



洁净煤技术  
*Clean Coal Technology*  
ISSN 1006-6772, CN 11-3676/TD

## 《洁净煤技术》网络首发论文

题目： 燃煤流化床锅炉耦合含碳废弃物燃烧技术研究进展  
作者： 刘向民，张津铭，张涛，袁天霖，李惠彦辰，杨琨，王长安，车得福  
DOI： 10.13226/j.issn.1006-6772.23072501  
网络首发日期： 2023-12-05  
引用格式： 刘向民，张津铭，张涛，袁天霖，李惠彦辰，杨琨，王长安，车得福. 燃煤流化床锅炉耦合含碳废弃物燃烧技术研究进展[J/OL]. 洁净煤技术.  
<https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.23072501>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.23072501

## 燃煤流化床锅炉耦合含碳废弃物燃烧技术研究进展

刘向民<sup>1</sup>, 张津铭<sup>2</sup>, 张涛<sup>1</sup>, 袁天霖<sup>2</sup>, 李惠彦辰<sup>2</sup>, 杨琨<sup>1</sup>, 王长安<sup>2\*</sup>, 车得福<sup>2</sup>

(1.上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240; 2.西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 在我国双碳目标的背景下, 如何高效利用含碳废弃物受到了广泛关注。本文介绍了流化床掺烧含碳废弃物的现状及研究进展, 着重关注了流化床掺烧含碳废弃物的燃烧控制、污染物排放特性以及积灰结渣腐蚀规律, 探讨各过程反应机理、分析总结相关研究现状并展望未来发展方向。首先, 在掺烧燃烧控制方面, 增大农林生物质的掺烧比例一般可以提高燃烧性能, 而增大污泥的掺烧比例则对燃烧稳定性有不利影响。最佳燃烧工况参数需要考虑燃煤与含碳废弃物双方燃料特征并针对燃料特性的合理配风。其次, 在污染物排放控制方面, 流化床掺烧相对其他方式较为清洁, 但满足超低排放标准需要采取更先进的技术, 针对 SO<sub>2</sub> 有超细石灰石脱硫技术, 针对 NO<sub>x</sub> 有多种低氮燃烧技术。最后, 在积灰结渣腐蚀方面, 掺烧含碳废弃物需要重点关注碱金属和 S、Cl 元素导致的积灰结渣腐蚀问题, 可以通过燃料预处理或添加剂以及控制炉膛温度减缓积灰结渣腐蚀速度, 材料方面可以替换耐腐蚀材料或布置耐蚀涂层。对于流化床掺烧含碳废弃物, 如何清洁高效地处理含碳废弃物同时最大限度资源化利用, 需针对具体问题进一步深入研究。

**关键词:** 流化床; 含碳废弃物; 掺烧; 污染物排放; 积灰结渣; 腐蚀

**中图分类号:** TK6

## A Review of Coal-Fired Fluidized Bed Boiler Coupled with Carbon-Containing Waste Combustion Technology

LIU Xiangmin<sup>1</sup>, ZHANG Jinming<sup>2</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, YUAN Tianlin<sup>2</sup>, LI Huiyanchen<sup>2</sup>, YANG Kun<sup>1</sup>,  
WANG Chang'an<sup>2</sup>, CHE Defu<sup>2</sup>

(1. Shanghai Power Generation Equipment Complete Design and Research Institute Co., Shanghai, 200240, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi, 710049, China)

**Abstract:** In the context of China's carbon peaking and carbon neutrality goals, how to efficiently utilize carbon-containing waste has received widespread attention. This paper introduces the current situation of carbonaceous waste utilization and the research progress of fluidized bed blending firing of carbonaceous waste and coal. This paper focuses on three key issues in the process of carbonaceous waste co-combustion with coal in fluidized bed: combustion control in the co-combustion process, pollutant emission characteristics of co-combustion in fluidized bed, and ash accumulation and slag corrosion characteristics. Firstly, in the combustion control of co-combustion, the blending of agricultural and forestry biomass can improve the combustion performance compared with coal

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52176129)

\* 通讯作者: 王长安 (1986.12-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事固体燃料高效清洁利用与碳捕集技术研究, Email: changanwang@mail.xjtu.edu.cn

combustion. While sludge blending has a negative impact on combustion stability. The optimal combustion parameters need to consider the fuel characteristics of both coal and carbon waste, and the reasonable air distribution for the fuel characteristics can make the fuel burn completely. Secondly, in terms of pollutant emission control, fluidized bed blending firing with carbonaceous waste is cleaner than other methods. However, more advanced technology is needed to meet the ultra-low emission standard. There are ultra-fine limestone desulfurization technologies for  $\text{SO}_2$  and different low- $\text{NO}_x$  combustion technologies for  $\text{NO}_x$ . Finally, in terms of ash slag corrosion, the blending firing of carbon-containing waste needs to focus on the problem of ash slag corrosion caused by alkali metals and S and Cl elements, which can be mitigated by fuel pretreatment or additives. Control of furnace chamber temperature can slow down the rate of ash slag corrosion. Materials can be replaced with corrosion resistant materials or arranged with corrosion resistant coatings. For fluidized bed blending of carbonaceous waste, how to cleanly and efficiently treat carbonaceous waste while maximizing the utilization of energy needs further in-depth study for specific problems.

Keywords: fluidized bed; carbon containing waste; co-combustion; pollutant emissions; fouling and slagging; corrosion

## 0 引 言

化石能源在当今人类社会生产生活中占有非常重要的地位,但在我国碳中和、碳达峰的背景下,我们需要合适的绿色替代能源来达成双碳目标<sup>[1]</sup>,因此风能、太阳能及生物质能等可再生能源在我国能源中的占比不断上升。生物质能是次于煤、石油、天然气的第四大能源,在一次能源中具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。生物质具有来源广、成本低以及绿色清洁等优点<sup>[3]</sup>,同时我国的生物质能比较丰富,如何利用好生物质能源是我国达成双碳目标中不可忽视的问题<sup>[4]</sup>。作为生物质能的重要组成部分,农林生物质和污泥属于典型的含碳废弃物,我国产量巨大,不进行资源化利用会占用大量土地资源、造成环境污染和能源浪费,因此需要重点关注如何高效清洁利用此类含碳废弃物。

通常,可以通过生物质直接燃烧技术或生物质与煤混烧发电技术来利用生物质能。其中,直接燃烧技术不仅需要针对生物质燃料重新设计锅炉,并且由于许多生物质燃料碱金属含量高的原因<sup>[5]</sup>,常常在运行过程中出现严重的积灰结渣问题而导致停炉事故。而这些含碳废弃物与煤掺烧则不仅可以有效的处理废弃物,而且可以有效降低燃煤锅炉碳排放,此外合理地选择生物质/煤的掺烧方案也可以改善煤的燃烧性能<sup>[6]</sup>,并进一步提高着火特性与燃烧效率。同时,掺烧含碳废弃物不需要对燃烧设备进行大规模改动,可以有效减少初期投资费用,较好地解决我国生物质能源利用效率低的问题。

在炉型选择问题上,煤粉炉中组织悬浮燃烧所需的高温环境与生物质的高碱特性之间存在一定的矛盾,高温下碱金属绝大部分进入气相,对炉膛及下游受热面造成很大的受热面沾污腐蚀危害,严重威胁动力设备安全正常运行。层燃炉中由于生物质燃料挥发

分含量较高,火焰中心温度较高,碱金属倾向于进入气相,随后造成一系列灰渣沾污腐蚀问题。同时层燃炉的燃料适应性较差,而不同生物质之间差异极大,当燃料种类改变时会造成燃烧效率降低以及受热面沾污腐蚀情况恶化<sup>[7]</sup>。流化床锅炉因为其低温燃烧特性、较好的燃料适应性以及较低的排放特性,在含碳废弃物掺烧利用技术中有着重要的实际应用前景。

流化床掺烧含碳废弃物也存在很多科学和技术问题需要重点关注,并在实际应用过程中切实解决,例如如何选择掺烧比例以及生物质种类,掺烧后是否会降低锅炉效率,燃烧生物质时的积灰结渣腐蚀问题以及污染物排放控制问题。目前,国内外针对流化床掺烧含碳废弃物已经开展了大量相关基础研究和技术开发工作,但是缺乏系统地总结流化床掺烧过程中燃烧控制、积灰结渣腐蚀以及污染物排放的技术特点、研究现状及进展。因此,本文总结流化床掺烧含碳废弃物过程中重要环节的技术发展现状及存在的核心关键科学问题,重点关注燃煤流化床掺烧过程燃烧控制、污染物排放特性以及积灰结渣腐蚀防控三个方面,并展望了该技术未来的发展前景,关注需要重点解决的问题,以期待能够对流化床掺烧技术的实际应用提供一定的技术指导和理论支撑。

## 1 流化床掺烧含碳废弃物技术

### 1.1 含碳废弃物基本特性

作为生物质能的重要组成部分,含碳废弃物通常包括农林生物质、城市污泥、工业有机固废等,农林生物质与污泥在我国产量巨大、含有一定的能量、且需要迫切处理,但是这两类废弃物的理化性质间差异巨大。通常,农林生物质的燃烧性能要远优于污泥,典型的农林生物质与污泥特性对比如表 1 所示,具有代表性的含碳废弃物的工业分析与元素分析如表 2

所示。污泥相对农林生物质灰分含量更高，挥发分与固定碳含量较低且热值较低。

农林生物质通常是指绿色植物通过光合作用合成的各种有机质组成的可再生类生物质，不包括化石能源。生物质能是一次能源中占比次于传统化石能源煤、石油以及天然气之后的第四大能源，占世界一次能源消耗比 14% 左右，其中木屑、秸秆和生活垃圾等常用于生物质发电<sup>[8]</sup>。常见农林生物质有木屑、树枝、小麦玉米等农作物秸秆、稻壳、甘蔗渣等。农林生物质含碳量较低、含氧量较高且含有较多水分，其热值偏低。农林生物质的氮、硫以及灰分含量相对煤较低，是一种清洁能源。

污泥是污水处理之后得到的产物，其主要为微生物形成的胶团和吸附的有机物和无机物构成，其中包含大量的氮、磷等有机养分，同时也含有许多有毒物质，如果不进行有效处置，会对生态和环境造成严重危害<sup>[9,10]</sup>。污泥中固定碳占比较低，同时还有较多灰分，但挥发分含量较高，挥发分的析出与燃烧是污泥燃烧的关键<sup>[11]</sup>。污泥水分含量大不利于燃烧，与煤掺烧可以有效地对污泥中的有机物进行热处理回收热值。然而，污泥中氮、硫元素含量通常较高，如果在污水处理过程中使用含氯药剂，则不能忽视氯元素，燃烧过程中如果控制不好容易产生相关气态污染物，造成环境污染。

表 1 生物质与污泥基本特性对比

Table.1 Comparison of basic characteristics of biomass and sludge

特性	农林生物质	污泥
成分特点	挥发分高，碱金属含量高	水分高，N、S 元素含量高
热值	中等	低
燃烧污染物排放	较为清洁	污染物排放较高
与煤掺烧情况	促进煤燃烧，提高掺烧时燃烧特性	燃烧特性差，掺烧比例大时降低锅炉效率，影响正常运行
掺烧所需注意事项	抑制玷污与腐蚀情况	如何维持锅炉效率，降低污染物排放，抑制锅炉玷污

表 2 具体燃料的工业分析与元素分析

Table.2 Industrial analysis and elemental analysis of some biomass and sludge

燃料种类	工业分析 <sub>ar</sub> (%)				元素分析 <sub>ar</sub> (%)					热值 (MJ/kg)
	水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	N	S	O	
干化污泥	7.10	40.83	49.77	2.30	19.54	2.35	2.29	2.05	25.83	8.87
市镇污泥	77.20	14.96	7.24	0	3.72	0.57	0.57	0.13	2.85	-
玉米秸秆	20	7.15	56.8	16.05	36.44	4.65	0.59	0.14	31.04	14.38
麦秆	10.84	9.31	67.7	12.15	39.41	4.1	0.46	0.2	35.68	13.82

