

# 130 t/h 循环流化床飞灰残炭炉设计与运行

黄乐平<sup>1</sup>, 宋国良<sup>2</sup>, 杨 召<sup>2</sup>, 牛玉奇<sup>1</sup>

(1. 济民可信(高安)清洁能源有限公司, 江西 宜春 330812; 2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190)

**摘要:**煤气化工艺产生的气化残炭挥发分极低, 固定碳含量高, 水分几乎为零, 常规燃烧技术难以利用, 利用循环流化床实现气化残炭高效洁净燃烧是一种有效途径。针对中国科学院工程热物理研究的残炭燃烧技术建立的130 t/h 气化残炭循环流化床锅炉开展性能测试, 通过考察沿炉膛高度方向的温度分布和变化规律、旋风分离器差压、残炭炉的燃烧效率以及 $\text{NO}_x$ 原始排放数据分析了残炭炉的运行特性。结果表明:130 t/h 飞灰残炭炉在床温超过850℃时可实现气化残炭稳定燃烧, 整个底部床面进行预热燃料, 在二次风的分级配风下直接燃烧, 床温分布均匀, 燃烧效率可达97%以上; 一次风当量比为0.3的条件下, 残炭炉可稳定运行, 负荷80%以上尾部烟道飞灰含碳量低于6%; 残炭炉运行中炉内NO的转化率较低,  $\text{NO}_x$ 原始排放小于100 mg/m<sup>3</sup>。

**关键词:** 气化残炭; 残炭炉; 预热燃烧; 燃烧效率; 一次风当量比

中图分类号: TQ536 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.03.015

[引用本文格式] 黄乐平, 宋国良, 杨 召, 等. 130 t/h 循环流化床飞灰残炭炉设计与运行[J]. 热能动力工程, 2023, 38(3): 112-118. HUANG Le-ping, SONG Guo-liang, YANG Zhao, et al. Design and operation of a 130 t/h fly ash residual carbon CFB boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3): 112-118.

## Design and Operation of a 130 t/h Fly Ash Residual Carbon CFB Boiler

HUANG Le-ping<sup>1</sup>, SONG Guo-liang<sup>2</sup>, YANG Zhao<sup>2</sup>, NIU Yu-qi<sup>1</sup>

(1. Jimincare (Gaoan) Clean Energy Co., Ltd., Yichun, China, Post Code: 330812;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190)

**Abstract:** Due to the extremely low volatile content of gasification residual carbon, high fixed carbon content and almost zero moisture produced in the coal gasification process, it is difficult to utilize conventional combustion technology in this process. Therefore, efficient incineration through a circulating fluidized bed (CFB) is an effective way to realize efficient and clean combustion of gasification residual carbon. The performance of 130 t/h fly ash residual carbon boiler established by the residual carbon combustion technology of engineering thermophysics research of Chinese Academy of Sciences is tested. The operating characteristics of the residual carbon boiler is analyzed by investigating the temperature distribution and change rule along the furnace height direction, the differential pressure of cyclone separator, the combustion efficiency of the residual carbon boiler and the original  $\text{NO}_x$  emission data. The results show that the gasification residual carbon can be stably burned in 130 t/h fly ash residual carbon boiler when the bed temperature exceeds 850℃. The whole bottom bed surface is preheated and the fuel is directly burned under the graded distribution of secondary air. The bed temperature distribution is uniform and the combustion efficiency can reach more than 97%. When the primary air equivalent ratio is 0.3, the residual carbon boiler can operate stably. The carbon content of fly ash in tail flue is lower than 6% under the boiler load is more than 80%. The conversion rate of NO in the residual boiler is lower during operation,

and the original  $\text{NO}_x$  emission is less than  $100 \text{ mg/m}^3$ .

**Key words:** gasification residual carbon, residual carbon boiler, preheating combustion, combustion efficiency, primary air equivalent ratio

## 引言

流化床煤气炉是目前较为常见的煤气化工艺装置<sup>[1-3]</sup>。流化床煤气化装置产生的气化残炭低位发热量可高达  $12 \sim 25 \text{ MJ/kg}$ , 单台煤气化炉产量大, 气化残炭粒度细、固定碳高、挥发分极低、水分几乎为零等特性, 造成气化残炭用常规燃烧技术很难进行处理。气化残炭的洁净燃烧是当代煤化工煤炭梯级利用的重点研究课题, 如果能加以利用可将煤气化工艺的煤炭利用率上升到一个新台阶。

