

660MW 机组空预器设备故障模式与检修技术改进

李 鑫

国家电投集团贵州金元黔西中水发电有限公司 贵州省毕节市 551500

摘 要: 针对 660MW 超超临界机组空气预热器(空预器)运行过程中频发的腐蚀、磨损及堵灰等故障,从热力学、材料及流体力学等多学科视角解析其失效机理,提出基于材质升级、结构优化与智能控制的综合改进方案。研究聚焦低温腐蚀电化学行为、磨损能量耗散规律及灰垢沉积热力学特性,结合某电厂 2018–2023 年设备运行大数据分析,构建空预器全生命周期健康管理模型。

关键词: 660MW 机组; 空气预热器; 故障模式; 检修技术

在火力发电领域,660MW 机组承担着大量电力供应任务。空气预热器作为机组关键辅机,其性能优劣直接影响机组热效率与燃烧稳定性。在复杂运行工况下,该设备易出现各类故障,进而影响机组安全稳定运行。深入探究其故障模式,优化检修技术,对降低维护成本、提升经济效益意义重大。本文聚焦于此,从理论与实践层面展开分析。

1 660MW 机组空预器常见故障模式剖析

1.1 腐蚀类故障

1.1.1 低温腐蚀机理

在 660MW 机组运行中,低温腐蚀是空气预热器常面临的问题。当燃料含硫,在燃烧过程中硫氧化为二氧化硫,部分进一步生成三氧化硫。三氧化硫与烟气中的水蒸气结合,形成硫酸蒸汽。当烟气温度低于硫酸蒸汽露点,硫酸蒸汽凝结于空预器低温受热面,形成酸性腐蚀环境。在这一过程中,硫酸对金属基体产生强烈的化学侵蚀。从微观层面看,硫酸先破坏金属表面的氧化膜,使金属基体暴露在腐蚀环境中。铁氧化膜(Fe_2O_3)是金属表面的一层保护膜,硫酸能与其发生反应,如生成硫酸铁($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$),让氧化膜失效。随后硫酸持续溶解金属铁,生成硫酸亚铁等可溶性盐,导致受热面壁厚逐渐减薄。长此以往,受热面机械性能下降,出现腐蚀坑、裂纹,最终可能造成穿孔,影响热交换性能,增加排烟温度,降低机组热效率^[1]。

1.1.2 高温腐蚀机理

高温腐蚀多发生在锅炉高温受热面。燃料中硫、钒等元素在此环境下发生复杂化学反应。硫燃烧生成二氧化硫和三氧化硫,三氧化硫与水蒸气结合形成硫酸蒸汽,对金属造

成腐蚀。同时,钒与氧结合生成五氧化二钒(V_2O_5),它与三氧化硫反应生成稳定的硫酸钒($\text{V}_2(\text{SO}_4)_3$)。

而在高温下,五氧化二钒会熔化,形成液态熔渣。液态熔渣具有高黏性和流动性,附着在金属表面后,一方面在高温下形成的灰渣对金属基体产生机械磨损,破坏金属表面的氧化层。另一方面,熔渣中的化学成分与金属发生化学反应,加速金属腐蚀。高温腐蚀会使受热面表面坑洼不平,破坏气体与金属表面的接触界面,增大热阻,降低传热系数。严重时,管壁穿孔,引发漏风、漏烟等故障,影响机组安全稳定运行。

1.2 磨损类故障

1.2.1 叶片磨损机理

在机组运行过程中,空气预热器转子携带叶片和波纹板等构件高速旋转,与携带飞灰颗粒的气流进行相互作用。飞灰颗粒作为磨损介质,以较高的速度冲击叶片表面。当飞灰颗粒与叶片表面接触时,由于颗粒的硬度较高且具有尖锐的棱角,会对叶片表面产生切削作用。在长期的冲击和切削作用下,叶片边缘和表面会出现磨损现象。随着磨损程度的加剧,叶片的形状会发生变化,边缘逐渐钝化,表面粗糙度增加。这不仅会改变叶片的气动性能,降低气流与叶片的匹配程度,还会使热交换面积减小,导致传热效率下降,进而增加机组的能耗。

1.2.2 密封组件磨损机理

空预器内部的密封组件,如径向密封、环向密封等,在机组运行中承受复杂力学环境。转子旋转时,密封组件与转子、外壳之间存在相对运动。从力学原理分析,由于转子

与密封组件两侧存在压力差,会对其产生挤压和摩擦力。在燃烧工况变化时,如负荷波动,会导致烟气压力和空气压力变化,进而使密封组件所受压力差改变。此外,气流冲刷也会对密封组件产生外力作用,增加摩擦力。气流中携带的飞灰颗粒会加剧密封组件的磨料磨损。密封组件磨损后,其密封间隙增大,导致漏风量增加。过多的冷空气进入会影响燃烧的空气配比,使燃烧效率降低,同时增加排烟热损失,影响机组经济性和安全稳定性。

