

核电厂二回路水质控制对汽轮机腐蚀的影响

李壮壮

中广核苍南核电有限公司 浙江 温州 325000

摘要: 核电厂二回路水质控制对汽轮机腐蚀防治至关重要。二回路水质成分复杂,溶解氧、酸碱度、硬度离子等与汽轮机腐蚀密切相关,水质恶化会加速腐蚀、降低设备运行效率并缩短使用寿命。通过原水处理、给水水质调整与控制、水质分析与监测等手段,可有效调控水质,抑制酸腐蚀、氧腐蚀等多种腐蚀类型。做好二回路水质控制,对保障核电厂安全稳定运行、提升经济效益具有重要意义。

关键词: 核电厂;二回路水质控制;汽轮机腐蚀;控制方法

1 核电厂二回路系统概述

1.1 二回路系统的结构与功能

核电厂二回路系统是连接核反应堆与电能输出的关键纽带,其运行效率与稳定性直接关系到整个核电站的安全与经济效益。从结构上看,二回路系统主要由蒸汽发生器、汽轮机、冷凝器、给水泵以及相关管道和辅助设备构成。蒸汽发生器作为一回路与二回路之间的热量传递枢纽,通过U型传热管将一回路高温高压冷却剂携带的热量传递给二回路的给水,使给水加热并汽化为高温高压蒸汽。这些蒸汽随即进入汽轮机,推动汽轮机转子高速旋转,将蒸汽的热能转化为机械能。汽轮机通常采用多级结构,包括高压缸、中压缸和低压缸,蒸汽在各级缸中逐级膨胀做功,驱动发电机产生电能。做功后的乏汽进入冷凝器,在循环冷却水的作用下迅速冷凝成液态水,通过给水泵重新送回蒸汽发生器,完成一个完整的热力循环^[1]。二回路系统的功能不仅是能量转换,还承担着维持核电站稳定运行的重要职责。它通过精确控制蒸汽流量和压力,保证汽轮机与发电机的稳定运转,实现高效发电;通过冷凝器的冷却作用,将乏汽及时冷凝回收,维持系统的物质平衡,避免水资源浪费和环境排放。二回路系统还具备事故工况下的安全保障功能,在紧急情况下能够快速隔离故障区域,防止事故扩大,确保核电站的安全可靠运行。

1.2 二回路水质的重要性

在核电厂二回路系统中,水质是影响系统安全稳定运行的关键因素。从能量转换效率角度来看,纯净的水质能够保证蒸汽发生器的传热效率。如果水质不达标,水中的杂质和离子会在传热管表面形成污垢和腐蚀产物,这些物质具有较低的导热系数,会阻碍热量传递,导致蒸汽发生器的热效率下降。从设备安全角度而言,不良的水质会引发设备的腐蚀和结垢问题。例如,水中

的溶解氧会与金属材料发生氧化反应,导致管道和设备表面出现氧腐蚀,形成凹坑和裂纹,严重时甚至会引发管道泄漏和设备损坏;水中的钙、镁等离子在高温高压条件下会形成水垢,附着在蒸汽发生器传热管和汽轮机叶片表面,破坏设备的正常运行,增加设备故障风险。水质问题还可能影响核电站的放射性安全,一旦二回路设备发生腐蚀泄漏,可能会导致放射性物质泄漏,对环境和人员安全造成严重威胁。因此,严格控制二回路水质,是保障核电站安全稳定运行的必要条件。

