

火电厂锅炉本体受热面磨损机理分析

何凯帆

山西漳山发电有限责任公司 山西 长治 046021

摘要: 火电厂锅炉本体受热面磨损主要源于飞灰颗粒的冲击与切削作用,其磨损强度与烟气流速、飞灰浓度及颗粒特性密切相关。高温环境下,腐蚀性气体与金属反应加剧磨损,形成腐蚀-磨损循环。机械振动磨损则由烟气涡流、积灰结渣等因素引发,导致部件间额外摩擦。多因素耦合作用下,磨损机理更趋复杂,需通过优化设计、材料改进及运行调整等综合措施加以防控。

关键词: 火电厂; 锅炉本体; 受热面; 磨损机理

引言: 在火电厂的运行中,锅炉本体作为核心设备,承担着将燃料化学能转化为热能的关键任务,其受热面是实现热量高效传递的核心部件。然而,受热面在长期运行过程中,不可避免地遭受着磨损问题的困扰,这不仅影响锅炉的安全稳定运行,降低热效率,还增加了维护成本与停机风险。深入探究火电厂锅炉本体受热面的磨损机理,对于制定有效的防磨措施、提升锅炉运行可靠性与经济性具有至关重要的意义。

1 火电厂锅炉本体受热面磨损概述

1.1 锅炉本体结构与受热面分类

锅炉本体是火电厂能量转换的核心单元,其受热面是实现热量传递的关键载体,主要分为四大类关键部件:(1)水冷壁,布置于炉膛四周,直接吸收炉膛内高温辐射热,将水加热成饱和蒸汽;(2)过热器,位于炉膛出口烟道,负责将饱和蒸汽加热为具有额定参数的过热蒸汽,保障发电效率;(3)再热器,承接汽轮机高压缸排出的低温蒸汽,重新加热后送入中低压缸做功,提升能源利用率;(4)省煤器,布置于烟道尾部,利用低温烟气预热锅炉给水,降低排烟温度,节约能源。

1.2 受热面磨损的主要形式

(1) 飞灰磨损,这是占主导地位的磨损形式。燃料燃烧产生的飞灰随高温烟气高速流动,持续冲击、切削受热面管壁,长期作用下导致管壁厚度逐渐减薄,其磨损程度与烟气流速、飞灰浓度及颗粒硬度密切相关;(2) 腐蚀磨损,分为高温腐蚀和低温腐蚀两类。高温腐蚀多发生在过热器、再热器区域,由烟气中腐蚀性气体与管壁反应引发;低温腐蚀则常见于省煤器等尾部受热面,因烟气中水蒸气凝结形成酸性液体侵蚀管壁;(3) 机械振动磨损,由烟气涡流、受热面积灰结渣等因素引发受热面振动,导致管壁与相邻部件或飞灰之间产生额外摩擦磨损,加剧部件损坏。

1.3 磨损的危害与影响

(1) 导致管壁减薄,降低受热面结构强度,影响承载能力;(2) 增加爆管风险,磨损严重时管壁会发生破裂,引发锅炉停运事故,造成重大经济损失;(3) 降低锅炉热效率,磨损产生的漏洞会导致烟气泄漏,破坏热量传递过程,增加能源消耗;(4) 提高维护成本,需频繁对磨损部件进行检修、更换,占用大量人力物力资源;(5) 影响电网供电稳定性,锅炉突发故障会导致发电中断,干扰电力系统正常运行。

2 火电厂锅炉本体受热面磨损机理分析

2.1 飞灰磨损机理

(1) 飞灰颗粒特性直接决定磨损强度,粒径越大、硬度越高,对管壁的冲击切削能力越强;不规则棱角状颗粒的磨损效应远大于球形颗粒,而飞灰浓度越高,单位时间内冲击管壁的颗粒数量越多,磨损速率显著提升。(2) 冲击角度与速度是磨损的关键影响因素,对应两种核心理论:微切削理论适用于小角度冲击,高速颗粒以“切削”方式刮擦管壁表面,造成材料流失;变形磨损理论适用于大角度冲击,颗粒动能转化为管壁材料的塑性变形,反复冲击后形成疲劳剥落。烟气流速越高,颗粒动能越大,磨损量大致与流速的3~5次方成正比。(3) 烟气流场分布通过改变颗粒运动状态影响磨损,炉膛出口、烟道转弯处等区域湍流强度高、速度梯度大,易形成涡流,导致局部烟气流速骤升,飞灰颗粒在此区域产生回旋冲击,造成受热面局部严重磨损。

