

# 燃煤锅炉改燃兰炭燃烧工艺及效益分析

何海军<sup>1,2\*</sup>

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工清洁能源股份有限公司, 北京 100013)

**摘要:** 兰炭因热值高、硫含量低的特点被广泛应用于散煤替代, 燃煤锅炉改燃兰炭是实现资源合理利用、降低污染物排放和改善企业经济效益的有效途径。以河北某循环流化床锅炉改燃兰炭工程为例, 燃烧系统采用掺烧灰渣的方法, 解决改燃后机械未完全燃烧导致损失大和物料循环不稳定问题, 确定了兰炭和灰渣的最佳掺混比为 9:1; 配风系统采用控制总量并降低一次风率的方法, 解决兰炭着火困难的问题, 确定了最佳一次风比例为 55%; 换热系统采用增加锅炉尾部受热面的方法, 解决因燃料热值提升较大产生的蒸汽超温和锅炉效率下降问题。改燃扩容后锅炉烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放分别比原锅炉降低了 73%、94% 和 55%, 以原锅炉 35 t/h 的额定功率运行, 每小时节约燃料成本 5.51%, 产吨蒸汽所需燃料成本降低 6.47 元。

**关键词:** 循环流化床锅炉; 兰炭; 燃烧; 配风; 换热

**中图分类号:** TK284

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2024)07-0221-04

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.07.039

## Combustion process and benefit analysis on using semi-coke to replace coal in coal-fired boiler

HE Hai-jun<sup>1,2\*</sup>

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. China Coal Technology & Engineering Group Clean Energy Corporation Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** Taking the project using semi-coke to replace coal as fuel in a circulating fluidized bed boiler in Hebei province, China as an example, the combustion system adopts the method of co-burning semi-coke and ash together, which solves the problems of large mechanical incomplete combustion loss and unstable material circulation after changing the fuels. The optimum mixing ratio of semi-coke to ash is 9:1. The air distribution system adopts the methods of controlling the total air volume and reducing the primary air rate to solve the problem that semi-coke is difficult to ignite, and the optimal primary air ratio is determined as 55%. The heating surface at the tail of the boiler is increased to solve the problems of steam overheating and boiler efficiency declining caused by the large increase of fuel calorific value. The soot, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions of the boiler after changing the fuels are reduced by 73%, 94% and 55%, respectively compared with the original boiler, and the hourly fuel cost will reduce by 5.51% under the original boiler's rated power.

**Key words:** circulating fluidized bed boiler; semi-coke; combustion; air distribution; heat transfer

煤炭长期以来在我国的能源结构中处于重要地位, 在我国一次能源消费中占比高达 56%<sup>[1]</sup>。煤炭燃烧产生大量 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等污染物和 CO<sub>2</sub> 等温室气体, 造成了酸雨、雾霾、温室效应等一系列大气污染和环境破坏。国家电力发展“十三五”规划指出, 加大集中供热发展力度, 对现有燃煤小锅炉进行逐步替代是未来的发展方向<sup>[2]</sup>。2020 年, 中国正式提出 2030 碳达峰、2060 碳中和目标, 并于次年将碳达峰、碳中和纳入到了生态文明建设整体布局<sup>[3]</sup>。

2019 年, 河北省生态环境厅发布政策, 要求禁止新建 35 t/h 以下燃煤锅炉, 以至于许多小型燃煤锅炉房因环保要求而被关停, 造成了较大的资源浪费。劣质煤炭的高效清洁利用是解决现有环保问题, 同时与我国能源禀赋相一致的有效用能途径<sup>[4]</sup>。21 世纪以来煤炭工业体系日渐完善, 采用炼焦、气化等技术应用可实现煤炭资源的最大化利用<sup>[5]</sup>。兰炭作为煤炭清洁类应用的产物, 已被纳入河北省清洁能源, 并且得到大力推广使用。将现有的

