备的新型包装方式——气相防锈热收缩防护布[J]. 塑料包装, 2013, 23(6): 12-15.
SUN Kai. New Packing of Large Metal Equipment—VCI Thermal Shrinkage Protective Cloth[J]. Plastics Packaging, 2013, 23(6): 12-15.