

燃煤火电厂锅炉运行中的受热面磨损与防护技术研究

孟凡成, 王向阳, 田星宇

江苏阚山发电有限公司, 江苏 徐州 221000

DOI:10.61369/ERA.2025070011

摘要 : 随着燃煤火电厂装机容量的不断增加, 锅炉受热面磨损问题日益突出, 已成为影响锅炉安全、稳定、经济运行的重要因素。本文深入分析了燃煤火电厂锅炉受热面磨损的机理, 包括飞灰磨损、机械磨损等, 探讨了影响受热面磨损的主要因素, 如煤质特性、锅炉运行参数、受热面结构等。在此基础上, 提出了多种有效的受热面防护技术, 如表面防护技术、结构优化技术、运行调整技术等, 并对其防护效果进行了评估。通过研究, 旨在为燃煤火电厂锅炉受热面的磨损防护提供理论依据和技术支持, 提高锅炉的运行可靠性和经济性。

关键词 : 燃煤火电厂; 锅炉受热面; 磨损机理; 防护技术

Study on Heat Surface Wear and Protection Technology in Boiler Operation of Coal-Fired Thermal Power Plant

Meng Fancheng, Wang Xiangyang, Tian Xingyu

Jiangsu Fanshan Power Generation Co., LTD. Xuzhou, Jiangsu 221000

Abstract : With the continuous increase in installed capacity of coal-fired power plants, the issue of boiler heat surface wear has become increasingly prominent, becoming a critical factor affecting the safe, stable, and economic operation of boilers. This paper delves into the mechanisms of boiler heat surface wear in coal-fired power plants, including fly ash wear and mechanical wear, and explores the main factors influencing heat surface wear, such as coal quality characteristics, boiler operating parameters, and heat surface structure. Based on this, various effective heat surface protection technologies are proposed, such as surface protection technology, structural optimization technology, and operational adjustment technology, and their protective effects are evaluated. The aim of this research is to provide theoretical basis and technical support for the wear protection of boiler heat surfaces in coal-fired power plants, thereby enhancing the operational reliability and economic efficiency of boilers.

Keywords : coal-fired power plant; boiler heating surface; wear mechanism; protection technology

燃煤火电厂作为我国电力供应的主要力量, 其锅炉的安全、稳定运行对于保障电力供应至关重要。然而, 在锅炉运行过程中, 受热面磨损问题长期存在且较为严重。受热面磨损不仅会降低锅炉的热效率, 增加能源消耗, 还会导致受热面泄漏、爆管等事故的发生, 严重影响锅炉的安全运行, 给企业带来巨大的经济损失。因此, 深入研究燃煤火电厂锅炉运行中的受热面磨损机理, 并采取有效的防护技术具有重要的现实意义。

一、燃煤火电厂锅炉受热面磨损机理分析

(一) 飞灰磨损

飞灰磨损作为锅炉受热面磨损的关键形式, 在燃煤过程里对设备运行安全影响显著。燃煤时, 煤内矿物质于高温环境下历经分解、熔融与气化等反应, 进而生成飞灰颗粒。这些飞灰颗粒伴随烟气一同流动, 以特定速度和角度持续撞击受热面管壁, 致使管壁遭受磨损。飞灰磨损程度受诸多因素影响, 飞灰的浓度、粒度、硬度、形状以及烟气的流速、流向等, 均与之密切相关。具

体而言, 飞灰浓度越高, 意味着单位时间内撞击受热面的飞灰颗粒数量越多, 磨损加剧; 飞灰粒度越大, 其携带的动能越大, 撞击时对管壁的破坏力越强; 飞灰硬度越高, 对管壁的刮擦作用越明显, 磨损也就更为严重。此外, 烟气流速越大, 飞灰颗粒获得的动能越大, 对受热面的撞击力随之增大, 磨损程度也会相应提升。因此, 在锅炉运行中, 需对这些因素加以控制, 以减轻飞灰磨损对受热面的损害。

