

垃圾焚烧锅炉高温腐蚀机理及防护措施浅析

许锦涛

广州环投增城环保能源有限公司 广东广州 511300

摘要：生活垃圾焚烧属于达成城市固体废物减量化、无害化处理的关键技术，但是锅炉受热面长时间处于高温腐蚀环境当中，存在严重的腐蚀风险。文章全面剖析垃圾焚烧锅炉的高温腐蚀原理，细致论述氯腐蚀、硫腐蚀以及碱金属腐蚀等主要类型所蕴含的化学本质及其作用途径。从烟气成分、燃料属性、运行参数等诸多方面探究腐蚀的主要影响因素。依托此，研究给出包含材料选择改良、表面保护技术、运行控制策略以及智能检测体系的综合保护方案，给增强垃圾焚烧锅炉的耐久性与运行稳定性赋予重要的理论支持和实践指导。

关键词：垃圾焚烧锅炉；高温腐蚀；氯腐蚀；防护措施；运行优化

引言

生活垃圾焚烧属于达成城市固体废物减量化与资源化处置的关键技术。但是，在焚烧过程中会生成包含氯、硫以及碱金属等腐蚀性物质，使得锅炉受热面遭遇严重的高温腐蚀状况。此腐蚀现象致使管壁变薄、爆管风险加剧，而且引发电厂意外停运，带来大幅的经济损失。所以，深入探究高温腐蚀原理并制订有效的保护措施，对于确保垃圾焚烧锅炉长时间稳定运行、延长设备使用寿命有着重要的现实意义。本文尝试全面剖析该问题，给工程应用提供理论参照。

1 高温腐蚀机理概述

1.1 高温腐蚀定义与分类

高温腐蚀指金属材料处于高温环境时，同周边气态或者沉积下来的固态、液态介质展开化学或者电化学反应，造成材料损失或者性能下降的现象。在垃圾焚烧锅炉当中，这个过程格外强烈而且繁杂。按照腐蚀介质以及反应形式的差别，高温腐蚀大致可被划分为气体腐蚀和熔盐腐蚀两类。气体腐蚀指的是金属同烟气里的腐蚀性气态部分，诸如氯化氢、硫氧化物等直接产生反应。熔盐腐蚀则要繁杂得多，一般而言，烟气中的碱金属盐类会在受热面凝结成黏附性灰垢^[1]。这些灰垢处于高温时呈熔融状，既会损毁金属表面的防护性氧化层，又充当了腐蚀性气体向金属本体扩散的途径，极大地推动了腐蚀的速度。

1.2 腐蚀发生的环境条件

垃圾焚烧锅炉中，高温腐蚀若要产生，需高温环境。金属壁温超越氧化膜稳定性临界温度时，腐蚀往往加剧。

就碳钢来说，该温度一般高于 400 摄氏度。过热器这样高温的部件，壁温可达到 500 摄氏度或更高，此时腐蚀速率快速增大。

生活垃圾燃烧所产生的烟气包含高浓度的氯化氢、硫氧化物、碱金属蒸汽（比如钾、钠）以及重金属蒸汽等，这些物质给腐蚀反应供应了足够的反应物。而且，锅炉内部局部存在还原性气氛，特别是燃料与空气混合不好的地方。还原性气氛会毁坏金属表面那层致密的氧化铬保护层，让基体金属直接暴露在腐蚀环境当中。

1.3 腐蚀对锅炉寿命的影响

高温腐蚀给锅炉寿命带来的影响极为严重。其最直观的后果就是造成受热面管壁持续变薄。腐蚀进程使得管材有效承载厚度不断缩减，机械强度大幅减弱。在内部介质压力的作用之下，最终会引发爆管事故，从而危及整个锅炉系统的安全。腐蚀产物在管壁表面不断积聚，这会降低热传导效率，使得管壁实际温度进一步上升，从而引发“高温 – 加速腐蚀 – 温度更高”的恶性循环。频繁实施非计划停炉检修，一方面会加大守护成本，另一方面也会减小发电效率。所以，控制高温腐蚀乃是影响垃圾焚烧锅炉运行时长以及其整个生命时段成本的重要因素。

2 主要腐蚀类型与成因

2.1 氯腐蚀机理

氯腐蚀在垃圾焚烧锅炉中极具特征性与破坏性。其本质在于氯元素的循环现象。烟气里的氯化氢或者氯气可穿过金属表面的氧化膜，同基体金属作用形成挥发性的金属氯化

物。这些氯化物沿着氧化膜的孔隙向外部扩散。当扩散到氧分压较高的氧化膜外层时，挥发性氯化物会分解，重新生成金属氧化物和氯气。所释放的氯气又能向内扩散，再次重复前面的过程。这个循环让氯充当催化剂，不断破坏保护性氧化膜，致使金属不断被损耗。而且，氯还会明显减小灰分的熔点，促使低熔点共晶体生成，加重熔盐腐蚀现象。

