

垃圾发电焚烧炉受热面腐蚀及改进措施

曾宇飞 李仲哲

华能国际电力江苏能源开发有限公司南京电厂 江苏 南京 210035

摘要：垃圾发电焚烧炉受热面腐蚀问题严重，影响安全运行与发电效率。本文分析了受热面腐蚀现状，指出垃圾成分复杂致氯、硫腐蚀及飞灰冲刷磨损是主因，探讨化学反应、物理冲刷及综合作用机制。提出优化焚烧与净化、选用耐腐蚀材料、改进结构设计、调整运行参数、加强维护监测等改进措施，并通过案例分析验证了单项与综合措施的有效性。

关键词：垃圾发电；焚烧炉；受热面腐蚀；氯腐蚀；防腐措施

1 垃圾发电焚烧炉受热面腐蚀现状分析

1.1 焚烧炉受热面腐蚀现象描述

在垃圾发电焚烧炉的运行过程中，受热面的腐蚀问题极为普遍且严重。受热面主要包括过热器、再热器、省煤器等部件，这些部件长期暴露在高温、复杂的烟气环境中，极易受到腐蚀侵害。从外观上看，受热面管壁会出现不同程度的减薄现象。在腐蚀较为严重的区域，管壁可能变得凹凸不平，甚至出现局部穿孔。随着腐蚀的加剧，管壁厚度逐渐减小，导致管子的强度下降，在高温高压的工况下，极易引发爆管事故，严重影响焚烧炉的安全运行。另外，受热面的腐蚀还会导致传热效率下降。腐蚀产物在管壁表面形成一层隔热层，阻碍了热量从烟气向工质的传递，使得锅炉的热效率降低。为了维持锅炉的额定出力，需要消耗更多的燃料，这不仅增加发电成本，还加剧环境污染。

1.2 腐蚀原因分析

垃圾成分的复杂性是导致焚烧炉受热面腐蚀的主要原因之一。垃圾中含有大量的氯元素、硫元素以及其他重金属元素。在焚烧过程中，氯元素会与金属发生反应，生成氯化物。氯化物具有较高的挥发性和腐蚀性，能够在高温下迅速扩散到受热面表面，并与金属基体发生反应，导致金属的腐蚀。例如，氯化氢（HCl）气体在高温下会与铁（Fe）反应生成氯化亚铁（FeCl₂），进一步氧化后形成疏松的铁氧化物，加速了金属的腐蚀过程^[1]。硫元素在焚烧过程中会生成二氧化硫（SO₂）和三氧化硫（SO₃）等气体。这些气体与水蒸气结合后，会形成亚硫酸（H₂SO₃）和硫酸（H₂SO₄）等酸性物质，对受热面产生强烈的化学腐蚀。特别是在低温受热面区域，如省煤器，硫酸蒸汽容易凝结在管壁表面，形成酸露点腐蚀，严重损害受热面的性能。垃圾焚烧过程中产生的飞灰颗粒也会对受热面造成物理冲刷和磨损，飞灰颗粒在高速

烟气的携带下，不断撞击受热面管壁，使管壁表面的保护膜逐渐磨损脱落，暴露出新鲜的金属表面，从而加剧了化学腐蚀的进程。同时，飞灰中还可能含有一些具有催化作用的物质，能够促进化学腐蚀反应的进行，进一步加重了受热面的腐蚀程度。