(二) 机械磨损

机械磨损是锅炉受热面管子在运行中面临的重要问题, 主要

由多种机械力作用引发。在锅炉启停阶段，温度的急剧变化会产生热应力，这种应力会使受热面管子发生振动，长期的振动作用会导致管子表面材料逐渐脱落，形成磨损。同时，烟气中可能存在的大颗粒飞灰或异物，在高速流动过程中撞击受热面管子，这种冲击力会直接对管子表面造成损伤，引发机械磨损。大颗粒飞灰或异物的硬度、大小以及撞击频率等因素，都会影响磨损的程度。另外，受热面管子的安装质量以及支撑结构也至关重要。若安装时存在偏差或支撑结构不合理，会使管子在运行中承受不均匀的力，从而加剧振动和磨损。因此，在锅炉的设计、安装和运行过程中，需充分考虑这些因素，采取有效措施减少机械磨损，保障受热面管子的安全稳定运行。

二、影响受热面磨损的主要因素

（一）煤质特性

煤质特性在锅炉受热面磨损，尤其是飞灰磨损方面扮演着关键角色。煤中灰分含量是影响磨损程度的核心指标之一，高灰分煤在燃烧过程中会产生更多飞灰，导致飞灰浓度显著增加，进而加剧受热面管壁的磨损。灰分成分同样不容忽视，其中二氧化硅、氧化铝等硬质成分的含量直接影响飞灰的硬度。这些硬质成分在飞灰中占比越高，飞灰对受热面的撞击和刮擦作用越强烈，磨损也就越严重。此外，挥发分含量对磨损也有显著影响。挥发分含量较低的煤，燃烧时火焰温度相对较高，这使得灰分更容易熔融并形成硬质颗粒。这些硬质颗粒在烟气中流动时，对受热面的磨损作用更为明显^[1]。因此，在选用燃煤时，需综合考虑煤质特性，以降低受热面磨损风险，保障锅炉安全稳定运行。

（二）锅炉运行参数

锅炉运行参数对于受热面磨损状况有着不可忽视的影响。其中，烟气流速是关键因素之一，当烟气流速增大时，飞灰颗粒随之获得更大动能，以更强的撞击力作用于受热面，从而加剧磨损程度。烟气温度同样对磨损有着重要影响。若烟气温度过高，煤中的灰分易发生熔融现象，进而形成具有粘结性的飞灰。这种粘结性飞灰不仅会直接对受热面造成磨损，还可能在受热面表面形成积灰层，影响传热效率的同时，也会因积灰的不均匀分布而引发局部磨损加剧。过量空气系数对受热面磨损的影响也较为复杂。过量空气系数过大时，烟气中的氧含量增加，有利于煤的充分燃烧，但同时也会导致烟气量增多，使得烟气流速提高，进而加剧飞灰颗粒对受热面的撞击磨损^[2]。因此，在锅炉运行过程中，需合理控制这些运行参数，以降低受热面磨损风险，保障锅炉的安全稳定运行。

（三）受热面结构

受热面结构对磨损程度有着显著影响，其结构形式、布置方式以及管子间距等因素均不容忽视。就结构形式而言，不同的受热面设计会直接改变飞灰颗粒的运动轨迹和撞击概率。若受热面管子排列过于密集，飞灰颗粒在流动过程中与管壁的撞击机会将大幅增加，从而加剧磨损。布置方式同样关键，合理的布置能够引导烟气顺畅流动，减少涡流和回流现象，进而降低磨损风险。

相反，若布置不当，如管子的弯曲半径过小，烟气在转弯处易产生涡流，涡流中的飞灰颗粒会对管壁造成更强烈的冲击，加速磨损过程。此外，管子间距也是影响磨损的重要因素。适当的管子间距能够保证烟气流动的均匀性，减少飞灰颗粒的局部聚集和撞击^[3]。因此，在设计和安装受热面时，需综合考虑这些因素，以优化结构形式、布置方式和管子间距，从而有效降低磨损程度，延长受热面的使用寿命。