1.3 堵灰类故障

1.3.1 灰堵形成原因

燃煤品质对空预器堵灰程度影响较大,高灰分含量煤种在燃烧时产生大量飞灰。当煤的灰熔点较低,在燃烧过程中,灰分在相对较低温度下软化、熔融,形成具有较高黏性的物质。锅炉燃烧工况也会影响灰的沉积。例如,燃烧不充分时,烟气中碳颗粒含量增加,这些碳颗粒会附着在灰层上,降低灰层与受热面的摩擦力,使灰更容易脱落和重新附着^[2]。烟气流速也是关键因素,较低的烟气流速会使飞灰颗粒在受热面上停留时间延长,增加沉积可能性。随着运行时间增加,受热面上会逐渐形成一层薄灰层。在烟气冲刷和飞灰颗粒不断沉积的双重作用下,灰层逐渐增厚。当灰层达到一定厚度,就可能引发堵灰问题。

1.3.2 堵灰带来的危害

堵灰会导致气流通道截面减小,使空气和烟气的流通阻力增大。为了保证系统的正常通风,引、送风机需要克服增大的阻力,从而增加了电机的功耗。同时,被堵区域的热交换能力下降,导致局部温度异常升高。由于相邻未堵部位的负荷相对增加,会使热应力分布不均。长期处于这种状态下,热应力过度积累可能引发部件的热疲劳、变形等故障,严重影响机组的安全稳定运行。如果堵灰严重且未及时处理,还可能导致局部过热,引发火灾等安全事故,给电站带来巨大的经济损失。

2 660MW 机组空预器检修技术革新策略

2.1 防腐技术革新

2.1.1 耐腐蚀合金钢材应用

在应对空预器的腐蚀问题上,选用耐腐蚀合金钢材是一种行之有效的方法。在空预器的关键部位,如低温受热面 and 高温受热面,采用添加了铬、镍等微量元素的耐腐蚀合金钢材,能够显著提高设备的抗腐蚀能力。铬元素具有独特的

化学性质,在钢材表面能够与氧气发生反应,形成一层致密的氧化铬(Cr_2O_3)保护膜。这层保护膜具有极高的化学稳定性,能够有效阻止氧气、水分等腐蚀性介质与基体金属的接触,从而抑制腐蚀反应的发生。从微观角度来看,氧化铬保护膜的存在使得金属表面的电子结构和化学键发生改变,降低了金属表面的活性,提高了其抗腐蚀能力^[3]。

镍元素的添加则进一步增强了钢材的韧性和耐腐蚀性能。镍能够与铁形成稳定的合金相,改变金属的晶体结构,提高材料的抗腐蚀疲劳和应力腐蚀开裂的能力。例如,在一些高温含硫环境中,镍能够与硫形成稳定的化合物,减少硫对金属基体的侵蚀。通过在关键部位采用耐腐蚀合金钢材,可以显著延长空预器的使用寿命,降低因腐蚀导致的设备损坏风险。同时,合金钢材的合理应用也有助于减少设备的维护和更换次数,提高机组运行的可靠性,为电力企业的稳定运营提供有力保障。

2.1.2 暖风器投运策略优化

暖风器的合理投运对于防止空预器的低温腐蚀至关重要。在机组启停及低负荷阶段,烟气的温度较低,酸性腐蚀的风险较高。此时,精确控制暖风器的投运时间和暖风温度,使空预器冷端温度始终高于酸露点温度,是降低腐蚀风险的关键措施。通过安装高精度的温度传感器,实时监测空预器冷端温度和烟气酸露点温度。当冷端温度接近酸露点温度时,及时投入暖风器。暖风器的调节阀门开度根据温度变化进行动态调整,以确保冷端温度稳定在安全范围内。

从热力学角度来看,暖风器通过引入高温空气对空预器冷端的空气进行加热,降低了冷端空气与烟气的温差,从而提高了冷端空气的温度,使其高于酸露点温度。同时,合理的投运策略还能够避免过度加热导致的能源浪费。例如,在机组低负荷运行时,根据实际的热负荷需求,精确调节暖风器的供热量,使系统在保证防腐效果的前提下,实现能源的优化利用。这种精确的控温策略不仅有效避免硫酸蒸汽在受热面凝结,从源头上遏制低温腐蚀的发生,还能够提高机组的运行经济性。

2.2 抗磨技术改进

2.2.1 叶片结构优化

新型螺旋扭曲叶片的设计与应用是叶片结构优化的重要成果。这种叶片的非对称形状改变了气流的流动方向,使气流与叶片的相互作用更加均匀。从流体力学的角度分析,

螺旋扭曲叶片能够在叶片的不同位置产生不同的气流速度和压力分布,从而分散飞灰颗粒的冲击力,减少对叶片边缘的集中磨损。同时,叶片表面的曲面设计扩大了受力面积,降低了单位面积上的冲击强度,进一步延缓了叶片的磨损进程。