国内对低挥发分气化残炭直接燃烧技术的研究较少, 对低挥发分无烟煤燃烧的研究较多, 主要研究方向是气化残炭与燃煤进行混燃特性及动力学分析。无烟煤的直燃技术主要应用在 W 火焰锅炉, 但 W 火焰锅炉整个燃烧区域内温度较高, 其  $\text{NO}_x$  排放较常规燃煤锅炉高<sup>[4-6]</sup>。

何宏舟、骆仲决等人<sup>[7-9]</sup>在循环流化床上进行无烟煤的燃烧特性分析, 通过大量试验数据分析表明燃烧效率都低于 90%。中国科学院工程热物理研究所推行的预热燃烧技术可以实现气化残炭的充分燃烧, 其燃烧效率可达 95% 以上,  $\text{NO}_x$  原始排放可低于  $200 \text{ mg/m}^3$ 。文献[10-14]实现了对挥发分极低的气化残炭的稳燃, 通过预热气化残炭, 整体预热温度达到  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 预热燃料可在燃烧室中着火燃烧, 燃烧室温度分布均匀, 循环流化床运行稳定, 其尾部飞灰含碳量为 3.2%, 燃烧效率高达 95.12%。李伟等人<sup>[15]</sup>对宁夏石沟驿煤气化残炭的燃烧特性进行了实验研究, 研究结果表明, 升温速率的提升有助于气化残炭的燃烧, 细粒径有助于气化残炭的着火, 氧气浓度对气化残炭的燃尽及稳燃特性影响最大。郑洪岩等人<sup>[16]</sup>对气化残炭与低阶煤混燃特性及动力学进行分析研究, 研究结果表明, 煤中挥发分的逸出和燃烧会提高气化残炭的燃烧性能, 说明气化残炭与煤混燃可以提高整体的燃烧性

能。文献[17-18]对  $100 \text{ t/d}$  气化飞灰预热燃烧锅炉进行了试验研究。研究结果表明, 预热燃烧锅炉把挥发分极低的气化飞灰稳定着火燃烧, 燃烧效率可达 98% 以上,  $\text{NO}_x$  原始排放浓度最低可达  $261.94 \text{ mg/m}^3$ , 预热燃烧锅炉可实现气化飞灰的高效低氮燃烧。

基于中国科学院工程热物理研究所飞灰残炭燃烧技术, 以及在各试验平台上取得试验研究成果<sup>[19-21]</sup>支撑下, 2020 年在江西某项目建设了 3 台  $130 \text{ t/h}$  循环流化床飞灰残炭炉, 气化残炭来自 16 台常压富氧循环流化床煤气化炉, 该项目作为中科院煤炭高效清洁利用科研示范项目, 飞灰残炭燃烧科研成果首次实现商业化应用。本文利用循环流化床锅炉燃烧技术对气化残炭进行资源化综合利用, 合理优化残炭燃烧技术, 表明该技术具备可行性。残炭炉经过一年多的调试运行, 2021 年 10 月 3 台残炭炉均实现高效、安全、稳定运行。

## 1 飞灰残炭炉设计

### 1.1 设计参数

该锅炉为超高压、超高温、中间一次再热、露天布置的循环流化床锅炉, 最大连续蒸发量为  $130 \text{ t/h}$ 。主要设计参数如表 1 所示。

表 1 残炭炉主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of residual carbon boiler

参数	数值
最大连续蒸发量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	130
过热蒸汽压力/MPa	13.7
过热蒸汽温度/ $^\circ\text{C}$	571
再热蒸汽进口压力/MPa	3.71
再热蒸汽出口压力/MPa	3.93
再热蒸汽进口温度/ $^\circ\text{C}$	400
再热蒸汽出口温度/ $^\circ\text{C}$	571
给水温度/ $^\circ\text{C}$	250
排烟温度/ $^\circ\text{C}$	$\leq 135$
设计残炭消耗量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	20.7

锅炉冷态启动时,采用0~4 mm粒径原煤,在80%额定热负荷下运行后投入气化残炭进行燃烧,正常运行时,纯残炭工况运行,燃烧残炭量设计值为20.7 t/h。但结合项目实际,设计燃料与项目实际产生的气化残炭热值差距比较大,热值相差5 MJ/kg,造成该残炭炉在正常运行期间消耗的飞灰残炭量与设计值有较大的偏差。根据该锅炉实际运行情况,在锅炉额定出力下实际消耗的飞灰残炭量约16 t/h。