## 1.2 流化床燃烧技术

不同于层燃和悬浮燃烧，流化床燃烧的温度低且炉膛温度均匀、燃料停留时间长、燃烧时混合强度大，同时有砂子和炉渣等作为流化介质，蓄热量大着火条

件好<sup>[12]</sup>。这些特点使得流化床对燃料的适应性强，污染物排放控制好，负荷的调节范围和变化速率大，积灰结渣相对较轻，在含碳废弃物处理领域有很好的发展应用前景<sup>[13]</sup>。表 3 为三种不同燃烧方式的特性对比。

表 3 不同煤燃烧方式的燃烧特性对比<sup>[14]</sup>

Table.3 Comparison of combustion characteristics of different coal combustion methods<sup>[14]</sup>

燃烧特性参数	层燃	室燃	流化床燃烧
燃烧温度 (°C)	1100~1300	1200~1500	850~900
燃料尺寸 (mm)	0~50	0~0.2	0~8
截面烟气流速 (m/s)	2.5~3	4.5~9	4.5~6.5
燃料停留时间 (s)	~1000	2~3	~5000
燃料升温速度 (°C/s)	1	10~10 <sup>4</sup>	10~10 <sup>3</sup>
挥发分燃尽时间 (s)	100	<0.1	10~50
焦炭燃尽时间 (s)	1000	~1	100~500

混合强度	差	强	强
燃料适应性	差	差	强
污染物排放情况	高	高	低

鉴于流化床燃烧的诸多优点, 北欧美国等发达国家很早就开始研究使用流化床锅炉来利用生物质能。同时, 上世纪我国优质煤矿资源产量逐渐减少, 低阶煤开采量越来越大, 煤质相较之前下降较多, 而常规煤粉炉对煤质有一定的要求, 低阶煤不符合常规锅炉对煤质的要求。上世纪 80 年代我国引进了循环流化床锅炉, 同时国内相关研究所与高校也先后投入循环流化床锅炉的研究以及产品的开发工作中, 希望新型的循环流化床燃煤锅炉可以较好地燃用劣质煤。随后, 我国各大高校和研究所也开始研究流化床燃烧利用生物质能, 包括纯烧生物质与掺烧生物质技术<sup>[15]</sup>。初期研究通过引进、消化吸收国外先进技术, 随后不断在此基础上推广流化床技术, 并不断设计更大容量、更高效率的循环流化床锅炉。例如, 四川白马循环流化床锅炉示范基地已投运具有自主知识产权的国产 300 MW 级循环流化床锅炉<sup>[8]</sup>。

生物质燃料在流化床内的燃烧是一个包括磨损、破碎和燃烧化学反应的复杂的耦合过程。生物质燃烧主要分为四个阶段: 预热阶段、干燥阶段、挥发分析出燃烧阶段与焦炭燃烧阶段<sup>[16]</sup>。其中焦炭燃烧阶段污泥符合缩核模型而秸秆颗粒不能完全符合缩核模型<sup>[17]</sup>。牛欣<sup>[18]</sup>研究了污泥在赤铁矿为载氧体的化学链燃烧中的燃烧机理, 化学链燃烧通过载氧体在两个反应器中循环实现氧的转移, 梯级利用能量, 提高能量转化效率。

### 1.3 煤与含碳废弃物掺烧技术

含碳废弃物利用方法主要有气化发电、与煤混燃发电以及直接燃烧发电三种, 其特点如表 4 所示。其中煤与含碳废弃物混燃技术在国外已经成熟, 建立了许多工程项目以及较为完善的技术体系<sup>[3,19]</sup>。我国学者也对混燃技术做了大量卓有成效的研究工作, 有相应的混燃工程应用项目投入运行。

表 4 生物质发电技术对比<sup>[7]</sup>

Table.4 Comparison of biomass power generation technologies<sup>[7]</sup>

利用方法	与煤混烧发电	直接燃烧发电
系统、结构	简单	中等
投资	小	中等
工程应用	燃煤机组改造	较多投产
难点问题	掺烧比例受限	锅炉腐蚀

对于煤与含碳废弃物在流化床锅炉中的燃烧效果, 有较多实验研究表明了生物质的加入促进了煤的燃烧, 有利于煤的燃尽, 提高了总体燃烧特性<sup>[20]</sup>。刘翔等<sup>[21]</sup>验证了烟煤与生物质混燃的燃烧特性要优于纯烟煤, 探究了生物质比例和升温速率对燃烧特性的影响。Wang 等<sup>[22]</sup>研究了神华烟煤与稻壳、松木的混燃行为, 并将实验数据拟合为两个平行反应的  $n$  阶速率模型, 分析生物质添加量对混燃性能的影响。闵凡飞<sup>[23]</sup>还发现变质程度不同的煤种与生物质掺烧时表现出的燃烧特性不同, 对于褐煤和烟煤, 加入生物质可以降低着火点、加快燃烧速率并增加燃烧强度, 对于无烟煤着火温度影响较小, 燃尽温度则会降低。徐向鹏等<sup>[24]</sup>表明, 煤泥中掺入污泥可较好地利用污泥挥发分高的特性, 提高混燃时的着火性能。还有许多学者分析了生物质掺烧比例对燃烧的影响, Li 等<sup>[25]</sup>用非

等温热重分析了煤与稻草热解残渣的共燃, 结果表明热解残渣可以提高褐煤的反应性与燃烧效率, 并在 60% 残渣掺烧比例下表现活化能最低。Wang 等<sup>[26]</sup>将平朔煤与稻草、木屑进行掺烧, 得出生物质的加入可以促进煤的热解和燃烧, 同时生物质加入比例越大燃烧性能越好, 在 70% 时最大燃烧速率和燃烧性能最好。孟涛等<sup>[27]</sup>通过热重分析污泥与煤的燃烧特性, 污泥减重主要集中在 200 °C 以下, 而煤主要的减重集中在 400~1000 °C, 这说明在煤中掺烧污泥可以提高着火特性。Gao 等<sup>[28]</sup>的实验结果同样表明在无烟煤中掺烧污泥可以提高着火性能, 但污泥比例从 5% 增长到 20% 时, 可以明显注意到混合燃料残渣率增加, 综合性能指标降低。侯海盟<sup>[9]</sup>的研究结果表明污泥与煤掺烧时综合燃烧指数随污泥掺烧比例增大而增大, 但掺烧比例在 40% 以下时可以降低着火温度、提高燃尽特性。

柯希玮等<sup>[29]</sup>的研究结果表明少量的污泥掺烧对锅炉整体运行参数影响较小,物料循环性能和尾部对流换热性能稍有提升,炉内传热系数稍有下降。蒋孟宴<sup>[30]</sup>等进行了市政污泥与烟煤的掺烧试验,重点研究不同条件下燃烧效率以及氮硫元素的存在形式以及燃烧过程中的转化特性。田甲蕊<sup>[31]</sup>针对印染污泥处置技术开展研究,结果表明对印染污泥添加生石灰硫酸铝改性压滤后干化,再与煤再流化床中掺烧既可以达到炉内脱硫效果,还可以在较高的燃烧效率下资源化利用印染污泥。值得注意的是,飞灰中的重金属富集率较高,提高除尘效率并妥善处置飞灰以避免重金属污染<sup>[32]</sup>。胡修猛<sup>[33]</sup>研究纺织工业固废在流化床中的掺烧效果,结果表明纺织废料重金属、氮硫含量低且热值较高,掺烧燃烧性能好且降低了SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>排放量。杨东伟<sup>[34]</sup>建立模型研究流化床中掺烧的工业固废比例以及热值来得到最佳掺烧方案。

对于生物质掺烧促进燃烧的机理, Magalhães 等<sup>[35]</sup>指出褐煤与橄榄渣混烧可以提高燃烧性能,主要由于提高了燃烧时加热速率,提高了燃料的反应性,降低了表观活化能。Ullah 等<sup>[36]</sup>也得出松木与煤混燃时着火性能与热反应性得到改善。通常,学者认为掺烧生物质可以降低活化能,提高燃烧性能,但是 Jayaraman 等<sup>[37]</sup>发现某些生物质(如榛子壳)由于其孔隙结构燃烧时活化能比原煤更高,导致掺烧时活化能增加。Junga 等<sup>[38]</sup>发现鸡粪也会导致掺烧时活化能增加。同时由于生物质燃烧相对煤来说生成污染物较少,因此煤与生物质掺烧可以降低污染物排放, Yu 等<sup>[39]</sup>说明生物质与褐煤的掺烧不仅提高了褐煤的反应性,同时也使混燃时相对煤燃烧污染物排放降低。

总的来说,煤与农林生物质掺烧相对于纯煤燃烧有更好的着火特性以及其它燃烧性能,与污泥掺烧在一定比例内也可以提高燃烧性能。同时含碳废弃物相对煤来说是一种清洁可再生能源,掺烧含碳废弃物可以降低燃烧过程碳排放,助力我国双碳目标的实现。

## 2 流化床掺烧燃烧控制技术

流化床掺烧含碳废弃物可以通过控制燃料供给与空气供给两个方面调控燃烧。燃料供给方面,根据与煤掺烧的含碳废弃物种类选择掺烧比例以及燃料入炉前的处理方法可以控制燃烧效率以及炉膛温度等参数。空气供给方面,不同的空气过量系数,一二次风配比以及具体送风方案可以调控炉内燃烧。

### 2.1 燃料供给控制

锅炉可以通过控制入口燃料的性质来调节燃烧,其中相对可操控的是含碳废弃物掺烧比例。在农林生物质掺烧燃料供给控制方面,唐秀能<sup>[8]</sup>进行了不同比例的煤与木屑在流化床的混烧实验,实验结果表明燃烧前期主要为木屑燃烧,而煤主要集中在燃烧后期,两者混烧可以改善着火特性和燃尽特性,提高木屑利用率,同时生物质比例越大,炉膛温度越均匀。谢兴旺<sup>[40]</sup>表明掺烧比例越大,CO排放浓度和飞灰含碳量越低,燃烧越完全。张金<sup>[41]</sup>的实验结果同样表明木屑的加入使混燃CO排放和飞灰含碳量降低,且掺烧比例越大降低幅度越大。Liu 等<sup>[42]</sup>进行的玉米秸秆与煤混燃也得出相近的结果。寿恩广<sup>[43]</sup>表明对于不同灰分含量的生物质,生物质掺烧比例对燃烧的影响不同,低灰分的生物质掺烧比例越大,TG曲线向低温区移动,燃尽温度降低,综合燃烧指数增大,但对于高灰分生物质,在较小掺烧比例下能改善燃烧性能,但在超过一定值后反而会使掺烧性能恶化。任罡<sup>[44]</sup>研究了烟梗与煤的掺烧试验,烟梗比例过大时着火性能较好,但燃尽性能较差,同时热值也较低,燃烧性能变差,所以掺烧比例需要综合考虑着火指数、燃尽指数以及放热性能。孙磊<sup>[45]</sup>则对生物质掺烧锅炉进行烟分析,分析其节能特性,结果表明烟效率随掺烧秸秆掺烧比例增大而降低。

对于污泥则有不同的规律,曹通等<sup>[46]</sup>针对一台循环流化床锅炉,基于Fluent数值模拟软件模拟市镇污泥、工业污泥在不同掺混比例下与煤粉在流化床中的燃烧过程。结果表明,小比例掺烧污泥不会影响锅炉效率,同时在技术上也易于实现,但大比例掺烧会对燃烧产生明显影响,应尽量避免掺烧大比例污泥。胡桂秋<sup>[47]</sup>在不同掺烧比的工业试验中得出掺烧垃圾会使床温下降,影响锅炉燃烧效率,掺烧比例过大会影响锅炉的燃烧和传热,这时采用发热量更高的煤种混烧可以维持较高的床温。刘聪<sup>[48]</sup>进行了污泥掺烧的现场实验,污泥掺烧比例在6%以下时锅炉效率无明显变化,但比例高于10%时锅炉效率则会由明显下降,在燃烧前干化湿污泥则可以更大限度的利用污泥,提高掺烧比例。