2 垃圾发电焚烧炉受热面腐蚀机制探讨

2.1 化学反应机制

垃圾焚烧炉受热面的化学反应腐蚀主要包括氯腐蚀和硫腐蚀。氯腐蚀主要是通过氯化氢（HCl）和金属氯化物的反应来实现的。在高温环境下，HCl气体与金属表面发生反应，生成金属氯化物和氢气。硫腐蚀则主要是由二氧化硫（SO₂）和三氧化硫（SO₃）引起的。SO₂在高温下会被氧化为SO₃，SO₃与水蒸气结合生成硫酸蒸汽。当硫酸蒸汽在受热面表面凝结时，会与金属发生反应，生成硫酸盐。例如，与铁的反应方程式为： $\text{Fe} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{FeSO}_4 + \text{H}_2 \uparrow$ 。硫酸盐的形成会导致金属表面的保护膜破坏，使金属进一步受到腐蚀。垃圾中的重金属元素如铅（Pb）、锌（Zn）等也会在高温下挥发，并在受热面表面凝结，与氯元素和硫元素发生反应，生成低熔点的化合物，加速了受热面的腐蚀进程。

2.2 物理冲刷与磨损机制

飞灰颗粒对受热面的物理冲刷和磨损是一个复杂的物理过程。飞灰颗粒在烟气中具有较高的速度，当它们撞击受热面管壁时，会对管壁表面产生切向力和法向力。切向力会使管壁表面的金属材料发生塑性变形和剪切破坏，逐渐磨损管壁；法向力则会使管壁表面产生压痕和裂纹，降低管壁的强度。飞灰颗粒的形状、大小和硬度对物理冲刷和磨损的程度有重要影响。尖锐的飞灰颗粒比圆形的颗粒更容易对管壁造成损伤；较大的飞灰颗粒具有较大的动能，撞击力更强；硬度较高的飞灰颗粒能够在管壁表面留下更深的划痕，加速磨损过程。烟

气的流速也会影响物理冲刷和磨损的效果。流速越高, 飞灰颗粒对管壁的撞击频率和力度就越大, 磨损也就越严重。

2.3 综合作用机制

在实际的垃圾焚烧炉运行过程中, 受热面的腐蚀往往是化学反应腐蚀和物理冲刷磨损共同作用的结果。化学反应腐蚀会使受热面管壁表面形成疏松的腐蚀产物层, 这些腐蚀产物层的强度较低, 容易被飞灰颗粒冲刷掉。而飞灰颗粒的冲刷作用又会破坏管壁表面的保护膜, 使新鲜的金属表面暴露在腐蚀性环境中, 进一步加剧了化学反应腐蚀的进程^[2]。例如, 在高温过热器区域, 氯化氢和硫酸蒸汽会对管壁表面进行化学腐蚀, 形成腐蚀坑和裂纹。同时, 高速流动的飞灰颗粒会不断地撞击这些腐蚀部位, 使腐蚀坑和裂纹不断扩大和加深, 最终导致管壁穿孔。这种化学腐蚀和物理冲刷磨损的协同作用, 使得受热面的腐蚀速度大大加快, 严重影响了焚烧炉的使用寿命和安全运行。

3 垃圾发电焚烧炉受热面腐蚀改进措施

3.1 优化焚烧过程与烟气净化

优化焚烧过程是减少受热面腐蚀的重要措施之一。通过合理控制焚烧炉的燃烧温度、停留时间和氧气含量等参数, 可以使垃圾中的氯元素和硫元素充分燃烧, 生成氯化氢和二氧化硫等气体, 并通过后续的烟气净化系统将其去除。例如, 采用分段燃烧技术, 在焚烧炉的不同区域控制不同的氧气含量, 使垃圾在缺氧条件下进行部分燃烧, 抑制氯元素和硫元素的挥发, 减少腐蚀性气体的生成。加强烟气净化也是关键环节。安装高效的脱氯、脱硫设备, 如湿法脱硫装置和活性炭吸附装置等, 可以有效去除烟气中的氯化氢和二氧化硫等有害气体。湿法脱硫装置通过将石灰石浆液喷入烟气中, 使二氧化硫与石灰石发生反应, 生成硫酸钙沉淀, 从而达到脱硫的目的。活性炭吸附装置则可以利用活性炭的吸附性能, 吸附烟气中的氯化氢和其他重金属元素, 进一步净化烟气, 减少对受热面的腐蚀。