燃煤锅炉改燃兰炭是在遵循环保政策的条件下, 实现资源合理利用和改善企业经济效益的有效途径。

兰炭因热值高、硫含量低的特点被广泛应用于散煤替代清洁供热。近年来, 国内外学者针对在锅炉中纯烧或掺烧兰炭进行了广泛研究, 包括对兰炭的燃料性质<sup>[6-7]</sup>, 兰炭作为原煤的替代燃料在链条炉<sup>[8-9]</sup>和煤粉炉<sup>[10-14]</sup>中的燃烧特性研究。然而, 由于兰炭的低挥发分含量特性, 链条炉和煤粉炉的燃烧形式往往难以解决着火困难和燃尽率低的问题, 相比之下兰炭更适合用于循环流化床锅炉。陈庆杰<sup>[15]</sup>搭建了循环流化床燃烧试验系统用于模拟兰炭在锅炉中的燃烧, 根据实验台的温度和压力数据反馈得出了最佳燃烧效率工况。张孝禹<sup>[16]</sup>研究了兰炭末在 14 MW 循环流化床锅炉的燃料特性, 指出采用烟气再循环可降低 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放, 但会导致 CO 排放增加。Song 等<sup>[17]</sup>在 0.5 MW 循环流化床锅炉试验平台上研究了兰炭的 NO<sub>x</sub>、CO 排放和飞灰特性, 指出兰炭飞灰的多孔结构有利于促进 NO<sub>x</sub> 的还

收稿日期: 2024-02-07; 修回日期: 2024-05-07

基金项目: 中煤科工清洁能源股份有限公司科技创新基金项目 (CE-KY-CX-2021-07)

作者简介: 何海军 (1979-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为燃烧、节能、环保, 通讯联系人, hehaijun@cctege.com。

原反应,使  $NO_x$  排放降低。胡伟涛等<sup>[18]</sup>在 75 t/h 循环流化床锅炉上进行了兰炭浆燃烧试验,在负荷 38、50 t/h 时实现稳定燃烧,并建议结合兰炭浆特性优化分离器的分离效率和尾部受热面的分配。李静渊等<sup>[19]</sup>建立了一维循环流化床数值模型,模拟了兰炭在循环流化床锅炉中的燃烧特性,结果表明,提高分离器效率有利于兰炭的燃尽,并提出了 0.5 ~ 6.0 mm 的最优给煤粒径。

目前对于燃煤锅炉改燃兰炭的研究多以模拟计算和小尺度实验的方式进行<sup>[20-24]</sup>,对实际循环流化床锅炉改燃兰炭的工艺改造还缺乏认识,本文中以河北某燃煤锅炉改燃兰炭工程为例,研究循环流化床锅炉改燃兰炭的燃烧工艺,并对改燃前后的污染物排放及经济性进行了分析。

## 1 项目概况

河北某供热锅炉房建设于 2016 年,锅炉额定蒸发量 35 t/h,锅炉型号为 DHX35-2.0/250-M,燃煤种为 A II 类烟煤,采用高温型旋风分离器,高烟气流速,使炉膛内保持正压,燃烧室内保持较高的物料浓度。图 1 给出了该锅炉燃烧及换热系统的布置情况,将原燃烧烟煤的 35 t/h 循环流化床锅炉改用清