通过控制燃料可以调节燃烧,控制炉膛温度以及锅炉出力等参数。已有的研究表明,通常对于部分农林生物质,掺烧比例越大,燃烧越完全,燃尽温度低且炉膛温度分布更均匀,但也有些生物质掺烧与上述规律不同。对于污泥掺烧,虽然可以提高着火性能,但掺烧比例越大,对锅炉效率的降低效果越明显,应尽量避免大比例掺烧污泥。

## 2.2 配风控制优化燃烧

通过控制进入炉膛的空气也可以调节燃烧特性,空气供给控制包括控制一次风二次风比例以及风量。谢兴旺<sup>[40]</sup>研究了过量空气系数和二次风率对燃烧特性的影响,结果表明过量空气系数增加,稀相区温度和CO排放浓度先上升后下降,飞灰含碳量逐渐降低;二次风率增加,稀相区温度影响很小,CO排放浓度先降低后升高,飞灰含碳量降低。鄢晓忠等<sup>[49]</sup>同样发现选取合适的流化风量、床温、过量空气系数和一次风配比可以减少未完全燃烧损失以及排烟损失。唐秀能<sup>[8]</sup>表明增大风量可以使燃烧中心上移,密相区温度降低,炉膛温度分布和炉内热量分布更均匀。王昕<sup>[50]</sup>进行了流化床锅炉煤与生物质富氧燃烧实验,在整体氧浓度不变的情况下,降低一次风氧浓度可以使密相区温度下降,使炉膛温度更均匀,燃烧更容易控制。胡桂秋<sup>[47]</sup>得出在流化床锅炉中垃圾掺烧比例过大时,可以在总风量不变的情况下降低一次风比例,提高二次风率来满足炉膛上部燃烧需要,提供充足的返料风来满足返料床内燃烧。同时,富氧燃烧也可以提高燃烧性能,Gao等<sup>[28]</sup>将氧浓度从21%增加到30%,样品的着火温度和燃尽温度降低,最大质量损失率和综合性能指数增加。总的来说,增大总风量、增大二次风占比可以促进掺混燃料完全燃烧,降低密相区温度,使炉膛温度更均匀,具体的配风还需要针对不同的燃料性质及锅炉运行状况来确定。

## 3 流化床掺烧污染物控制技术

### 3.1 流化床掺烧污染物排放现状

应用流化床掺烧煤与含碳废弃物已经是我国较为普遍的利用生物质能的方式之一,这主要由于循环流化床锅炉污染物排放低的特点,在保证较高的燃烧效率和燃料适应性较好的情况下,具有非常良好的环保性能<sup>[51]</sup>。此外,生物质的硫氮含量较低,同时含有较高的碱金属及其氧化物,可以与SO<sub>2</sub>反应生成硫酸盐,具有一定的固硫效果,煤与生物质掺烧与纯煤燃烧相比污染物排放更低<sup>[6,52]</sup>。

但循环流化床也存在部分需要解决的问题。虽然循环流化床的低污染物排放特性被人们所青睐<sup>[53]</sup>,但是炉内高效率脱硫与低氮燃烧所需要的燃烧条件一定程度是互相矛盾的,需要进一步优化或在合理的范围内取舍。同时近几年来NO<sub>x</sub>排放标准不断提高<sup>[54]</sup>,超低排放标准要求烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度(基准含氧量6%)分别不超过5 mg/m<sup>3</sup>、35 mg/m<sup>3</sup>、50 mg/m<sup>3</sup>,虽然循环流化床的NO<sub>x</sub>排放较低,但

如何控制污染物排放达到超低排放标准,需要进一步组织低氮燃烧,或增加炉外烟气脱硝技术来满足排放要求。

同时掺烧污泥时还需要注意SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>以外的污染,如飞灰和炉渣中的重金属对环境的影响以及二恶英排放量是否超标。飞灰相对于炉渣来说更容易富集重金属<sup>[32]</sup>,某垃圾焚烧发电厂结果表明市镇污泥的掺烧使得飞灰中铬铜含量增加,需要注意脱灰并妥善处理以避免重金属污染。有机污泥掺烧会影响烟气组分影响二恶英生成<sup>[55]</sup>,控制污泥掺烧比例以及烟气温度避免二恶英大量合成<sup>[56]</sup>,二恶英的排放量还与掺烧污泥中氯含量正相关<sup>[57]</sup>,控制氯含量同样可以减少二恶英排放量。

### 3.2 流化床掺烧污染物排放特点

循环流化床污染物低排放的优势在硫氧化物、氮氧化物以及有毒物质排放均有体现:

(1)对于硫氧化物,循环流化床的炉内脱硫技术非常成熟,可以在燃烧过程中直接向流化床炉膛内加入脱硫剂(石灰石、生石灰等),使得燃烧过程中产生的SO<sub>2</sub>与脱硫剂发生反应达到脱硫效果<sup>[58]</sup>。同时循环流化床内流动强烈,燃料与脱硫剂在多次循环过程中可以达到很高的脱硫效率。

(2)对于氮氧化物,燃料型、热力型以及快速型三种NO<sub>x</sub>生成量都比较低。其中快速性NO<sub>x</sub>占比较低,循环流化床炉膛温度较低,热力型NO<sub>x</sub>几乎不会产生,这使得流化床原始NO<sub>x</sub>排放主要集中在燃料型NO<sub>x</sub><sup>[59]</sup>。同时烟气循环使得燃烧气氛为弱还原性,可以使部分已生成的燃料型NO<sub>x</sub>转化为N<sub>2</sub>,进一步降低燃烧过程中产生的NO<sub>x</sub>。

(3)对于污泥等有害成分含量较高的生物质来说,循环流化床炉内温度分布均匀且烟气平均停留时间长,可以较好地处理有害物质,从而降低有毒排放物的产生。

### 3.3 常见污染物的生成机理

#### 3.3.1 SO<sub>2</sub>生成机理

循环流化床锅炉中煤与含碳废弃物掺烧过程中产生的硫氧化物主要为SO<sub>2</sub>。硫元素在燃料主要有两种存在形式,以蛋白质、硫脂质等形式存在的有机硫,以及主要以硫酸盐形式存在的无机硫。

燃烧过程中主要有两种途径生成SO<sub>2</sub>,在燃料挥发份析出着火阶段,蛋白质硫脂质等受热分解并氧化生成SO<sub>2</sub>,在固定碳燃烧阶段,有部分硫酸盐分解生成SO<sub>2</sub>。Dayton等<sup>[60]</sup>探究了SO<sub>2</sub>在生物质燃烧阶段的析出情况,发现在挥发分析出燃烧以及焦炭燃烧两个

阶段分别有不同的方式生成  $\text{SO}_2$ 。Knudsen 等<sup>[61]</sup>对燃烧过程中硫的析出做了量化分析,  $500^\circ\text{C}$  以下时仅有少量硫析出, 通过有机硫的分解产生。当达到  $950^\circ\text{C}$  时, 由于高温下钾钙等金属更容易形成硅酸盐, 硫的析出率增加到 85%。

### 3.3.2 $\text{NO}_x$ 生成机理

氮氧化物根据生成机理不同通常被分为燃料型  $\text{NO}_x$ 、快速型  $\text{NO}_x$  和热力型  $\text{NO}_x$ 。其中由于流化床的燃烧特性, 热力型与快速型  $\text{NO}_x$  生成极少, 燃料型  $\text{NO}_x$  占比较大。燃料型  $\text{NO}_x$  是燃料中含有的氮元素在燃烧过程中氧化生成的, 其生成机理未完全定论。燃料中的氮元素首先在挥发分析出及燃烧阶段分解为氰化氢 (HCN)、氨 ( $\text{NH}_3$ ) 和 CN 等中间反应体。HCN 及  $\text{NH}_3$  有如下几种主要反应路径<sup>[62]</sup>。

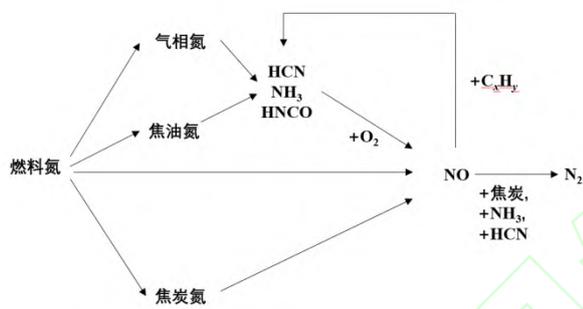


图 1 燃料氮转化路径<sup>[62]</sup>

Fig.1 Fuel nitrogen conversion pathway<sup>[62]</sup>

中间反应体进一步氧化成为  $\text{NO}_x$ , 或被还原为  $\text{N}_2$ 。通过操控燃烧时的气氛, 或使生成的  $\text{NO}$  与焦炭

表 5 烟气脱硫技术对比<sup>[67]</sup>

Table5 Flue gas desulfurization technology comparison<sup>[67]</sup>

脱硫工艺	硫分适应性	脱硫效率 (%)	系统	投资及运行费用
半干法脱硫	中、低硫	$\geq 95$	简单	低
湿法脱硫	高硫	$\geq 98$	复杂	高

单独使用常规的炉内脱硫技术的情况下不能达到超低排放标准, 增大炉内石灰石用量会影响锅炉效率, 而加装炉外烟气脱硫装置需要较高的成本, 如何在不加装炉外烟气脱硫装置的情况下达到超低  $\text{SO}_2$  排放标准是目前需要解决的难题之一。流化床锅炉中超细石灰石脱硫技术可以较好地达成超低  $\text{SO}_2$  排放要求。

超细石灰石指的是有一半石灰石粒径小于  $15\ \mu\text{m}$  的同时绝大部分石灰石粒径要小于  $45\ \mu\text{m}$  的石灰石粉。相对于常规技术所用的石灰石颗粒, 选择非常小的石灰石粒径可以大幅度增加石灰石的比表面积

发生反应<sup>[63]</sup>, 可以尽可能多的将氮元素转化为  $\text{N}_2$  而不是  $\text{NO}_x$ , 达到低氮燃烧的目的。燃料中的氮元素根据反应条件部分被氧化为  $\text{NO}_x$ , 剩下的被还原为  $\text{N}_2$ 。

热力型  $\text{NO}_x$  是由于燃烧过程中空气中  $\text{N}_2$  在高温下氧化产生的, 热力型  $\text{NO}_x$  的生成速率与温度之间的关系参照阿雷尼乌斯定律变化, 随温度升高产生速率增大, 当温度低于  $1300^\circ\text{C}$  时, 其生成量小到几乎不计, 所以在流化床的燃烧温度下热力型  $\text{NO}_x$  可忽略。快速型  $\text{NO}_x$  是当反应区燃料浓度较大时, 通过燃烧时燃料产生的  $\text{CH}$  原子团撞击  $\text{N}_2$  分子生产中间化合物, 中间反应产物如  $\text{N}$ 、 $\text{CN}$ 、 $\text{HCN}$  再进一步被氧化成  $\text{NO}_x$ 。快速型  $\text{NO}_x$  多产生于油气燃烧的情况下,  $\text{CH}$  基团较多且周围贫氧, 在煤燃烧时占比较少可忽略不计<sup>[64,65]</sup>。