2.2 腐蚀磨损机理

(1) 高温硫腐蚀机理为燃料中的硫燃烧生成 SO_3 、 H_2S 等腐蚀性气体,在高温环境下与受热面金属发生化学反应,生成疏松脆弱的硫化物表层,该表层易被高速烟气和飞灰颗粒冲刷剥落,暴露出新鲜金属表面再次被腐蚀,形成“腐蚀-剥落-再腐蚀”的循环磨损过程。(2)

低温氯腐蚀多发生在尾部受热面，烟气中的HCl气体在低温条件下与水蒸气结合形成酸性介质，附着于管壁表面引发化学腐蚀，腐蚀产物与管壁结合力弱，在飞灰冲击和烟气冲刷作用下极易脱落，加速管壁磨损。(3) 电化学腐蚀与磨损的协同作用显著加剧损伤，腐蚀过程中管壁表面形成微电池，产生的腐蚀产物降低表面硬度，同时机械磨损破坏腐蚀产物保护膜，两者相互促进，使磨损速率远高于单纯腐蚀或单纯磨损的叠加效应^[1]。

2.3 机械振动磨损机理

(1) 烟气流动不均匀性是振动的主要诱因，锅炉烟道内受热面布置差异、局部阻力变化等会导致烟气流速分布失衡，形成周期性脉动气流，对受热面产生交变激振力；当激振频率与受热面固有频率接近时，会引发共振，使管壁振动幅度急剧增大，导致管壁与相邻管排、管夹等部件发生碰撞摩擦，同时增强飞灰颗粒对管壁的冲击效果，加剧磨损。(2) 积灰结渣通过改变受热面结构特性诱发局部应力集中，积灰和结渣在受热面表面分布不均，不仅会改变受热面的质量分布和刚度，使其振动特性发生改变，还会导致受热面受热不均，产生热应力；当积灰结渣达到一定厚度时，会在重力和气流冲刷作用下脱落，对下方管壁产生强烈冲击，造成局部应力突变，引发材料疲劳损伤，同时脱落的渣块还会随烟气流动，对下游受热面产生二次冲击磨损。

2.4 多因素耦合作用

受热面磨损并非单一因素独立作用的结果，而是温度、压力、流速、颗粒特性、材料性能等多因素综合耦合的复杂过程。温度升高不仅会降低金属材料的硬度和耐磨性，还会加速腐蚀反应，同时改变烟气粘度和飞灰颗粒的物理化学特性；压力升高会提升烟气流速，增加飞灰颗粒的冲击动能，同时强化腐蚀性气体的渗透能力；流速分布不均既会引发振动磨损，又会加剧飞灰的局部冲击磨损；飞灰颗粒的粒径、硬度等特性直接决定磨损的基础强度，而材料的耐蚀性、耐磨性则决定了受热面的抗损伤阈值。各因素相互关联、相互强化，例如高温环境会增强飞灰颗粒的切削能力，同时加速腐蚀与振动的协同效应；流速升高会同时提升飞灰磨损和振动磨损的强度。这种多因素耦合作用使受热面磨损机理更趋复杂，也导致磨损损伤更难控制。