## 1.2 燃料成分

气化残炭是煤气化工艺中产生的工业废弃

物,其挥发分低、水分近零、热值较高,甚至达到20 MJ/kg以上,如不加以燃烧利用,会造成残炭资源的巨大浪费。本项目最初设计根据同类型煤气化炉气化残炭进行设计核算,但项目投运后煤气化炉运行工况的不同,产生的气化残炭与设计有较大的偏差,运行调整参照项目实际燃料特性进行调整。气化残炭工业分析和元素分析如表2所示。从表2可知,气化残炭与动力煤热值相当,气化残炭水分极低,挥发分仅为0.47%,堆密度低,输送过程需要进行高度严格密封处理,避免出现吸水板结及漏灰现象。

表2 气化残炭及燃煤的工业分析和元素分析(%)

Tab.2 Ultimate and proximate analysis of gasification residual carbon and coal(%)

燃料	元素分析/%					工业分析/%				
	C <sub>ad</sub>	H <sub>ad</sub>	O <sub>ad</sub>	N <sub>ad</sub>	S <sub>ad</sub>	M <sub>t</sub>	A <sub>ad</sub>	V <sub>daf</sub>	FC <sub>ad</sub>	Q <sub>net,ad</sub> /MJ·kg <sup>-1</sup>
实际残炭	65.21	0.47	0	0.44	0.93	0.4	32.88	2.25	64.91	23.85
设计残炭	55	0.48	0	0.5	0.69	0.65	43.3	0.91	51	18.83

使用马尔文 MS3000 粒度仪分析的气化残炭粒径分布如图1所示。从图1中可知,该项目的气化残炭粒度范围为0~40 μm,气化残炭粒径分布 $d_{50}$ 为19.6 μm, $d_{90}$ 为31.5 μm。

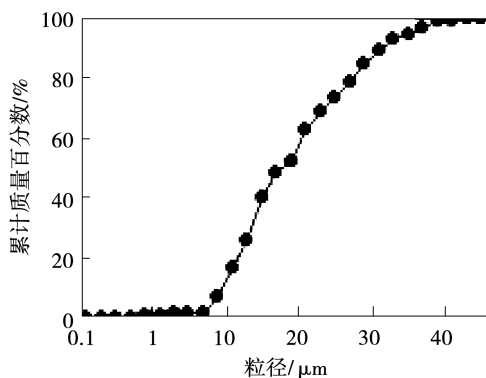


图1 气化残炭的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of gasification residual carbon

## 1.3 工艺流程

该锅炉的气化残炭输送工艺流程如图2所示,主要包括炉前输送系统、飞灰预热系统及返料系统。

该项目的气化残炭全部来自气化炉,由气力输送装置完成气化残炭的给料输送。飞灰残炭炉设置一个炉前飞灰仓。炉前细灰仓有效容积为100 m<sup>3</sup>,仓底设计2个出料口,每个出料口对应一套输送装置,并在仓底斜坡面上设置了流化风板,保障下料顺畅,利用压缩空气输送至残炭炉给料口。炉膛内部安装了3片中温过热屏、2片高温再热屏、3片高温过热屏。前后墙还布置有2层二次风口,上下层二次风风量可灵活进行调节。炉膛与尾部竖井之间,布置有2台汽冷式旋风分离器,旋风分离器中心筒与旋风筒为偏心布置,提高分离器分离效率。其下部各布置1台“J”阀回料器,其结构如图3所示,“J”阀回料器为一分为二的型式,在2只返料器下部的料腿上各设置有2个气化残炭给料口,用于气化残炭的加入,将气化残炭送到返料腿给料口进入炉膛燃烧,并在每个斜腿引入1股热二次风,促进气化残炭扩散分布,与高温循环灰进行混和和预热,预混有利于提升气化残炭的活性,在炉膛里可实现充分着火燃烧。