2.2 硫腐蚀机理

硫腐蚀大多源自燃料里含硫物质的燃烧产物，即二氧化硫和三氧化硫。三氧化硫会和碱金属氧化物发生反应形成硫酸盐，这些硫酸盐会沉积在受热面上。硫腐蚀常常与硫酸盐的复合作用有关联。沉积下来的硫酸盐同金属氧化膜发生反应，会产生疏松多孔的氧化物，从而破坏氧化膜原有的保护功能^[2]。处于还原性气氛当中时，硫酸盐有可能被还原成腐蚀性更强的硫化物。硫离子能够快速渗透进金属晶界之处，引发晶间腐蚀现象，致使材料变得脆弱不堪。硫腐蚀和氯腐蚀两者往往会彼此助长，造成更为繁杂的协同腐蚀效果。

2.3 碱金属腐蚀机理

碱金属腐蚀主要由钾、钠等元素及其化合物造成。这些碱金属来自垃圾里的厨余、纸张等，在燃烧时，它们会变成氯化物或者氢氧化物这样的气相物质而挥发，然后随着烟气一起流动。温度较低的受热面存在时，气相碱金属化合物会冷凝沉积，同烟气中的三氧化硫反应产生硫酸盐。生成的碱金属硫酸盐沉积层具备吸湿性和黏性，可以捕捉更多飞灰。而且，它能够与金属表面的氧化铬保护膜发生反应，生成碱金属铬酸盐，进而破坏保护膜，为诸如氯、硫之类的其他腐蚀性介质的入侵创造条件。

3 腐蚀影响因素分析

3.1 烟气成分与温度

烟气成分是决定腐蚀性的关键因素。氯化氢浓度与氯腐蚀强度直接相关，二氧化硫和二氧化硫的浓度会影响硫腐蚀路径及硫酸盐生成量。碱金属蒸气的分压决定沉积速率。烟气中的氧含量和一氧化碳含量决定局部气氛的氧化还原性，还原性气氛会大幅加快腐蚀。温度属于腐蚀反应的动力学控制因子。金属壁温另外会影响各类化学反应的速度，而且决定了沉积灰垢的物理状态。如果壁温高于灰分里低熔点共晶体的熔点，那么灰垢就会从固态变成熔融态，腐蚀速率会出现数量级的增长。过热器区域的温度最高，所以这也是腐蚀最为严重的地方。

3.2 燃料特性与杂质含量

燃料也就是生活垃圾自身具有的特性会引发腐蚀现象。生活垃圾的热值、含水量、氯含量、硫含量、碱金属含量等要素会直接左右烟气中腐蚀性成分的浓度。其中氯含量格外重要，它被视作评判生活垃圾腐蚀风险的主要指标。垃圾成分存在极大波动与不均性，这给腐蚀控制造成严峻考验^[3]。不同季节、不同来源的垃圾，其元素合成存在明显差别，从而致使锅炉运行工况不断改变，腐蚀环境不够稳定，很难生成稳定又具保护性的氧化膜。

3.3 运行参数与工况波动

锅炉的运行参数会对腐蚀环境起到重新塑造的效果。过剩空气系数会直接左右烟气气氛。空气量过低时容易形成还原区，空气量过高可维持氧化气氛，不过这也许会使烟气温度上升，而且加大三氧化硫的生成量。燃烧组织形式包含配风、炉膛温度场分布等方面，这些会左右灰分的特性以及其在受热面上的沉积形态。如果频繁地执行启停操作或者负荷出现波动，那么受热面的温度就会呈现周期性的变化，进而引发热应力，使得沉积层产生开裂和剥落现象，破坏已经生成的氧化膜，暴露出崭新的金属表面，这样就加快了腐蚀的速度。

4 防护措施与技术

4.1 材料选择与优化

选择耐腐蚀性能更好的合金材料属于根本性的防护举措。针对像过热器这样腐蚀最为严重的高温部件，应当采用含铬镍量较高的奥氏体不锈钢或者镍基合金。铬可在表面生成一层致密的氧化铬保护膜，镍则能够提升合金抵抗渗碳以及氯腐蚀的能力。在材料改良上，可以选用复合管材。其基管用高强度但成本较低的钢材制成，外壁与烟气接触处则利用挤压、堆焊或者共挤压技术复合一层耐腐蚀合金。这样既能保证承压能力，又大幅改善了抗腐蚀性能，具备不错的经济价值。

