

火力发电厂水汽系统腐蚀与结垢机理及防护技术

王馨慨

华阳建投阳泉热电有限责任公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8667

[摘要] 火力发电厂水汽系统腐蚀、结垢问题，直接关系到机组的安全经济运行，是制约其长周期稳定运行的瓶颈。本文对系统内主要的腐蚀机理及结垢成因作了系统的阐述，腐蚀方面包括电化学腐蚀、氧腐蚀、氢损伤等类型，结垢主要是钙镁盐类、硅酸盐等物质的沉积富集。深入分析发现腐蚀结垢会加快设备性能的衰减，引发安全隐患，严重时会造成非计划停机。针对以上问题，本文提出多维度防护方案，水质控制方面有给水处理、炉水处理、凝结水精处理技术，化学防护采用加氧、加氨、磷酸盐等针对性处理方法。结合工况需求优化材料选择和表面防护措施，形成全方位防控体系。本文所提技术方案可为火电厂水汽系统腐蚀结垢治理提供可靠支撑，保障机组安全高效运行。

[关键词] 火力发电；水汽系统；腐蚀机理；结垢控制；化学处理

Corrosion and scaling mechanism and protection technology of water and steam system in thermal power plants

Wang Xinkai

Huayang Construction Investment Yangquan Thermal Power Co., Ltd.

[Abstract] The corrosion and scaling problems in the water and steam system of thermal power plants are directly related to the safe and economic operation of the units, and are bottlenecks that restrict their long-term stable operation. This article provides a systematic explanation of the main corrosion mechanisms and scaling causes within the system. Corrosion includes types such as electrochemical corrosion, oxygen corrosion, and hydrogen damage, while scaling mainly involves the deposition and enrichment of substances such as calcium magnesium salts and silicates. In depth analysis reveals that corrosion and scaling can accelerate equipment performance degradation, pose safety hazards, and in severe cases, cause unplanned shutdowns. In response to the above issues, this article proposes a multidimensional protection plan. In terms of water quality control, there are technologies for water treatment, boiler water treatment, and condensate polishing. Chemical protection uses targeted treatment methods such as oxygenation, ammonification, and phosphate. Optimize material selection and surface protection measures based on working conditions, and form a comprehensive prevention and control system. The technical solution proposed in this article can provide reliable support for the treatment of corrosion and scaling in the water vapor system of thermal power plants, ensuring the safe and efficient operation of the units.

[Key words] thermal power generation; Water vapor system; Corrosion mechanism; Scale control; chemical treatment

水汽系统是火力发电厂的重要组成，担负着工质循环、热能转换的任务。系统运行中高温高压的环境下水汽介质同金属管道、设备表面会存在复杂的物理化学反应，导致腐蚀和结垢。这些问题不仅会降低传热效率，增大能源消耗，而且有可能造成设备损坏甚至引发安全事故。随着火电机组向大容量、高参

数方向发展，水汽品质的要求也越来越严格，腐蚀结垢问题也越来越突出。探究水汽系统腐蚀结垢形成机理，把握有效的防护技术，对保证机组安全稳定运行、延长设备使用寿命、提高经济效益有着十分重要的意义。

1 水汽系统腐蚀与结垢机理分析

1.1 腐蚀机理

水汽系统腐蚀的本质就是金属材料在一定的环境里发生的电化学反应。电化学腐蚀是主要的腐蚀形式,金属表面形成无数微小的腐蚀原电池,阳极区金属失去电子被氧化,阴极区去极化剂得到电子被还原。在水汽介质中,溶解氧是强氧化剂,加快了阴极反应的速度,使腐蚀速率大大增加。给水除氧不彻底时,残留的溶解氧随着给水进入到锅炉系统,在省煤器、水冷壁等地方造成严重的氧腐蚀。氧腐蚀产物主要是疏松的氧化铁,呈红褐色或黑色,不能形成有效的保护膜,反而使基体金属持续溶解^[1]。氢损伤属于高温高压机组的特殊腐蚀问题,给水 pH 值控制不当或者含有酸性杂质的时候,氢离子在阴极被还原成氢原子,部分氢原子扩散到金属晶格里,与碳化物发生反应生成甲烷气体,从而引起晶界开裂和材料脆化。应力腐蚀开裂在受力部件中比较常见,拉伸应力和腐蚀介质共同作用造成裂纹的产生和扩展,最终导致设备突然失效。凝汽器铜合金管束的氨腐蚀也不可小视,凝结水中的氨与铜离子形成络合物,破坏了表面的钝化膜,加快了铜的溶解,溶解的铜离子随着凝结水进入热力系统,在高温区沉积成铜垢。