2 汽轮机腐蚀的机理与类型

2.1 腐蚀机理

在核电厂二回路系统中,汽轮机的腐蚀是一个复杂的电化学反应,涉及到金属与周围介质之间的化学反应和电化学反应。金属材料在电解质溶液(即二回路中的水)中,由于不同部位的电极电位存在差异,会形成无数微小的原电池。在这些原电池中,电位较低的部位作为阳极,发生氧化反应,金属原子失去电子变成金属离子进入溶液;电位较高的部位作为阴极,发生还原反应,溶液中的氧化性物质(如溶解氧)获得电子被还原^[2]。这种电化学反应过程会不断消耗金属材料,导致设备的腐蚀损坏。温度、压力、流速等运行参数也会对腐蚀过程产生显著影响,在高温高压环境下,化学反应和电化学反应的速率会加快,腐蚀过程更加剧烈;流体的高速流动会对金属表面产生冲刷作用,破坏金属表面的保护膜,加速腐蚀进程;而介质的酸碱度(pH值)则会影响金属表面钝化膜的稳定性,合适的pH值可以促进钝化膜的形成和稳定,抑制腐蚀,反之则会加速腐蚀。

2.2 腐蚀类型

2.2.1 酸腐蚀

酸腐蚀是核电厂二回路汽轮机常见的腐蚀类型之一,主要是由于水中酸性物质的存在导致金属表面发生

腐蚀。在二回路系统中，酸性物质的来源较为复杂，可能是由于化学药剂添加不当、设备材料的腐蚀产物溶解以及外界污染物的引入等原因造成。当水中的酸性物质浓度超过一定限度时，溶液的pH值会降低，处于酸性环境中的金属表面的钝化膜会遭到破坏，金属原子更容易失去电子，从而引发酸腐蚀。酸腐蚀通常表现为均匀腐蚀和局部腐蚀两种形式。均匀腐蚀会使金属表面整体变薄，降低设备的结构强度；局部腐蚀则会在金属表面形成点蚀坑、缝隙腐蚀等局部缺陷，这些缺陷在应力作用下容易扩展，形成裂纹，最终导致设备的失效。对于汽轮机而言，酸腐蚀会严重影响叶片、缸体等部件的性能，降低汽轮机的效率和可靠性，增加维修成本和停机时间。

2.2.2 氧腐蚀

氧腐蚀是二回路系统中危害较大的一种腐蚀类型，主要是由于水中溶解氧与金属发生氧化反应引起的。在正常运行条件下，二回路系统应该保持严格的无氧环境，但在实际运行过程中，由于设备泄漏、补水处理不当等原因，会有一些量的氧气进入系统。当水中存在溶解氧时，金属表面会发生吸氧腐蚀，阳极区金属发生氧化反应，阴极区溶解氧获得电子被还原，生成氢氧根离子。这些氢氧根离子会与金属离子结合，形成金属氢氧化物，进一步氧化后形成铁锈，附着在金属表面。氧腐蚀具有明显的局部性，通常会在金属表面形成溃疡状或斑点状的腐蚀坑。随着腐蚀的不断发展，这些腐蚀坑会逐渐加深和扩大，严重时甚至会穿透金属壁，导致设备泄漏。对于汽轮机来说，氧腐蚀会破坏叶片表面的光洁度，增加流动阻力，降低汽轮机的效率；腐蚀坑的存在还会成为应力集中点，在蒸汽压力和机械振动的作用下，容易引发裂纹扩展，威胁汽轮机的安全运行。

2.2.3 其他类型腐蚀

除了酸腐蚀和氧腐蚀外，核电厂二回路汽轮机还可能遭受其他类型的腐蚀，如应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳、磨损腐蚀等。应力腐蚀开裂是在拉应力和特定腐蚀介质共同作用下发生的一种脆性断裂现象，即使金属材料所受应力远低于其屈服强度，也可能发生开裂。在汽轮机中，叶片、缸体等部件在运行过程中承受着较大的机械应力和热应力，当这些部件处于含有特定腐蚀介质（如氯化物、氢氧化物等）的环境中时，就容易发生应力腐蚀开裂。腐蚀疲劳是指金属材料在交变应力和腐蚀介质共同作用下，疲劳强度降低，疲劳寿命缩短的现象。汽轮机在启停过程和变负荷运行过程中，部件会受到周期性的应力变化，同时又处于含有腐蚀介质的环境中，因