4.2 表面涂层与喷涂技术

当下，在锅炉管材表面涂上防护涂层，这是一种有效的延长使用寿命的方法。该涂层形成一种物理隔离层，把基体金属和腐蚀性环境分隔开来。常见的涂层技术涵盖热喷涂（比如电弧喷涂、等离子喷涂）、渗金属（诸如渗铝、渗铬）以及激光熔覆等。热喷涂可于表面形成耐腐蚀的金属或者陶瓷涂层，镍铬合金涂层即为其一。渗铝或者渗铬处理会令铝

或铬元素渗进基体表层，创建富铝或者富铬的扩散层，在服役期间生成防护性更强的氧化膜。这些技术可遵照具体的腐蚀环境以及成本来选定。

4.3 运行控制与燃烧优化

通过精细化的运行控制去改良锅炉内部环境，这是一种积极而经济的防护策略。改良燃烧时的配风情况，使炉内保持微氧化气氛，防止出现局部还原性气氛，这对保障氧化膜的稳定性十分关键。把炉膛出口的烟温控制在一定的范围内，可以减轻过热器的结渣和腐蚀情况。经由蒸汽吹灰等方法定时清理疏松的积灰，避免沉积层过厚并且烧结硬化^[4]。而且，试着加入高岭土、氧化铝之类的吸附剂，它们会和碱金属化合物发生反应生成高熔点物质，这样就能减轻黏结性的沉积物，这也是有效的改善办法。

5 监测与维护策略

5.1 腐蚀监测方法

创建起有效的腐蚀检测体系，乃是做到预测性守护的关键所在。在线检测手段重点在于关键之处设置腐蚀检测探头，经由电阻法或者电化学方法，及时测量金属的损失速度。而且，要定时采集烟气成分实施分析，观测氯化氢、二氧化硫等腐蚀性气体的浓度变动情况。超声波测厚属于应用范围很广的离线检测手段。当锅炉处于停炉检修之时，会在易腐蚀区域执行网格状布点操作，精准测量管壁所剩厚度。然后把当前测量值同上次检修记录相比较，得出此运行阶段的平均腐蚀速度，从而给使用寿命评定提供参考依据。

5.2 定期检查与评估

制定定期检查计划并且严格执行它十分关键。检查内容包含壁厚测量，也要对管壁表面状况实施宏观查看，看是否存在溃疡状腐蚀、裂纹、鼓包之类的缺陷，还要查看沉积物的形态、厚度及其分布情况。根据检查结果和检测数据，要综合考量锅炉各个受热面的腐蚀状况。该考量重点在于腐蚀速率、剩余寿命预测还有高风险区域的识别，这样就能给

制定针对性的守护与更换策略提供决策支撑。

5.3 维护与修复方案

按照评定结果来执行相应的保护与修缮举措。那些均匀腐蚀变薄不过仍在安全界限之内的管段，可以加大检测频率，而那些局部腐蚀坑深度超出标准或者存有重大瑕疵的管段，则必要予以更换或者仅做局部修补。修复技术包含割管更换、补焊以及利用夹具加强这些方法。大面积且还未到更换程度的腐蚀部分，可以运用现场表面修复技术，现场激光熔覆或者热喷涂之类的技术来恢复它的防腐性能。所有的保护措施都要有记录，这样就形成起设备健康的档案。

结语

垃圾焚烧锅炉存在高温腐蚀现象，这属于多因素相互影响的复杂过程，要想做好防护就得采用系统性的策略。挑选耐蚀材料、运用表面防护技术、改良燃烧运行调控，再加上智能检测和科学守护，就能形成起有效的腐蚀防护体系。未来，伴随新材料、新工艺以及智能检测技术不断进步，垃圾焚烧锅炉的防腐性能会更强，这样就能给垃圾焚烧发电行业的安全、高效以及可持续发展提供更强的技术保障。

参考文献：

- [1] 曲作鹏, 钟日钢, 王磊, 等. 垃圾焚烧发电锅炉高温腐蚀治理的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2020,33(03):50–60.
- [2] 朱邦同. 城市垃圾焚烧锅炉高温腐蚀机理及防护技术概述 [J]. 智能城市, 2019,5(18):193–194.
- [3] 曲作鹏, 钟日钢, 王磊, 等. 垃圾焚烧发电锅炉高温腐蚀防护技术的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2021,50(15):6–11.
- [4] 孙晓钟. 分析城市垃圾焚烧锅炉高温腐蚀机理及防护技术 [J]. 智能城市, 2020,6(07):246–247.

作者简介：许锦涛，1995年07月，男，汉，江西省萍乡市莲花县，本科，助理工程师（电力运行），垃圾焚烧发电厂