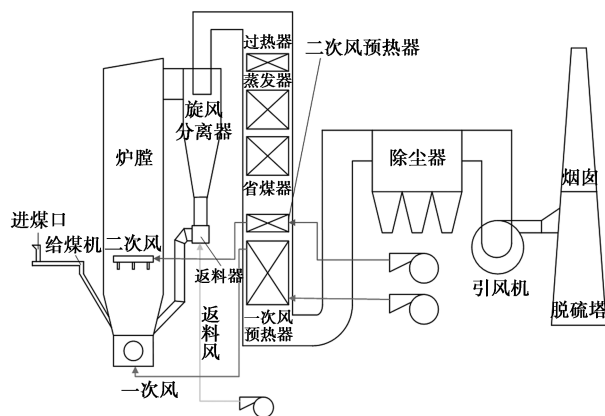


图 1 35 t/h 循环流化床锅炉系统图

表 2 锅炉采用燃料的工业分析、元素分析及发热量

	元素分析/%					工业分析/%				$Q_{\text{net,ar}}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
	$C_{\text{ar}}$	$H_{\text{ar}}$	$O_{\text{ar}}$	$N_{\text{ar}}$	$S_{\text{ar}}$	$A_{\text{ar}}$	$M_{\text{ar}}$	$V_{\text{ar}}$	$FC_{\text{ar}}$	
兰炭	65.32	1.90	5.55	0.83	0.45	10.26	15.69	7.37	66.68	23.15
原煤	47.40	3.14	8.61	0.86	0.61	18.43	20.92	13.43	47.22	17.80

本研究通过在兰炭中按比例混合锅炉自排灰渣,一同投入锅炉进行燃烧的方式,解决上述问题。在燃料中加入灰渣一方面增加了循环物料内灰分的含量,有利于建立物料平衡,实现稳定燃烧,另一方面可以使含碳量较高的灰渣继续参与燃烧,回收灰

洁型兰炭作为燃料,并将锅炉的额定蒸发量扩容为 45 t/h。

## 2 锅炉改燃及扩容工艺

### 2.1 燃料特性

我国兰炭的产区主要集中于陕西、新疆等西北地区,表 1 给出了我国近年来兰炭的产能与产量分布情况,2021 年我国兰炭的产能 1.3 亿 t,产量 5 308 万 t,产能利用率仅为 40.45%。提高兰炭资源的利用率是煤炭高效梯级利用的重要环节,鉴于兰炭高热值、低硫分的性质,作为燃料用于锅炉供热是提升其产能利用率的有效途径。

表 1 我国近年兰炭主产能、产量及产能利用率情况

时间	产量/万 t	产能/万 t	产能利用率/%
2016	4403	11018	39.96
2017	4700	11019	42.66
2018	4920	11077	44.26
2019	5572	11497	48.47
2020	5595	12212	45.82
2021	5308	13122	40.45

### 2.2 改造方案

#### 2.2.1 燃烧系统

由于燃料性质的差异,直接采用兰炭替换原煤将导致锅炉燃烧出现诸如着火困难、物料循环不稳定、机械未完全燃烧热损失高等问题。表 2 给出了循环流化床锅炉改造前后所燃用原煤及兰炭的工业分析、元素分析和发热量,可以看出,兰炭与原煤在化学成分含量上存在较大差别,原锅炉采用的燃料为 A II 型烟煤,挥发分含量较高,而兰炭的特点是固定碳、低挥发分和低灰分。兰炭的固定碳含量为 66.68%,是原煤的 1.4 倍,而挥发分含量为 7.37%,比原煤低 45%,灰分含量为 10.26%,比原煤低 44%。

渣中的机械未完全燃烧热损失。通过实验研究,取得了兰炭与灰渣的最佳掺配比例为 9:1,此时的飞灰烧失量低于 10%。

#### 2.2.2 配风系统

兰炭的热值为 23.15 MJ/kg,是原煤热值的 1.3

倍,而改造后的锅炉经过扩容,额定蒸发量由原来的 35 t/h 增加至 45 t/h,因此单位时间燃料的投入量未发生改变。由式(1)可得燃烧原煤和兰炭的理论空气量分别为 4.76、6.13 m<sup>3</sup>/kg。兰炭燃烧所需空气量接近原煤的 1.3 倍,因此改燃后锅炉配风系统首先应增加总空气量。为保障燃料燃尽,改燃前后采用了相同的过量空气系数,在总送风量方面将原锅炉的 31 600 m<sup>3</sup>/h 提升至 40 200 m<sup>3</sup>/h。

$$V^0 = 0.0889(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.26H_{ar} - 0.0333O_{ar} \quad (1)$$

