

生物质锅炉受热面高温腐蚀影响因素研究

丁晴, 杨婉婷, 姚锡文, 许克强, 丁文博, 邓娅丽

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳110819)

[摘要] 生物质电厂锅炉受热面的腐蚀控制是生物质能有效利用的关键技术, 研究生物质锅炉受热面高温腐蚀的影响因素对于指导生物质锅炉的安全运行具有重要意义。本文以我国常见的生物质——玉米秸秆为研究对象, 基于管式炉实验系统, 搭建金属受热面沉积腐蚀实验平台, 深入研究生物质电厂锅炉受热面积灰、水洗和添加剂等因素对锅炉受热面高温腐蚀的影响, 为生物质锅炉腐蚀防治提供理论支撑。研究结果表明, 生物质灰的存在会加速生物质电厂锅炉受热面的腐蚀, 积灰存在对锅炉的腐蚀速率比不存在积灰的情况提高21.15%; 而水洗和添加矿物添加剂会抑制生物质灰对电厂锅炉受热面的腐蚀。在模拟锅炉温度为650℃的工况下, 水洗后生物质灰的腐蚀速率降低了8.93%, 而添加5%高岭石灰后的生物质灰的腐蚀速率降低了9.62%。

[关键词] 生物质锅炉; 高温腐蚀; 玉米秸秆; 水洗; 添加剂

[中图分类号] TK6 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)06-0093-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.06.014

0 引言

随着工业和经济快速发展, 煤炭、石油和天然气等一次性化石燃料的供应日趋紧张。为符合我国绿色、环保、可持续发展的理念和满足日益增长的燃料需求量, 开发多元化的可再生能源迫在眉睫。生物质燃料和生物质炭具有可再生、清洁、低碳等优点, 可以替代传统能源, 减少我国对化石能源的依赖, 有利于实现节能减排和环境保护, 且我国生物质储能

十分丰富, 因而生物质能源等相关研究被国家列为重点研究领域^[1]。

生物质的主要应用方向是制备液体燃料、有机肥料、建筑材料以及发电。其中, 发电是生物质应用最为广泛的领域。生物质直燃发电是生物质发电的主要方式之一, 其原理与传统燃煤发电技术类似, 但给环境带来的污染及破坏远小于现今传统的燃煤发电。生物质燃料的燃烧效率对生物质直燃发电的效率有很大影响, 而其燃烧效率又与燃烧设备息息相关, 因而要想提高生物质燃烧效率则需要提高生物质锅炉的热效率^[2]。限制生物质锅炉热效率的一个重要因素是锅炉腐蚀。因植物在生长过程中携带K、Na、Cl等微量元素, 生物质燃料的灰分中碱金属含量高, 且K、Na等碱金属元素含量要高于Cl元素。在低温条件下, 这些碱金属元素容易以氯离子形态存在并产生腐蚀。此外, 烟气成分中水蒸气含量越高, 形成的酸蒸汽量也会越大, 腐蚀也会加剧^[3]。因此, 当玉米秸秆在锅炉内燃烧时, 锅炉内受热面会遭受严重腐蚀。

国外对生物质能源的利用研究进行较早。在20世纪90年代, 丹麦的BWE公司率先开始了对生物质燃烧发电的研究^[4], 1998年, 世界上第一座以秸秆生物质为燃料的发电厂应运而生。2008年, 英

[收稿日期] 2025-02-17

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52474214); 国家级大学生创新创业训练计划项目(240049)。

[作者简介] 丁晴(2005—), 东北大学安全工程2022级本科生在读。

[通信作者] 姚锡文(1987—), 博士, 副教授, 研究方向为生物质能安全、生物质燃气净化等。

[引用格式] 丁晴, 杨婉婷, 姚锡文, 等. 生物质锅炉受热面高温腐蚀影响因素研究[J]. 绿色矿冶, 2025, 41(5): 93-97.

