“双碳”背景下垃圾焚烧发电锅炉中的高温腐蚀问题及优化措施

严凯[1,2]

（1.江西科技师范大学，江西南昌330013；2.江西省材料表面重点实验室，江西南昌330013）

摘要：随着城市生活垃圾数量的增加，环境面临的压力也在日益增加。垃圾焚烧发电技术已经发展成为处理城市生活垃圾的主要方式之一。然而，在城市固体废物中，成分复杂多变，其中氯元素含量较高，极易引发严重的高温腐蚀现象。“双碳”目标的提出以及垃圾分类政策的不断推动，焚烧发电锅炉中面临的更加严峻的高温腐蚀问题。文章对当前垃圾焚烧发电锅炉中的高温腐蚀现象及“双碳”背景下遇到的问题进行梳理，总结相应的优化措施，寻求提高发电锅炉使用寿命，降低发电厂成本。

0引言

随着工业化步伐的加快以及现代城市化进程的加速，市民在享受城市生活便利的同时，也产生了大量的城市固体废物即城市生活垃圾。妥善处理城市固体废物对提升城市居民的生活质量、缓解环境压力至关重要。从目前来看，城市固体废物处理方法主要采取回收利用、卫生填埋、堆肥、垃圾焚烧发电四种方法[1]。其中，由于垃圾焚烧发电法能够做到迅速处理，减量化程度高达90%，产生相对较少的环境污染，合理资源化地将废物转化为绿色能量，被国内外大量使用[2]。然而，在垃圾焚烧过程中，会释放出HCl、SO_2、CO等腐蚀性气体，以及熔融盐的产生，这会引起严重的高温腐蚀问题，降低焚烧发电锅炉的服役寿命，影响焚烧发电锅炉的正常运行[3]。同时在“双碳”目标下和生态环保政策的发布，焚烧产生的可吸入颗粒物、飞灰、二噁英、苯类等污染物，也亟须得到控制。基于此，对目前引起焚烧发电锅炉腐蚀的几个因素，结合“双碳”，对发电锅炉可能面临的高温腐蚀问题进行分析，并提出工艺优化措施，确保焚烧发电锅炉的正常运行，降低发电厂的维护成本。

1焚烧发电锅炉中高温腐蚀现象

1.1高温气相腐蚀

生活垃圾中含有相对较高的氯元素，在焚烧过程中，主要以HCl的形式释放。目前市场上投入应用的垃圾焚烧发电锅炉，工作温度大部分在400～800℃左右，而焚烧锅炉烟气中，即使含有少量HCl都将引起严重的气相腐蚀[4]。

研究表明，高温HCl气体是造成垃圾焚烧锅炉高温气相腐蚀的主要成分，其腐蚀行为遵循“活化氧化”的机制[5-6]。一般认为，在腐蚀初始阶段，HCl并不直接参与腐蚀，而是会与烟气气氛中的O_2反应生成Cl_2，随后Cl_2附着在金属表面生成金属氯化物。通常来说，部分金属氯化物化学性质不稳定，且具有较高的饱和蒸气压，在高温下易挥发。因此，在生成金属氯化物后，随着腐蚀的继续进行，由于蒸气压梯度的作用，金属氯化物会通过金属氧化膜向外挥发，并在氧气压力较高区域被氧化，生成金属氧化物，同时释放出Cl_2。最后，生成的Cl_2会再次回到金属表面参与腐蚀，形成一种以氯化物提供金属从金属表面向高氧分压连续输送的循环输送过程。大量数据表明，金属氯化物的生成，使得焚烧发电锅炉设备组成金属损失严重，容易引起水冷壁减薄、发电锅炉过热器管路爆炸等生产事故，增加了焚烧发电锅炉的维护成本。

1.2高温熔盐腐蚀

城市生活垃圾成分相当复杂，有机物含量高，C、H、O元素是其中主要成分，此外含有大量Cl、S、碱金属等有害元素[7]。当燃烧气体中的挥发性氯化物进入冷却的管道表面时，容易被冷凝形成液体或固体沉积物。随后，沉积的金属氯化物会与烟气气氛中的SO_2或SO_3反应，形成碱金属硫酸盐。此外，在焚烧时，垃圾中的Pb、Zn等金属元素会与Cl和S反应，在烟气中生成金属氯化物和硫酸盐。它们的熔点，一般在300～400℃，容易与其他盐类型形成低熔点共晶混合物。在高温环境下，熔融盐会形成液相，而液相化学反应，往往要比固相反应快得多，从而进一步加快熔融盐腐蚀速率[8]。研究表明，高温熔盐腐蚀机制主要遵循两种：一种是基于金属氯化物，硫酸盐化机制，

管壁沉积的金属氯化物与烟气气氛中的SO_2或者SO_3反应，生成HCl与Cl_2，其中HCl可以进一步生成Cl_2，从而进一步腐蚀金属[6]；另一种是高温熔融的碱金属氯化物与金属氧化物发生反应，将覆盖在金属表面的Fe、Cr和Al等元素形成的具有保护性氧化物分解。在破坏金属保护性氧化膜的同时，释放出Cl_2，进一步发生气相腐蚀，从而引起器件频繁失效，影响焚烧发电锅炉的正常工作[3]。

