

锅炉水冷壁高温腐蚀影响因素及应对措施

王 梓

国能宝清煤电化有限公司 黑龙江 双鸭山 155600

摘 要：锅炉水冷壁高温腐蚀严重影响锅炉安全稳定运行与使用寿命，本文首先阐述了其硫化物、氯化物及硫酸盐型三种类型与复杂机理，接着从燃料特性、燃烧工况、水冷壁温度、烟气成分四方面分析了影响因素。针对此提出应对措施，包括燃料优化、燃烧调整、材料选择与表面处理、运行管理与维护。通过这些措施，从源头减少腐蚀性物质、改善燃烧、增强材料抗腐蚀性及加强监控维护，降低水冷壁高温腐蚀风险，保障锅炉安全稳定运行，延长其使用寿命。

关键词：锅炉水冷壁；高温腐蚀；影响因素；应对措施

引言：锅炉水冷壁高温腐蚀是影响锅炉安全稳定运行与使用寿命的关键问题。其腐蚀类型多样，机理复杂，涉及多物理化学步骤。燃料特性、燃烧工况、水冷壁温度及烟气成分等因素，均会对其产生显著影响。若不采取有效应对措施，将严重威胁锅炉安全，增加运行成本。本文深入剖析锅炉水冷壁高温腐蚀的影响因素，并从燃料优化、燃烧调整、材料选择与表面处理、运行管理与维护等方面提出应对策略。

1 锅炉水冷壁高温腐蚀的类型与机理

锅炉水冷壁高温腐蚀主要分硫化物、氯化物及硫酸盐型三种类型且机理复杂，硫化物腐蚀多见于含硫燃料燃烧锅炉，燃料中硫燃烧先生成二氧化硫，部分再氧化为三氧化硫，三氧化硫与水蒸气反应生成硫酸蒸汽，到高温水冷壁管表面冷凝成液滴，先溶解金属表面氧化膜使金属失保护，又直接与金属反应生成金属硫酸盐和氢气，金属硫酸盐高温还可能分解出二氧化硫继续参与氧化形成恶性循环加剧腐蚀^[1]。氯化物腐蚀是燃料中氯元素燃烧形成氯化氢等气体，氯化氢与金属氧化物反应生成低熔点金属氯化物，高温下呈液态易从金属表面蒸发使金属不断受侵蚀，还可能与烟气其他成分反应生成复杂腐蚀产物加速腐蚀；硫酸盐型高温腐蚀是含硫、碱金属等元素的燃料燃烧生成硫酸盐，硫酸盐与金属氧化物在高温下形成低熔点共晶物，覆盖在金属表面破坏氧化膜完整性，共晶物成分与金属反应致金属溶解腐蚀，且共晶物影响传热使局部温度升高进一步加剧腐蚀，整个高温腐蚀过程涉及多个物理和化学步骤，是复杂的电化学或化学过程，不同类型腐蚀相互关联又各有特点，硫化物腐蚀的恶性循环、氯化物腐蚀的侵蚀挥发以及硫酸盐型腐蚀的共晶物破坏和升温影响等，都从不同角度揭示了锅炉水冷壁高温腐蚀的内在机制，对深入理解腐蚀现

象、采取有效防护措施保障锅炉安全稳定运行具有重要意义。

2 锅炉水冷壁高温腐蚀的影响因素

2.1 燃料特性

(1) 硫含量，是引发水冷壁高温硫化物腐蚀的主因之一，燃料中硫含量越高，燃烧时生成的二氧化硫就越多，部分二氧化硫在高温下进一步氧化成三氧化硫，三氧化硫与烟气中的水蒸气反应生成硫酸蒸汽，硫酸蒸汽浓度随硫含量升高而增大，到达水冷壁管表面冷凝成硫酸液滴后，会溶解金属表面氧化膜中的金属氧化物，使金属失去保护，同时硫酸直接与金属反应生成金属硫酸盐和氢气，金属硫酸盐高温分解产生的二氧化硫又继续参与反应，形成恶性循环，加剧水冷壁硫化物腐蚀。