## 3.4 流化床污染物控制技术

### 3.4.1 低硫氧化物燃烧技术

流化床因为其独特的炉内喷洒石灰石脱硫技术在利用劣质燃料方面得到大规模发展。而炉内脱硫相对于其他烟气脱硫方式来说系统更简单, 投资及运行成本更低。但超低  $\text{SO}_2$  排放标准出台后, 部分机组的炉内脱硫技术并不能达到  $\text{SO}_2$  排放低于  $35\text{mg}/\text{m}^3$  的标准, 需要加大炉内脱硫石灰石用量或加装炉外烟气脱硫技术。赵强等<sup>[66]</sup>针对电站 CFB 锅炉的研究结果表明, 炉内脱硫结合尾部半干法脱硫可以稳定达到超低排放标准。半干法脱硫和湿法脱硫作为两种较为成熟的脱硫技术, 主要不同为反应介质状态, 其特点对比见表 5。

<sup>[68,69]</sup>, 增大反应速率来达到高效脱硫。Fan 等<sup>[70]</sup>研究了高反应性石灰石吸附剂的开发及其较好的硫捕获速率和能力, 减小石灰石颗粒尺寸以获得更高的反应速率, 分析尺寸小于  $50\ \mu\text{m}$  的吸附剂在煤燃烧过程中对硫捕获的应用。岳光溪等<sup>[71]</sup>研究表明, 更细的石灰石颗粒会使利用效率显著增加, 将循环灰的中位数粒径降低为  $100\ \mu\text{m}$  时, 炉内脱硫钙硫比为 1.5,  $\text{SO}_2$  排放浓度可以小于  $50\ \text{mg}/\text{m}^3$ 。

除超细石灰石外, 锅炉布风对  $\text{SO}_2$  排放的影响也需要注意, 一次风比例太低时, 生石灰与燃料的混合强度较低, 不能发挥很好的固硫作用, 而一次风比例太大时又会导致反应时间太短,  $\text{SO}_2$  排放量增加。二

次风量增加可以使炉内流场更复杂,使密相区与稀相区混合增强,促进灰与  $\text{SO}_2$  反应,自脱硫效果增强<sup>[72]</sup>。同时过量空气系数在保证燃烧完全的情况下尽量减小以降低排气中的  $\text{SO}_2$  质量浓度<sup>[30]</sup>。

热解煤是目前重要的煤洁净利用燃料处理技术,可以较好的利用劣质燃料。可以通过该技术将低阶煤制成低硫洁净半焦,与原煤相比,低硫洁净半焦中硫含量显著降低<sup>[73]</sup>。该技术在燃烧前通过热解将燃料中的硫脱除,可以有效实现超低  $\text{SO}_2$  原始排放,但是热解过程成本较高,如何综合利用附加产物,降低该技术的成本仍需要进一步研究。

总体而言,实现超低  $\text{SO}_2$  排放可以通过燃烧前将其制备成低硫半焦进而燃烧,或是减小炉膛内脱硫剂

的粒径,增大脱硫剂比表面积,加快反应速率来达到更好的脱硫效果,同时需要注意良好的布风来保证较好的脱硫环境。

### 3.4.2 低氮氧化物燃烧技术

流化床因为其低温燃烧特性在氮氧化物排放方面具有一定的优势,较低的氮氧化物原始排放可以减轻氮氧化物排放控制成本。在  $\text{NO}_x$  超低排放标准出台后,一些原有机组并不能满足低于  $50 \text{ mg/m}^3$  的要求,达到超低排放标准需加装烟气脱硝装置实现  $\text{NO}_x$  深度脱除。炉外烟气脱硝技术主要有 3 种:选择性催化还原脱硝 (SCR) 技术、选择性非催化还原脱硝 (SNCR) 技术和 SNCR-SCR 联合技术,3 种技术对比见表 6。

表 6 烟气脱硝技术对比<sup>[67]</sup>

Table.6 Flue gas denitrification technology comparison<sup>[67]</sup>

烟气处理技术	脱硝效率 (%)	投资成本	运行成本	缺点
SNCR	40~70	低	低	高温,氨气泄露风险
SCR	80~90	低	高	氨气泄漏,设备腐蚀
SNCR-SCR	70~90	高	低	系统复杂

为了避免加装烟气脱硝装置带来的高额成本,能够达到超低排放标准的 CFB 超低  $\text{NO}_x$  燃烧技术开发非常重要。采用后燃技术以及优化流化床布风等运行工况组织流态可以达到超低  $\text{NO}_x$  燃烧排放标准。

循环流化床后燃技术是一种新型煤燃烧技术,通过在燃烧过程中将空气化学计量比降低到相当低的水平,可以显著降低烟道气中的  $\text{NO}_x$  排放浓度。同时  $\text{NH}_3$  和  $\text{HCN}$  的排放浓度在整个过程中也保持在较低水平,将大部分燃料 N 还原燃烧环境中转化为  $\text{N}_2$ 。针对还原气氛导致未完全燃烧产生的 CO 和焦炭,设计了后燃室燃料二次燃烧来保证燃烧效率,未完全燃烧的物质在后续燃烧过程中进一步燃烧,同时这些未燃烧物质可以在后燃室营造还原性氛围,还原部分  $\text{NO}_x$ 。这种综合燃烧方法可以实现循环流化床的超低  $\text{NO}_x$  排放。Zhou 等<sup>[74]</sup>探讨了在加装后燃烧室的新型循环流化床试验平台上加强控制燃烧产生的氮氧化物排放的可能措施,研究发现在二次风布置、稀氧燃烧和二次燃烧条件下,二次燃烧能够带来  $\text{NO}_x$  排放的最终浓度降至仅  $51 \text{ mg/m}^3$  (在  $6\% \text{ O}_2$  下),同时保持  $98.6\%$  的高燃烧效率。Zhou 等<sup>[75]</sup>研究了低阶煤在不同空气化学计量比和后燃室空气布置的影响下的燃烧特性和  $\text{NO}_x$  排放特性,在空气化学计量比为  $0.963$ ,优化后燃室运行工况后排放量降至  $48.7 \text{ mg/m}^3$ ,达到

超低排放标准。Gong 等<sup>[76]</sup>研究了空气喷射位置对二次燃烧  $\text{NO}_x$  排放的影响,结果表明喷口位置上移后  $\text{NO}_x$  排放更低。Xiao 等<sup>[77]</sup>研究了不同进料位置和后燃室空气布置对原始  $\text{NO}_x$  排放特性的影响,后燃风级数的增加可以大幅减少  $\text{NO}_x$  排放量,但为了平衡 CO 排放量,选取两级后燃风并合理布置,最终达到超低排放要求。Xiao 等<sup>[78]</sup>还研究了炉内空气计量比对高温后燃技术的影响以及不同气氛下 N 元素的迁移,随着炉内空气化学计量比的降低,更多的燃料氮将保留在焦炭中,而不是释放到气相中。Ji 等<sup>[79]</sup>的研究结果表明随着助燃空气速度和助燃空气喷嘴数量的增加,  $\text{NO}_x$  原始排放量减少,CO 排放量略有增加,后燃烧技术使  $\text{NO}_x$  原始排放量更低,可以满足超低排放要求。后燃技术本质上仍然是通过制造还原性气氛来阻断燃料型  $\text{NO}_x$  的产生,该方法可以使全炉膛处于还原性气氛的同时还保证燃烧效率,是一种行之有效的低  $\text{NO}_x$  燃烧方法。

还可以通过控制一二次风配比、二次风布置位置以及优化床料粒径等运行工况参数来达到低  $\text{NO}_x$  排放的目的。降低一次风比例的同时上移二次风口,可以很好的提高炉膛密相区还原性并且使炉膛密相区范围扩大,使燃烧处于还原性气氛降低  $\text{NO}_x$  生成,同时未燃尽的碳在稀相区中继续燃烧的同时对  $\text{NO}_x$  进行还原。该技术增强物料循环,会使炉膛温度降低,

在低氮燃烧方面更有优势。李竞岌等<sup>[54]</sup>论证了组织炉膛内流态在低  $\text{NO}_x$  排放方面上的一定优势,包括炉膛温度控制与还原性气氛的构造,该技术在循环流化床试验中实现了超低排放。Li 等<sup>[80]</sup>在 150 t/h、260 t/h 以及 560 t/h CFB 锅炉上进行流态组织,同时使用石灰石脱硫,排放量达到超低排放标准且未发现燃烧效率明显下降。周托等<sup>[81]</sup>根据此原理设计了相应的  $\text{NO}_x$  低排放 CFB 锅炉,优化整体结构和二次风系统,完成原始排放低于  $\text{NO}_x$  超低排放标准的要求。优化流化床布风等运行工况组织流态同样也是制造还原性气氛,通过调节运行参数来增加有效细粒,提高循环倍率,从而使密相区还原性物质进入炉膛空间,达到低  $\text{NO}_x$  燃烧效果。

不同的低氮燃烧技术主要是通过营造还原性气氛来阻断燃料型  $\text{NO}_x$  生成,这说明组织好燃烧的情况下燃煤流化床掺烧含碳废弃物可以达到超低  $\text{NO}_x$  排放标准。

## 4 流化床掺烧积灰结渣腐蚀控制技术

### 4.1 流化床中积灰结渣腐蚀问题

积灰主要由生物质中碱金属进入气相后发生一系列复杂物理化学反应后凝结、附着或沉降在受热面上形成。结渣是燃烧过程中发生在烟气侧的复杂物理化学过程,由熔融或半熔融灰颗粒在温度较高的壁上不断凝结并生长形成。积灰结渣会导致受热面传热能力降低,降低热经济性的同时严重威胁锅炉安全稳定运行,结渣还会与高温腐蚀等其他问题伴随出现<sup>[82]</sup>。腐蚀会对金属管壁造成严重危害,导致锅炉穿孔泄露甚至爆炸。循环流化床在积灰结渣方面与煤粉炉相比有较大不同,主要在于循环流化床锅炉中燃烧温度较低,所以燃烧中挥发的碱金属相对较少,更多的保留在灰中,有利于缓解积灰结渣情况。同时较低的燃烧温度不会导致飞灰熔融,结渣相对煤粉炉较轻<sup>[83]</sup>。循环流化床炉膛、分离器内充满坚固的床料颗粒,这些颗粒在循环过程中会不断冲刷受热面,减轻锅炉受热面积灰<sup>[84]</sup>。流化床锅炉中具体的积灰结渣腐蚀特性与选用的燃料有关<sup>[85]</sup>,不同含碳废弃物之间元素成分区别可能会很大,从而导致的积灰结渣腐蚀特性也不同<sup>[86,87]</sup>。

### 4.2 流化床掺烧时的积灰结渣腐蚀机理

#### 4.2.1 积灰机理分析

管壁灰分沉积机理图解如图 2 所示。积灰机理主要包括惯性碰撞 (Inertial impaction)、热泳力 (Thermophoresis)、凝结 (Condensation)、涡流沉

积 (Eddy deposition) 和化学反应 (Chemical reactions)。惯性碰撞一般被认为是主要的飞灰沉积机制,烟气流经管壁时,较大的飞灰颗粒 ( $>10\ \mu\text{m}$ ) 因为其较大的惯性并不随流场越过障碍物,而是穿过流场撞击在管壁表面导致飞灰堆积。热泳力为飞灰粒子在非均匀温度场中流动而受到的力,气体分子在热侧动能更高,碰撞传递的动能更大,向温度更低一侧形成一个净作用力,该力作用在温度梯度的反方向上,使颗粒向温度较低区域迁移。凝结是烟气中的气态物质在受热面冷凝形成黏性薄膜,并吸收飞灰和其他沉积物产生进一步凝结现象。涡流沉积是管壁背风侧存在的涡流可以加速较小的飞灰粒子 ( $5-10\ \mu\text{m}$ ),使其脱离涡流穿过边界层撞击在被风侧导致飞灰堆积。化学反应主要包括沉积灰分和烟气中发生的硫酸化、碱金属吸附和氧化还原反应等<sup>[88-92]</sup>。