2焚烧发电锅炉中的腐蚀问题及优化措施

2.1“双碳”背景下发电锅炉中的腐蚀问题

基于推动构建人类命运共同体的担当和实现可持续发展的内在要求，我国于2020年9月提出“双碳”目标的战略决策，力争2030年前实现“碳达峰”，2060年前实现“碳中和”目标。

“双碳”背景下，能源结构调整，资源循环利用，加快降低碳排放步伐，是实现“双碳”目标的关键[9]。目前，我国能源结构仍旧主要以煤炭为主，亟需寻找路径。“双碳”政策要求提升重点行业的能源利用效率，控制煤炭消费增长，发展绿色低碳技术的研发和推广，大力发展生物质等可再生能源，建设多元互补的综合能源供给体系[10-11]。垃圾焚烧发电是一项经济的发电技术，在“双碳”目标下，势必推动垃圾焚烧发电技术应用和发展。此外，在能源转型、低碳可持续发展不断提高的过程中，实行垃圾分类是发展绿色低碳经济的重要践行。生活垃圾分类具有社会、经济、生态等效应，能够变废为宝，减少污染，物尽其用，提高资源化利用率，也能减少垃圾处理量和处理设备，减少土地资源的消耗，改善居民生活环境[9]。我国自2019年起，全国各个城市开始逐步精准实施生活垃圾分类。然而，随着近年来强制垃圾分类政策推进，垃圾焚烧发电厂入厂垃圾的塑料、橡胶、纺织物等垃圾比重不断提高，垃圾焚烧的氯元素含量增加，加剧了发电锅炉中的高温腐蚀，导致垃圾焚烧发电锅炉故障率增加。此外，HCl诱导的高温腐蚀行为会随着气体中HCl的含量增加加速。而在医用垃圾中，其Cl元素含量远超其他垃圾，医疗废物焚烧转化Cl含量高达2.33%～2.64%，甚至更高。因此，随着垃圾的分类的进行，这也可能加重垃圾焚烧锅炉工作环境的负担。

垃圾焚烧发电领域具有上百年的发展历史，虽然已经形成了相对的稳定模式，但是仍然存在一些问题。根据联合国政府气候变化专门委员会（IPCC）定义，焚烧生物质不纳入碳排放估算，生活垃圾焚烧发电被认定作为生物质发电属于可再生资源。然而，根据生态环境部工程评估中心发布称2022年全国因垃圾焚烧排放CO_2总量为10065万t，处理吨垃圾的碳排放量约为358kg。这是因为垃圾焚烧除生物质外，还存在大量塑料等化石基垃圾。在垃圾焚烧过程中，容易产生二噁英、苯烯等有毒有机物，难以处理，易造成环境污染。尽管当前已有环保措施和相应技术用于减少有毒气体的排放，但成本较高。大量研究表明，二噁英、苯烯等有毒气体主要是由于生活垃圾的不充分燃烧造成，而当焚烧温度达到850℃以上时，垃圾焚烧烟气气氛中的有毒气体可以分解[12]。当垃圾焚烧时的温度提高，越来越多的研究表明，不仅可以显著减少二噁英等有毒气体的排放，焚烧发电的效率也得到大幅度提升，然而随着温度的提高，金属的腐蚀速率也会急剧加速[13]。

2.2提升发电锅炉腐蚀性能的优化措施

随着垃圾焚烧发电技术的不断应用和推广，由于发电效益的要求，垃圾焚烧锅炉工质从低饱和蒸汽不断向过热蒸汽过渡，更加剧了高温腐蚀的发生。为保证设备的正常运行，降低生产成本，提高发电效率，高温腐蚀防护措施也经历了不断的创新和发展。目前已经建立了很多降低高温腐蚀的方法，对垃圾焚烧锅炉防护措施，主要分为一级措施和二级措施[5]。

一级措施主要是通过优化焚烧发电锅炉中的工艺条件，尽量减少腐蚀因素的不利影响。在“双碳”背景下，为减少发电锅炉高温腐蚀，大量焚烧发电厂已经开始采取混合燃烧的方式，进行协同处置[14]。大量研究表明，硅酸铝和二氧化硫可以和碱金属的氯化物反应，捕获碱金属元素使其避免沉积在锅炉管壁，而适当的二氧化硫存在，能够明显抑制HCl诱导的气相腐蚀[14]。因此垃圾焚烧时添加富含硫和铝硅酸盐的燃料，或将富含硫元素的煤与生活垃圾混烧，不仅可以提高热值，提高发电效率，还能缓解发电锅炉的腐蚀。同时，在生活垃圾焚烧中，添加抑制氯腐蚀的添加剂，如$Ca(OH)_2$、CaO、和$CaCO_3$，也被大量采用。此外，优化焚烧发电锅炉燃烧条件，采用合理的余热锅炉与焚烧锅炉一体化，以及合理布置一次风和二次风喷嘴调节，确保过量的空气系数使得燃烧产生的烟气均匀，减小炉膛口的温度和烟气速度的稳定，防止严重的局部腐蚀[15]。

