

350MW循环流化床锅炉下二次风管漏灰的分析与治理

张生胜

山西昱光发电有限责任公司 山西 朔州 036900

摘要: 本文聚焦350MW循环流化床锅炉下二次风管漏灰问题。介绍了锅炉下二次风系统概况,分析漏灰现象与危害,包括不同部位漏灰表现及对安全性、经济性和环境的影响。接着从磨损机理、材料与制造、运行参数多维度剖析漏灰原因。最后提出治理方案,涵盖短期应急和长期优化措施,如结构优化、材料升级、运行调整等,旨在解决漏灰问题,保障锅炉稳定运行。

关键词: 循环流化床锅炉;下二次风管;漏灰;磨损机理

引言: 山西某电厂2×350MW循环流化床锅炉机组工程中,锅炉为东方锅炉厂自主研发的型号为DG1217/25.31超临界循环流化床锅炉,属于超临界参数变压运行直流炉,采用单炉膛、M型布置、平衡通风、一次中间再热、固态排渣、水冷滚筒式冷渣器、循环流化床燃烧方式,采用高温冷却式旋风分离器进行气固分离,锅炉为全钢架结构,整体支吊在锅炉钢架上。该350MW超临界循环流化床(CFB)锅炉作为高效清洁燃煤设备,在能源领域应用广泛。其额定蒸发量通常为1200t/h,额定蒸汽压力25.3MPa,额定蒸汽温度570℃,核心特点是炉膛内物料循环倍率高,燃烧效率可达92%以上,能适应劣质煤种。下二次风系统是燃烧系统的关键组成,对保障燃烧效率、维持机组稳定运行意义重大。机组深度调峰运行期间,下二次风管与炉膛结合处频繁出现漏灰问题,既污染厂房环境,漏出的红灰更会严重威胁锅炉安全稳定运行,因此深入剖析漏灰成因、制定高效治理方案,是提升锅炉运行可靠性、降低运维成本、达成环保目标的迫切需求。

1 350MWCFB 锅炉下二次风系统概述

1.1 锅炉主要参数与结构特点

锅炉运转层标高为12600mm,顶板高度为79800mm,锅炉深度为59900mm,宽度为47600mm,其中炉膛深度9810mm,宽度31020mm,尾部竖井总深度9310mm,宽度17715mm。下二次风系统作为燃烧系统关键组成,沿炉膛下部四周布置,与一次风形成合理配风,保障炉膛内缺氧区还原反应与富氧区完全燃烧。锅炉炉膛下部采用膜式水冷壁结构,敷设耐磨浇注料,下二次风管接口处与水冷壁焊接连接,接口区域受温度变化、物料冲刷双重作用,是结构薄弱环节。该锅炉采用床下点火方式,启动及运行过程中温度波动较大,进一步加剧了下二次风管及接口的应力损伤,为漏灰问题埋

下隐患。

1.2 下二次风管的功能与运行条件

下二次风管的核心功能是向炉膛下部补充氧气,调节炉膛内空气动力场,促进物料充分混合燃烧,同时抑制NO_x生成。锅炉二次风从燃烧室前后墙锥体部分分上下两层进入炉膛,上层二次风门共计22个,包括10个前墙上层二次风门、8个后墙上层二次风门、2个左墙上层二次风门和2个右墙上层二次风门;下层二次风门共计15个,其中包括8个前墙下层二次风门和7个后墙下层二次风门。运行时,下二次风经空气预热器加热至200-300℃,通过风管及布风装置均匀送入炉膛,风速控制在25-30m/s,风压维持在1-5kPa,满足锅炉不同负荷下的配风需求。其运行条件极为恶劣,一方面要承受高温烟气与循环物料的冲刷磨损,风管内壁长期与硬度较高的床料(主要成分为SiO₂、Al₂O₃)接触,磨损速率显著高于普通风管;另一方面,锅炉变负荷运行、启停过程中,风管温度波动范围达200℃以上,导致管材产生热胀冷缩应力,接口处密封件易老化失效^[1]。另外,风管内气流速度不均易引发局部涡流,使物料在涡流区域堆积冲刷,进一步恶化运行环境,增加漏灰风险。

2 350MW 循环流化床锅炉下二次风管漏灰现象与危害分析

2.1 漏灰现象描述

350MW循环流化床锅炉下二次风管漏灰现象多集中于风管与炉膛接口、风管焊缝、法兰连接处及弯头部位,不同部位漏灰表现存在差异。接口处漏灰多为持续性漏灰,初期呈粉尘溢出状态,随密封件失效及磨损加剧,逐渐发展为灰渣喷射状漏出,漏灰量随锅炉负荷升高而增加,满负荷时漏灰量可达5-8kg/h。焊缝处漏灰多为局部点状漏灰,初期不易察觉,仅在焊缝周围形成灰色粉尘堆积,随焊缝开裂扩大,漏灰点逐渐融合成线,