为了进一步提高叶片的抗磨性能,还可以对叶片的表面进行特殊涂层处理。例如,采用陶瓷涂层,陶瓷材料具有高硬度、高耐磨性和良好的化学稳定性。陶瓷涂层能够有效地抵抗飞灰颗粒的磨损,同时还具有较低的摩擦系数,减少了气流与叶片之间的摩擦阻力,提高了叶片的气动性能。通过叶片结构优化和表面涂层处理相结合的方式,可以显著提高叶片的抗磨能力,延长叶片的使用寿命,保证空预器的正常运行。

2.2.2 密封技术创新

磁性密封条的使用是密封技术创新的典型代表。磁性密封条利用磁场吸附原理,能够紧密贴合转子与外壳之间的间隙。在密封部件发生轻微磨损时,磁力可以自动补偿间隙,确保密封性能的稳定性。从磁学的角度来看,磁性密封条内部的磁性材料产生的磁场能够对金属产生吸引力,使密封条与转子、外壳之间始终保持紧密接触。

与传统密封方式相比,磁性密封条具有更好的适应性和密封效果。它能够根据转子的振动和热膨胀等因素,自动调整密封间隙,避免因间隙过大或过小而导致的泄漏问题。同时,磁性密封条的密封性能不受灰尘和杂质的影响,能够在较为恶劣的环境下保持良好的密封效果。此外,磁性密封条的结构简单,安装和维护方便,能够有效地降低维护成本。通过采用先进的密封技术,可以维持机组的通风热力循环平衡,提高燃烧效率,降低排烟热损失,提升机组的经济性。

2.3 防堵灰技术创新

2.3.1 实时在线监测系统

借助激光散射灰浓度传感器和声波灰厚探测仪等先进传感设备,构建实时在线监测系统。激光散射灰浓度传感器通过测量激光在烟气中的散射强度,能够精确计算出烟气的灰浓度分布情况。根据米氏散射理论,激光在灰粒介质中传播时会发生散射,散射光的强度与灰粒的浓度、大小和形状等因素有关。传感器通过对散射光的检测和分析,可以实时获取烟气的灰浓度信息^[4]。

声波灰厚探测仪则利用声波在灰层中的传播特性,确定灰层的厚度。声波在灰层中传播时,其传播速度和衰减程

度与灰层的物理性质有关。通过测量声波从发射到接收的时间差和幅度变化,可以计算出灰层的厚度和密度。这些传感器能够全方位、实时地监测空预器内部的灰情态势。通过将传感器采集到的数据传输至控制系统,利用数据处理和分析算法,对灰情进行实时评估和预警。实时在线监测系统能够及时发现灰堆积的早期迹象,为后续的防堵灰措施提供准确的数据支持。

2.3.2 智能吹灰协同系统

智能吹灰协同系统是在实时在线监测系统的基础上发展而来的。当监测系统发现灰堆积现象时,智能算法会根据灰情的具体情况,如灰的位置、厚度、浓度等,自动规划吹灰路径、确定合理的吹灰强度和频次。以算法优化为例,系统会根据灰层厚度和浓度的分布情况,采用动态规划算法确定最优的吹灰路径,使吹灰枪和声波吹灰器能够高效地作用于灰层。

系统会精准操控蒸汽吹灰枪和声波吹灰器协同作业。蒸汽吹灰枪以高压蒸汽流直接冲击灰垢,使灰垢产生剥落力而脱离受热面。声波吹灰器则通过产生特定频率的声波,引发灰垢的共振,使灰垢从受热面上剥离。这种智能吹灰系统能够实现精准、高效的防堵灰作业,保证空预器的气流通畅和热交换性能。通过智能吹灰协同系统,可以提高机组的运行可靠性,减少因堵灰导致的故障停机时间,同时降低运行成本,提高电站的经济效益。

3 结论

660MW 机组空气预热器的故障模式复杂,涵盖腐蚀、磨损和堵灰等方面。通过深入分析故障成因和内在机理,针对性提出的检修技术革新策略,包括防腐、抗磨与防堵灰技术改进,是提升空预器运行可靠性的关键。随着电力行业快速发展及环保要求日益严格,深入研究空预器性能优化和故障预防技术至关重要。持续完善检修技术方案,能适应不断变化的市场需求和环保标准,为电力行业的可持续发展提供有力的技术保障。

参考文献:

- [1] 高建生,祁青福,赵小兵.一次空气预热器支承轴承失效的原因分析[J].冶金动力,2025(1):51-53
- [2] 刘旺,陈连,龚高阳,李智华,薛文华,石金刚,谢军,李雷雷,姚荣财,王召鹏,杨延西,邓毅,张晨辉.基于数字孪生的空气预热器预测性维护模式研究[J].发电技

术,2024,45(4):622-632

[3] 侯云峰. 火力发电厂锅炉空气预热器安装控制技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(12):058-061

[4] 徐冰. 660MW 机组锅炉空气预热器漏风控制自

动跟踪失灵故障分析和处理对策[J]. 安徽电力科技信息,2010(6):1-2

作者简介: 李鑫; 性别: 男; 出生日期: 1996 年 4 月; 民族: 汉族; 籍贯: 贵州黔西; 学历: 大学本科; 职称: 助理工程师; 研究方向: 火力发电厂设备检修