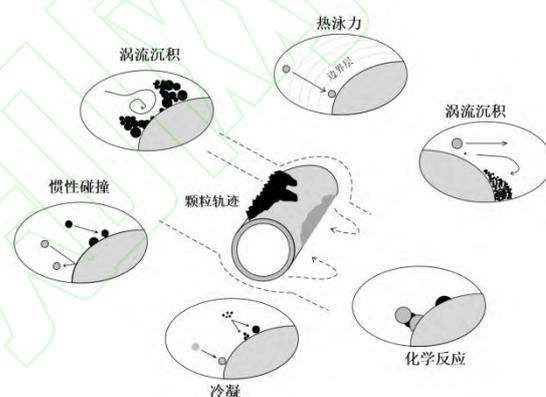


图 2 管壁灰分沉积机制<sup>[89]</sup>

Fig.2 Mechanism of pipe wall ash deposition<sup>[89]</sup>

#### 4.2.2 结渣机理分析

结渣是指当煤灰分的熔点较低时,软化或者熔融状态的粘性灰颗粒碰撞在温度较低的水冷壁或者碰撞在主要辐射受热面上而形成的熔渣<sup>[93]</sup>。在以准东煤为燃料的循环流化床锅炉运行过程中,分离器出口壁面上以及高温再热器上的结渣较为严重。前者灰渣主要包括硬石膏 ( $\text{CaSO}_4$ )、石英 ( $\text{SiO}_2$ )、赤铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、钙长石 ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ),结渣主要原理为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ - $\text{CaSO}_4$  低熔点复合盐体系在粗糙壁面形成粘性底层,随后捕捉灰中矿物质形成低熔点共熔体并固化。后者灰渣主要包括硬石膏 ( $\text{CaSO}_4$ )、石英 ( $\text{SiO}_2$ )、赤铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、铝酸三钙 ( $\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{O}_6$ ),结渣主要原理为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$  或  $\text{NaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2(\text{SiO}_2)$  等低熔点化合物形成气溶胶,并在温度较低的管壁上沉积,同时发生  $\text{CaSO}_4$  的低温沉积效应,在这个过程中不断捕获飞灰颗粒,形成新渣层<sup>[84,94]</sup>。

#### 4.2.3 腐蚀机理分析

掺烧含碳废弃物锅炉受热面腐蚀因为腐蚀原因的不同可以分为高温腐蚀以及低温腐蚀两类。高温腐蚀与飞灰中 K、Cl 含量和形态密切相关，沉积在受热面表面的碱金属化合物会引起受热面腐蚀，而氯化物对腐蚀具有催化作用。同时 HCl 是一种腐蚀性较强的酸性气体，容易对锅炉受热面和尾部烟道造成腐蚀<sup>[95]</sup>。HCl 以及氯化物作为沉积物存在铁或钢的表面时，会大大加速铁或钢的氧化过程，其机理为氯离子渗透到金属氧化物表面或金属表面时形成金属氯化物（主要为 FeCl<sub>2</sub>），并在扩散过程中被氧化为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 或 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，这些氧化物是疏松的，不能保护内部金属，从而使氧化反应继续进行，氯作为催化剂，加速腐蚀反应<sup>[96]</sup>，如图 3 所示。

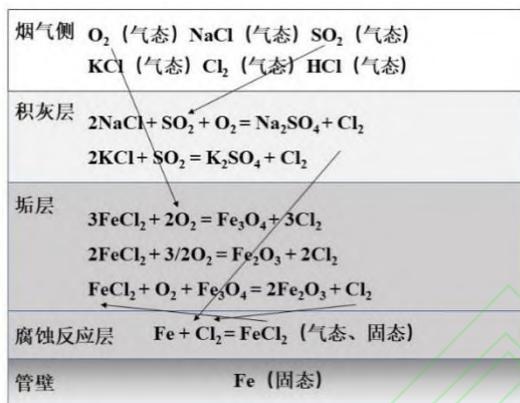


图 3 沉积物下腐蚀机理<sup>[97]</sup>

Fig.3 Mechanism of corrosion under deposits<sup>[97]</sup>

其中，氯化物在 SO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 存在的条件下有明显的凝集成核趋势<sup>[98]</sup>，被腐蚀金属表面由 KCl、NaSO<sub>4</sub> 等形成的低熔点共熔物会增加灰的粘度，增加沉积物中腐蚀性物质，同时发生强烈的电化学腐蚀，加速受热面金属腐蚀<sup>[87]</sup>。低温腐蚀则主要发生在温度较低的受热面，如省煤器和空气预热器，当管壁温度低于烟气酸露点时酸性气体冷凝在管壁上造成金属表面腐蚀<sup>[99]</sup>。低温腐蚀可以通过提高出口烟温来缓解，而抑制高温腐蚀可以采用较多方式。

### 4.3 控制积灰结渣腐蚀技术

#### 4.3.1 燃料预处理及添加剂

燃料中的碱金属离子会导致低熔点粘结沉积物的生成，可以通过水洗去除 70% 的钠，减少在燃烧时释放的碱金属，减轻积灰结渣现象<sup>[100]</sup>。对于含有较多碱金属和氯的生物燃料，为了降低燃烧过程中释放的碱金属，可以通过加入添加剂来控制烟气中的碱金属浓度，效果较好的添加剂有高岭土、膨润土、云母、硅藻土、浮石、叶蜡石等<sup>[101]</sup>。刘志等<sup>[102]</sup>研究了生物

质与煤混烧的 75 t/h 循环流化床锅炉尾部烟道低温过热器前 3 种混烧比例下的积灰及腐蚀情况，结果表明生物质燃料 Cl 含量较高而 K 含量并不高，掺混比例较小时不会发生严重的积灰及腐蚀现象。黄芳<sup>[97]</sup>设计了一种以 MgO 为主的受热面沉积抑制剂并期望抑制剂可以较好的适用于生物质流化床锅炉，减轻高温过热器结渣腐蚀，这种抑制剂在 800 °C 以下可以减缓受热面积灰结渣，但在 1000 °C 以上反而会促进结渣。宋景慧等<sup>[103]</sup>在生物质循环锅炉中加入由 MgO、高岭土、活性 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和发泡剂构成的防腐蚀剂，防腐蚀剂掺烧量在 3% 时可以在不降低锅炉效率的前提下有效减少飞灰中的 K、Cl 含量，减轻积灰腐蚀情况。张恒立<sup>[104]</sup>将高岭土和硫磺当做沉积抑制剂加入 CFB 锅炉，结果表明高岭土对积灰结渣的抑制作用更好，沉积物中 CaSO<sub>4</sub> 增加，KCl 含量降低。唐智<sup>[105]</sup>对添加剂影响灰熔融特性机理进行研究，希望减轻对流受热面的积灰结渣现象。结果表明 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 都有提高灰熔点的作用，CaO 可以使四个灰熔融特性温度都提高，高岭土也有相同效果但是掺混比例超过 10% 后熔融温度上升不明显。但是需要注意对于不同的燃料同样的添加剂也有不同的效果<sup>[106]</sup>。Kassman 等<sup>[107]</sup>在生物质燃料中加入了硫酸铵，可以显著降低烟气中的 KCl 并且沉积物中的氯含量大大降低，减轻结渣与腐蚀情况。过量的脱硫剂也会导致炉内 Ca-S 型积灰加重，所以要合理的选择脱硫剂并控制脱硫剂用量<sup>[108]</sup>。对于燃料处理，可以通过水洗或酸洗来去除燃料中的碱金属元素，但是水洗需要构建水洗装置并且增加耗能，所以添加抑制剂也是通常使用的方法，常见的各种添加剂都可以抑制积灰结渣，同时可以选择添加剂降低 Cl 含量来抑制腐蚀。

#### 4.3.2 燃烧工况调节技术

积灰结渣腐蚀现象也受壁面所处温度影响。在实际运行中，循环流化床锅炉受热面积灰情况受烟气温度和管壁温度影响较大，小粒径的浮灰在热泳和湍流的作用下更容易形成积灰，其中管壁温度为 600 °C 时飞灰沉积量最小，管壁温度太低则烟气与管壁温度梯度过大加重积灰现象，管壁温度过高则导致飞灰熔融增加黏性加重积灰，所以合理的控制管壁温度可以减轻积灰<sup>[109]</sup>。Sandberg 等<sup>[110]</sup>对一生物质循环锅炉进行长时间跟踪观察，发现二级过热器烟温处于 800~850 °C 时，气相 KCl 可以凝结在温度较低的管壁上，温度稍低时会以亚微米颗粒的形式存在于熔融态中，造成严重的结渣现象，而一级过热器烟温处于 400~450 °C 时，KCl 存在于固相中，黏性降低，积灰结渣较轻。

Tang 等<sup>[11]</sup>同样表明在垃圾焚烧 CFB 锅炉中管壁温度越高, 沉积速率越大。向柏祥等<sup>[112,113]</sup>针对 100 MWe 流化床锅炉总结温度对锅炉腐蚀的影响, 温度升高会导致 Cl 元素析出加速, 对于表面玷污的壁面温度处于 700 °C 左右时腐蚀速率达到最大, 降低壁面温度可以减缓腐蚀速率。可以通过在燃烧室内增加传热面来降低炉膛温度。为减轻积灰结渣腐蚀现象, 需要对壁面温度进行一定控制, 在温度较高的情况下无论积灰、结渣还是腐蚀现象都非常严重, 控制壁面温度在一个合理范围内对缓解积灰结渣腐蚀非常重要。

#### 4.3.3 管壁防腐蚀材料技术

控制管壁腐蚀情况除了改变燃料性质和燃烧工况外, 提升管壁的防腐蚀性能也是一种行之有效的方法。魏琪等<sup>[114]</sup>认为热喷涂技术在管壁上制备一层防腐蚀涂层是最为有效经济的方法。对于高温腐蚀, 龚彬<sup>[115]</sup>研究了 6 种不同等级的锅炉用钢的抗腐蚀性, 测定样块的增重得到腐蚀特性曲线, 结果表明在一定范围内 Cr 含量越高, 抗腐蚀性越高, 原因是 Cr 可以形成一层保护性的氧化层。Uusotalo 等<sup>[116]</sup>将 2 种锅炉用钢作为基底对 6 种含 Cr 防腐蚀涂层进行高温腐蚀试验, 结果表明含有高铬含量的均匀致密涂层防腐蚀性能良好。王浩等<sup>[117]</sup>针对锅炉管壁表面严重腐蚀导致的减薄失效, 对管壁进行周期性电弧喷涂耐蚀金属涂层, 使锅炉管使用寿命增长。张轲等<sup>[118]</sup>通过实验验证了 Cr 的添加对抗氧化腐蚀是有利的。对于低温腐蚀, 郎丽萍<sup>[119]</sup>对于低温受热面采用镀搪瓷管, 结果表明可以提高管壁耐腐蚀性。王晓东等<sup>[120]</sup>针对高温氯蚀在不锈钢表面制备先驱体陶瓷涂层, 结果表明涂层致密且与基体结合良好, 可以起到保护基材避免氯蚀的作用。总而言之, 在管壁增加防腐蚀涂层是一种有效的防腐蚀方法, 但是要考虑成本问题以及可能的防腐蚀层脱落问题。

## 5 结语与展望

燃煤流化床掺烧技术是我国目前较好处理并资源化利用含碳废弃物的有效方法之一, 该方法不需要对设备进行较大的改动, 可减少初期投资费用, 有望较好地解决我国含碳废弃物能源利用效率低的问题。煤与生物质掺烧有更好的着火特性以及其他燃烧性能。同时流化床着火性能好、烟气停留时间长的特性可以通过掺烧无害化处理污泥。