(2) 氯含量，燃料中的氯元素会引发水冷壁高温氯化物腐蚀，氯在燃烧时易形成氯化氢等气体，氯化氢对金属腐蚀性强，高温环境下会加速水冷壁管腐蚀，使用含较高氯含量的劣质煤或生物质燃料，会增加水冷壁氯化物腐蚀风险。(3) 碱金属含量，燃料中的钠、钾等碱金属燃烧时形成碱金属化合物，这些化合物与硫酸盐等在高温下形成低熔点共晶物，破坏金属表面氧化膜完整性，导致硫酸盐型高温腐蚀，碱金属含量越高，形成低熔点共晶物可能性越大，水冷壁腐蚀越严重。

2.2 燃烧工况

燃烧工况对锅炉水冷壁高温腐蚀影响明显，涵盖燃烧方式、过量空气系数、燃烧器布置与运行等方面：燃烧方式上，不同方式对水冷壁高温腐蚀作用不同，四角切圆燃烧锅炉火焰易贴壁，使水冷壁局部温度过高，且烟气中腐蚀性物质易在水冷壁附近积聚，加剧腐蚀；前后墙对冲燃烧方式能改善火焰分布，减少火焰贴壁，降低水冷壁高温腐蚀风险；过量空气系数大小直接影响

燃烧充分程度与烟气氧含量,系数过小,燃料燃烧不充分,产生大量一氧化碳和未燃尽碳氢化合物,高温下与水冷壁管表面金属反应加剧腐蚀,不完全燃烧还使烟气可燃物增加,炉膛内二次燃烧致局部温度升高加重腐蚀^[2]。系数过大虽使燃料燃烧更充分,但增加烟气氧含量,促进硫、氯等元素氧化生成更多腐蚀性物质,还会降低炉膛温度影响燃烧稳定性;在燃烧器布置与运行方面,其方式和状态对火焰形状、长度和充满度影响大,布置不合理或运行不正常会导致火焰偏斜、局部缺氧,使水冷壁受热不均、局部温度过高,加剧高温腐蚀,如燃烧器喷口结焦或磨损会使燃料喷射不均,影响燃烧效果,增加水冷壁腐蚀风险。

2.3 水冷壁温度

水冷壁温度作为影响高温腐蚀的关键因素之一,对腐蚀进程起着至关重要的作用。通常情况下,水冷壁温度与腐蚀速率呈正相关关系,温度越高,腐蚀速率越快。这是由于高温环境会显著加速化学反应的速率,使得烟气中的腐蚀性物质,如硫酸蒸汽、氯化氢气体等,与水冷壁管表面金属之间的反应更为剧烈。在高温作用下,金属表面原本形成的氧化膜稳定性大幅降低,变得极易遭受破坏和溶解,进而丧失对金属基体的保护作用,让金属直接暴露在腐蚀性环境中。而且,当水冷壁温度超出一定界限时,硫酸蒸汽会在管壁上快速冷凝,随即与金属发生强烈的腐蚀反应,极大地加快了管壁的减薄速度。除此之外,水冷壁温度分布不均匀也会进一步加剧局部腐蚀情况。在实际运行中,由于火焰分布、燃烧状况等因素的影响,水冷壁不同区域会存在温度差异,高温区域的化学反应更为活跃,腐蚀性物质与金属的反应也更为频繁和剧烈,所以其腐蚀速率明显高于低温区域,这种局部腐蚀的加剧会严重影响水冷壁的使用寿命和锅炉的安全运行。

2.4 烟气成分

(1) 腐蚀性气体浓度,烟气中二氧化硫、三氧化硫、氯化氢等腐蚀性气体浓度高低直接决定水冷壁高温腐蚀程度,气体浓度越高,与水冷壁管表面金属发生反应的机会就越多,腐蚀愈发严重,因这些气体能与金属发生化学反应,破坏金属表面结构。(2) 灰分成分与含量,烟气灰分含多种金属和非金属氧化物,部分成分参与腐蚀反应,如铁氧化物可催化硫的氧化反应,促进硫酸生成,加剧硫化物腐蚀,且灰分含量过高会在水冷壁管表面形成积灰层,积灰层影响传热使局部温度升高,同时其中腐蚀性物质也会腐蚀金属,积灰层还会阻碍烟气与水冷壁正常热交换,改变局部环境加速腐蚀。(3)