DING Qing, YANG Wanting, YAO Xiwen, et al. Study on the influencing factors of high temperature corrosion on the heating surface of biomass boiler[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(5): 93-97.

国在威尔士南部塔尔波特港废弃的海港上建立了以实现 CO₂ 减排为目标的生物质发电厂。相较国外,我国生物质能利用技术起步较晚,但发展迅速,在 2006 年于单县投产了第一个大型生物质直燃发电示范项目,搭建了 25 MW 的生物质电厂,每年的发电量相当于十万吨标准煤^[5]。截至 2024 年底,我国利用生物质发电的总量已达 45 510 MW。截至 2024 年 6 月,我国生物质发电装机 45 300 MW,成熟的生物质发电企业也越来越多。

国内外对生物质锅炉受热面的高温腐蚀有着不同的研究。Zhang 等^[6]通过沉积采样系统,研究了不同沉积时间内锅炉受热面灰分沉积的动态过程,结果表明生物质燃料中的碱金属(Na、K)以及碱土金属(Mg、Ca)等元素对灰分沉积过程有很大影响。范浩东等^[7]的研究表明农林生物质燃料的污染物排放中碱/碱土金属含量较高,当生物质锅炉直燃发电时,部分碱金属成分以蒸汽形式释放,导致受热面高温腐蚀较为严重。蔡文博等^[8]归纳了目前锅炉受热面腐蚀研究进展,指出生物质中的 Cl 元素是导致生物质锅炉受热面积灰、结渣、腐蚀的主要原因,严重影响了锅炉热转化效率及其安全运行。

目前,锅炉受热面的高温腐蚀仍是困扰生物质能高效利用的一个重大难题。邓磊等^[9]将生物质原料与水洗后样品进行灰熔融特性分析,发现水洗可以有效脱除 K、Na、Cl、S 等元素,进而阻止了碱金属及 S、Cl 等元素在燃烧过程中的析出,从而有效缓解了生物质在燃烧时产生的气相和固相腐蚀。Steenari 等^[10]研究了 CaCO₃ 和 Al₂O₃ 等添加剂对农业废弃物燃烧过程中烧结特性的影响,结果表明这些添加剂可以通过化合物的形式与钾元素结合,使灰熔融温度显著升高,烟气中的 KCl 蒸气也有所减少,进而抑制或缓解受热面腐蚀危害。

本文以我国农村常见的玉米秸秆生物质为原料,探究生物质电厂锅炉受热面积灰、水洗和添加剂等因素对锅炉受热面高温腐蚀的影响规律,研究结果可为生物质电厂锅炉防腐提供理论依据和科学指导。

1 实验部分

1.1 实验样品及设备

实验选用的生物质为玉米秸秆,在农村较为常见,具有一定的代表性,实验所用生物质均来自沈阳周边,其工业和元素分析见表 1。

表 1 玉米秸秆工业分析和元素分析结果(空气干燥基)

成分	工业分析/%				元素分析/%				
	水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	O	N	S
含量	5.3	6.8	727	15.2	47.8	6.5	32.7	0.7	0.2

在制备灰样之前,使用磨粉机将玉米秸秆粉碎,筛分出粒径小于 60 目的样品,放置于样品袋常温下干燥保存。实验钢材选用生物质锅炉受热面常用的 12Cr1MoV 金属片,金属片的化学成分见表 2。

表 2 12Cr1MoV 金属片化学成分分析结果 %

元素	C	Si	Mn	P	S	Mo	V
含量	0.09	0.19	0.42	0.01	0.99	0.27	0.16

本文以玉米秸秆为研究对象,利用 12Cr1MoV 金属片代表锅炉受热面,基于管式炉搭建了金属受热面沉积腐蚀特性实验平台,同时利用 Origin 软件画出腐蚀情况,得出实验结果。实验过程中,腐蚀温度选择 650 ℃,实验平台示意图如图 1 所示。