此容易发生腐蚀疲劳。磨损腐蚀则是由于流体的冲刷作用和腐蚀作用相互叠加，加速金属表面的损坏。在汽轮机的进汽口、排汽口等部位，蒸汽流速较高，对金属表面的冲刷作用较强，容易引发磨损腐蚀。这些不同类型的腐蚀相互影响，会给汽轮机的安全运行带来严重威胁。

3 二回路水质对汽轮机腐蚀的影响分析

3.1 水质成分与腐蚀的关系

核电厂二回路水质成分复杂，其中多种离子和物质的含量与汽轮机的腐蚀密切相关。水中的溶解氧是导致氧腐蚀的主要因素，溶解氧含量越高，金属发生吸氧腐蚀的可能性就越大，腐蚀速率也越快。水中的酸碱度（pH值）对汽轮机的腐蚀也有着重要影响。合适的pH值范围能够促进金属表面形成稳定的钝化膜，抑制腐蚀反应的进行^[3]。一般来说，二回路水的pH值控制在9-10.5之间较为合适，在这个范围内，金属表面的钝化膜具有良好的稳定性和保护性。当pH值低于9时，溶液酸性增强，钝化膜容易被破坏，引发酸腐蚀；当pH值高于10.5时，虽然能够有效抑制氧腐蚀，但过高的pH值可能会导致碱性腐蚀和应力腐蚀开裂等问题。水中的硬度离子（钙、镁等离子）、氯化物、硫酸盐等物质的含量也会影响汽轮机的腐蚀。硬度离子在高温高压条件下会形成水垢，附着在设备表面，破坏传热效果，同时也会为腐蚀反应提供有利条件；氯化物和硫酸盐具有较强的腐蚀性，它们能够穿透金属表面的钝化膜，引发局部腐蚀和应力腐蚀开裂。

3.2 水质恶化对汽轮机腐蚀的具体影响

当核电厂二回路水质恶化时，会对汽轮机产生多方面的严重影响。首先，水质恶化会加速汽轮机的腐蚀速率。例如，当水中溶解氧含量超标时，氧腐蚀会迅速加剧，在金属表面形成大量的腐蚀坑和铁锈，导致金属壁厚减薄，强度下降；当水中的pH值偏离正常范围，酸性增强时，酸腐蚀会破坏汽轮机叶片和缸体表面的钝化膜，使金属直接暴露在腐蚀介质中，加速腐蚀进程。其次，水质恶化会影响汽轮机的运行效率，水中的杂质和腐蚀产物会在汽轮机叶片表面形成污垢，改变叶片的型线，增加蒸汽流动阻力，降低汽轮机的做功能力。污垢的存在还会影响蒸汽的传热效果，导致汽轮机的热效率下降，发电成本增加。另外，水质恶化引发的腐蚀问题还可能导致汽轮机部件的损坏和泄漏，增加设备的维修频率和维修成本，甚至可能引发停机事故，给核电站的正常运行带来严重影响。长期的水质恶化还会缩短汽轮机的使用寿命，增加设备更换和更新的成本。

4 核电厂二回路水质控制方法与技术

4.1 原水处理

原水处理是核电厂二回路水质控制的首要环节，其目的是去除原水中的悬浮物、胶体、有机物、硬度离子等杂质，为后续的水质处理提供合格的水源。原水处理通常包括混凝、沉淀、过滤、软化等多个工艺步骤。混凝是向原水中加入混凝剂，使水中的微小悬浮物和胶体颗粒相互凝聚形成较大的絮状物，便于后续的沉淀和过滤。常用的混凝剂有聚合氯化铝、聚合硫酸铁等。沉淀过程是让混凝后的水在沉淀池中静置，使絮状物在重力作用下沉降到池底，从而实现固液分离。过滤则是通过滤料（如石英砂、活性炭等）的截留作用，进一步去除水中残留的悬浮物和杂质，使水质得到进一步净化。软化处理主要是去除水中的硬度离子（钙、镁等离子），常用的方法有离子交换树脂法和石灰软化法。离子交换树脂法是利用树脂中的钠离子与水中的钙、镁离子进行交换，将硬度离子去除；石灰软化法则是通过向水中加入石灰，使钙、镁离子形成沉淀物析出。通过这些原水处理工艺，可以有效降低原水中的杂质含量，为二回路系统提供高质量的水源。

