

核电厂蒸汽发生器沉积物问题及治理技术的深度剖析

杨龙龙, 李亚兴, 许小斌

阳江核电有限公司, 广东 阳江 529941

DOI:10.61369/ETQM.2025100014

摘 要： 作为核电厂的核心设备，蒸汽发生器的沉积物问题对核电厂安全与经济运行构成严重威胁。本文凭借一线维修经验，深入探究沉积物来源、类型、分布规律及其对传热性能的影响，详细阐述预防性与纠正性清洗等治理技术的实际应用与发展方向，为核电厂解决沉积物问题提供实用的技术方案，助力核电厂安全、稳定、高效运行。

关 键 词： 核电厂；蒸汽发生器；沉积物；传热性能；治理技术

In-depth Analysis of Steam Generator Deposits in Nuclear Power Plants and Treatment Technologies

Yang Longlong, Li Yaxing, Xu Xiaobin

Yangjiang Nuclear Power Co.,LTD.,Yang jiang, Guangdong 529941

Abstract： As a core piece of equipment in nuclear power plants, the issue of deposits in steam generators poses a serious threat to the safety and economic operation of nuclear power plants. Drawing on first-hand maintenance experience, this paper delves into the sources, types, distribution patterns, and impact of deposits on heat transfer performance,detailed explanations of the practical application and future directions of preventive and corrective cleaning technologies, and provides practical technical solutions for nuclear power plants to address deposit issues, supporting safe, stable, and efficient plant operations.

Keywords： nuclear power plant; steam generator; deposits; heat transfer performance; treatment technologies

引言

在核电厂日常运维中，蒸汽发生器承担着一、二回路热交换的关键任务，其运行状况直接关乎核电厂的安全与经济效益。尽管我们在材料选用、设计优化及水化学控制等方面持续改进，但沉积物问题始终是影响蒸汽发生器性能的“老大难”。沉积物在管束、支撑板和管板等关键部位不断累积，导致热力性能下降、传热管腐蚀、水位波动甚至传热管失效等一系列棘手问题，严重威胁核电站的稳定运行。因此，深入研究并解决蒸汽发生器沉积物问题，是我们核电维修工程师日常工作中的重中之重，具有极其重要的现实意义。

一、蒸汽发生器沉积物的根源与类别

（一）沉积物的来源

从多年现场维修观察来看，蒸汽发生器内沉积物来源广泛且复杂。管道系统和热交换器表面的腐蚀产物膜，会不断释放离子态和可溶解态金属物质，同时在流体冲刷下产生颗粒态物质，尤其在高压缸湿蒸汽下游区域，这种现象更为明显。凝汽器的管道或水箱密封区域一旦出现泄漏，会引入氧气、二氧化碳等气体，以及阴阳离子、颗粒和可溶性物质，其自身管道及支撑结构的腐蚀产物也会成为沉积物的一部分。此外，设备维修保养时残留的

油脂或涂敷物、补给水处理系统无法去除的有机物、补给水中溶解的气体、排污及精处理系统产生的树脂碎片和残留化学药剂等，都可能在蒸汽发生器内沉积下来^[1]。其中，铁基腐蚀产物占比约90%，是沉积物的主要成分，其沉积过程受蒸发器内水流速、干度和热流密度等因素显著影响。在实际维修中，我们经常能看到这些因素共同作用下形成的不同形态沉积物。

（二）沉积物的具体类型

不同电厂由于设备材质、制水工艺及pH控制策略的差异，蒸汽发生器内沉积物的化学组成也不尽相同。常见的沉积物可分为颗粒态、离子态和可溶物三类。颗粒态物质如Fe₃O₄、

FeO(OH)、Fe₂O₃等，在传热管表面堆积，影响传热效率；离子态物质有Na⁺、CO₃²⁻、Cl⁻等，会参与腐蚀反应，加速设备损坏；可溶物包括O₂、CO₂、N₂、H₂SiO₃等，它们在不同工况下可能会发生相变或化学反应，进一步影响蒸汽发生器的运行性能。像硅、铝、钙等属于硬性物质，沉积后较难清除；而硫酸根、氯离子等腐蚀性杂质，对传热管的腐蚀作用不容忽视，这在我们日常检查中经常能发现相关腐蚀痕迹^[2]。

二、蒸汽发生器沉积物的分布规律

（一）总体分布特征

通过对多个核电站蒸汽发生器的现场检查和数据分析，我们发现沉积物分布存在一定规律。通常热侧上部沉积物较多，U型管区域越靠上部沉积越明显，冷侧沉积物量相对较少。例如西屋公司F型蒸汽发生器，热侧上部腐蚀产物沉积量明显高于其他部位，分布如图1所示。

