

# 超临界火电厂锅炉受热面高温腐蚀机理及防护策略研究

伊春洋

国家电投集团内蒙古白音华煤电有限公司坑口发电分公司 内蒙古自治区 026200

**摘要:**超临界火电厂锅炉运行中,受热面高温腐蚀严重影响机组安全与经济性。本文深入探讨其高温腐蚀机理及防护策略,从超临界工况特点出发,剖析高温、高压及强腐蚀性介质等关键因素对腐蚀的影响,阐述化学环境、温度、应力等多场耦合腐蚀机理。同时,分析传统防护策略如材料升级、表面处理技术的局限。基于此,提出基于多场协同的防护策略优化方案,包括精准识别腐蚀敏感区、适应性选材与改性、动态调控运行参数等,为锅炉受热面长周期安全运行提供理论支撑。

**关键词:**超临界火电厂锅炉;受热面;高温腐蚀;防护策略

随着全球经济的持续发展,电力需求呈现出不断增长的趋势,同时,环保要求也日益严格。在此背景下,超临界火电厂锅炉凭借其更高的热效率和更低的污染物排放优势,脱颖而出,成为现代火力发电的主流技术。该技术能有效提升能源利用效率,减少煤炭等化石能源的消耗,降低二氧化碳、二氧化硫等污染物排放,契合可持续发展的需求。

然而,超临界火电厂锅炉在实际运行中面临着一个关键难题——锅炉受热面高温腐蚀问题。受热面长期处于高温、高压以及强腐蚀性介质的恶劣环境中,金属材料极易受到侵蚀,发生腐蚀损坏。这种损坏不仅会削弱受热面的结构强度,影响机组的安全稳定运行,还可能引发安全事故。而且,腐蚀问题会增加设备的维护成本,缩短设备使用寿命,频繁的维修和更换部件还会导致机组停机时间延长,降低发电效率。因此,深入研究超临界火电厂锅炉受热面高温腐蚀机理,并制定出切实有效的防护策略,具有重要的现实意义和紧迫性。

## 1. 超临界锅炉受热面高温腐蚀的关键特征

超临界锅炉与亚临界锅炉相比,运行参数有了显著提升,这导致受热面高温腐蚀呈现出不同的特征。超临界工况下,工质的温度和压力更高,使得受热面承受的温度和应力更大。同时,高温烟气与管壁金属之间的相互作用更加复杂,形成了独特的腐蚀环境。

受热面高温腐蚀主要集中在炉膛水冷壁、屏式过热器和高温再热器等部位。这些部位直接与高温烟气接触,烟气中含有大量的腐蚀性成分,如硫氧化物、氯化物等。在超临界条件下,这些腐蚀性成分的活性增强,与管壁金属发生化

学反应,导致金属表面的氧化膜破坏,进而引发高温腐蚀。此外,超临界锅炉的汽水两相流特性也对受热面高温腐蚀产生影响,两相流的流动状态和传热特性会影响管壁金属的温度分布,从而影响腐蚀的进程<sup>[1]</sup>。

超临界锅炉中,由于压力和温度的升高,水蒸气的性质发生了显著变化。在超临界状态下,水蒸气不再有明显的气液两相区分,其密度接近液体,而黏度和扩散系数接近气体。这种特殊的状态使得腐蚀性物质更容易在金属表面吸附和扩散,从而加速了腐蚀反应的进行。而且,超临界工况下的高温环境为化学反应提供了更多的能量,使得硫氧化物和氯化物等腐蚀性物质更容易与金属发生反应,生成具有强腐蚀性的化合物。

## 2. 高温腐蚀的多场耦合机理解析

### 2.1 化学环境的影响

超临界锅炉受热面的腐蚀与化学环境密切相关。燃料中的硫和氯在燃烧过程中会发生一系列化学反应,生成硫氧化物和氯化物。在高温和还原性气氛下,这些化合物会进一步反应生成具有强腐蚀性的物质,如硫化氢和氯化氢。这些腐蚀性物质与管壁金属发生化学反应,导致金属表面的氧化膜被破坏,金属基体暴露在腐蚀性环境中,从而加速腐蚀进程<sup>[2]</sup>。