该实验平台由可控气氛的送气系统、气体流量计、混气装置、管式炉、吸收装置组成。管式炉

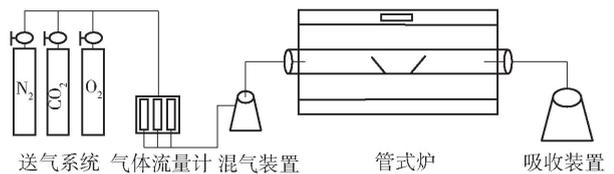


图 1 基于管式炉系统建立的金属受热面沉积腐蚀实验平台是实验平台的主体部分;送气系统由 N₂、O₂ 和 CO₂ 气瓶组成;利用气体流量计控制通入管式炉的气体流量,模拟烟气气氛,并调节气体流量计,保证管式炉内气氛由 6% 的 O₂、12% 的 CO₂ 和 82% 的 N₂ 组成。使用管式炉模拟生物质锅炉受热面环境,将管堵置于两端进行密封。吸收装置中,先采用 NaOH 溶液吸收废气中的有害成分,再将气体排出。进行实验前需要排出系统中存在的空气,首先将试样放入管式炉内,再通入三种气氛,当吸收装置出现气泡时,便可将管式炉装置温度升至 650 ℃,开

始实验。

1.2 生物质灰样的制备

首先,将玉米秸秆研磨粉碎,经筛分后,放置于样品袋中常温干燥保存。然后,称取一定重量的样品,将样品与洗涤溶液按照 1:30 比例混合,利用电磁搅拌机水洗,反复 3 次后放入烘干机,常温干燥保存。同时称取一定重量样品,添加比例为 5% 的高岭石进行混合,常温干燥保存。最后,将上述 3 种生物质样品,称取一定重量,分别平铺在 3 个坩埚中,放置于马弗炉中,按照《固体生物质燃料工业分析方法》(GB/T 28731—2012)要求,设置马弗炉升温速率为 10 °C/min,灰化温度为 550 °C,并在该温度停留 2 h,冷却后即可得出三种灰样。制灰所用马弗炉为 XL-2000 型智能一体马弗炉,如图 2 所示,由鹤壁市创新仪器仪表有限公司生产。



图 2 XL-2000 型智能一体马弗炉图

1.3 实验方法与内容

为模拟生物质锅炉实际工况,使生物质充分反应,按照《生物质锅炉技术规范》(GB/T 44906—2024)要求,将管式炉温度设为 650 °C,实验流程如下:

1) 玉米秸秆在磨粉机粉碎后,一部分保留,一部分采用去离子水清洗,一部分添加 5% 的高岭石矿物添加剂,一并放入马弗炉中制取灰样。

2) 将金属片打磨抛光,用游标卡尺测量长度并计算其表面积,进行称重。

3) 将单纯灰、水洗灰和添加 5% 高岭石的生物质灰分别均匀涂抹在金属片表面,放入 200 °C 干燥箱干燥 2 h 预氧化,进行称重记录。

4) 将 3 组金属片放入管式炉中,实验平台各部分顺次连接,打开三种气瓶,通入气体,开始实验,管式炉加热至温度 650 °C,加热时间 60 h,每 10 h 测一次重量。每组实验重复 3 次。

5) 降温结束后取出钢材试样,打开电子天平,清零称重。

6) 保存数据,实验结束。

2 实验结果讨论与分析

2.1 生物质灰对电厂锅炉受热面腐蚀的影响

根据腐蚀增重数据绘制了腐蚀增重曲线,探究有无积灰对实验钢材高温腐蚀的影响,结果如图 3 所示。对增重量(ΔG)进行抛物线拟合,得到拟和方程为: $\Delta G = kt^{1/2} + C$,用 ΔG 表示腐蚀增重量, t 表示腐蚀时间; k 为抛物线曲线速率常数,表征腐蚀增重速率; C 为积分常数,表示腐蚀反应初始时刻各影响因素对抛物线曲线造成的偏离^[11]。