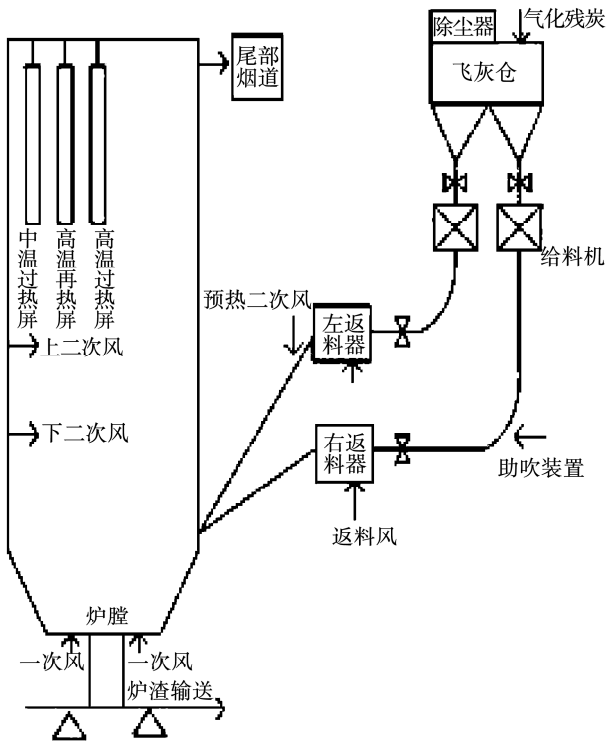


图 2 残炭输送工艺流程图

Fig. 2 Conveying process flow chart of gasification residual carbon

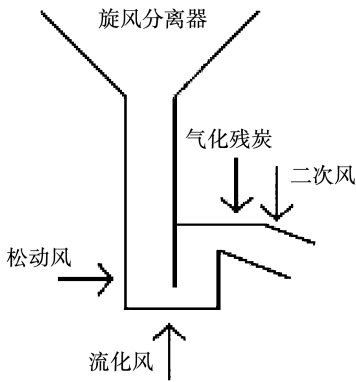


图 3 “J” 阀回料器结构图

Fig. 3 J- valve feeder structure diagram

## 2 飞灰残炭炉运行

### 2.1 炉膛运行情况

残炭炉在炉膛底部布置了 12 个热电偶测量床温,插入深度为 400 mm,测量距离整个炉膛底部 400 mm 处的温度;沿炉膛高度方向布置了 4 个热电偶,插入深度为 300 mm,测量距离侧墙 300 mm 处的温度。其中 2 个对称布置在炉膛中部侧墙上,另 2 个布置在炉膛出口壁面上。残炭炉运行中 168 h

温度变化如图 4 所示。从图 4 可知,炉膛温度变化比较稳定,炉子运行工况比较稳定,底部床温和中部床温趋于 850 ~ 890 °C,炉膛左右两侧出口温度分布均匀,两者相差不超过 20 °C。

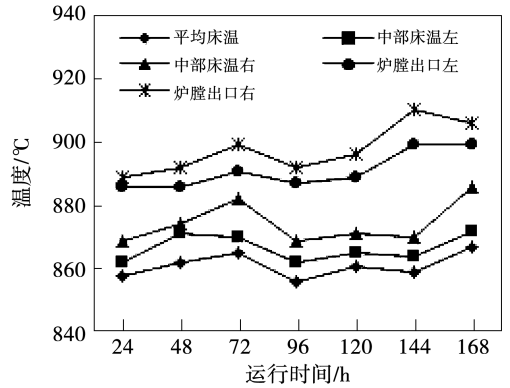


图 4 残炭炉炉内的温度变化

Fig. 4 Temperature change in residual carbon boiler

图 5 是炉膛底部密相区平均床温、中部平均床温、炉膛出口平均床温在 80% ~ 100% 负荷变化图。炉膛密相区和稀相区温度点变化区间均不大,燃烧工况比较稳定,由于气化残炭挥发分低,水分几乎为零,绝大部分为固定碳,当气化残炭着火燃烧后,炉膛的温度都有明显提升。随着气化残炭的增加,锅炉负荷增加,炉内温度及沿炉膛高度方向的温度都有提升。3 台残炭炉运行中,核心燃烧区域内的最高温度不高于 920 °C,远低于常规循环流化床燃煤炉。这是由于大量气化残炭进入炉膛,其挥发分极低,需要在炉膛底部进行预热,中部进行充分燃烧,通过分级配风,逐步控制燃料热量的释放。从图 5 中也可以看出,残炭炉炉膛出口温度较底部床温及中部床温偏高。