燃料的种类和质量对化学环境有着重要影响。不同种类的燃料含有不同比例的硫和氯,其燃烧特性也有所不同。例如,高硫燃料在燃烧时会产生更多的硫氧化物,增加了腐蚀的风险。此外,燃料中的杂质和灰分成分也会影响化学环境。灰分中的一些成分可能会与腐蚀性物质发生反应,改变其活性和腐蚀性。

## 2.2 温度的作用

温度是影响高温腐蚀的重要因素之一。在超临界工况下,受热面的温度较高,金属的氧化速率和硫化速率都会显著增加。高温会促进金属与腐蚀性物质之间的化学反应,使氧化膜的生长和破坏过程更加剧烈。同时,温度的变化还会导致金属和氧化膜的热膨胀系数不一致,产生热应力,使氧化膜容易破裂,进一步加剧腐蚀<sup>[3]</sup>。

随着温度的升高,金属原子的活性增强,更容易与腐蚀性物质发生反应。而且,高温会使氧化膜的结构和性能发生变化,降低其保护作用。例如,在高温下,氧化膜可能会变得更加疏松,容易让腐蚀性物质穿透,从而加速金属基体的腐蚀。

## 2.3 应力的影响

受热面在运行过程中会受到热应力和机械应力的作用。热应力是由于管壁金属温度不均匀引起的,机械应力则来自于锅炉的运行压力和振动等。这些应力会使金属表面的氧化膜产生裂纹和缺陷,使腐蚀性物质更容易侵入金属基体,从而加速腐蚀。此外,应力还会影响金属的晶体结构和组织,降低金属的耐腐蚀性能。

热应力的产生与受热面的温度分布不均匀有关。在超临界锅炉中,由于燃烧和传热的不均匀性,受热面不同部位的温度差异较大,从而产生较大的热应力。机械应力则可能来自于锅炉的启停过程、负荷变化以及管道的振动等。这些应力会与热应力叠加,进一步加剧氧化膜的破坏和金属的腐蚀<sup>[4]</sup>。

## 2.4 多因素的耦合作用

高温腐蚀是化学环境、温度、应力等多因素耦合作用的结果。这些因素之间相互影响、相互促进,共同影响着受热面的腐蚀进程。例如,高温会增强化学环境中腐蚀性物质的活性,而化学环境中的腐蚀性物质又会与应力相互作用,加速氧化膜的破坏和金属的腐蚀。因此,要全面理解高温腐蚀的机理,必须考虑多因素的耦合作用<sup>[5]</sup>。

化学环境中的腐蚀性物质在不同温度和应力条件下,其腐蚀行为会有所不同。高温和应力可能会改变腐蚀性物质的反应速率和反应途径,从而影响腐蚀的进程。同时,多因素的耦合作用还会导致腐蚀的局部化,使得腐蚀在某些特定区域更加严重。

## 3. 传统防护策略的局限性

### 3.1 材料升级的局限

为了提高受热面的耐腐蚀性能,通常采用升级材料的方法,如选用含铬量较高的合金钢或镍基合金。然而,这些材料在超临界工况下也存在一定的局限性。一方面,高含铬量的合金钢在高温下可能会发生铬的氧化和挥发,导致氧化膜的稳定性和完整性受到影响。另一方面,镍基合金虽然具有较好的耐腐蚀性能,但成本较高,限制了其广泛应用。此外,材料在长期高温运行过程中,其组织和性能可能会发生变化,导致耐腐蚀性能下降<sup>[6]</sup>。