大亚湾电厂的腐蚀产物集中在热侧上部和冷侧下部。总体而言，多数蒸汽发生器上部管束，

特别是热侧弯管区，是沉渣最为集中的位置，这在设备检修打开后能直观看到^[3]。

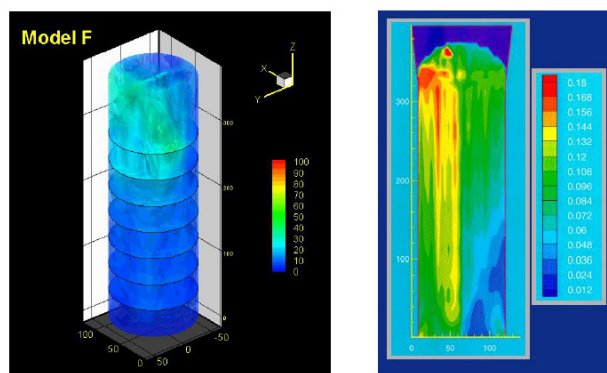


图1 F型蒸汽发生器泥渣分布图

（二）基于检测技术的分布呈现

低频涡流检测技术是我们在日常检测中常用的手段，它能有效帮助我们了解沉积物的分布情况。通过检测发现，不同区域沉积物分布差异明显。热侧轴向区域在不同径向位置，沉积量呈现特定比例分布；U型管热侧和冷侧弯管区域也各有独特的沉积特点。这些检测结果为我们制定针对性的清洗和维护方案提供了直观、准确的依据，让我们能更精准地处理沉积物问题^[4]。

（三）沉积位置与机理分析

在管板上，中心区由于流速最低，大颗粒沉积物受重力作用易于在此沉积，这也是排污管布置在中心区的原因。而在传热管上，流速、干度和热流密度对沉积影响显著。流速大、干度高、热流密度大的区域，更有利于沉渣附着和积累。我们在维修中发现，热流密度大的部位往往沉积物更多，对传热性能影响也更大，这与理论分析结果相符。

三、沉积物分布对传热性能的影响

（一）传热性能影响的理论分析

从实际运行经验和理论原理来看，蒸汽发生器传热管上沉积物分布对传热效率影响重大。热流密度在热腿到冷腿的传热管上存在较大偏差，沉渣产生的热阻会阻碍热流传递，热量倾向于从热阻小的区域通过。因此，热腿积垢通常比冷腿严重，冷侧沉渣对传热影响相对较小。

在实际维修中，我们通过测量不同部位的温度和热传递效率，能明显感受到这种差异带来的影响^[5]。

（二）基于模拟研究的结果

DEI公司的White博士等人利用EPRI的ATHOS软件进行分区模拟，设定不同区域沉积物厚度代表不同热阻，模拟中等程度（ $10.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ）和严重程度（ $35.22 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ）积垢情况，研究发现整体热阻对压降的影响大于空间分布不均匀性。不同程度污垢引起的蒸汽压力差显著，不均匀分布时压力降低相对较小，均匀分布时压力降低更大，因为不均匀分布时热量可从污垢少的区域补偿。EDF利用3D两相流软件模拟时，考虑到沉渣分布不均匀，结果显示多数情况下热腿积垢影响最大，污垢沉积到一定程度时，冷热腿均匀分布对热阻影响最突出，这与我们在实际维修中观察到的热侧传热性能下降更为明显的情况相符^[6]。

（三）对蒸汽发生器运行的实际意义

沉积物分布对传热性能的影响，直接关系到核电站的安全与经济运行。在实际工作中，我们通过掌握这种影响规律，能更合理地优化蒸汽发生器运行参数，制定科学的维护和清洗计划。

比如根据沉积物分布情况，提前安排针对性的清洗作业，避免因传热性能下降导致设备过热、效率降低等问题，从而保障蒸汽发生器高效稳定运行，减少安全风险和经济损失。

四、蒸汽发生器沉积物治理技术

（一）预防性清洗技术

1. 水化学控制技术：在日常运维中，我们深知二回路以铁基腐蚀产物为主，蒸汽发生器中堆积的铁基腐蚀物量较大，常规管板冲洗难以去除大部分腐蚀产物。水化学控制技术通过添加合适pH控制剂、联氨除氧、连续排污和控制给水杂质浓度等措施来调节二回路水化学性质。虽然该技术在减少设备腐蚀、降低杂质和腐蚀产物沉积方面有一定作用，但由于蒸汽发生器运行工况复杂，即使严格控制水化学工艺，仍难以完全避免沉渣富集。我们在实际操作中，会定期监测水化学参数，根据变化及时调整控制措施，但仍需结合其他清洗技术共同作用。2. 成膜胺（FFA）技术：成膜胺技术自20世纪60-70年代应用以来，原理是在管道表面形成隔离膜，减少腐蚀产物生成并抑制氯离子腐蚀。从实际应用数据看，成膜胺可延长化学清洗间隔。部分电厂应用后，给水