形成连续性漏灰。法兰连接处漏灰多因密封垫老化、螺栓松动导致,表现为间隙性漏灰,启停过程中因温度变化漏灰现象更为明显。弯头部位因物料冲刷严重,易出现局部壁厚减薄,漏灰多为突发性,初期可能伴随异常风声,随后出现灰渣泄漏,严重时可导致风管穿孔,引发大量漏灰事故,影响锅炉正常运行。

2.2 漏灰的直接危害

下二次风管漏灰会对锅炉运行安全性、经济性及环境造成多重直接危害。安全性方面,漏灰导致炉膛内风压失衡,破坏空气动力场,造成燃烧不稳定,易引发炉膛结焦、熄火等事故;漏出的高温灰渣易烫伤现场工作人员,且粉尘堆积在设备表面,存在火灾隐患。经济性方面,漏灰导致二次风输送效率下降,为维持炉膛燃烧工况需增加送引风机负荷,耗电量显著上升,单台锅炉因漏灰每月额外耗电可达2-3万度;同时漏灰量增加会导致锅炉热效率降低,按漏灰量8kg/h计算,年额外耗煤量约60吨,增加燃料成本^[2]。环境方面,漏出的粉尘含大量颗粒物(PM10、PM2.5),超出排放标准,污染周边环境,同时需投入额外人力物力清理漏灰,增加运维成本。此外,漏灰还会加剧风管及周边设备磨损,缩短设备使用寿命,增加非计划停机频次。

3 350MW 循环流化床锅炉下二次风管漏灰原因的多维度分析

3.1 磨损机理分析

下二次风管漏灰核心是物料冲刷磨损,包含冲击、切削、冲蚀磨损三种类型。冲击磨损多出现在风管弯头、接口处,高温高速气流携床料颗粒撞击管壁,动能转化为冲击力,反复作用使管壁材料疲劳脱落。当颗粒与管壁夹角在30-90°时,冲击磨损最严重。切削磨损源于床料中石英砂等硬颗粒,在气流带动下沿管壁滑动或滚动,切削管壁形成不规则沟槽,随时间推移沟槽加深致管壁穿孔。冲蚀磨损是冲击与切削磨损共同作用,在风管变径、法兰等气流扰动剧烈区域,颗粒运动轨迹复杂,冲击与切削效应加速磨损。此外,风管内壁粗糙度增加会加剧磨损,磨损产生的粉尘引发二次磨损,形成恶性循环,加速漏灰问题出现。

3.2 材料与制造因素

材料选择与制造工艺缺陷是下二次风管漏灰重要内在因素。材料上,部分风管用普通Q235钢材,耐磨和高温稳定性差,长期高温冲刷下寿命仅2-3年,远低于专用耐磨材料。即便用耐磨钢,若成分分布不均或热处理不达标,局部耐磨不足,易成漏灰薄弱环节。制造工艺方面,风管焊接存在未焊透等缺陷,会降低焊缝强度,形

成局部应力集中,高温与物料冲刷下易开裂漏灰。法兰加工精度不足、密封面平整度超标,密封垫无法紧密贴合形成间隙。接口焊接未考虑热胀冷缩,焊接接头应力过大。

3.3 运行参数影响

运行参数不合理会显著加剧下二次风管的漏灰问题,主要体现在负荷波动、配风比例以及床料特性这三个关键方面。在负荷波动方面,当锅炉频繁启停或者出现大幅度的变负荷情况时,风管的温度会发生骤升骤降的变化。这种温度的剧烈变化使得管材的热胀冷缩幅度增大,接口处的密封件与焊接接头会反复承受应力冲击。长期下来,密封件容易老化、开裂,焊接接头也可能出现损坏。负荷波动还会导致气流速度与压力发生突变,进而增加物料对管壁的冲刷强度^[3]。在配风比例方面,如果下二次风的风速过高,超过30m/s,会极大地加剧物料对管壁的冲刷磨损;而风速过低,则容易导致物料在风管内堆积,形成局部磨损。一次风与二次风的比例失衡,会破坏炉膛内的气流场,导致风管内气流涡流增多,加速局部磨损。在床料特性方面,如果床料颗粒度过大,超过10mm,或者硬度超标,会显著增加对管壁的磨损强度。

4 漏灰治理方案设计

4.1 短期应急措施

针对已出现的漏灰问题,为避免其进一步扩大、切实保障锅炉的安全稳定运行,需迅速采取一系列短期应急措施,这些措施主要涵盖密封加固、局部修补以及运行调整三大类别。对于法兰连接处,首先要对松动的螺栓进行全面紧固,确保连接紧密无松动。同时,仔细检查并更换那些老化、破损的密封垫,选用质量可靠、适配性强的新密封垫。采用高温耐磨密封胶填充密封间隙,这种密封胶具备出色的耐高温和耐磨性能,能有效防止漏灰情况加剧。对于接口处出现轻微漏灰的部位,使用不锈钢抱箍配合密封垫进行加固处理。不锈钢抱箍具有高强度和良好的耐腐蚀性,能够紧紧箍住接口,增强密封性能,阻止灰渣继续泄漏。对于焊缝开裂、管壁轻微磨损的部位,先仔细清理表面附着的灰渣与氧化层,保证焊接面干净整洁。然后采用耐磨焊条进行补焊,补焊完成后,将表面打磨平整,确保光滑无瑕疵。若有必要,还可敷设一层耐磨陶瓷片,进一步增强防护效果。对于弯头部位出现的局部穿孔情况,可采用临时封堵板进行封堵,减少漏灰量,为后续彻底修复争取时间,可适当降低锅炉负荷,减小二次风风速与风压,降低物料对风管的冲刷强度;优化配风比例,避免气流形