3 火电厂锅炉本体受热面磨损影响因素研究

3.1 燃料特性

(1) 煤种直接影响磨损风险，灰分含量越高，燃烧产生的飞灰颗粒越多，磨损载体数量增加；硫分含量高则易引发腐蚀磨损，加剧管壁损伤；煤粒粒度分布不均

会导致燃烧不充分，大颗粒未燃尽物随烟气流动，增强冲击磨损效应。(2) 生物质/污泥掺烧会改变磨损特性，生物质燃料灰分低但含氯、钾等成分，易引发低温腐蚀磨损；污泥中含有大量杂质和腐蚀性物质，掺烧后会增加烟气中腐蚀性气体和颗粒含量，同时可能改变燃烧工况，间接影响磨损程度。

3.2 锅炉运行参数

(1) 烟气流速、温度、氧量的影响显著，烟气流速越高，飞灰颗粒动能越大，冲击磨损越强，且流速过高易引发气流紊乱；烟气温度升高会降低金属材料硬度，增强腐蚀反应活性，同时改变烟气粘度，影响颗粒运动状态；氧量不足会导致燃烧不充分，增加未燃尽颗粒数量，加剧磨损，而过量氧则可能强化高温腐蚀。(2) 负荷变化通过改变燃烧强度间接影响磨损，负荷骤升时，燃料投入量增加，烟气流速和飞灰浓度随之上升，磨损速率骤增；负荷频繁波动会导致受热面温度和应力交替变化，降低材料抗磨损能力，同时加剧气流脉动，诱发振动磨损^[2]。

3.3 受热面结构与材料

(1) 管排布置方式影响烟气流场，错列布置的管排会使烟气绕流时产生强烈涡流和速度梯度，飞灰颗粒对管壁的冲击角度更复杂，磨损程度远大于顺列布置；管排间距过小易导致积灰结渣，过大则会使局部流速过高，均会加剧磨损。(2) 防磨防护措施效果差异明显，防磨瓦可直接阻挡飞灰冲击，显著降低管壁磨损速率；喷涂层通过提升表面硬度和耐腐蚀性，延长受热面使用寿命，但涂层厚度和结合强度不足时易脱落失效，反而可能因涂层碎片形成二次磨损。(3) 材料性能是抗磨损的核心，材料硬度越高，抗飞灰切削和冲击能力越强；良好的韧性可减少疲劳磨损；优异的耐腐蚀性能抑制腐蚀-磨损协同作用，降低损伤速率。

3.4 环境因素

(1) 烟气成分主导腐蚀磨损，SO₃、HCl等腐蚀性气体易与金属管壁反应生成脆弱腐蚀产物，在飞灰冲刷下脱落，加速磨损；水蒸气含量过高会降低烟气温度，增加低温腐蚀风险，同时改变烟气密度，影响颗粒运动轨迹。(2) 积灰结渣倾向间接加剧磨损，积灰会改变受热面表面形态，使气流绕流特性恶化，局部流速升高；结渣脱落时会产生强烈冲击，造成管壁瞬时损伤，且积灰结渣会阻碍热量传递，导致局部温度异常，强化腐蚀磨损。

4 火电厂锅炉本体受热面防磨措施与优化策略

4.1 设计优化

(1) 受热面结构改进，通过优化结构设计提升抗磨

损能力。采用膜式壁替代传统光管水冷壁，利用鳍片将相邻管壁连接为整体，减少管壁暴露面积，同时增强结构刚度，降低振动磨损概率；科学优化管排间距，根据烟气流速和飞灰特性调整顺列或错列管排的横向、纵向间距，避免因间距过小导致积灰结渣，或间距过大引发局部流速过高，从结构上优化烟气绕流状态，减轻局部磨损。（2）烟气流场均匀化设计，通过增设导流、阻流装置改善气流分布。在炉膛出口、烟道转弯等易产生涡流的区域，合理布置导流板，引导烟气平稳流动，削弱湍流强度和速度梯度；在管排入口区域设置阻流板，均衡管排间烟气流速，避免局部区域流速骤升导致的严重磨损，确保烟气流场整体均匀稳定，降低飞灰颗粒的不均衡冲击^[3]。