中铁离子含量降低,排污效率提高,蒸汽发生器脏污程度减轻。如法国 Almaraz 核电厂 1、2 号机组实施 FFA 在线应用后,通过对相关参数变化的研究,实其能有效减少二回路腐蚀产物向蒸汽发生器迁移,OSART 组织也推荐使用^[7]。在国内火电厂,成膜胺技术在锅炉给水水质处理和停运保护方面有应用,能在金属表面形成保护膜。在国内核电厂也有部分应用,也在持续关注其长期效果和稳定性。

2. 在线分散剂(PAA)技术:在线分散剂技术是国际水化学领域前沿技术,在蒸汽发生器积污控制方面有成果。分散剂能改变微粒表面电荷,抑制腐蚀产物沉积并去除松散腐蚀产物。

自 1998 年提出应用计划以来,国际上有多次应用案例,如比利时 Doel3 核电厂和瑞典 Vattenfall 核电厂的在线应用,结果显示其能提高排污除铁效率、改善结垢程度且不影响二回路水化学参数和系统材料,还能提高蒸汽出口压力。目前国内核电厂虽未应用,但相关研发工作正在推进,我们也在密切关注其进展,期待能引入这一新技术^[8]。

预防性清洗技术在机组正常运行期间应用成熟,对保障蒸汽发生器运行有重要意义,但无法完全清除沉积物,在电厂停机大修时,仍需依靠纠正性清洗技术。

(二) 纠正性清洗技术

1. 物理清洗技术

- 管板水力清洗:作为最早应用的清洗技术之一,自 20 世纪 70 年代起用于清除管板松软泥渣。经过多年发展,安全性和可靠性不断提高,设备也更加智能化。以阳江核电厂的清洗系统为例,根据管板检修口确定清洗工艺,通过手孔和眼孔清洗减少盲区。单台清洗时间约 24 小时,清洗泥渣量因设备运行年限和工况而异,需进行清洁度检查。但该技术对管板泥渣清除不彻底,残留泥渣可能变硬,在中心管廊热侧中心区域后续清除困难,这在多次大修中都有体现。

- 强化水力清洗:针对次硬性或硬性泥渣,在管板水力清洗基础上发展而来。原理相似但枪杆承压更高,清洗压力 250~300bar。根据法国 EDF 公司策略,未形成硬性泥渣时每 4 个大修周期清洗一次,形成后每 2 个大修周期清洗一次。我们在实际操作中,会根据泥渣硬度和设备情况灵活调整清洗周期和参数。

- 柔性水力清洗:主要用于清洗管间硬性泥渣,具备清洁度检查和异物取出功能。与传统刚性清洗不同,喷嘴可灵活进入管间,通过机械装置驱动,部分情况下上下对称布置减小反作用力。美国 FOSTER-MULLER 公司的 CECIL 技术为基础,法国相关公司进一步发展,清洗压力可达较高水平。国内中核武汉核动力运行技术研究所所在机组大修中应用效果良好,能有效清除硬质泥渣,我们也在不断总结经验,优化该技术应用。

- 反向清洗技术:2014 年国内针对蒸汽发生器主蒸汽压力降低问题开发,用于扩大刚性水力清洗范围,清洗分流板和第一支撑板区域泥渣。苏州热工研究院和中核武汉核技术运行有限公司

提供技术服务,与管板水力清洗共用系统,清洗时间约 12 小时,效果显著。但国外尝试该区域清洗效果不佳,考虑到国内外设备差异,我们在国内应用中按计划推进,每两个大修周期进行一次,保障传热管安全^[9]。

- 上部管束水力清洗(UBHC):由英国 Rolls-Royce 公司开发,通过高压水射流冲洗管束上部

支撑板间泥渣和污垢,可进行全范围管束视频检查。但该技术适用于特定类型蒸汽发生器国内现有 55/19B 型蒸汽发生器不适用,我们也在关注其技术改进,看是否有适配可能。