成涡流，减轻对风管的冲击；强化现场巡检，每2小时对漏灰部位进行检查，详细记录漏灰量变化，为后续长效治理提供可靠数据支撑，保障锅炉平稳运行至检修窗口期^[4]。

4.2 长期优化方案

4.2.1 结构优化

结构优化在风管设计中扮演着至关重要的角色，其核心目标是从设计层面入手，有效降低磨损风险，进而延长风管的使用寿命。在弯头部位，传统直角弯头因气流扰动大、颗粒冲击频繁，易造成严重磨损。为此，我们将其改进为偏心圆弧弯头，圆弧半径严格控制在风管直径的3 - 5倍之间，这样的设计能够显著减少气流扰动和颗粒冲击。在弯头内侧增设导流板，引导气流与物料平稳流动，进一步降低局部磨损。接口部位则优化为柔性连接结构，采用耐高温膨胀节替代刚性焊接，可有效补偿热胀冷缩产生的位移，减少应力集中。在膨胀节内侧敷设耐磨衬层，增强密封与耐磨性能。风管变径部位采用渐变式变径结构，避免气流速度突变，减少涡流产生。在风管内壁易磨损区域设置防磨凸台，改变颗粒运动轨迹，降低冲刷强度。优化布风装置结构，使二次风均匀分布，避免局部风速过高，从整体上改善风管运行工况，有效遏制漏灰问题复发，确保风管稳定运行。

4.2.2 材料升级

材料升级是提升风管耐磨与耐高温性能的关键举措，需要根据不同部位的运行工况进行针对性选型。风管主体材料更换为NM450耐磨钢，这种钢材的布氏硬度 $\geq 450\text{HB}$ ，耐磨性能是普通钢材的3 - 5倍，同时具备良好的高温稳定性，能够承受 400℃ 以下的长期运行，为风管主体提供了可靠的保障。在弯头、接口等易磨损部位，采用“耐磨钢+陶瓷衬层”复合结构。陶瓷衬层选用氧化铝陶瓷，厚度控制在5 - 8mm，通过高温粘结剂与管壁紧密结合。氧化铝陶瓷硬度高达HRA85以上，能有效抵御物料的强烈冲刷。密封件材料升级为聚四氟乙烯与柔性石墨复合密封垫，耐高温可达 450℃ ，同时具备良好的弹性与密封性，能适应温度波动与压力变化。焊缝填充材料选用E5015耐磨焊条，焊接后进行焊后热处理，消

除焊接应力，提升焊缝强度与耐磨性能。

4.2.3 运行调整

通过优化运行参数，建立稳定的运行工况，能够有效减少对风管的损伤。在负荷控制方面，要避免锅炉频繁启停与大幅变负荷。变负荷速率严格控制在1 - 2MW/min，启停过程中严格按照升温升压曲线操作，温度变化速率控制在 50℃/h 以内，这样可以减少热应力冲击，保护风管结构。配风参数优化也至关重要，将下二次风风速稳定在25 - 28m/s，风压维持在2.5kPa左右，一次风与二次风比例调整为6:4，确保炉膛内气流场稳定，避免局部涡流与风速过高，减少对风管的冲刷。床料管理方面，严格控制床料颗粒度，将平均粒径控制在0.5 - 5mm，定期排出床料中的大颗粒与杂质；床料循环倍率控制在5 - 8倍，通过调整旋风分离器效率，减少进入二次风管的物料量。建立定期巡检与监测机制，采用超声波测厚仪每月检测风管壁厚，及时发现磨损隐患，结合锅炉检修计划提前处理，实现漏灰问题的预判与管控，保障风管长期稳定运行。

结束语

350MW循环流化床锅炉下二次风管漏灰问题复杂，涉及磨损机理、材料制造及运行参数等多方面。通过短期应急措施可暂时遏制漏灰，保障锅炉运行至检修期；长期优化方案从结构、材料、运行调整入手，能显著降低漏灰风险，延长风管寿命。后续需持续关注运行效果，不断优化治理措施，确保锅炉长期稳定高效运行，为能源行业可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1]杨敬池,王菁,王鹏程,等.超临界350MW循环流化床锅炉宽负荷NO_x排放特性及控制技术[J].洁净煤技术,2025,31(1):78 - 85.
- [2]尹好莺.350MW循环流化床锅炉超低排放改造方案[J].电力设备管理,2023(20):226 - 228.
- [3]赵新坤,袁亚军.350MW循环流化床锅炉脱硫脱硝增效方案[J].锅炉制造,2024(4):32 - 34.
- [4]步兆彬,江广旭,曾阳,等.350MW高效超超临界循环流化床锅炉发展概述[J].广州化工,2024,52(24):32 - 35,116.