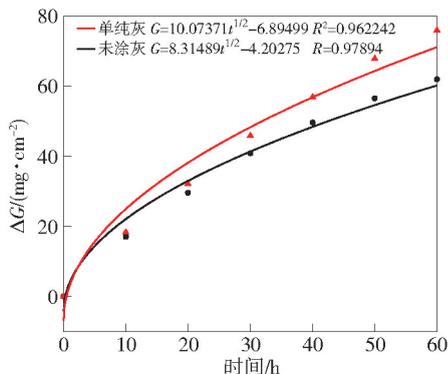


图 3 是否涂灰对锅炉高温腐蚀的影响曲线

从图 3 可以看出,在腐蚀实验初期,是否涂灰对金属片腐蚀情况影响不大,但在第 5 h 时,涂灰的金属片相较于未涂灰一组,腐蚀增重加剧。随着实验的进行,涂灰组的腐蚀增重一直大于未涂灰组,并且二者差距逐渐增加。在 650 °C 条件下,未涂灰腐蚀增重速率为 8.314 89,而涂灰腐蚀增重速率为 10.073 71,两者差值为 1.758 82。因此,积灰的存在会提高钢材 21.15% 腐蚀增重速率。

玉米秸秆的主要元素成分是 C、H、O、S,金属片主要元素成分为 Si、C、Cr、Mo、Mn。王浩等^[12]研究表明,炉灰的主要成分为 C、Si、O、Cl,还有少量碱金属元素,炉渣的主要成分为 Al、Ca、Fe 以及 C、Si、O 等元素,且大量以氧化物形式存在,腐蚀产物的主要成分是 Fe、C、O,还含有大量 Cl、S 腐蚀性元素,其中 Cl 元素含量较高。炉渣中不含 Cl 元素,说明在生物质燃烧过程中,Cl 元素主要以气态、熔融盐或飞灰的形式附着在管壁表面,将炉灰、炉渣的成分以及锅炉管受热面表面腐蚀产物对比可知,在锅炉运行中,烟气中的腐蚀性元素主要沉积在锅炉表面,造成电化学腐蚀及熔融盐腐蚀,而其中主要的腐蚀元素即为 Cl 元素。生物质灰会与锅炉受热面发生反应,在高温下碱金属等元素反应形成熔融盐,由此加剧了