4.2 给水水质调整与控制

给水水质调整与控制是核电厂二回路水质控制的核心环节，主要通过向给水中添加化学药剂的方式，调节水质参数，抑制腐蚀反应的发生。在给水处理中，通常会添加氨、联氨等化学药剂。氨是一种常用的pH调节剂，通过向给水中加入适量的氨，可以提高水的pH值，使其保持在合适的范围内，促进金属表面钝化膜的形成和稳定，从而有效抑制氧腐蚀和酸腐蚀。联氨则是一种强还原剂，能够与水中的溶解氧发生化学反应，将溶解氧还原为水，从而去除水中的溶解氧，防止氧腐蚀的发生。在一些情况下，还会添加缓蚀剂等化学药剂，进一步增强对设备的保护作用。给水水质的控制需要根据核电站的运行工况和水质监测数据进行精确调整。通过在线监测仪表实时监测给水的pH值、溶解氧含量、电导率等参数，并根据监测结果及时调整化学药剂的添加量，确保给水水质始终满足运行要求。同时还需要定期对给水水质进行全面分析，评估水质控制效果，及时发现和解决潜在的水质问题。

4.3 水质分析与监测

水质分析与监测是核电厂二回路水质控制的重要保障，通过对水质的实时监测和定期分析，能够及时掌握水质变化情况，发现潜在的水质问题，为水质控制提供准确的数据支持^[4]。在核电厂二回路系统中，配备了大量的在线监测仪表，用于实时监测水质参数。这些仪表包括pH计、溶解氧分析仪、电导率仪、钠离子浓度计、氯离子浓度计等，能够连续监测给水、蒸汽、凝结水等不同部位的水质指标。在线监测数据通过控制系统实时传输到中央控制室，操作人员可以根据数据变化及时调整水质控制措施。除了在线监测外，还需要定期对水质进行离线分析，离线分析通常采用实验室分析方法，对水质进行更全面、更精确的检测。分析项目包括水中的各种离子含量、有机物含量、微生物含量等。通过离线分析，可以对在线监测数据进行验证和补充，发现一些在线监测难以检测到的水质问题。另外，还需要建立完善的水质监测档案，对水质数据进行长期记录和分析，总结水质变化规律，为水质控制提供科学依据。通过有效的水质分析与监测，能够及时发现和解决水质问题，保障二回路系统的安全稳定运行。

结束语

综上所述，核电厂二回路水质控制是防范汽轮机腐蚀的关键举措。合理的水质控制能够有效降低腐蚀风险，保障设备安全稳定运行与发电效率。随着核电技术发展，对水质控制的要求将愈发严格。未来需持续深入研究水质与腐蚀的内在联系，优化控制技术与方法，提升监测精度，为核电厂的高效、安全运行提供更坚实的保障。

参考文献

- [1] 昌桐,刘慧宇,郑文君.核电厂二回路系统水化学控制优化[J].科技视界,2020(24):16-17.
- [2] 高敏,李建锁.核电厂电动主给水泵系统控制设计优化[J].产业与科技论坛,2024,23(21):31-34.
- [3] 乔睿鑫,董亮,陈建栋,等.核电厂二回路金属管道流动加速腐蚀与防护的研究进展[J].腐蚀与防护,2024,45(02):10-17.
- [4] 胡海彬.压水堆核电厂二回路管道设计应对FAC策略[J].电力勘测设计,2022,(02):29-33.