高含铬量的合金钢在超临界高温环境下,铬元素可能会与氧气发生反应,生成挥发性的铬氧化物,使得氧化膜中的铬含量降低,从而影响氧化膜的保护性能。镍基合金虽然具有优异的耐腐蚀性能,但由于其生产成本较高,在大规模应用中受到经济因素的限制。而且,材料在长期高温运行时,会受到热疲劳、蠕变等因素的影响,其微观结构会逐渐发生变化,导致耐腐蚀性能逐渐降低。

### 3.2 表面处理技术的不足

表面处理技术是另一种常用的防护方法,如热浸镀铝、等离子喷涂等。这些技术可以在受热面表面形成一层保护膜,起到隔离腐蚀性物质的作用。然而,表面处理技术也存在一些不足之处。例如,热浸镀铝形成的铝氧化膜在高温下可能会发生剥落,等离子喷涂的涂层与基体之间的结合强度可能不够,容易产生裂纹和缺陷。此外,表面处理层的性能可能会受到运行环境的影响,如高温、高压和腐蚀性物质的侵蚀,导致防护效果下降<sup>[7]</sup>。

热浸镀铝形成的铝氧化膜在超临界高温环境下,可能会因为热膨胀系数的差异而与基体分离,导致剥落。等离子喷涂的涂层在制备过程中,可能会存在气孔、裂纹等缺陷,这些缺陷会成为腐蚀性物质侵入的通道。而且,表面处理层在长期运行过程中,会受到高温、高压和腐蚀性物质的综合作用,其性能会逐渐下降,从而降低防护效果。

## 4. 基于多场协同的防护策略优化

### 4.1 腐蚀敏感区的精准识别

通过对锅炉受热面的运行参数、烟气成分和温度分布等进行监测和分析,精准识别腐蚀敏感区。利用先进的监测技术,如壁温监测、烟气成分在线分析等,实时掌握受热面的运行状态。结合数值模拟技术,对受热面的温度场、流场

和化学场进行模拟分析，确定腐蚀敏感区的位置和范围。针对腐蚀敏感区，采取针对性的防护措施，提高防护效果。

可以采用高精度的传感器对受热面的壁温、烟气温度、压力和成分等进行实时监测。通过对监测数据的分析，找出温度、压力和腐蚀性物质浓度较高的区域，这些区域通常是腐蚀敏感区。同时，利用数值模拟软件对受热面的运行过程进行模拟，考虑化学环境、温度和应力等多因素的耦合作用，预测腐蚀的发生和发展。根据模拟结果，进一步确定腐蚀敏感区的具体位置和范围，为采取针对性的防护措施提供依据<sup>[8]</sup>。

#### 4.2 材料的适应性选择与改性

根据腐蚀敏感区的特点和运行条件，选择合适的材料。对于腐蚀较轻的区域，可以选用常规的合金钢材料，并通过优化材料的成分和组织，提高其耐腐蚀性能。对于腐蚀严重的区域，可以选用特殊的耐腐蚀材料，如新型的高铬合金、镍基合金或复合材料等。同时，对材料进行表面改性处理，如离子注入、激光熔覆等，提高材料表面的耐腐蚀性能和抗氧化性能。

对于腐蚀较轻的区域，可以通过调整合金钢中的合金元素含量，如增加钼、钒等元素的含量，提高材料的耐腐蚀性能。对于腐蚀严重的区域，新型的高铬合金和镍基合金具有更好的耐腐蚀性能，可以根据具体情况选择。复合材料则可以将不同材料的优点结合起来，提高材料的综合性能。表面改性处理可以改变材料表面的组织结构和化学成分，形成具有良好耐腐蚀性能的表面层。例如，离子注入可以在材料表面引入具有耐腐蚀性能的元素，激光熔覆可以在材料表面制备一层高性能的涂层<sup>[9]</sup>。

#### 4.3 运行参数的动态调控

运行参数的合理调控对受热面高温腐蚀的防护具有重要作用。通过优化燃烧过程，控制燃烧温度、氧量和燃料与空气的混合比例等参数，降低烟气中腐蚀性物质的浓度，减少还原性气氛的影响。同时，合理控制受热面的蒸汽温度和压力，避免温度和压力的剧烈波动，减少热应力和机械应力对受热面的影响。根据受热面的运行状态和腐蚀情况，动态调整运行参数，实现运行参数的优化和腐蚀的有效防护。