1.2 结垢机理

结垢是水中溶解性盐类在受热面上析出沉积的过程,主要受温度、压力、pH 值等因素的影响。钙镁盐类结垢是最常见的类型,给水中的钙镁硬度在高温下会发生热分解反应,碳酸氢钙分解成碳酸钙和二氧化碳,碳酸氢镁分解成氢氧化镁和二氧化碳,这些难溶性的盐类附着在金属表面形成坚硬的水垢层。硅酸盐结垢机理比较复杂,补给水和凝结水携带的硅酸根离子在锅炉蒸发浓缩过程中浓度增大,当超过溶解度极限时就会以硅酸镁、硅酸钙等形式析出。硅垢的热阻和附着力都很大,不能用常规的方法去除。磷酸盐加药不当会造成磷酸盐结垢,炉水中磷酸根浓度过高时,与钙镁离子反应生成磷酸钙、磷酸镁沉淀,在水冷壁管内壁上沉积^[2]。铁垢的形成与金属腐蚀产物的迁移沉积有关,给水系统、凝结水系统的腐蚀产物随着水流进入锅炉,在温度较高的地方发生热分解或者浓缩结晶,转变为致密的氧化铁垢层。混合垢是实际运行中遇到最多的情况,多种成分一起沉积形成结构复杂的垢层,钙镁盐、硅酸盐、铁氧化物等互相交织,增大了清除的难度。

2 腐蚀与结垢对系统的危害

2.1 对设备性能的影响

腐蚀、结垢都会给水汽系统的设备带来不良影响。传热效率降低是直接的结果,垢层导热系数远低于金属材料,即使很薄的一层水垢也会使受热面金属壁温上升,为了保持额外的蒸汽产量,必须增加燃料消耗,造成发电煤耗增加。统计数据表明,水冷壁管内壁有 1 毫米厚的水垢,燃料消耗就会增加 3% 到 5%。金属壁温异常升高还会改变材料的力学性能,高温蠕变

速率加快,抗拉强度、屈服极限下降,设备寿命缩短。局部过热现象在结垢严重的地方更加明显,垢下腐蚀机制使金属减薄和过热叠加,很容易造成爆管事故。流动阻力增大是腐蚀结垢的另一个重要影响,管道内壁粗糙度增大,流通截面减小,循环水泵、给水泵等辅机的电耗相应增大^[3]。凝汽器铜管内壁的微生物粘泥和结垢使循环水流量减少、真空度变差、汽轮机排汽压力增大、机组出力受到限制。腐蚀产物脱落、迁移会造成小管径管道、控制阀门堵塞,影响系统的调节能力。

2.2 对安全运行的威胁

腐蚀结垢问题给机组的安全运行造成严重的危害。爆管事故是最危险的后果,垢下腐蚀使管壁变薄,在高温高压的作用下,应力集中部位先发生破裂,高温蒸汽和热水喷出会造成人员伤亡、设备损坏,被迫停机检修造成巨大经济损失。应力腐蚀裂纹具有隐蔽性,表面看上去没有明显异常,但是内部裂纹已经深入基体,突然断裂时往往措手不及。过热器、再热器的结垢过热,容易引起蠕变损伤,金属组织会变粗、碳化物球化等劣化,承载能力急剧下降。汽轮机叶片的固体颗粒侵蚀也和水汽品质有关,炉水携带的盐类和腐蚀产物随蒸汽进入汽轮机通流部分,高速运动的固体颗粒冲击叶片表面造成磨损凹坑,叶片效率降低,振动加剧。盐类在叶片上沉积,使叶型、流通面积发生变化,破坏了做功条件^[4]。凝汽器泄漏也是一个隐患,铜管腐蚀穿孔之后循环水就会进入到凝结水系统里,水质急剧恶化,硬度、氯离子、硫酸根等杂质浓度超标,加剧了整个热力系统的腐蚀速率,形成了恶性循环。化学清洗时所用的酸液如果控制不好,会对基体金属造成过腐蚀,从而缩短设备的寿命。