式中, $V$ 为燃烧理论空气量,m<sup>3</sup>/kg; $C_{ar}$ 为收到基碳含量,%; $S_{ar}$ 为收到基硫含量,%; $H_{ar}$ 为收到基氢含量,%; $O_{ar}$ 为收到基氧含量,%。

煤的着火温度随着挥发分含量的降低而升高,兰炭的挥发分含量仅为原煤的 55%,着火温度在 750℃左右,比原燃料 A II 型烟煤高约 200℃,因此改燃兰炭后锅炉将出现着火延迟的问题。原炉膛内的燃烧过程将因着火延迟而延后,从而导致粉煤未能燃尽就离开炉膛高温区,增大锅炉的机械不完全燃烧损失,此外,燃烧过程延后也会使炉膛内高温区上移,在炉膛出口处产生结渣。

本研究通过优化一二次风配比的方式,解决兰炭着火困难的问题,原锅炉的设计一次风量占比为 60%,本研究在锅炉改燃兰炭后,保持总风量不变的基础上,调整一、二次风机转速,按比例逐渐降低一次风量并提高二次风量,测试结果表明,一次风占比降低至 55%时,可以同时满足兰炭燃料的稳定着火和物料流化的要求。配风优化后锅炉在额定负荷条件下炉膛流化速度为 5.5 m/s,煤粒在炉膛内的停留时间可达 4 s,锅炉出口氧含量低于 7%。

### 2.2.3 换热系统

原煤的收到基低位热值为 17.8 MJ/kg,而兰炭的收到基低位热值高达 23.15 MJ/kg,原煤与兰炭在发热量方面存在巨大差异,若直接进行改燃,炉膛内温度将明显上升,炉膛及烟道内吸热量随之增加,受热面传热能力不足,最终导致蒸汽超温,锅炉出力下降和 NO<sub>x</sub> 排放增加的问题。

本研究中采用在锅炉尾部竖井烟道增设水冷受热面并提高吸热工质流量的方法,在改燃后炉内放热增加的情况下,同步提高吸热工质侧的传热能力,使改燃后的蒸汽温度和炉膛温度与原锅炉的运行参数相接近。表 3 给出了改燃前后锅炉部分测点的运行数据,可以看出通过增加受热面和工质流量,改燃兰炭后炉膛温度为 885.6℃,仅比改燃前增加

6.5℃,因此不会对 NO<sub>x</sub> 排放造成较大影响,改燃后主蒸汽温度为 234.8℃,比原锅炉高 16.9℃,未造成蒸汽超温,改燃后的锅炉仍可以较好地满足原供热用户的生产要求。

表 3 循环流化床锅炉改燃前后运行数据 ℃

项目	改燃前	改燃后
炉膛下端温度	829.1	885.6
二次风界面温度	735.6	698.1
返料温度	813.3	812.3
炉膛出口温度	772.1	769.6
过热器进口温度	668.7	677.6
蒸发器进口温度	448.8	448.3
省煤器进口温度	309.1	293.2
省煤器出口烟温	259.9	267.8
空气预热器进口烟温	188.2	172.1
空气预热器出口烟温	125.0	113.0
主蒸汽温度	217.9	234.8
一次风温度	118.7	109.4
二次风温度	142.3	117.1