腐蚀。

2.2 水洗对生物质锅炉受热面腐蚀的影响

为探究生物质灰加剧腐蚀的原因,本文将生物质灰与水洗后的生物质灰进行对比,分析水洗后生物质灰对锅炉的腐蚀情况,对增重量(ΔG)进行抛物线拟合,结果如图4所示。

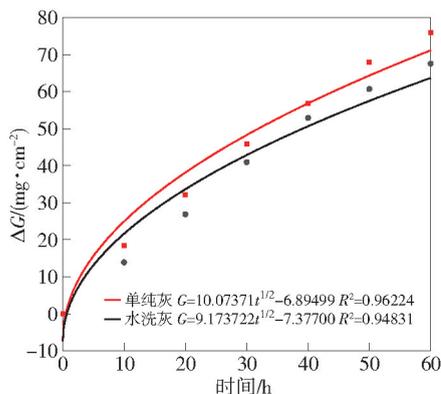


图4 是否水洗对锅炉高温腐蚀的影响曲线

从图4可以看出,在温度为650℃的整个腐蚀过程中,实验开始阶段,腐蚀增重曲线上升速率较快;随着时间的增加,曲线越来越平缓。在整个腐蚀过程中,相较于对照组单纯灰,水洗后的生物质灰对锅炉的腐蚀严重程度明显降低。在650℃条件下,水洗灰腐蚀增重速率为9.173722,与单纯灰腐蚀增重速率10.07371相差0.899988,因此,水洗预处理样品相较于未处理样品的腐蚀增重速率降低8.93%。生物质主要由碱金属元素和碱土金属元素组成^[9]。根据李华壮^[13]研究表明,生物质锅炉在燃烧时会产生大量飞灰。这些飞灰中碱性金属元素和Cl元素附着在锅炉受热面上,逐渐堆积结块,在这个过程中,锅炉中Fe、Cr等元素被附着物置换,高温和腐蚀气体都是造成锅炉受热面发生显著腐蚀损失的主要原因。胡睿等^[14]研究表明,水洗可以脱去生物质燃料绝大部分的K元素以及Cl元素,因此,生物质经过水洗后,燃烧生成的生物质灰内碱金属含量大幅减少,由此造成的电化学腐蚀及熔融盐腐蚀程度下降。

2.3 高岭石对生物质锅炉受热面腐蚀的影响

含有Al、Si、Ca等元素的物质均可以作为生物质燃料的矿物添加剂。矿物添加剂中,高岭石的Al含量较高,抑制腐蚀的效果较好,且高岭石灰是一种常见的添加剂,容易获取且价格低廉。高岭土是一种自然形成的水合硅酸铝混合物,主要成分是黏土矿物,化学式为 $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,其主要组分中

SiO_2 约占46.54%, Al_2O_3 约占39.5%, H_2O 约占13.96%。为了探究矿物质灰对金属受热面腐蚀增重的影响,本文选取市面上采用较多的高岭石作为矿物添加剂代表进行研究,分析腐蚀温度为650℃时,添加5%高岭石的生物质灰对锅炉的腐蚀情况,结果如图5所示。

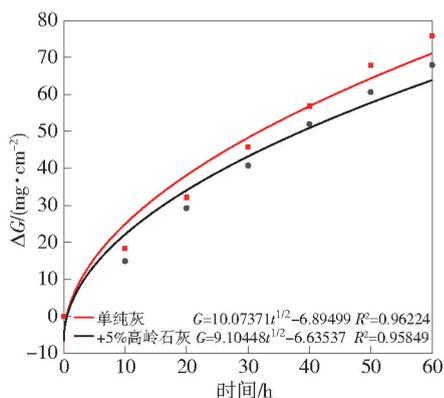


图5 高岭石添加剂对锅炉高温腐蚀的影响曲线

从图5可以看出,在玉米秸秆中加入5%的高岭石添加剂后,金属片腐蚀明显减缓,随着时间的增加,该腐蚀减缓趋势越明显。在650℃的试验温度下,添加5%高岭石的腐蚀增重速率为9.10448,与单纯灰腐蚀增重速率10.07371相差0.96923,因此,添加高岭石样品相较未处理样品可降低腐蚀增重速率9.62%。主要原因是高岭石中的Al和Si与结灰中碱金属氯化物可以发生反应,生成熔点较高的碱金属硅铝酸盐,从而减弱生物质灰对锅炉受热面的腐蚀^[10]。

3 结论

本文利用基于管式炉系统搭建的金属受热面沉积腐蚀特性实验平台,在模拟的650℃生物质锅炉烟气的气氛下,对玉米秸秆灰进行水洗和添加5%高岭石预处理,探究对生物质电厂锅炉受热面积灰腐蚀的影响,得出如下结论:

1) 生物质灰的存在会加剧锅炉受热面的腐蚀,腐蚀增重速率提高21.15%。

2) 生物质灰经过水洗后,碱金属及Cl、S等元素含量减少,水洗后的生物质灰样相较于未水洗生物质灰样显著抑制了锅炉受热面的高温腐蚀。而随着腐蚀时间的延长,抑制现象越明显,腐蚀增重速率下降8.93%。

3) 选择矿物添加剂中抑制效果较好的高岭石作为代表,对生物质灰添加5%高岭石进行预处理,

结果显示加入矿物添加剂后腐蚀增重速率下降9.62%,说明高岭石对于锅炉受热面的高温腐蚀具有较好的抑制效果。

[参考文献]