3 防护技术与控制措施

3.1 水质控制技术

高品质的水汽质量是防止腐蚀结垢的根本方法。给水处理系统主要去除原水中的各种杂质,预处理阶段采用混凝、沉淀、过滤等方式去除悬浮物、胶体物质,降低浊度、色度。离子交换技术属于传统的除盐方法,阳离子交换树脂去除钙镁等阳离子,阴离子交换树脂去除硫酸根、氯离子等阴离子,混合床可将水的电导率降至 0.2 微西/厘米以下。反渗透技术近几年来在火电厂得到了广泛的应用,利用半透膜的选择透过性截留溶解性固形物,脱盐率可达 97% 以上,产水水质稳定可靠,运行成本较低。电渗析技术对于苦咸水有独特的优势,利用离子交换膜在电场的作用下实现离子定向迁移分离。除氧是给水处理的重要环节,热力除氧器通过汽水直接接触传热,将水加热到沸点使溶解氧逸出,出口溶解氧含量可以控制在 7 微克/升以下,配合使用还原性除氧剂如联氨可进一步降低到 2 微克/升。凝结水精处理系统对维持汽轮机凝结水品质至关重要,高速混床或电再生混床可以有效去除凝结水中的腐蚀产物和

杂质离子,防止凝汽器泄漏时水质急剧恶化^[5]。前置过滤器可以去除铁锈颗粒,保护离子交换树脂不被污染。炉水处理针对锅炉内部水质进行调整,通过连续排污、定期排污来控制炉水中溶解固形物的浓度,防止浓缩倍率过高造成结垢、汽水共腾。

3.2 化学处理方法

化学加药处理是控制腐蚀结垢的重要方法。全挥发性处理适用于高压以上参数的直流锅炉和亚临界、超临界机组,给水中只加入氨和联氨等挥发性药剂,不添加任何非挥发性物质。氨作为成膜性缓蚀剂可以形成保护膜,同时将给水 pH 值提高到 9.0-9.5,抑制酸性腐蚀,联氨作为还原剂与残余溶解氧反应生成氮气和水,保护金属免受氧腐蚀。加氧处理技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新的水处理方法,在给水中加入适量的氧气使金属表面生成一层致密的氧化膜,该钝化膜具有良好的保护作用,可以阻止腐蚀介质和基体接触,从而大大降低腐蚀速率。加氧处理对水质的要求非常高,电导率要小于 0.15 微西每厘米,否则会加重腐蚀。磷酸盐处理主要用在中低压锅炉的炉水调节上,向炉水中加入磷酸三钠等磷酸盐药剂,与硬度成分反应生成不溶性的磷酸钙沉淀,通过排污排出系统,防止钙镁盐类在受热面上结垢。磷酸盐处理时要严格控制加药量和炉水 pH 值,防止出现磷酸盐隐藏现象和腐蚀问题。螯合剂处理用有机螯合剂 EDTA 与钙镁离子形成稳定的络合物,使钙镁离子保持在溶解状态,不会沉淀结垢,适合于负荷波动大的机组。缓蚀剂的选择要根据系统特点和腐蚀类型来确定,凝汽器循环水系统常采用复合型缓蚀剂,既能成膜在铜合金表面又不会污染环境。阻垢剂通过晶格畸变、分散悬浮等方式阻止成垢晶核的形成和长大,聚丙烯酸类、磷酸盐类阻垢剂在循环冷却水处理中应用较多。