在燃烧过程中，通过优化燃烧器的设计和运行参数，使燃料充分燃烧，降低不完全燃烧产物的生成，从而减少硫氧化物和氯化物等腐蚀性物质的生成。控制燃烧温度和氧量，

避免温度过高和氧量不足导致的还原性气氛增强。合理控制燃料与空气的混合比例，使燃烧更加均匀，减少局部高温和腐蚀性物质浓度的差异。同时，根据受热面的运行状态和腐蚀情况，动态调整蒸汽温度和压力，避免温度和压力的剧烈波动。通过实时监测受热面的运行参数和腐蚀情况，及时调整运行参数，实现运行参数的优化和腐蚀的有效防护<sup>[10]</sup>。

### 5. 结论

超临界火电厂锅炉受热面高温腐蚀是一个复杂的问题，涉及到化学环境、温度、应力等多因素的耦合作用。传统的防护策略在超临界工况下存在一定的局限性。通过深入研究高温腐蚀的多场耦合机理，提出基于多场协同的防护策略优化方案，包括腐蚀敏感区的精准识别、材料的适应性选择与改性以及运行参数的动态调控等，可以有效提高受热面的耐腐蚀性能，延长受热面的使用寿命，保障超临界火电厂锅炉的安全稳定运行。未来的研究可以进一步深入探索高温腐蚀的本质和规律，开发更加高效、经济的防护技术和材料，为超临界火电厂的发展提供更加有力的支持。同时，随着科技的不断发展，新的监测技术、材料技术和控制技术将不断涌现，为超临界火电厂锅炉受热面高温腐蚀的防护提供更多的手段和方法。通过不断的研究和实践，有望进一步提高超临界火电厂的运行可靠性和经济性，为实现能源的可持续发展和环境保护做出更大的贡献。

### 参考文献：

- [1] 蔡勇, 张兴龙, 孙金龙. 超超临界锅炉水冷壁高温腐蚀原因分析与防治 [J]. 山东电力技术, 2021, 48(07):64-69.
- [2] 马强. 平圩电厂 600MW 超临界锅炉水冷壁高温腐蚀原因分析及防治 [J]. 化工管理, 2015, (22):180.
- [3] 弓学敏, 张文忠. 锅炉受热面高温腐蚀的机理及防范措施 [J]. 电力科学与工程, 2007, (02):72-76.
- [4] 魏力民, 刘超, 程义, 等. 超(超)临界锅炉高温受热面氧化皮产生与剥落的影响因素及防护措施 [J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(10):731-736.
- [5] 徐泽洋. 火电厂锅炉受热面失效原因及防治措施 [J]. 科技风, 2022, (13):91-93.
- [6] 姜志强. 火电厂锅炉受热面失效原因及防治措施探讨 [J]. 科技创新与应用, 2020, (18):145-146.
- [7] 程海松, 刘岗, 雷刚, 等. 燃煤锅炉受热面高温腐蚀防护涂层技术研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34(S1):433-435+447.

[8] 崔崇, 张倚雯, 周龙, 等. 锅炉受热面高温腐蚀涂层技术研究和应用进展 [J]. 热喷涂技术, 2018, 10(01):8-14.

[9] 苏春岩, 孔繁盛. 电站锅炉受热面高温氯腐蚀特性及防控 [J]. 中国高新科技, 2024,(21):100-101+131.

[10] 马道洋, 李睿, 张兰, 等. 电站锅炉受热面高温氯腐

蚀特性及防控 [J]. 洁净煤技术, 2024,30(06):7-15.

作者简介: 伊春洋, 出生年月: 1999年10月, 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯(省、县级名): 内蒙古自治区通辽市, 学历: 本科, 职称: 助理工程师, 从事的研究方向或工作领域: 火力发电