对于燃烧控制, 可以通过燃料供给以及空气供给控制。燃料供给方面, 农林生物质掺烧比例增大可以使燃烧更完全, 降低燃尽温度; 污泥掺烧比例增大会

降低锅炉效率, 应避免大比例掺烧污泥。空气供给方面, 增大总风量及二次风占比可以促进完全燃烧, 降低密相区温度, 使炉膛温度更均匀, 具体的配风还需要针对不同的锅炉及运行情况来确定。

对于污染物排放控制, 主要针对氮氧化物及硫氧化物的排放量, 流化床原始排放不能达到超低排放标准, 需要采取其他措施。对于硫氧化物可以通过减小炉膛内脱硫剂的粒径使比表面积增大, 从而加快反应速率来达到更好的脱硫效果。对于氮氧化物则需要组织低氮燃烧, 营造还原性气氛来阻断燃料型 NO<sub>x</sub> 生成, 通过不同的燃料输送及配风方案实现。

对于积灰结渣腐蚀控制, 碱金属氯元素会导致较为严重的积灰结渣腐蚀现象。可以通过水洗或酸洗来去除碱金属元素, 添加例如高岭土、CaO 等抑制剂抑制积灰结渣。选择添加剂降低燃烧气相中 Cl 含量来抑制腐蚀。同时太高的壁面温度会使积灰结渣腐蚀情况急剧恶化, 可以通过受热面布置以及燃烧控制方面来控制壁面温度在一个合理范围。通过更换管壁材料或增加防腐蚀涂层也是一种有效的缓解腐蚀方法。

流化床掺烧含碳废弃物虽然是目前较好地利用生物质能及处理废弃物的方法, 但在具体实施层面, 仍有较多技术难点, 后期应在这些方面加强研究:

(1) 我国生物质种类繁多且性质相差较大, 找到特定的煤与含碳废弃物掺烧搭配方案达到高效率低污染利用含碳废弃物。

(2) 流化床锅炉炉膛尺寸增大时, 能否保证燃料均匀性, 能否保证石灰石分布均匀以达到炉内高效脱硫也是需要进一步研究的问题。

(3) 针对流化床炉内超低原始排放技术, 对于单一的 NO<sub>x</sub> 或 SO<sub>2</sub> 已经相对成熟, 如何耦合两种污染物超低排放技术, 使 NO<sub>x</sub> 与 SO<sub>2</sub> 同时满足超低排放。

(4) 开发更多针对流化床掺烧的低氮燃烧组织方法可能是一种前景较好的技术路线。同时特定超低排放燃烧技术对不同燃料的适应性需要进一步研究。

(5) 除提高材料耐蚀性以外, 控制碱金属在燃烧过程的迁移, 从燃烧方面抑制积灰结渣及腐蚀也需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1]张鑫. 低碳视角下中国能源结构分析[D]:江苏大学, 2014. ZHANG Xin. Analysis on energy structure in China under the low-carbon economy view[D]. Jiangsu University, 2014.
- [2]Chen G, Andries J, Spliethoff H, et al. Biomass gasification integrated with pyrolysis in a circulating fluidised bed[J]. Solar Energy, 2004, 76 (1-3): 345-349.
- [3]Demirbas A. Combustion characteristics of different biomass fuels[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30 (2): 219-230.

- [4]刘岩. 生物质与煤混合循环流化床燃烧炉内脱硫特性研究[D]: 内蒙古工业大学, 2020.
- LIU Yan. Research on desulfurization characteristics of biomass and coal mixed combustion circulating fluidized bed [D]: Inner Mongolia University of Technology, 2020.
- [5]Wei X, Schnell U, Hein KR. Behaviour of gaseous chlorine and alkali metals during biomass thermal utilisation[J]. Fuel, 2005, 84 (7-8): 841-848.
- [6]郭飞宏. 流化床中煤与成型生物质颗粒流动、传热和燃烧特性基础研究[D]: 东南大学, 2018.
- GUO Feihong. Basic research on particle flow, heat transfer and combustion of coal and biomass pellet in fluidized bed [D]: Southeast University, 2018.
- [7]林永明, 潘峰, 王正锋. 生物质发电燃烧方式与炉型选择[J]. 广西电力, 2009, 32 (1): 5-8.
- LING Yongming, PAN Feng, WANG Zhengfeng. Choice of Combustion Mode and Boiler Type for Biomass Electricity Generation [J]. Guangxi Electric Power, 2009, 32 (1): 5-8.
- [8]唐秀能. 流化床中木屑与烟煤混烧特性的试验研究及数值模拟[D]: 重庆大学, 2012.
- TANG Xiuneng. Experimental study on co-combustion of sawdust and soft coal in circulating fluidized bed and numerical simulation [D]: Chongqing University, 2012.
- [9]侯海盟. 城市下水污泥循环流化床焚烧及排放特性试验研究[D]: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2013.
- HOU Haimeng Experimental study on incineration characteristics and pollutants emission of sewage sludge in circulating fluidized bed [D]: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [10]Xiao Y, Zhao R, Chen J. Fixation of Phosphorus in Ash during Cocombustion of Sewage Sludge and Coals: Influence of Coal and Steam[J]. Energy & Fuels, 2022, 36 (8): 4396-4403.
- [11]房点. 干化污泥在流化床内燃烧特性及污染物排放特性研究[D]: 哈尔滨工业大学, 2016.
- FANG Dian. Study on combustion characteristic and pollutants emission of dried sludge in fluidized bed [D]: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [12]别如山, 杨文, 宋兴飞. 采用流化床或低倍率循环流化床燃烧生物质发电的建议[J]. 工业锅炉, 2010, No.120 (2): 1-3.
- BIE Rushan, YANG Wen, SONG Xingfei. Fluidized bed or low circulating fluidized bed recommend for biomass electricity generation[J]. Industrial Boiler, 2010, No.120 (2): 1-3.
- [13]Asadullah M, Miyazawa T, Ito S, et al. Demonstration of real biomass gasification drastically promoted by effective catalyst[J]. Applied Catalysis a-General, 2003, 246 (1): 103-116.
- [14]李鹏飞. 基于大数据应用的 300MW CFB 机组调峰经济性研究[D]: 华北电力大学, 2015.
- LI Pengfei. Study on economy of 300MW CFB boiler unit peak-shaving based on large data application [D]: North China Electric Power University, 2015.
- [15]孙博. 生物质在流化床中燃烧特性研究[D]: 哈尔滨工业大学, 2007.
- SUN Bo. Study on combustion of biomass in fluidized bed [D]: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [16]倪惠, 李廷勋. 生物质燃料燃烧机理及影响燃烧的因素分析[J]. 化学工程与装备, 2021, (1): 1-2.
- NI Hui, LI Tingxun. Analysis of biomass fuel combustion mechanism and factors affecting combustion [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021, (1): 1-2.
- [17]王爽. 海藻生物质热解与燃烧的试验与机理研究[D]: 上海交通大学, 2010.
- WANG Shuang. Pyrolysis and combustion experiments and mechanism research of seaweed biomass[D]: Shanghai JiaoTong University, 2010.
- [18]牛欣. 污泥化学链燃烧特性及氮磷迁移转化机理[D]: 东南大学, 2018.
- NIU Xin. Chemical looping combustion of sewage sludge and nitrogen-phosphorus transformation[D]: Southeast University, 2018.
- [19]Tillman DA. Biomass cofiring: the technology, the experience, the combustion consequences[J]. Biomass & Bioenergy, 2000, 19 (6): 365-384.
- [20]马爱玲. 生物质与煤混合燃烧特性的研究[D]: 河南理工大学, 2010: 13-37, 2010.
- MA Ailing. Study on co-firing characteristic of biomass and coal [D]: Henan Polytechnic University, 2010: 13-37, 2010.
- [21]刘翔, 陈梅倩, 余冬, 等. 草本类生物质与烟煤混烧特性及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28 (21): 200-207.
- LIU Xiang, CHEN Qingnong, YU Dong, et al. Analysis of influence factors on co-combustion characteristics of bituminous coal with herbal biomass[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (21): 200-207.
- [22]Wang G, Zhang J, Shao J, et al. Thermal behavior and kinetic analysis of co-combustion of waste biomass/low rank coal blends[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 124: 414-426.
- [23]闵凡飞, 张明旭. 生物质与不同变质程度煤混合燃烧特性的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, (2): 107-112.
- MIN Fanfei, ZHANG Mingxu. Research on combustion characteristics of biomass and coals with different ranks [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2005, (2): 107-112.
- [24]徐向鹏, 钟文琪, 陈曦, 等. 污泥煤泥协同燃烧动力学及污染物排放特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52 (1): 25-33.
- XU Xiangpeng, ZHONG Wenqi, CHEN Xi, et al. Co-combustion kinetics and pollutant emission characteristics of sludge and coal slime [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2022, 52 (1): 25-33.
- [25]Li H, Xia S, Ma P. Thermogravimetric investigation of the co-combustion between the pyrolysis oil distillation residue and lignite[J]. Bioresource technology, 2016, 218: 615-622.
- [26]Wang J, Zhang S-y, Guo X, et al. Thermal behaviors and kinetics of Pingshuo coal/biomass blends during coprolysis and cocombustion[J]. Energy & Fuels, 2012, 26 (12): 7120-7126.
- [27]孟涛, 邢小林, 陈传恒, 等. 污泥-烟煤混合燃料燃烧特性与动力学研究[J]. 热力发电, 2021, 50 (5): 87-93.
- MENG Tao, XING Xiaolin, CHEN Chuanheng, et al. Study on co-combustion characteristics and kinetics of mixing fuel of sludge and coal [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50 (5): 87-93.
- [28]Gao FY, Zhou CC, Du J, et al. Effect of gaseous agents on co-combustion characteristics of sewage sludge and coal[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9 (5).
- [29]柯希玮, 孙国瑞, 黄中, 等. 330mwe 循环流化床锅炉掺烧污泥性能影响[J]. 洁净煤技术, 2022, 28 (3): 102-108.
- KE Xiwei, SUN Guorui, HUANG Zhong, et al. Operation characteristic analysis on co-combustion of sludge and coal in a 330 MWe circulating fluidized bed boiler [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28 (3): 102-108.
- [30]蒋孟宴, 张自丽, 孙光, 等. 0.3MW<sub>th</sub> 循环流化床污泥与煤掺烧试验[J]. 洁净煤技术, 2022, 28 (3): 130-138.
- JIANG Mengyan, ZHANG Zili, SUN Guang, et al. Co-combustion characteristic of sewage sludge and coal in 0.3MW<sub>th</sub> circulating fluidized bed [J]. 洁净煤技术, 2022, 28 (3): 130-138.
- [31]田甲蕊. 改性印染污泥干化和掺烧特性研究[D]: 东南大学, 2016.
- TIAN Jiarui. Research on drying and co-combustion characteristics of modified dyeing sludge[D]: Southeast University, 2016.
- [32]罗衍强, 龚丽芳, 陈繁忠, 等. 印染污泥掺煤焚烧过程中重金属分配与归趋特性研究[J]. 环境工程, 2016, 34 (S1): 666-669.
- LUO Yanqiang, GONG Lifang, CHEN Fanzhong, et al. Distribution and incidence characteristics of heavy metals during the printing and dyeing sludge combustion[J]. Environmental Engineering, 2016, 34 (S1): 666-669.
- [33]胡修猛. 循环流化床锅炉一般工业固废掺烧综合利用研究[J]. 煤炭科技, 2022, 43 (6): 25-29.
- HU Xiუმeng. Study on comprehensive utilization of general industrial solid wastes in circulating fluidized bed boiler[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2022, 43 (6): 25-29.
- [34]杨东伟. 500t/D 垃圾焚烧循环流化床锅炉协同处置工业固废的研究[J]. 环境污染与防治, 2022, 44 (7): 890-894.
- YANG Dongwei. Research on municipal solid waste incineration circulating fluidized bed boiler co-disposing industrial solid waste[J]. Environmental Pollution and Control, 2022, 44 (7): 890-894.
- [35]Magalhaes D, Kazanç F, Rianza J, et al. Combustion of Turkish lignites and olive residue: Experiments and kinetic modelling[J]. Fuel, 2017, 203: 868-876.
- [36]Ullah H, Liu G, Yousaf B, et al. Combustion characteristics and retention-emission of selenium during co-firing of torrefied biomass and its blends with high ash coal[J]. Bioresource technology, 2017, 245: 73-80.
- [37]Jayaraman K, Kok MV, Gokalp I. Thermogravimetric and mass spectrometric (TG-MS) analysis and kinetics of coal-biomass blends[J]. Renewable Energy, 2017, 101: 293-300.
- [38]Junga R, Knauer W, Niemic P, et al. Experimental tests of co-combustion of laying hens manure with coal by using thermogravimetric analysis[J]. Renewable Energy, 2017, 111: 245-255.
- [39]Yu D, Chen M, Wei Y, et al. An assessment on co-combustion characteristics of Chinese lignite and eucalyptus bark with TG-MS technique[J]. Powder Technology, 2016, 294: 463-471.
- [40]谢兴旺. 流化床中煤与生物质混烧实验与数值模拟研究[D]: 东南大学, 2018.
- XIE Xingwang. Experimental investigation and numerical simulation of co-combustion of coal and biomass in fluidized bed [D]: Southeast University, 2018.
- [41]张金. 流化床内煤与生物质混烧实验研究及数值模拟[D]: 东南大学, 2017.
- ZHANG Jin. Experimental study and numerical simulation of co-combustion of coal and biomass in fluidized bed [D]: Southeast University, 2017.
- [42]Liu YQ, Tan WY, Liang SH, et al. Comparative study on the co-combustion behavior of torrefied biomass blended with different rank coals[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2021: 1-13.
- [43]寿恩广. 生物质与煤循环流化床混合富氧燃烧特性研究[D]: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2014.

