

电站锅炉水冷壁高温腐蚀成因及防护措施研究

杨金山 闫秀峰

陕煤集团榆林化学有限责任公司 陕西 榆林 719000

【摘要】：电站锅炉水冷壁在高温环境下容易受到腐蚀，影响锅炉的安全性与运行效率。高温腐蚀主要由水蒸气、燃烧产物、气体腐蚀等因素引发。为有效降低腐蚀风险，需要深入分析水冷壁腐蚀的成因，探讨腐蚀机制及其影响因素，并研究多种防护措施，包括合金材料的使用、表面涂层技术和水质管理等。通过这些措施的应用，可以有效提高锅炉设备的耐腐蚀性，延长使用寿命，保障电力生产的安全稳定。

【关键词】：锅炉水冷壁；高温腐蚀；腐蚀成因；防护措施；电站

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.012

引言

电站锅炉作为电力生产的重要设备，其运行效率和安全性直接影响到电厂的经济性和稳定性。水冷壁作为锅炉的关键部件之一，长时间暴露于高温、高压的工作环境中，容易受到高温腐蚀的影响。随着燃烧技术和电力需求的提升，锅炉的工作条件愈加苛刻，水冷壁的腐蚀问题日益严重，亟需采取有效措施加以解决。如何深入探讨水冷壁的腐蚀机制，并针对性地提出防护措施，已成为保障电站锅炉运行安全和提高其经济效益的关键。研究该问题，不仅有助于提升锅炉设备的使用寿命，也能为电力行业的可持续发展提供技术支持。

1 锅炉水冷壁高温腐蚀的基本特征

1.1 高温腐蚀的定义与表现

高温腐蚀是指在高温环境下，金属材料与气体或蒸气发生化学反应，导致表面结构损坏的一种腐蚀现象。对于电站锅炉水冷壁而言，高温腐蚀通常发生在工作温度达到500℃以上的区域。这种腐蚀形式通常表现为金属表面的氧化、硫化及氯化反应，尤其在燃烧生成的二氧化硫、氯化物及水蒸气的共同作用下，水冷壁材料表面逐渐剥落，形成腐蚀坑或裂纹，影响其热交换效率。高温腐蚀的结果不仅削弱了材料的机械性能，还可能导致设备的失效，严重时甚至导致锅炉停运，给电厂带来巨大的经济损失。

1.2 锅炉水冷壁的特殊工作环境

锅炉水冷壁在高温、高压的环境中工作，常常暴露于极端条件下。其主要作用是吸收锅炉内部的热量，将热能传递给蒸汽或水。此过程产生的高温气流和水蒸气为水冷壁带来了巨大的热应力和腐蚀压力。锅炉的工作温度通常超过500℃，且气体中的氧化性物质和腐蚀性物质（如二氧化硫、氯化物等）不断与水冷壁表面发生化学反应^[1]。由于锅炉水冷壁与冷却水直接接触，水质、冷却水流速及其对热量的吸收能力都对水冷壁的耐腐蚀性产生重要影响，增加了腐蚀的复杂性和严重性。

1.3 水冷壁高温腐蚀的主要影响因素

锅炉水冷壁高温腐蚀的影响因素涉及多个方面，最关键的

因素之一是气体中腐蚀性物质的浓度和类型。在燃烧过程中，二氧化硫、氮氧化物以及含氯化物的气体往往会与水冷壁材料发生化学反应，形成氧化物或其他腐蚀产物。水质的变化也直接影响水冷壁的腐蚀程度。水中的溶解气体、矿物质及腐蚀性物质在锅炉运行时加速了水冷壁的腐蚀过程。高温下，水冷壁表面会发生热应力变化，导致局部应力集中，从而进一步加剧腐蚀过程。

2 锅炉水冷壁高温腐蚀的成因分析

2.1 化学反应与气体腐蚀

锅炉水冷壁的高温腐蚀主要由化学反应引发，尤其是气体腐蚀作用。高温环境下，燃烧气体中富含的氧、二氧化硫及氮氧化物等具有强烈的氧化性，能够与水冷壁表面的金属材料发生反应，形成氧化物或硫化物，这些化合物会逐步腐蚀金属表面，降低其机械强度与热传导效率。特别是在燃煤锅炉中，氯化物的存在会进一步加剧腐蚀过程，形成局部酸性环境，加速了金属的快速腐蚀。这些腐蚀产物的沉积还可能在水冷壁表面形成一层不均匀的覆盖层，阻碍热量的有效传导，造成局部过热，进而加速腐蚀速率。