## 3 节能减排效益分析

### 3.1 污染物排放

兰炭因经过干馏热解处理,部分氮、硫元素被去除,并且兰炭灰分中 CaO 占比较大,使兰炭具有较好的自脱硫能力,在 SO<sub>2</sub> 排放方面存在很大优势;兰炭的固定碳含量较高,在乏氧区域易出现不完全燃烧的问题,本案例改燃兰炭后降低了煤粉颗粒直径,原煤采用的粉煤粒径范围为 0~10 mm,改用兰炭后将最大粒径调整为 6 mm,以增加燃料与空气的接触面积,同时采用掺烧灰渣和配风优化的方法进一步提高燃尽率,达到控制改燃后锅炉烟尘排放的目的;兰炭与原煤的 NO<sub>x</sub> 排放均来自 3 个生成路径,一是由燃料本身含氮有机物含量决定的燃料型 NO<sub>x</sub>,兰炭的氮元素含量低于原煤;二是富燃料区域形成的快速型 NO<sub>x</sub>,可以通过优化锅炉配风加以控制;三是热力型 NO<sub>x</sub> 生成温度一般高于 1 500℃,循环流化床锅炉中的燃烧过程热力型 NO<sub>x</sub> 不占主导地位。表 4 给出了锅炉改燃前后烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的排放情况,可以看出改燃后的 SO<sub>2</sub> 排放得到明显下降,并且经过对锅炉燃烧和配风系统的优化设计,改燃后锅炉内燃料的燃尽率较高,炉内温度控制在合适的范围内,因此颗粒物和 NO<sub>x</sub> 排放得到了较好的控制,均低于改燃前的排放水平。

改燃兰炭后,在采用与原锅炉相同的烟气净化流程情况下,锅炉烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 排放分别为

0.478、0.374、8.851 mg/m<sup>3</sup>,与原锅炉相比分别降低了 73%、94%、55%。改燃后锅炉排放远低于河北省大气污染物排放标准<sup>[25]</sup>。

表 4 锅炉改燃前后污染物排放对比 mg/m<sup>3</sup>

燃料	颗粒物	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
原煤	1.786	6.139	19.719
兰炭	0.478	0.374	8.851

### 3.2 经济性分析

改燃前锅炉额定功率下产蒸汽速率为 35 t/h,燃料消耗量 4 955 kg/h,原燃料 A II 型烟煤(热值 17.8 MJ/kg)单价 830 元/t,燃料成本 4 112.65 元/h,产吨蒸汽所需燃料成本 117.50 元;改燃兰炭(热值 23.15 MJ/kg)后,若仍以原锅炉额定功率 35 t/h 运行,燃料消耗量 3 810 kg/h,兰炭单价 1 020 元/t,燃料成本 3 886.2 元/h,产吨蒸汽所需燃料成本 111.03 元/t。锅炉经过改燃扩容后,以原锅炉 35 t/h 的额定功率运行,节约燃料成本 5.51%,产吨蒸汽所需燃料成本降低 6.47 元。改燃前后产吨蒸汽所需燃料成本对比如表 5 所示。

表 5 锅炉改燃前后产吨蒸汽所需燃料成本对比 元/t

燃料	原煤	兰炭
每吨蒸汽燃料成本	117.50	111.03

改燃后锅炉采用的兰炭部分为粒径小于 3 mm 的兰炭焦面,可以不经破碎机直接投入锅炉,可节省部分磨煤电耗。

## 4 结论

采用兰炭替代烟煤用于清洁供暖是提高兰炭产能利用率,实现煤炭资源梯级利用的有效途径,循环流化床锅炉的燃烧方式有利于实现兰炭的高效清洁燃烧。本研究通过对实际煤改兰炭循环流化床锅炉工程案例分析得出以下结论。

(1)通过在燃料中掺入灰渣的形式,提高了燃尽率和物料循环稳定性,经实验测得最佳兰炭和灰渣的掺混比为 9:1。

(2)通过降低一次风占比同时控制燃烧总风量不变的方法,降低燃烧初期的吸热量提高了兰炭的着火性能,得出最佳一次风比例为 55%。

(3)通过增加尾部烟道受热面面积并提高吸热工质流量的方式,使改燃兰炭后炉膛内温度和蒸汽温度在合理范围之内,解决了因锅炉改用高热值燃料产生的蒸汽超温和效率下降的问题。

(4)锅炉通过改燃扩容,烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放分别比原锅炉降低了 73%、94% 和 55%,在原锅炉