- SHOU Enguang. Study on oxy-fuel combustion characteristics of biomass and coal blending in circulating fluidized bed[D]: Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [44]任罡. 生物质与煤混燃特性研究与工程应用[D]: 华北电力大学, 2014.
- REN Gang. Co-combustion characteristics and engineering application of biomass and coal [D]: North China Electric Power University, 2014.
- [45]孙磊. 循环流化床锅炉生物质与煤共燃系统热力学分析[D]: 华北电力大学, 2019.
- SUN Lei. Thermodynamic analysis of co-combustion system of biomass and coal in circulating fluidized bed boiler[D]: North China Electric Power University, 2019.
- [46]曹通, 方立军, 李鸿远. 循环流化床锅炉掺烧污泥的炉内燃烧数值模拟研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48 (2): 30-35.
- CAO Tong, FANG Lijun, LI Hongyuan. A numerical simulation of co-combustion of sludge on a circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 2017, 48 (2): 30-35.
- [47]胡桂秋. 垃圾、秸秆和煤混燃的燃烧特性研究[D]: 河北科技大学, 2015.
- HU Guiqiu. Research on combustion characteristics for cofiring of rubbish, stalks and coal [D]: Hebei University of Science & Technology, 2015.
- [48]刘聪. 循环流化床锅炉污泥掺烧的影响因素及关键技术研究[D]: 中国矿业大学, 2021.
- LIU Cong. Research on influencing factors and key technology of sludge mixed burning in circulating fluidized bed boiler [D]: China University of Mining and Technology, 2021.
- [49]鄢晓忠, 何旭, 马琪顺, 等. 260t/h 循环流化床锅炉燃烧优化调整试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50 (5): 553-558.
- YAN Xiaozhong, HE Xu, MA Qishun, et al. Test analysis of 260 t/h circulation fluidized bed boiler combustion optimization parameters[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50 (5): 553-558.
- [50]王昕. 煤/生物质循环流化床富氧燃烧及氮转化特性试验研究[D]: 中国科学院工程热物理研究所, 2017.
- WANG Xin. Experimental study on combustion characteristics and nitrogen transformation of coal/biomass circulation fluidized bed oxy-fuel combustion [D]: Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [51]柯希玮, 蒋苓, 吕俊复, 等. 循环流化床燃烧低污染排放技术研究展望[J]. 中国工程科学, 2021, 23 (3): 120-128.
- KE Xiwei, JIANG Lin, LU Junfu, et al. Prospects for the low pollutant emission control of circulating fluidized bed combustion technology[J]. Strategic Study of CAE 2021, 23 (3): 120-128.
- [52]张小英, 马晓茜, 邹治平. 循环流化床中谷壳与煤共燃 SO<sub>2</sub> 生成特性研究[J]. 煤炭转化, 2005, (4): 54-56.
- ZHANG Xiaoying, MA Xiaoqian, ZOU Zhiping. Study on generation of SO<sub>2</sub> during co-combustion of biomass and coal in circulation fluidized bed [J]. Coal Conversion, 2005, (4): 54-56.
- [53]蔡攀. 循环流化床锅炉混煤掺烧应用与分析[D]: 华南理工大学, 2018.
- CAI Pan. Application and analysis of blended coal combustion in CFB boiler[D]: South China University of Technology, 2018.
- [54]李竞茂, 杨海瑞, 吕俊复, 等. 节能型循环流化床锅炉低氮氧化物排放的分析[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19 (4): 293-298.
- LI Jingji, YANG Hairui, LU Junfu, et al. Low NO<sub>x</sub> emission characteristic of low energy consumption CFB boilers [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19 (4): 293-298.
- [55]周虹光, 李帅英, 王超, 等. 燃煤耦合污泥发电过程二噁英生成与排放研究[J]. 热力发电, 2023, 52 (5): 160-166.
- ZHOU Hongguang, LI Shuaiying, WANG Chao, et al. Formation and emission of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans during the co-firing of coal and sludge in power plant [J]. Thermal Power Generation, 2023, 52 (5): 160-166.
- [56]陈海军, 严骁, 许榕发, 等. 市政污泥掺烧对生活垃圾焚烧设施烟气中污染物排放的影响[J]. 安全与环境学报, 2018, 18 (2): 766-772.
- CHEN Haijun, YAN Xiao, XU Rongfa, et al. Gaseous pollutant emissions from the mixed combustion of the municipal solid waste incinerator with sewage sludge[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18 (2): 766-772.
- [57]严骁, 贾燕, 李淑圆, 等. 污泥掺烧对焚烧后固体废物污染物排放的影响[J]. 安全与环境学报, 2018, 18 (1): 285-291.
- YAN Xiao, JIA Yan, LI Shuyuan, et al. Influence of the municipal solid residue on the municipal solid waste emission[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18 (1): 285-291.
- [58]李伟, 李诗媛, 徐明新, 等. 循环流化床富氧燃烧 SO<sub>2</sub> 排放和石灰石脱硫特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (23): 3932-3937.
- LI Wei, LI Shiyuan, XU Mingxin, et al. Study on SO<sub>2</sub> emission and limestone desulfurization characteristics for oxy-fuel circulating fluidized bed combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (23): 3932-3937.
- [59]聂虎. 生物质燃烧污染物排放特性研究[D]: 浙江大学, 2010.
- NIE Hu. Study on emission characteristics of biomass combustion pollutants[D]: Zhejiang University, 2010.
- [60]Dayton DC, Jenkins BM, Turn SQ, et al. Release of inorganic constituents from leached biomass during thermal conversion[J]. Energy & Fuels, 1999, 13 (4): 860-870.
- [61]Knudsen JN, Jensen PA, Dam-Johansen K. Transformation and release to the gas phase of Cl, K, and S during combustion of annual biomass[J]. Energy & Fuels, 2004, 18 (5): 1385-1399.
- [62]Zhou H, Jensen AD, Glarborg P, et al. Formation and reduction of nitric oxide in fixed-bed combustion of straw[J]. Fuel, 2006, 85 (5-6): 705-716.
- [63]吕俊复, 柯希玮, 蔡润夏, 等. 循环流化床燃烧条件下焦炭表面 NO<sub>x</sub> 还原机理研究进展[J]. 煤炭转化, 2018, 41 (1): 1-12.
- LU Junfu, KE Xiwei, CAI Runxia, et al. Research progress on the kinetics of NO<sub>x</sub> reduction over chars in fluidized bed combustion[J]. Coal Conversion, 2018, 41 (1): 1-12.
- [64]徐通模. 燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- XU Tongmo. Combustion sciences[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [65]McAllister S, Chen J-Y, Fernandez-Pello AC. Fundamentals of combustion processes[M]: Springer, 2011.
- [66]赵强, 傅斌, 金燕, 等. 350 MW 大型循环流化床锅炉 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 超低排放运行特性研究[J]. 煤炭转化, 2022, 45 (6): 80-88.
- ZHAO Qiang, FU Bin, JIN Yan, et al. Study on operation characteristics of ultra-low SO<sub>2</sub> emission and NO<sub>x</sub> emission of 350 MW large circulating fluidized bed boiler[J]. Coal Conversion, 2022, 45 (6): 80-88.
- [67]王超, 宋国良, 吕清刚. 循环流化床超低 NO<sub>x</sub> 与 SO<sub>2</sub> 排放技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27 (4): 17-25.
- WANG Chao, SONG Guoliang, LU Qinggang. Research progress on ultra-low NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emission control technology for CFB boilers[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27 (4): 17-25.
- [68]蔡润夏, 柯希玮, 葛荣存, 等. 循环流化床超细石灰石炉内脱硫研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (10): 3042-3048+3155.
- CAI Runxia, KE Xiwei, GE Gongcun, et al. The In-situ desulfurization with ultra-fine limestone for circulating fluidized bed boilers [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (10): 3042-3048+3155.
- [69]Ke XW, Cai RX, Zhang M, et al. Application of ultra-low NO<sub>x</sub> emission control for CFB boilers based on theoretical analysis and industrial practices[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 181: 252-258.
- [70]Fan L-S, Jiang P, Agnihotri R, et al. Dispersion and ultra-fast reaction of calcium-based sorbent powders for SO<sub>2</sub> and air toxics removal in coal combustion[J]. Chemical engineering science, 1999, 54 (22): 5585-5597.
- [71]岳光溪, 吕俊复, 徐鹏, 等. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J]. 中国电力, 2016, 49 (1): 1-13.
- YUE Guangxi, LU Junfu, XU Peng, et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed combustion technology [J]. Electric Power, 2016, 49 (1): 1-13.
- [72]贾相如, 柳少卿, 赵亚斌, 等. 布风对生物质与煤矸石混烧 NO 和 SO<sub>2</sub> 排放的影响[J]. 煤炭转化, 2022, 45 (5): 81-88.
- JIA Xiangru, LIAO Shaoqin, ZHAO Yabin, et al. Effects of air distribution on NO and SO<sub>2</sub> emission from biomass and coal gangue co-firing[J]. Coal Conversion, 2022, 45 (5): 81-88.
- [73]雷佳莉, 严东. 煤热解过程中硫的析出规律研究进展[J]. 河北化工, 2012, 35 (2): 10-12+36.
- LEI Jiali, YAN Dong. Research development of sulfur release from coal in pyrolysis process [J]. Coal and Chemical Industry, 2012, 35 (2): 10-12+36.
- [74]Zhou T, Gong ZQ, Lu QG, et al. Experimental study on enhanced control of NO<sub>x</sub> emission from circulating fluidized bed combustion[J]. Energy & Fuels, 2015, 29 (6): 3634-3639.
- [75]Zhou T, Lu QG, Cao Y, et al. Study on the combustion and NO<sub>x</sub> emission characteristic of low rank coal in a circulating fluidized bed with post-combustion[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2017, 95 (12): 2333-2340.
- [76]Gong ZQ, Zhou T, Lu QG, et al. Combustion and NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Shenmu Char in a Circulating Fluidized Bed with Post-combustion[J]. Energy & Fuels, 2016, 30 (1): 31-38.
- [77]Xiao Y, Song GL, Song WJ, et al. Influence of feeding position and post-combustion air arrangement on NO<sub>x</sub> emission from circulating fluidized bed combustion with post-combustion[J]. Fuel, 2020, 269: 117394.
- [78]Xiao Y, Song GL, Yang XT, et al. Influence of stoichiometry air ratio on char characteristics and nitrogen conversion in circulating fluidized bed with post-combustion[J]. Fuel, 2021, 298.
- [79] Ji ZC, Song GL, Yang Z, et al. Effect of post-combustion air distribution on NO<sub>x</sub> original emission and combustion characteristics of 75 T/H coal slime circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of the Energy Institute, 2021, 99: 154-160.
- [80]Li JJ, Zhang M, Yang HR, et al. The theory and practice of NO<sub>x</sub> emission control for circulating fluidized bed boilers based on the re-specification of the fluidization state[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 150: 88-93.
- [81]Vasalos IA, Lappas AA, Kopalidou EP, et al. Biomass catalytic pyrolysis: process design and economic analysis[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews-Energy and Environment, 2016, 5 (3): 370-383.