2.2 水质与水冷壁腐蚀的关系

水质的变化直接关系到锅炉水冷壁的腐蚀程度。水中的溶解氧、二氧化碳以及矿物质含量，尤其是水中的硅、钙、镁和氯化物等离子的浓度，都会影响腐蚀的发生和发展^[2]。溶解氧在高温下与水冷壁发生反应，形成氧化膜，但在水质不良的情况下，这种氧化膜不稳定，无法有效防止腐蚀。水中氯化物的含量对锅炉水冷壁的腐蚀作用尤为显著，因为氯化物会与金属反应形成可溶性腐蚀产物，进而加速金属表面的腐蚀。硬水中的钙镁离子沉积在水冷壁表面，形成水垢层，这层水垢不仅阻碍了水冷壁与冷却水之间的热交换，也为腐蚀反应提供了适宜的环境。

2.3 材料选择与热应力对腐蚀的影响

锅炉水冷壁的材料选择对其耐高温腐蚀性能至关重要。常用的材料如碳钢和合金钢，在高温、高压环境下具有不同的耐

腐蚀能力。在高温下，材料的晶粒结构和合金成分决定了其抗氧化和抗硫化的能力。某些合金钢通过添加铬、镍等元素提高耐腐蚀性能，但在极端环境中仍然可能出现腐蚀现象。水冷壁在运行过程中会受到不断变化的热应力影响，特别是在锅炉启动、停运或负荷波动时，材料因热膨胀和收缩产生的应力会导致微裂纹的出现，这些微裂纹为腐蚀产物的积聚和扩展提供了有利条件，从而加速了腐蚀进程。热应力的集中区域常常是腐蚀最严重的部分，导致水冷壁表面出现局部的损伤和薄弱区。

3 锅炉水冷壁高温腐蚀防护技术

3.1 耐高温合金材料的应用

为有效提高锅炉水冷壁的抗腐蚀能力，耐高温合金材料的应用已成为一种重要防护技术。耐高温合金通过在钢铁基体中加入如铬、镍、钼等元素，使得材料在高温环境下具有较好的氧化与硫化抗性。这些合金材料在高温下能在水冷壁表面形成一层致密的氧化膜，防止进一步的腐蚀反应。尤其是在燃煤和燃气锅炉的高温气流中，耐高温合金的使用有效减少了金属表面与腐蚀性气体的直接接触，从而大大延长了锅炉水冷壁的使用寿命。近年来，随着合金材料技术的发展，诸如高温耐蚀性更强的铬钼合金、钛合金等在锅炉水冷壁中的应用逐步增多，这些材料能够在更苛刻的条件下运行，保证了锅炉的安全与效率。

3.2 表面涂层技术的研究与应用

表面涂层技术作为一种有效的防护措施，已广泛应用于锅炉水冷壁的腐蚀防护中。通过将耐高温、抗腐蚀的涂层涂覆于水冷壁表面，能够有效阻止腐蚀性气体与金属材料的直接接触，降低腐蚀速率。常见的涂层材料包括陶瓷涂层、铝镁涂层、以及高温合金喷涂层等，这些涂层能够在高温环境中保持较高的稳定性和耐腐蚀性^[3]。陶瓷涂层的优势在于其优异的耐高温氧化性能，而铝镁涂层则能有效防止硫化物的侵蚀，减缓腐蚀过程。近年来，随着涂层技术的不断进步，采用纳米涂层和复合涂层的研究逐渐受到关注，凭借其较高的耐磨性和抗氧化性，能够进一步提升水冷壁的保护效果。涂层的质量、附着力以及涂覆工艺的优化也是确保其防护效果的关键因素。