水蒸气含量,水蒸气是生成硫酸蒸汽的必要条件,烟气中水蒸气含量越高,与三氧化硫反应生成的硫酸蒸汽就越多,水冷壁硫化物腐蚀越严重,此外,水蒸气还可能参与其他类型腐蚀反应,它会改变金属表面电解质溶液的成分和性质,为腐蚀反应提供更有利条件,从而对水冷壁造成多方面损害,影响锅炉安全稳定运行。

3 锅炉水冷壁高温腐蚀的应对措施

3.1 燃料优化

在条件许可时,优先挑选硫、氯、碱金属等腐蚀性元素含量低的燃料,像低硫煤、优质天然气等,从源头减少腐蚀性物质生成,进而降低水冷壁高温腐蚀风险,因为这些腐蚀性元素是引发水冷壁高温腐蚀的关键因素,减少其含量能直接削弱腐蚀动力。对燃料进行预处理同样关键,洗选煤、脱硫、脱氯等操作可有效降低燃料中腐蚀性元素含量,洗选煤能去除煤里部分硫分和灰分,减少燃烧时腐蚀性物质排放;脱硫技术可在燃烧前或燃烧过程中去除燃料中的硫,降低二氧化硫和三氧化硫生成量,避免它们与水蒸气反应生成腐蚀性强的硫酸蒸汽;脱氯处理可减少燃料中氯元素含量,降低氯化物腐蚀风险,因为氯元素在燃烧时易形成腐蚀性强的氯化氢气体^[3]。燃料掺烧也是一种有效手段,将不同特性燃料按一定比例混合燃烧,能改善燃料综合性能、降低腐蚀性,把高硫煤与低硫煤按比例掺烧,在保证燃料热值的同时降低硫总体含量,减少硫化物腐蚀,同时掺烧生物质燃料或其他低腐蚀性燃料,可起到稀释和调节作用,改变燃料整体化学组成,降低腐蚀性物质生成概率,使燃烧过程更稳定,减少因燃烧异常导致的局部高温等加剧腐蚀的情况,多方面保障水冷壁安全,延长锅炉使用寿命。

3.2 燃烧调整

燃烧调整对降低锅炉水冷壁高温腐蚀风险意义重大,主要涵盖优化燃烧方式、合理控制过量空气系数以及加强燃烧器维护与管理。优化燃烧方式方面,需依据锅炉实际状况挑选适宜燃烧方式并优化调整,不同燃烧方式调整要点不同,通过调整燃烧器角度、旋流强度等参数,能改善火焰分布,减少火焰贴壁,降低水冷壁局部高温与腐蚀性物质积聚,优化燃烧器布置和运行方式可提高燃烧效率、减少不完全燃烧损失。合理控制过量空气系数上,要借助实验与运行经验确定最佳值并严格把控,既要保证燃料充分燃烧,减少不完全燃烧产物对水冷壁的腐蚀,又要防止过量空气系数过大使烟气氧含量增加,促进腐蚀性物质生成,可运用先进燃烧控制技术如氧量调节系统,实时监测和调整,确保锅炉在最佳

工况运行^[4]。加强燃烧器维护与管理也不容忽视,定期对燃烧器检查、维护和清理,能保证燃烧器喷口畅通、燃料喷射均匀,及时更换磨损部件、调整运行参数可确保其正常运行,同时加强对燃烧器的监控,能及时发现和处理燃烧异常情况,避免因燃烧器问题出现火焰偏斜、局部缺氧等问题,进而减少水冷壁高温腐蚀,多方面协同作用可有效降低水冷壁高温腐蚀风险,保障锅炉安全稳定运行,延长其使用寿命,提高能源利用效率。