二级措施是从材料选择角度进行，一方面着手开发出新型的高性能防腐蚀材料，另一方面采取相应的辅助措施改善现有材料性能以减少高温腐蚀对焚烧发电锅炉的影响，延长发电锅炉的使用寿命。多种耐腐蚀材料已经在发电焚烧锅炉上进行了测试和应用[16]。目前应用在焚烧锅炉加热管的合金主要有镍铁基高铬合金、高铬钼镍基合金和高硅铬镍基合金，大部分适用于炉温400～600℃的焚烧锅炉，在800℃左右也能具有优异的高温强度和耐腐蚀性能。此外，诸如高速氧燃料（HVOF）热喷涂、激光熔覆、堆焊等的涂层系统被开发和应用在先进的垃圾焚烧锅炉中。其中，传统的热喷涂和堆焊涂层具有技术成熟和成本低的优点，适用于中容量的焚烧发电锅炉，而激光熔覆层的高强度，和基体之间的高冶金结合强度，更适合用于大容量的焚烧发电锅炉。因此，对不同参数的垃圾焚烧发电锅炉，应该根据实际情况，采用适当的工艺提升焚烧发电锅炉的腐蚀性能。

3结语

生活垃圾焚烧发电在实现城市生活垃圾的安全处置、减少污染的同时，作为绿色技术更能降低碳排放，是实现“双碳”目标的必然趋势。然而，在垃圾焚烧时，垃圾焚烧锅炉遭受许多的高温腐蚀问题。随着垃圾分类的深入推进，垃圾中氯元素含量会增加，容易引发严重的高温腐蚀，导致垃圾焚烧发电锅炉将面临新的挑战。因此，需要采取相应的防护措施，提高发电锅炉高温腐蚀性能，确保焚烧发电锅炉的正常运行。本文介绍了焚烧发电锅炉中的高温腐蚀现象和目前常见的高温腐蚀防护方法。垃圾焚烧发电锅炉的高温腐蚀问题主要是高温气相腐蚀和高温熔盐腐蚀，目前主要的保护措施是通过优化工艺，降低腐蚀因素的不利影响，以及寻求具有优异的抗腐蚀性材料并采用相应的辅助措施，延长焚烧发电锅炉的使用寿命。

参考文献：

[1]张英民，尚晓博，李开明，等.城市生活垃圾处理技术现状与管理对策[J].生态环境学报，2011，20（2）：389-396.

[2]舟丹.我国垃圾焚烧发电行业发展的有利因素[J].中外能源，2018，23（7）：65.

[3]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（7）：246-247.

[4]苏猛业，柏华斌，洪斌，等.垃圾焚烧发电中的高温氯腐蚀与防护研究进展[J].广州化工，2021，49（23）：17-22.

[5]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.

[6]李远士，牛焱，刘刚，等.金属材料在垃圾焚烧环境中的高温腐蚀[J].腐蚀科学与防护技术，2000，12（4）：224-227.

[7]曲作鹏，田欣利，王永田，等.垃圾电站锅炉腐蚀速度及关键影响因素研究进展[J].中国腐蚀与防护学报，2022，42（5）：839-844.

[8]刘轶.垃圾焚烧发电中的问题与应对措施[J].集成电路应用，2023，40（3）：188-189.

[9]李秋虹，孙晓杰，胡心悦，等.中国城市生活垃圾处理的碳排放变化趋势研究[J].环境污染与防治，2023，45（7）：952-958.

[10]李乔楚，杨瀚匀.“双碳”目标下能源转型对低碳发展的影响机理分析[J].科技创业月刊，2023，36（8）：19-22.

[11]李娜，杨景胜，陈嘉茹.“双碳”背景下能源行业的机遇和挑战[J].中国国土资源经济，2021，34（12）：63-69.

[12]宋景全.垃圾焚烧发电厂发电效率的影响因素及提升措施[J].工程技术研究，2023，8（1）：127-129.

[13]焦世娟.垃圾焚烧污染物的形成机理及控制研究[J].山西化工，2022，42（7）：197-199.

[14]王永征，张科，姜磊，等.生物质混煤燃烧过程中硫氯协同腐蚀特性研究[J].高校化学工程学报，2015，29（6）：1422-1429.

[15]武岳，王永征，栗秀娟，等.生物质混煤燃烧锅炉过热器受热面金属氯腐蚀特性[J].动力工程学报，2014，34（9

）：690-695.

[16]王永田，赵祎璠，魏啸天，等.垃圾焚烧电站水冷壁镍基合金涂层高温氯腐蚀性能研究[J].中国腐蚀与防护学报，2022，42（5）：879-884.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/210159.html