3.3 水质管理与腐蚀抑制剂的使用

水质管理在锅炉水冷壁的腐蚀防护中起着至关重要的作用。锅炉运行过程中，水质的变化会直接影响水冷壁的腐蚀速率，特别是溶解氧、二氧化碳以及溶解盐类的浓度。通过精确控制水质参数，可以有效减少腐蚀性物质对水冷壁的侵蚀。硬度过高的水容易形成水垢，导致热交换效率下降并加速腐蚀。为了进一步提升水冷壁的抗腐蚀能力，腐蚀抑制剂的使用得到了广泛应用。腐蚀抑制剂通过在水中加入特定化学物质，能够形成保护膜，减少金属与腐蚀性物质的接触。常用的腐蚀抑制剂包括磷酸盐、硫酸盐及有机化学物质等，它们可以在金属表

面形成一层薄膜，有效阻隔腐蚀源的侵害。水质管理与腐蚀抑制剂的结合使用，能显著提高锅炉水冷壁的耐腐蚀性，保障锅炉长期稳定运行。

4 电站锅炉水冷壁高温腐蚀防护的实际案例

4.1 国内外成功案例分析

国内外针对电站锅炉水冷壁高温腐蚀防护的研究和实践已有许多成功案例。在欧美等发达国家，采用耐高温合金材料和先进的涂层技术已取得显著成果。某些欧洲国家通过使用高铬耐热合金材料，成功延长了锅炉水冷壁的使用寿命。在美国，特定的喷涂铝镁合金涂层已被广泛应用于锅炉水冷壁，显著提高了其抗硫化和抗氧化能力。在国内，部分大型电力企业也采用了类似的技术，通过优化材料选择和涂层工艺，显著提高了锅炉水冷壁的耐腐蚀性。在某电厂中，通过替换原有的碳钢水冷壁为含铬合金钢水冷壁，腐蚀速率降低了50%以上，锅炉停机时间减少，运维成本大幅降低。

4.2 防护措施的实施效果

实施高温腐蚀防护措施后，锅炉水冷壁的整体运行稳定性和效率得到了显著提升。采用耐高温合金材料和表面涂层技术后，锅炉水冷壁的耐腐蚀性大大增强，特别是在高温和高压环境下，其腐蚀速率明显降低。在某电厂项目中，使用高温合金钢替代普通碳钢后，锅炉水冷壁的腐蚀速率由每年5mm减少至0.5mm，材料消耗降低了70%。与此同时，涂层技术的应用减少了表面氧化物的形成，改善了水冷壁的热传导性能^[4]。水质管理和腐蚀抑制剂的结合使用，也有效控制了水中溶解氧和盐分含量，降低了水冷壁的腐蚀风险。通过这些综合防护措施，锅炉的运行周期得以延长，整体发电效率和经济性得到提升，设备维护成本也有显著降低。

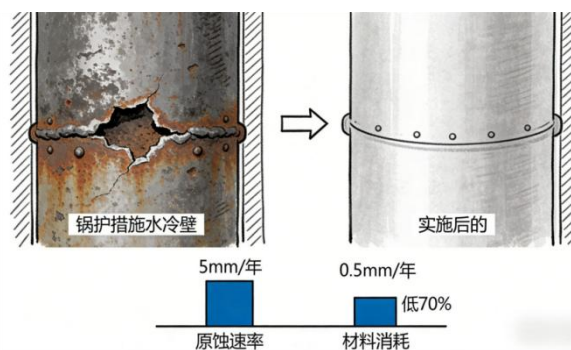


图1 锅炉水冷壁腐蚀控制成效对比

4.3 存在的问题与改进空间

耐高温合金材料的成本较高，且其在极端高温条件下的性能仍需进一步优化，尤其是在高温燃气中长期运行时，某些合金材料的抗腐蚀能力仍然不足。涂层技术的应用效果受到涂层附着力、均匀性及耐久性的影响，在高温、高压的环境下，涂层可能会出现脱落或失效，导致腐蚀问题反复出现。水质管理方面，虽然已有较为严格的水处理标准，但部分电厂的水处理

系统存在管理不到位的情况，水中的溶解氧和腐蚀性物质仍然较高，增加了腐蚀风险。因此，需要在材料选择、涂层技术以及水质管理上进一步优化，开发更加耐高温、耐腐蚀的合金材料和涂层技术，同时加强电厂水质监控系统，提高腐蚀防护的全面性和可持续性。