- [1] 刘晓龙,杨跃臣,姜铄,等. 我国玉米秸秆的综合利用现状分析及对策建议[J]. 食品工业,2024,45(7):207-211.
- [2] 金安,李建华,高明,等. 生物质发电技术研究与应用进展[J]. 能源研究与利用,2022(5):19-24.
- [3] 曹剑,王岩,赵明旺. 生物质锅炉管式空气预热器堵灰的分析与优化[J]. 锅炉制造,2024(6):11-13,23.
- [4] 蒋高明,庄会永. 生物质直燃发电:未来能源发展新趋势[J]. 发明与创新(综合版),2009(2):37.
- [5] 王文,万显君,别如山. 试论生物质直燃发电现状及发展趋势[J]. 农技服务,2016,33(14):151.
- [6] ZHANG H L, YU C J, LUO Z Y. Investigation of ash de-position dynamic process in an industrial biomass CFB boiler burning high alkali and chlorine fuel[J]. RSC Advances,2020,10(36):420-426.
- [7] 范浩东,单雄飞,张曼,等. 生物质流化床结渣、沾污特

性及抑制方法研究进展[J]. 洁净煤技术,2020,26(S1):1-6.

- [8] 蔡文博,王一坤,成沛坤,等. 生物质Cl的析出迁移特性及对锅炉受热面腐蚀研究进展[J]. 热力发电,2019,48(12):1-7.
- [9] 邓磊,张涛,刘银河,等. 水洗对生物质燃料特性及燃烧特性的影响[J]. 工程热物理学报,2010,31(7):1239-1242.
- [10] STEENARI B M, LUNDBERG A, PETTERSSON H, et al. Investigation of ash sintering during combustion of agricultural residues and the effect of additives[J]. Energy & Fuels,2009,23(11):5655-5662.
- [11] 朱文斌. 生物质锅炉过热器受热面金属积灰腐蚀特性研究[D]. 济南:山东大学,2019.
- [12] 王浩,刘成威,覃恩伟,等. 生物质锅炉受热面高温腐蚀分析及对策[J]. 热喷涂技术,2022,14(4):63-70.
- [13] 李华壮. 生物质锅炉过热器高温腐蚀性能分析[J]. 全面腐蚀控制,2024,38(8):96-98.
- [14] 胡睿,万诗琪,毛峰,等. 农业废弃物水洗前后热解特性的变化[J]. 燃料化学学报,2021,49(9):1239-1249.

Study on the Influencing Factors of High Temperature Corrosion on the Heating Surface of Biomass Boiler

DING Qing, YANG Wanting, YAO Xiwen, XU Keqiang, DING Wenbo, DENG Yali
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The corrosion control of the heating surface of biomass boiler of power plant is the key technology for the effective utilization of biomass energy. It is of great significance to study the influencing factors of high temperature corrosion of the heating surface of biomass boiler for guiding the safe operation of biomass boiler. In this paper, the common biomass-maize straw in China was taken as the research object. Based on the tube furnace experimental system, the experimental platform of metal heating surface deposition corrosion was built. The effects of ash, washing and additives on the high temperature corrosion of boiler heating surface in biomass power plant were deeply studied, which provides theoretical support for the corrosion prevention and control of biomass boiler. The results show that the presence of biomass ash will accelerate the corrosion of the heating surface of the biomass boiler. The corrosion rate of the boiler with ash deposition is 21.15% higher than that without ash deposition. Washing and adding mineral additives will inhibit the corrosion of biomass ash on the heating surface of boilers. Under the condition of simulated boiler temperature of 650 °C, the corrosion rate of biomass ash after washing decreased by 8.93%, while the corrosion rate of biomass ash after adding 5% kaolinite decreased by 9.62%.

Key words: biomass boiler; high temperature corrosion; corn stover; water washing; additives