- [82]范建勇. 准东煤结渣特性及其配煤灰熔融性试验研究[D]: 浙江大学, 2014.
- FAN Jianyong. Research on Zhundong coal's slagging characteristics and its ash fusibility of blending coal [D]: Zhejiang University, 2014.
- [83]刘炎泉. 循环流化床燃用新疆准东煤结渣沾污机理及防止研究[D]: 浙江大学, 2019.
- LIU Ynaquan. Research on prevention and mechanism of slagging and fouling during Zhundong coal combustion in a circulating fluidized bed [D]: Zhejiang University, 2019.
- [84]齐晓宾. 高碱低阶煤热化学转化过程中的结渣沾污特性研究[D]: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2018.
- QI Xiaobin. Study on slagging and fouling characteristics of high-alkali low-coal during thermochemical conversion process [D]: Chinese Academy of sciences, 2018.
- [85]Obenberger I, Biedermann F, Widmann W, et al. Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions[J]. Biomass and bioenergy, 1997, 12 (3): 211-224.
- [86]赵小军, 孙锦余, 薛东发, 等. 混合生物质燃料循环流化床锅炉受热面结焦机理研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27 (4): 117-122.
- ZHAO Xiaojun, SUN Jinyu, XUE Dongfa, et al. Study on slagging mechanism of multiple biomass co-combustion on heating surface in a circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27 (4): 117-122.
- [87]范浩东, 张东旺, 赵冰, 等. 生物质流化床腐蚀特性及抑制方法综述[J]. 生物质化学工程, 2022, 56 (1): 30-36.
- FAN Haodong, ZHANG Dongwang, ZHAO Bin, et al. Summary of corrosion characteristics and inhibition methods of biomass fluidized bed [J]. Biomass Chemical Engineering, 2022, 56 (1): 30-36.
- [88]Baxter LL, Desollar RW. A mechanistic description of ash deposition during pulverized coal combustion-predictions compared with observations[J]. Fuel, 1993, 72 (10): 1411-1418.
- [89]Kleinmans U, Wieland C, Frandsen FJ, et al. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 68: 65-168.
- [90]Baxter LL. Ash deposition during biomass and coal combustion - a mechanistic approach[J]. Biomass & Bioenergy, 1993, 4 (2): 85-102.
- [91]Kleinmans U, Ruck R, Schmid S, et al. Alkali vapor condensation on heat exchanging surfaces: laboratory-scale experiments and a mechanistic CFD modeling approach[J]. Energy & Fuels, 2016, 30 (11): 9793-9800.
- [92]Cameron JH, Goerg-Wood K. Role of thermophoresis in the deposition of fume particles resulting from the combustion of high inorganic containing fuels with reference to kraft black liquor[J]. Fuel Processing Technology, 1999, 60 (1): 49-68.
- [93]孟建强. 准东煤燃烧及结渣特性研究[D]: 哈尔滨工业大学, 2013.
- MENG Jianqiang. Research on combustion and slagging characteristics of Zhundong coal [D]: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [94]陈衡, 王云刚, 马海东, 等. 循环流化床锅炉燃用准东煤结渣、沾污分析[J]. 热能动力工程, 2015, 30 (3): 431-435+496-497.
- CHEN Hen, WANG Yungang, MA Donghai, et al. Analysis of slagging and fouling of Jundong coal fired in circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2015, 30 (3): 431-435+496-497.
- [95]谭巍. 循环流化床生物质燃烧特性的试验研究[D]: 华北电力大学, 2014.
- TAN Wei. Experimental study on the biomass combustion character in circulating fluidized bed[D]: North China Electric Power University, 2014.
- [96]Grabke HJ, Reese E, Spiegel M. The effects of chlorides, hydrogen-chloride, and sulfur-dioxide in the oxidation of steels below deposits[J]. Corrosion Science, 1995, 37 (7): 1023-1043.
- [97]黄芳. 秸秆燃烧过程中受热面沉积腐蚀问题研究[D]: 浙江大学, 2013.
- HUANG Fang. Study on the deposit and corrosion problem on teating suiface during straw combustion[D]: Zhejiang University, 2013.
- [98]Jensen JR, Nielsen L, Schultz-Moller C, et al. The nucleation of aerosols in flue gases with a high content of alkali-A laboratory study[J]. Aerosol Science & Technology, 2000, 33 (6): 490-509.
- [99]Hwang K, ho Song C, Saito K, et al. Experimental study on titanium heat exchanger used in a gas fired water heater for latent heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30 (17-18): 2730-2737.
- [100]Quast K. Counter-current ion exchange for the removal of organically bound sodium from low-rank coals[J]. Minerals engineering, 2000, 13 (13): 1423-1428.
- [101]Kyi S, Chadwick BL. Screening of potential mineral additives for use as fouling preventatives in Victorian brown coal combustion[J]. Fuel, 1999, 78 (7): 845-855.
- [102]刘志, 雷秀汪, 汪佩宁, 等. 循环流化床锅炉生物质与煤混烧积灰腐蚀试验[J]. 热力发电, 2015, 44 (7): 50-54.
- LIU Zhi, LEI Xiujian, WANG Peining, et al. Experimental study on ash deposition and corrosion in a CFB boiler co-firing biomass with coal[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44 (7): 50-54.
- [103]宋景慧, 谭巍. 生物质循环流化床锅炉掺烧防腐剂的试验研究[J]. 新能源进展, 2014, 2 (4): 270-274.
- SONG Jinghui, TAN Wei. Experimental investigation on addition of anticorrosive agent in a 50-MW biomass-fired circulating fluidized bed boiler[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2 (4): 270-274.
- [104]张恒立. 生物质燃烧过程受热面沉积形成及抑制机理研究[D]: 浙江大学, 2020.
- ZHANG Hengli. Mechanism study on ash deposition and its inhibition on heating surfaces of biomass combustion [D]: Zhejiang University, 2020.
- [105]唐智. 循环流化床垃圾焚烧炉对流受热面积灰及防治机理研究[D]: 东南大学, 2020.
- TANG Zhi. Experimental investigation and prevention mechanism study of ash deposition on convective heating surfaces in CFB MSW incinerator[D]: Southeast University, 2020.
- [106]王云刚, 赵钦新, 马海东, 等. 准东煤灰熔融特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33 (11): 841-846.
- WANG Yungang, ZHAO Xinxin, MA Haidong, et al. Experimental study on ash fusion characteristics of Zhundong coal[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33 (11): 841-846.
- [107]Kassman H, Brostrom M, Berg M, et al. Measures to reduce chlorine in deposits: Application in a large-scale circulating fluidised bed boiler firing biomass[J]. Fuel, 2011, 90 (4): 1325-1334.
- [108]唐智, 陈晓平, 刘道银, 等. 垃圾焚烧炉对流受热面烧结积灰生长特性[J]. 化工进展, 2020, 39 (2): 767-775.
- TANG Zhi, CHEN Xiaoping, LIU Daoyin, et al. Characterization of ash deposits from convective heating surfaces in a CFB municipal solid waste incinerator[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39 (2): 767-775.
- [109]唐智, 陈晓平, 刘道银, 等. 流化床垃圾焚烧炉飞灰沉积实验[J]. 化工进展, 2020, 39 (1): 387-394.
- TANG Zhi, CHEN Xiaoping, LIU Daoyin, et al. Experimental investigation of ash deposition on heating surfaces in a municipal solid waste (MSW) bubbling fluidized beds[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39 (1): 387-394.
- [110]Sandberg J, Karlsson C, Fdhila RB. A 7 year long measurement period investigating the correlation of corrosion, deposit and fuel in a biomass fired circulated fluidized bed boiler[J]. Applied Energy, 2011, 88 (1): 99-110.
- [111]Tang Z, Chen XP, Liu DY, et al. Experimental investigation of ash deposits on convection heating surfaces of a circulating fluidized bed municipal solid waste incinerator[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 48: 169-178.
- [112]向柏祥, 张曼, 吴玉新, 等. 100 MWe 生物质循环流化床锅炉的开发[J]. 锅炉技术, 2013, 44 (4): 27-32.
- XIANG Baixiang, ZHANG Man, WU Yuxin, et al. Development of 100 MWe biomass circulating fluidized. bed boiler[J]. Boiler Technology, 2013, 44 (4): 27-32.
- [113]向柏祥. 100MWe 再热生物质循环流化床锅炉开发[D]: 清华大学, 2014.
- XIANG Baixiang. Development of a 100MWe reheat Biomass-fired circulating fluidized bed boiler[D]: Tsinghua University, 2014.
- [114]魏琪, 王瑞, 李辉, 等. 循环流化床锅炉焚烧垃圾腐蚀现状及防护研究进展[J]. 锅炉技术, 2011, 42 (3): 57-59.
- WEI Qi, WANG Rui, LI Hui, et al. The status and progress of corrosion protection in waste incinerator circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 2011, 42 (3): 57-59.
- [115]龚彬. 生物质锅炉受热面沉积机理与腐蚀特性研究[D]: 浙江大学, 2015.
- GONG Bin. Mechanism study on deposit build -up and corrosion of heating surfaces in biomass-fired boiler[D]: Zhejiang University, 2015.
- [116]Uusitalo M, Vuoristo P, Mäntylä T. High temperature corrosion of coatings and boiler steels in reducing chlorine-containing atmosphere[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 161 (2-3): 275-285.
- [117]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.
- WANG Hao, LIU Chengwei, TAN Enwei, et al. High temperature corrosion analysis and countermeasures of heating surface of biomass boiler [J]. Thermal Spray Technology, 2022, 14 (4): 63-70.
- [118]张轲, 牛焱, 吴维强. NiCr 合金在含氯氧化性气氛中的高温腐蚀[J]. 材料工程, 2005, (1): 12-15.
- ZHANG Ke, NIU Yan, WU Weitao. High temperature corrosion of NiCr alloys in chlorination-oxidation atmosphere[J]. Journal of Materials Engineering, 2005, (1): 12-15.
- [119]郎丽萍. 生物质循环流化床锅炉技术介绍[J]. 电站系统工程, 2019, 35 (4): 27-29.
- LANG Liping. Introduction to Technology of Biomass Circulating Fluidized Bed Boiler[J]. Power System Engineering, 2019, 35 (4): 27-29.
- [120]王晓东, 邵召山, 王杰, 等. 生物质锅炉防高温氯腐蚀陶瓷涂层研究及应用[J]. 能源工程, 2020, (5): 43-47+54.

WANG Xiaodong, SHAO Zhaoshan, WANG Jie, et al. Study and application of high temperature chlorine corrosion resistance ceramic coating for biomass boiler[J]. Energy Engineering, 2020, (5): 43-47+54.