3.2 选用耐腐蚀材料

选用耐腐蚀材料无疑是提升受热面抗腐蚀能力的关键之举。在高温受热面领域, 像过热器和再热器这类部件, 工作温度极高, 对材料的耐高温与耐腐蚀性能要求严苛。不锈钢、镍基合金等便是理想之选, 它们具备出色的抗氧化性以及抗氯化物腐蚀性能, 能在高温环境中长久稳定运行。以TP347H不锈钢为例, 其较高的铬和镍含量, 使其可在表面生成一层致密的氧化铬保护膜, 犹如坚固的铠甲, 有效抵御氯化氢和硫酸等腐蚀性介质的

侵蚀。对于低温受热面, 如省煤器, 情况有所不同。省煤器常处于含有硫酸蒸汽的环境, 此时耐硫酸腐蚀的钢材更为适用, ND钢就是其中的典型代表。它拥有良好的抗硫酸露点腐蚀性能, 能在特定环境中形成稳定的腐蚀产物膜, 将硫酸与金属基体隔离开来, 防止进一步腐蚀。除了选用合适的材料, 在受热面表面进行涂层处理也是提升耐腐蚀性能的有效手段。喷涂陶瓷涂层、金属涂层等, 能为受热面增添一层额外的保护屏障, 大大增强其抵御腐蚀的能力, 延长设备的使用寿命。

3.3 改进受热面结构设计

改进受热面的结构设计, 对于降低飞灰颗粒对受热面的冲刷与磨损, 以及提升传热效率而言, 意义重大。以膜式水冷壁结构为例, 它将受热面管子借助鳍片紧密连接, 构成一个稳固的整体。这一设计极大地增强受热面的刚度与强度, 有效减少管子在运行过程中的振动, 进而降低因振动引发的磨损。而且, 膜式水冷壁结构能够优化烟气的流动路径, 使烟气分布更为均匀, 避免局部出现高温区域, 减少高温腐蚀的发生概率, 延长受热面的使用寿命^[3]。合理规划受热面的间距和排列方式同样关键, 适当加大受热面管子之间的间距, 能防止飞灰颗粒在管间堆积、堵塞, 从源头上降低物理冲刷和磨损的程度。采用顺列布置取代错列布置, 可减少烟气对管子的横向冲刷力度, 显著降低磨损速度。另外, 在受热面入口处安装导流板也不失为一个良策。导流板能够引导烟气均匀地流入受热面区域, 避免局部烟气流速过高, 从而有效减轻因高速烟气冲击造成的磨损, 保障受热面稳定、高效地运行。

3.4 调整运行参数

合理调整焚烧炉的运行参数可以减轻受热面的腐蚀程度。例如, 适当降低焚烧炉的出口烟气温度, 可以减少氯化氢和硫酸等腐蚀性气体的挥发和凝结, 降低受热面的化学腐蚀风险。但是, 降低烟气温度也会影响锅炉的热效率, 因此需要在保证锅炉安全运行的前提下, 寻找最佳的烟气温度范围。控制烟气的流速也是重要的运行参数调整措施。过高的烟气流速会加剧飞灰颗粒对受热面的物理冲刷和磨损, 而过低的烟气流速则会导致飞灰颗粒在受热面表面沉积, 形成积灰和结渣, 影响传热效率。因此, 需要根据实际情况合理调整烟气的流速, 使其保持在一个合适的范围内。

3.5 加强设备维护与监测

加强设备的维护和监测是及时发现和处理受热面腐蚀问题的关键。定期对受热面进行检查和维护, 清理受热面表面的积灰和腐蚀产物, 检查管子的磨损和腐蚀情

况,及时更换损坏的管子。同时,建立完善的设备监测系统,采用先进的无损检测技术,如超声波检测、涡流检测等,对受热面的腐蚀情况进行实时监测,及时发现潜在的腐蚀隐患,采取相应的措施进行处理。另外,还应加强对运行人员的培训和管理,提高运行人员的操作水平和安全意识,严格按照操作规程进行运行操作,避免因人为因素导致的设备损坏和腐蚀加剧。