3.3 设备材料选择与防护

合理选择材料属于预防腐蚀的基础性手段。低压给水加热器多用碳钢制造,成本低且能满足使用要求。高压给水加热器、省煤器等承受较高温度和压力的部件用 20G、20MnG 等低合金钢,具有更好的高温强度和抗腐蚀性能。过热器、再热器管材按蒸汽温度选取,亚临界机组用 12Cr1MoVG、15CrMoG 等珠光体耐热钢,超临界机组高温段用 TP347H、Super304H 等奥氏体不锈钢,这些材料在高温下具有较好的蠕变性能和抗氧化能力。凝汽器管束过去大多采用黄铜、白铜等铜合金,近些年来不锈钢管和钛管由于具有良好的耐腐蚀性而被广泛使用,尤其是沿海电厂用海水冷却时,钛管能有效地抵抗氯离子的腐蚀。表面防护技术给金属设备提供额外的保护,热喷涂工艺在基体表面形成陶瓷涂层或者金属涂层,提高耐磨性和耐腐蚀性。化学镀镍磷合金可以得到均匀致密的保护层,镀层硬度高、和基体结合牢固。阴极保护技术在凝汽器水室等部位应用效果良

好,通过外加电流或者牺牲阳极使被保护金属处于阴极状态,消除了腐蚀驱动力。定期检验、状态监测是及早发现腐蚀缺陷的重要手段,超声波测厚可以无损检测管壁剩余厚度,涡流探伤可以发现表面及近表面裂纹,射线检测可以透视焊缝和铸件内部质量。水质在线监测系统对关键水质指标进行实时监测,pH 值、电导率、溶解氧、硬度等参数出现异常变化时就会发出报警,使运行人员及时调整水处理工况。化学清洗是去除顽固垢层的有效方法,根据垢样成分选择合适的清洗剂配方,钙镁垢用盐酸或氨基磺酸清洗,硅垢用氢氟酸或氟化铵碱性溶液清洗,铁垢用柠檬酸或 EDTA 等络合剂清洗,清洗过程中添加缓蚀剂保护基体金属,严格控制清洗温度、浓度和时间,清洗后必须进行钝化处理。

结束语

火力发电厂水汽系统腐蚀和结垢,是电化学、传热传质、材料科学等多学科交织在一起的复杂技术难题。这类问题存在于锅炉、汽轮机、凝汽器等主要设备上,弄清楚各种腐蚀(氧腐蚀、酸腐蚀、应力腐蚀)和结垢(碳酸盐、硫酸盐结垢)的产生机理,掌握它们对设备性能下降、运行效率降低、安全风险增大的影响规律,是制定科学防护措施、避免设备故障的前提。实践当中要始终坚持预防为主、综合治理的基本理念,从多方面创建闭环式系统化的防护体系。水质精准控制是源头防控的基础,严格控制水汽的 pH 值、溶解氧、电导率等指标,高效化学处理为有效手段,配合针对性药剂抑制腐蚀结垢,适配材料的选择要根据工况特点来选择耐腐蚀耐磨的材料,规范运行维护贯穿整个过程,定期检测并维修检查隐患。目前火电机组正在向高参数、大容量方向快速迭代升级,对水汽品质的控制标准也越来越严格,从而倒逼腐蚀结垢防控技术的创新和工艺优化不断推进。

【参考文献】

- [1] 王志刚,李建军,陈明华.火电厂热力系统腐蚀机理与防护措施[J].动力工程学报,2018,38(6):456-462.
- [2] 张伟,刘晓东,马宏伟.锅炉水冷壁结垢机理及清洗技术研究[J].热力发电,2019,48(3):68-74.
- [3] 赵建国,李敏,孙志强.火力发电厂水汽系统腐蚀控制技术综述[J].腐蚀与防护,2020,41(2):81-87.
- [4] 周华,杨国强,陈勇.超临界机组水汽系统材料选择与防护[J].中国电力,2017,50(11):142-148.
- [5] 陈磊,王建平,刘洋.凝结水精处理系统优化运行研究[J].电站系统工程,2021,37(1):35-40.

作者简介:王馨慨;出生年月:1992年8月26日,男,汉族,籍贯:山西省昔阳县,学历:大学本科,职称:机电工程师,研究方向:电厂化学。