- 鼓泡清洗(PPC):由于蒸汽发生器结构特点,部分水力清洗只能实现局部清洗,鼓泡清洗技术可利用水力震荡和水流冲刷实现全管束清洗,消除支撑板间疏松沉积物,清洗后结合管板清洗工艺。在实际应用中,我们常将其与化学清洗或其他水力冲洗结合,提高清洗效率。

- 低压喷淋清洗(UBF):针对传热管外壁松散泥渣,通过大流量水循环,利用重力使泥渣沉落,再经抽吸过滤循环作业。可解决支撑板梅花孔堵塞问题,清除管壁积垢,对蒸汽压力降低和性能下降问题有改善作用。国外应用较多,国内尚无案例。若积垢坚硬或粘着性高,清洁效果不佳,需结合软化学清洗。该技术冲洗时间长,占用大修工期,同时对传热管顶部的防震条可能会有影响,我们在考虑如何优化^[10]。

2. 化学清洗技术

- 硬化学清洗:即高浓度高温化学药剂清洗,旨在去除 95% 以上二回路腐蚀产物。20 世纪 80 年代左右开发,代表技术有 EPRI/SGOG 和 AREVAHTCC,EPRI/SGOG 应用较多,适用于 Inconel600 材料传热管。清洗后性能可恢复,但设备复杂昂贵,单次费用高达 2000 万 RMB 以上。

但可能对蒸汽发生器有一定的腐蚀,在实际大修中,我们会综合评估设备状况和成本,谨慎选择该技术。

- 软化学清洗:2000 年前期为解决硬化学清洗的不足而开发,采用低温低浓度化学药剂,对传热管腐蚀小,废液处理方便,更侧重预防性清洗。代表性技术如美国 DominionEngineeringInc 的 ASCA 和 AREVANPInc 的 DMT,ASCA 应用广泛。软化学清洗可防止沉渣增加和传热恶化,避免硬化学清洗的高成本和高风险,降低支撑板堵塞,去除铜等杂质,优化传热。在日常维护和大修中,我们会根据沉积物情况优先考虑软化学清洗技术。

五、结论

通过长期在核电厂的维修实践和研究,我们全面深入地了解了蒸汽发生器沉积物问题及治理技术。预防性清洗技术在日常运行中对减少沉积物积累起到一定作用,但无法完全解决问题。

纠正性清洗技术种类繁多,各有优劣,在电厂停机大修时发

挥着关键作用。在实际工作中，我们核电维修工程师需要根据蒸汽发生器的具体运行状况、沉积物的特性和分布等因素，灵活选择和组合不同的治理技术，制定个性化的解决方案。同时，我们也应持续关注相关技术的研发进展，不断引入新技术、新方法，进一步提升蒸汽发生器沉积物治理的效果和效率，保障核电站安

全、稳定、高效运行。未来，随着技术的不断进步，我们有信心在沉积物治理方面取得更好的成果，为核电站的可靠运行提供更坚实的保障。

参考文献

- [1] 卢净. 核电厂蒸汽发生器密封堵板控制系统的开发 [J]. 设备管理与维修, 2024, (17): 179-181.
- [2] 马强. 某压水堆核电站蒸汽发生器排污系统排污效率与碱化剂回收效果试验与研究 [J]. 广东化工, 2024, 51(17): 122-124.
- [3] 马武江, 宣禹澄, 单鹏晨, 等. 核电蒸汽发生器关键特厚管板锻件锻造成形方法 [J]. 模具技术, 2024, (05): 76-81.
- [4] 李双燕. 核电蒸汽发生器最终环缝焊接技术 [J]. 装备机械, 2021, (03): 47-50.
- [5] 张跃, 王岩, 张灵宇, 等. 第三代核电蒸汽发生器管板锻件制造工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46(10): 44-48.
- [6] 朱景艳. 核电蒸汽发生器热工水力稳态特性分析 [J]. 机电信息, 2021, (28): 40-41+44.
- [7] 张龙. 三代核电蒸汽发生器金属反射式保温安装施工风险分析 [J]. 中国高科技, 2021, (22): 45-46.
- [8] 赵清森, 王世勇. 核电机组蒸汽发生器和汽轮机裕度匹配研究 [J]. 核动力工程, 2021, 42(06): 174-178.
- [9] 万积俊, 邱建. 核电机组蒸汽发生器支撑用大规格螺纹装配技术研究 [J]. 设备监理, 2022, (02): 38-41.
- [10] 王浩, 王臣, 高俊, 等. 核电厂蒸汽发生器管板异物分析评价 [J]. 材料保护, 2022, 55(10): 213-217.