三、燃煤火电厂锅炉受热面防护技术

（一）表面防护技术

1. 涂层防护

涂层防护是保护锅炉受热面管子免受磨损的有效方法。其原理是在管子表面涂覆一层具备耐磨、耐腐蚀特性的涂层，以此抵御飞灰及机械力对管子的磨损侵害。在涂层材料选择上，陶瓷涂层凭借高硬度、优异耐磨性及耐高温性能，在高温环境下表现突出，然而其与基体结合强度欠佳，易发生脱落；金属陶瓷涂层融合了金属与陶瓷的双重优势，既具备高结合强度，又拥有良好耐磨性；高分子涂层则以出色柔韧性和耐腐蚀性见长，不过耐磨性稍显不足^[4]。实际应用中，需依据锅炉具体工况及磨损特点，合理选用涂层材料，以达到最佳防护效果。

2. 热喷涂防护

热喷涂防护作为一种高效的技术手段，在锅炉受热面管子抗磨损领域发挥着重要作用。其核心原理在于将耐磨材料加热至高温熔化或半熔化状态，随后借助高速气流将其喷射至受热面管子表面，从而形成一层坚固的耐磨涂层。在热喷涂技术中，火焰喷涂、等离子喷涂以及超音速火焰喷涂等方法较为常用。这些方法所形成的涂层具备诸多优势，如结合强度高，可紧密附着于管子表面；孔隙率低，能有效阻挡飞灰颗粒的侵入；耐磨性好，显著提升管子的抗磨损能力^[5]。然而，热喷涂工艺相对复杂，对操作技术和设备要求较高，且成本较为昂贵。

（二）结构优化技术

1. 受热面管子结构优化

受热面管子结构优化是降低锅炉磨损、提升运行效率的关键举措。在结构形式方面，采用螺旋管、鳍片管等创新设计，可带来显著优势。螺旋管独特的螺旋形态，使烟气在流动过程中形成螺旋气流，不仅增加了烟气与管子的接触面积，强化了传热效果，还改变了飞灰颗粒的运动轨迹，减少其对管子的直接撞击，降低磨损程度。鳍片管则凭借鳍片结构，进一步拓展了传热面积，同时，鳍片对飞灰颗粒具有一定的阻挡和分散作用，减轻磨损^[6]。此外，合理设计管子的弯曲半径和间距也至关重要。恰当的弯曲半径能避免烟气在转弯处产生涡流，合理的管子间距可保证烟气流动的均匀性，二者协同作用，有效改善烟气流动特性，减少磨损风险，保障锅炉稳定运行。

2. 防磨梁、防磨瓦安装

在锅炉运行中，受热面管子易遭受飞灰颗粒撞击磨损，为降低磨损程度，在易磨损部位安装防磨梁、防磨瓦等防护装置是有

效举措。防磨梁通常选用耐热钢材料制成, 凭借其优良的耐高温和抗磨损性能, 被安装在受热面管子的上方。当飞灰颗粒随烟气流动时, 防磨梁能发挥阻挡作用, 改变飞灰颗粒的运动方向, 使其无法直接撞击管子, 从而减少管子表面的磨损。防磨瓦则直接包裹在管子的外表面, 如同给管子穿上了一层“铠甲”。它紧密贴合管子, 能够承受飞灰颗粒的撞击和刮擦, 为管子提供全方位的直接保护^[7]。无论是飞灰颗粒的正面冲击还是侧面刮擦, 防磨瓦都能有效抵御, 降低管子磨损风险, 延长管子使用寿命, 保障锅炉安全稳定运行。

(三) 运行调整技术

1. 优化燃烧调整

优化燃烧调整对于减轻锅炉受热面磨损具有重要意义。具体而言, 可通过精准调控一次风、二次风的风量与风速, 确保煤粉与空气充分混合, 促进煤粉在炉膛内的完全燃烧。此举不仅能提高燃烧效率, 还能有效减少未燃尽碳的含量。同时, 对燃烧器的角度和位置进行合理调整, 可使火焰分布更加均匀, 避免局部高温和火焰冲刷受热面^[8]。通过这些调整措施, 飞灰的浓度和硬度均会显著降低。飞灰浓度减少, 意味着单位时间内撞击受热面的飞灰颗粒数量降低; 飞灰硬度降低, 则减轻了飞灰颗粒对受热面的撞击磨损程度, 进而延长受热面的使用寿命。