3.3 材料选择与表面处理

(1)在材料选择上,优先选用耐高温腐蚀性能佳的材料,像低合金钢、不锈钢、镍基合金等,它们化学稳定性与抗氧化性高,能在高温和腐蚀性环境中维持良好性能,延长水冷壁使用寿命,不同材料特性不同,可根据锅炉实际工况和腐蚀程度合理挑选。(2)表面涂层防护也是一种有效防腐手段,在水冷壁管表面涂覆耐腐蚀涂层,常用陶瓷涂层、金属涂层、复合涂层等,陶瓷涂层耐高温、耐腐蚀、耐磨,能形成致密保护膜隔绝腐蚀性物质与金属接触;金属涂层如镍基、铬基合金涂层,耐腐蚀性能和结合强度高;复合涂层结合多种材料优点,防腐性能更优异,涂覆时要严格把控涂层质量与施工工艺,保证涂层均匀、致密、附着力强。表面渗铝处理同样重要,它是将铝元素渗入金属表面的化学热处理工艺,处理后水冷壁管表面形成致密铝化物层,该层耐高温腐蚀性能优良,能有效抵抗硫化物、氯化物等侵蚀,且渗铝处理工艺简单、成本低,还不影响金属力学性能,是广泛应用的防腐技术。通过合理选用耐腐蚀材料,并配合有效的表面涂层防护与渗铝处理,能从材料本身和表面防护两方面增强水冷壁抗高温腐蚀能力,降低腐蚀风险,保障锅炉安全稳定运行,减少因水冷壁腐蚀导致的停炉检修等损失,提高锅炉运行的经济性和可靠性。

3.4 运行管理与维护

运行管理与维护对降低锅炉水冷壁高温腐蚀风险极为关键,包括加强运行监控、定期检修维护及提高运行人员素质。加强运行监控要建立完善监控系统,实时监测水冷壁温度、壁厚、腐蚀等关键参数,借助数据分析与技术诊断,及时发现局部温度异常升高、壁厚快速减

薄等异常状况,以便调整燃烧工况或安排停炉检修。定期检修维护需制定科学合理检修计划,按计划对水冷壁全面检查、维护修理,查看水冷壁管腐蚀程度、积灰状况和焊缝质量,及时更换修复腐蚀严重管段,清理管表面积灰,保持受热面清洁以提升传热效率、降低局部高温,同时全面检查维护锅炉附属设备和系统^[5]。提高运行人员素质要加强对运行人员培训,提升业务水平与操作技能,使其深入了解锅炉运行特性与高温腐蚀危害,熟练掌握正确操作方法与应急处理措施,运行中严格按操作规程操作,避免人为失误导致锅炉运行异常增加水冷壁高温腐蚀风险。通过多方面协同努力构建全方位运行管理与维护体系,降低水冷壁高温腐蚀风险,延长锅炉使用寿命,确保锅炉安全高效稳定运行。

结束语

综上所述,锅炉水冷壁高温腐蚀问题复杂且影响深远,关乎锅炉安全稳定运行与使用寿命。从硫化物、氯化物及硫酸盐型腐蚀的类型与机理,到燃料特性、燃烧工况、水冷壁温度、烟气成分等影响因素,再到燃料优化、燃烧调整、材料选择与表面处理、运行管理与维护等应对措施,各环节紧密相连。只有全面、深入地认识并把握这些要点,综合施策,才能有效降低水冷壁高温腐蚀风险,保障锅炉长期安全可靠运行,为能源领域稳定发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]刘勇.锅炉水冷壁管失效机理与预防措施分析[J].石油和化工设备,2025,28(9):172-174.
- [2]杜庆忠.超临界锅炉水冷壁高温腐蚀机理与防护措施[J].电力设备管理,2025(23):53-55.
- [3]谈金军,丁鹏,吕馥丞,王有林,等.燃煤锅炉水冷壁高温腐蚀形成原因及防治措施[J].全面腐蚀控制,2024,38(10):205-210.
- [4]刘国刚,康夜雨,刘兴力,等.锅炉水冷壁壁面高温腐蚀及壁管横向裂纹泄漏试验研究[J].工业加热,2024,53(4):49-54.
- [5]张小龙.燃气锅炉水冷壁高温腐蚀特性研究[J].石油和化工设备,2024,27(5):220-222.