5 提高电站锅炉水冷壁耐腐蚀性的综合对策

5.1 多重防护技术的结合应用

为有效提升锅炉水冷壁的耐腐蚀性，结合多重防护技术是必要的防护手段。单一的防护方法往往无法完全应对锅炉水冷壁所面临的复杂腐蚀环境，必须采取组合型防护技术。耐高温合金材料的应用能够提高水冷壁在高温环境下的抗氧化和抗硫化能力，但仅依赖合金材料可能仍不足以抵御复杂的腐蚀因素。与此同时，表面涂层技术，如喷涂铝镁合金或陶瓷涂层，能够形成坚固的保护层，减少气体腐蚀对金属的侵蚀。水质管理和腐蚀抑制剂的使用能够降低水中的溶解氧及腐蚀性物质浓度，为锅炉水冷壁提供更安全的运行环境。这些技术结合后，能够更全面地抵御不同类型的腐蚀风险，并延长水冷壁的使用寿命。

5.2 对材料与技术创新的需求

提高电站锅炉水冷壁耐腐蚀性的关键在于材料和技术的创新。传统的钢材和合金材料在高温腐蚀环境下仍面临一定的局限性，尤其在燃气锅炉和超临界锅炉中，材料的耐腐蚀性能要求愈加严格。因此，研发具有更强抗腐蚀性能的新型高温合金材料成为亟待解决的技术难题。当前，纳米材料、钛合金和高熵合金等新型材料在耐腐蚀性、耐高温性方面展现了巨大的潜力，值得在锅炉水冷壁的材料选型中加大研究与应用^[1]。涂

层技术的持续创新同样至关重要。新型耐腐蚀涂层，如纳米陶瓷涂层和复合涂层，可以有效增强水冷壁表面的保护性，并提高其抗高温、抗酸性气体的能力。技术创新不仅是材料的优化，还包括涂层技术和水处理技术的持续更新，这些创新将有助于应对更严苛的腐蚀环境。

5.3 行业标准与政策建议

提高电站锅炉水冷壁耐腐蚀性的实施，需要行业标准和政策的支持。当前，国内外对于锅炉水冷壁的腐蚀防护标准仍有一定的差距，尤其是在腐蚀测试方法、材料选择及防护技术应用等方面，缺乏统一的、权威的标准体系。为了有效推动腐蚀防护技术的应用和普及，行业标准的制定需要考虑锅炉的工作环境 and 腐蚀类型的多样性，细化防护要求和技术指标。政策层面应当鼓励相关技术的创新与发展，并提供相应的资金支持和 技术引导。通过设立专项基金，支持研究和应用新型耐腐蚀材料与 技术，推动涂层技术和水质处理技术的突破。政府应加强对电力企业腐蚀防护措施实施情况的监督，确保相关政策的落实和技术的推广，从而提升电站锅炉的整体运行效率和安全性。

6 结语

电站锅炉水冷壁高温腐蚀问题的解决关键在于材料的优化、技术创新与防护措施的综合应用。多重防护技术的结合，能够有效降低腐蚀风险，提高设备的稳定性与运行效率。材料科学与涂层技术的不断发展为应对高温腐蚀提供了新的解决思路。行业标准与政策的支持也是保障技术实施的重要保障，未来有望进一步提升锅炉水冷壁的耐腐蚀性能，确保电力生产的安全与经济性。

参考文献:

- [1] 付可,裴鑫岩,赵彦凯.某电厂锅炉水冷壁腐蚀机理分析[J].山西电力,2025,(06):60-63.
- [2] 杭文林,潘虎,柏杰杰,等.贴壁风协同燃烧调整缓解对冲锅炉水冷壁还原性腐蚀研究[J].能源研究与利用,2025,(06):2-6.
- [3] 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.
- [4] 林司.煤粉细度对锅炉水冷壁高温腐蚀的影响研究[J].华东科技,2025,(12):48-51.
- [5] 胡克,高伟,王涛,等.某火力发电厂 350MW 机组锅炉水冷壁泄漏事件原因分析及防范措施[J].模具制造,2025,25(07):247-249.