4 改进措施的应用效果与案例分析

4.1 单项措施应用效果

以选用耐腐蚀材料为例,某垃圾发电厂在过热器改造中选用了TP347H不锈钢代替原来的普通碳钢管。改造前,过热器管在运行一段时间后就出现严重的腐蚀和磨损现象,平均每年需要更换约20%的管子。改造后,经过一年的运行监测,发现过热器管的腐蚀速度明显降低,管壁厚度基本保持稳定,没有出现明显的减薄现象。同时,锅炉的热效率也有所提高,发电成本降低了约5%。这表明选用耐腐蚀材料能够有效提高受热面的抗腐蚀能力,延长设备的使用寿命,降低运行成本。再如,通过优化燃烧过程和加强烟气净化,某垃圾发电厂的烟气中氯化氢和二氧化硫的含量明显降低。改造前,烟气中氯化氢的含量平均为500mg/m³,二氧化硫的含量平均为800mg/m³。改造后,氯化氢的含量降低至100mg/m³以下,二氧化硫的含量降低至200mg/m³以下。受热面的腐蚀速度明显减缓,设备的故障率降低,运行稳定性得到了显著提高。

4.2 综合措施应用案例

某大型垃圾发电厂在面对受热面腐蚀严重的问题时,采取一系列综合改进措施。首先,对焚烧炉进行优化改造,采用分段燃烧技术和低氮燃烧器,合理控制燃烧温度和氧气含量,减少氯元素和硫元素的挥发。同时,安装高效的湿法脱硫装置和活性炭吸附装置,进一步净化烟气,使烟气中氯化氢和二氧化硫的含量大幅降

低。在受热面材料选择方面,高温过热器采用了TP347H不锈钢,低温省煤器采用了ND钢,并在受热面表面喷涂陶瓷涂层,提高了受热面的耐腐蚀性能。对受热面的结构进行改进,采用膜式水冷壁结构和顺列布置方式,减少飞灰颗粒的冲刷和磨损。在运行参数调整方面,根据实际情况合理降低焚烧炉的出口烟气温度,控制了烟气的流速,使其保持在一个合适的范围内^[4]。同时,加强设备的维护和监测,建立完善的设备监测系统,定期对受热面进行检查和维护。通过实施这些综合改进措施,该垃圾发电厂的受热面腐蚀问题得到有效解决。经过两年的运行监测,发现受热面的腐蚀速度明显降低,设备的使用寿命延长了约50%。锅炉的热效率提高约8%,发电成本降低了约15%。同时设备的故障率大幅降低,运行稳定性得到显著提高,为企业的经济效益和社会效益带来积极影响。

结束语

垃圾发电焚烧炉受热面腐蚀问题不容忽视,其成因复杂,涉及化学反应、物理冲刷等多方面。通过优化焚烧与净化、选用合适材料、改进设计、调整参数及加强维护监测等综合改进措施,可有效降低腐蚀速度,延长设备寿命,提高热效率,降低发电成本,保障焚烧炉安全稳定运行,为垃圾发电行业的可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1]刘泽庆.垃圾焚烧炉蒸发量预测可行性研究[J].节能与环保,2021(6):61-62.
- [2]宋剑华.一台垃圾焚烧锅炉低温过热器管爆管原因分析及建议[J].中国设备工程,2021(6):178-179.
- [3]苏永禄.关于火力发电厂锅炉低氮改造后高温过热器泄漏事故的分析[J].特种设备安全技术,2021(4):1-2.
- [4]崔静,李文杰,龚思达,于宁,叶洲海,张敏丽,张庚.垃圾焚烧锅炉受热面高温腐蚀与对策探讨[J].锅炉技术,2023,54(01):59.