4.2 材料与表面防护

（1）高耐磨合金材料应用，针对不同受热面区域的磨损特性，选用适配的高耐磨合金材料。在飞灰冲击强烈的省煤器、过热器区域，采用Cr-Mo合金、耐磨铸钢等硬度高、韧性好的材料，替代传统碳钢材料，显著提升管壁抗切削、抗冲击能力；对于腐蚀磨损严重的区域，选用耐蚀耐磨复合合金，同时兼顾材料的高温强度和加工性能，确保在恶劣工况下长期稳定运行。（2）表面涂层技术推广，通过表面改性增强管壁防护性能。采用陶瓷涂层（如Al₂O₃、ZrO₂基涂层），利用其极高的硬度和耐腐蚀性，阻挡飞灰冲击和腐蚀性介质侵蚀；应用激光熔覆技术，将耐磨合金粉末与管壁表面熔合形成致密的耐磨熔覆层，该涂层与基体结合强度高、耐磨性优异，可有效延长受热面使用寿命；针对不同磨损等级，精准控制涂层厚度和工艺参数，避免涂层脱落引发二次磨损。

4.3 运行调整

（1）严格控制烟气流速与温度，根据锅炉负荷和燃料特性，将烟气流速控制在合理区间，避免流速过高加剧飞灰冲击，同时防止流速过低导致积灰；精准调控各区域烟气温度，避开低温腐蚀区间和高温材料软化区间，减少腐蚀磨损和材料性能下降引发的磨损风险；通过调整引风机、送风机运行参数，维持烟气流动稳定，避免气流脉动。（2）优化燃烧调整策略，提升燃烧效率以降低飞灰含碳量。合理控制燃料粒径和给煤速率，确保燃料充分燃烧，减少未燃尽颗粒数量；调整燃烧器角

度和配风方式，构建稳定的燃烧火焰中心，避免局部燃烧不充分和烟气偏流；严格控制炉膛过量空气系数，既保证燃烧完全，又防止过量氧引发高温腐蚀，从源头减少磨损载体和腐蚀诱因^[4]。

4.4 维护与监测

（1）实施定期检测与科学吹灰策略，定期采用超声波测厚等技术检测受热面管壁厚度，精准定位磨损薄弱区域，及时开展检修更换；根据积灰结渣情况，制定差异化吹灰方案，合理选择吹灰介质（蒸汽、压缩空气）和吹灰频率，避免过度吹灰损伤管壁，同时有效清除积灰结渣，减少因积灰导致的局部磨损和腐蚀；建立磨损台账，跟踪磨损发展趋势，提前预判故障风险。（2）推广应用在线监测技术，实现磨损状态实时管控。采用声发射监测技术，通过捕捉管壁磨损产生的弹性波信号，实时监测磨损程度和发展速率；利用红外热成像技术，检测受热面温度分布异常，间接判断磨损和腐蚀隐患；搭建监测数据平台，对监测数据进行分析预警，实现从“事后维修”向“预知维修”转变，大幅提升锅炉运行安全性，降低维护成本。

结束语

火电厂锅炉本体受热面磨损是多种因素共同作用的结果，涉及飞灰冲击、腐蚀、机械振动等复杂机理。深入理解这些机理，有助于我们精准识别磨损根源，采取针对性措施，如优化受热面设计、选用耐磨耐蚀材料、合理调控运行参数以及加强维护监测等。未来，随着技术不断进步，我们应持续探索创新，进一步提升锅炉抗磨损能力，保障火电厂安全高效运行，推动电力行业可持续发展。

参考文献

- [1]黄显生,丁皓轩,冯凯越.W火焰锅炉高温受热面中部区域结焦原因分析与对策[J].节能与环保,2023,(07):93-96.
- [2]尉君.660MW超临界CFB锅炉外置床内受热面爆管的处理[J].电工技术,2023,(13):244-246.
- [3]陈宏伟,胡高斌,刘洲,等.火电厂锅炉尾部受热面检修技术分析[J].电子技术,2022,51(12):162-163.
- [4]魏铭毅.电站锅炉高温受热面壁温在线监测系统研究[J].电力设备管理,2025,(01):114-116.