2. 控制烟气流速

控制烟气流速是降低锅炉受热面磨损的重要手段。为实现这一目标, 需对锅炉的引风机、送风机等关键风机运行参数进行精准调控。具体而言, 可根据锅炉的实际运行工况, 合理调整风机的转速、风门开度等参数, 确保烟气流速处于适宜范围。通常情况下, 烟气流速应被严格控制在一定上限值以内。若流速过高, 飞灰颗粒将获得更大动能, 对受热面的撞击力显著增强, 从而加剧磨损^[9]。反之, 通过合理控制烟气流速, 可有效降低飞灰颗粒的撞击频率和力度, 减轻受热面磨损程度, 延长设备使用寿命, 保障锅炉安全稳定运行。

四、防护技术效果评估

为了评估上述防护技术的效果, 可以采用现场监测、实验室试验和数值模拟等方法。现场监测可以通过安装磨损传感器等设备, 实时监测受热面管子的磨损情况; 实验室试验可以在模拟锅炉运行工况的条件下, 对不同防护技术的防护效果进行对比分析; 数值模拟则可以利用计算流体力学(CFD)等方法, 对烟气的流动特性和受热面的磨损情况进行模拟计算, 预测防护技术的效果。通过评估发现, 表面防护技术可以有效地提高受热面管子的耐磨性能, 延长管子的使用寿命; 结构优化技术可以改善烟气的流动特性, 减少飞灰颗粒对管子的撞击, 降低磨损风险^[10]。运行调整技术可以从源头上控制飞灰的产生和流动, 减轻受热面的磨损。综合采用多种防护技术, 可以取得更好的防护效果。

五、结论

燃煤火电厂锅炉运行中的受热面磨损是一个复杂的问题, 涉及飞灰磨损、机械磨损等多种机理, 受煤质特性、锅炉运行参数、受热面结构等多种因素的影响。为了有效防护受热面磨损, 本文提出了表面防护技术、结构优化技术、运行调整技术等多种防护技术, 并对其防护效果进行了评估。研究表明, 综合采用多种防护技术可以显著提高受热面管子的耐磨性能, 延长管子的使用寿命, 降低锅炉的运行风险, 提高锅炉的运行可靠性和经济性。在实际应用中, 应根据锅炉的具体情况, 选择合适的防护技术, 并加强锅炉的运行管理和维护, 定期对受热面进行检查和检测, 及时发现和处理磨损问题, 确保锅炉的安全、稳定运行。同时, 还需要进一步开展相关研究, 不断改进和完善防护技术, 为燃煤火电厂锅炉的安全、高效运行提供更加有力的技术支持。

参考文献

- [1] 覃跃, 李德波, 覃昊, 等. 燃煤电厂锅炉水动力研究现状与展望[J]. 湖南电力, 2024, 44(05): 1-8.
- [2] 黄思林, 李德波, 苗建杰, 等. 燃煤电厂锅炉受热面超温燃烧调整试验研究与工程应用[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 812-818.
- [3] 袁奕竣. 基于火电厂锅炉受热面失效原因及防治措施研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (21): 19-21.
- [4] 王新伟, 孙全, 冯佐江. 火电厂受热面喷涂区换管易出现裂纹问题研究[J]. 设备管理与维修, 2021, (17): 137-138.
- [5] 刘鹏宇, 李德波, 刘彦丰, 等. 燃煤电厂锅炉机组受热面积灰结渣研究现状与展望[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(05): 87-96.
- [6] 赵海鹏. 火电厂锅炉水冷壁高温腐蚀及防护[J]. 科技风, 2020, (16): 190+193.
- [7] 戴昕. 火电厂锅炉腐蚀原因及防范措施[J]. 数码世界, 2020, (03): 288.
- [8] 杨亮. 火电厂燃煤锅炉尾部受热面低温腐蚀的防治[J]. 电工技术, 2019, (04): 104-105.
- [9] 习兴文. 火电厂燃煤锅炉尾部受热面低温腐蚀的防治与维护措施探究[J]. 中国战略新兴产业, 2018, (44): 253+255.
- [10] 张玲, 郭坚. 燃煤电厂节能技术与方法概述[J]. 内蒙古煤炭经济, 2015, (09): 43+98.