35 t/h 的额定功率运行,节约燃料成本 5.51%,产吨蒸汽所需燃料成本降低 6.47 元。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国自然资源部.中国矿产资源报告 2022[R].2022.
- [2] 李琼慧,王彩霞.从电力发展“十三五”规划看新能源发展[J].中国电力,2017,50(1):30-36.
- [3] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7):2197-2211.
- [4] 周琦.低阶煤提质技术现状及完善途径[J].洁净煤技术,2016,22(2):23-30.
- [5] Kazuhiro Ueta.Low carbon society faces the problem:The emissions goals and green new deal[M].Japan's Kyoto University Press,2008.
- [6] Zhang Jinping, Jia Xiaowei, Wang Chang'an, et al.Experimental investigation on combustion and NO formation characteristics of semi-coke and bituminous coal blends[J].Fuel,2019,247:87-96.
- [7] 张鑫.兰炭替代无烟煤高效清洁利用的研究[J].洁净煤技术,2015,21(3):103-106.
- [8] 陈曦.兰炭燃烧特性及燃兰炭锅炉设计分析[J].能源研究与信息,2018,34(4):208-211.
- [9] 吕耀军,美国新,蒋祥婷,等.供热燃煤锅炉改燃兰炭的探讨[J].区域供热,2021,(1):34-37.
- [10] 李芳.煤粉工业锅炉燃烧兰炭试验研究[J].洁净煤技术,2015,21(2):106-108.
- [11] 陈福仲,吕昊正,贾森,等.大型供热锅炉燃用兰炭试验研究[J].煤气与热力,2020,40(7):1-3,41.
- [12] 潘世英,邹蓬,吕昊正,等.70 MW 双燃料锅炉兰炭燃烧试验浅析[J].区域供热,2020,(2):82-85.
- [13] 李小炯.煤粉工业锅炉兰炭与烟煤燃烧性能比较[J].能源环境保护,2020,34(4):39-45.
- [14] 陈广伟,黄建平,徐鹏志.兰炭在 600 MW 无烟煤“W”火焰锅炉上的掺烧应用研究[J].发电技术,2021,42(2):267-272.
- [15] 陈庆杰.兰炭燃烧装置设计及燃烧特性研究[D].秦皇岛:燕山大学,2018.
- [16] 张孝禹.兰炭在流化床中燃烧特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [17] Song Guoliang, Xiao Yuan, Yang Zhao, et al.A comparative experimental study on characteristics of ultra-low NO<sub>x</sub> emission and fly ash between Fugu bituminous and its semi-coke with post-combustion[J].Fuel Processing Technology,2021,211:106618.
- [18] 胡伟涛,王菲菲,杜汉双,等.兰炭浆循环流化床锅炉工业试验探究[J].燃料与化工,2021,52(6):14-16,19.
- [19] 李静渊,柯希玮,蒋苓,等.兰炭循环流化床锅炉燃烧性能模型[J].洁净煤技术,2022,28(6):143-149.
- [20] Ke X, Engblom M, Zhang M, et al. Modeling of the axial distributions of volatile species in a circulating fluidized bed boiler[J].Chemical Engineering Science,2021,233:116436.
- [21] Ke X, Li D, Li Y, et al.1-Dimensional modelling of in-situ desulphurization performance of a 550 MWe ultra-supercritical CFB boiler[J].Fuel,2021,290:120088.
- [22] Yang H, Yue G, Xiao X, et al.1D modeling on the material balance in CFB boiler[J].Chemical Engineering Science,2005,60(20):5603-5611.
- [23] Abreu P, Casaca C, Costa M. Ash deposition during the cofiring of bituminous coal with pine sawdust and olive stones in a laboratory furnace[J].Fuel,2010,89(12):4040-4048.
- [24] Xiao Hanmin, Ma Xiaoqian, Liu Kai. Co-combustion kinetics of sewage sludge with coal and coal gangue under different atmosphere[J].Energy Conversion and Management,2010,51(10):1976-1980.
- [25] 河北省生态环境厅,河北省市场监督管理局.DB 13/5161—2020.锅炉大气污染物排放标准[S].