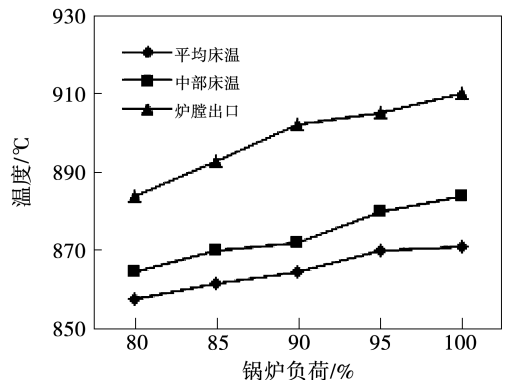


图 5 不同负荷下炉内的温度变化

Fig. 5 Furnace temperature change under different loads

### 2.2 旋风分离器运行情况

由图 6 中可知,残炭炉运行中左、右两侧旋风分离器差压的差压均低于 2.5 kPa。此参数的差值也反映尾部烟道的阻力,同一负荷下差值越大则循环灰量越大。循环灰量不足或返料不畅时,差值会变小。从残炭炉运行情况来看,旋风分离器最低差压均高于 1.5 kPa,这也表明气化残炭进入炉膛进行着火燃烧,锅炉外循环建立较流畅,炉膛的物料循环量较常规循环流化床燃煤炉高。从图 5 中也可知,残炭炉运行中炉膛差压均高于 6.0 kPa,这也说明残炭炉运行中旋风分离器入口物料浓度较高条件下,分离器的效率能满足物料循环。运行中循环灰量较大,采用在返料室底部放循环灰措施可有效控制炉膛的物料浓度,减少旋风分离器出口差压。对该项目循环灰样进行工业元素分析,其飞灰含碳量均小于 5%。气化残炭在返料器斜腿进入炉膛燃烧,在热二次风的预混作用下,经过炉膛分级配风燃烧比较充分。由于气化残炭是循环流化床煤气化炉的飞灰,粒度细,底渣量非常小,床面容易塌床,残炭炉运行中要定期添补床料来维持料层差压。该项目上采用的床料全部来自气化炉炉渣,气化炉炉渣颗粒度均匀,热值在 1.25 MJ/kg 以下,燃烧形成的灰分全部形成飞灰从尾部烟道经输灰仓泵排出,整个尾部烟道飞灰量较大,残炭炉高负荷运行中尾部受热面需要频繁清灰。

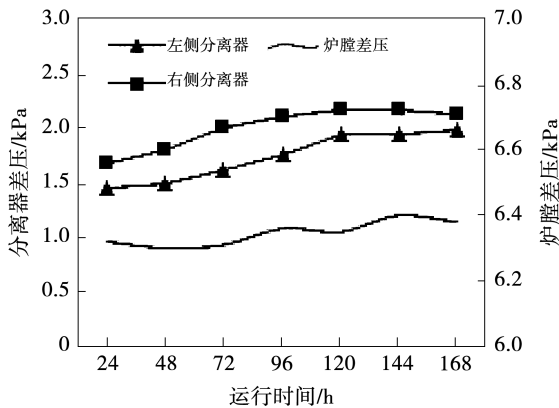


图 6 旋风分离器差压变化

Fig. 6 Differential pressure change in cyclone separator

### 2.3 残炭炉燃烧效率

图 7 是不同二次风当量比下残炭炉尾部烟道的飞灰含碳量情况。在一次风当量比为 0.3 的条件

下,增大二次风量和气化残炭入炉量可持续提升锅炉负荷。当二次风当量比超过 0.78 时,尾部烟道飞灰含碳量在 6% 以下。

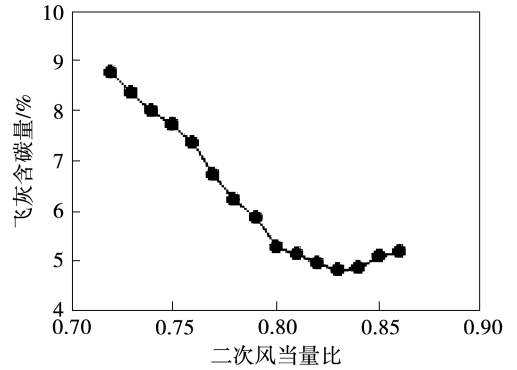


图 7 不同二次风当量比下尾部烟道飞灰含碳量

Fig. 7 Carbon content of tail flue fly ash under different secondary air equivalence ratios

为研究不同负荷下残炭炉的燃烧效率,选取 3 种不同负荷下燃烧效率进行测算。由表 3 可知,80%、85% 和 90% 负荷下气化残炭在残炭炉上燃烧效率均超过 97%;当锅炉负荷 80% 以上尾部烟道飞灰含碳量可控制在 6% 以下;炉渣含碳量低于 2%。气化残炭的粒度细,其发生燃烧反应表面积比较大,经过底部床面的进一步预热,达到着火点,在二次风的分级配风下直接燃烧,不存在着火过程。残炭炉运行中底部床面为预热燃料阶段,床面没有气化残炭的热量释放,不存在明显的高温区,燃烧区域为炉膛的中部,运行中要加强监管。对密相区床温只要控制床面的流化状态,定期加强炉内床料的置换,底部床温可分布均匀。

表 3 残炭炉燃烧效率

Tab. 3 Combustion efficiency of residual carbon boiler

参 数	工况 1	工况 2	工况 3
锅炉负荷/%	80	85	90
一次风当量比	0.3	0.3	0.3
尾气 CO 浓度/ $10^{-6}$	324	296	256
气体不完全燃烧热损失/%	0.3	0.24	0.18
固体不完全燃烧热损失/%	2.32	2.08	2.01
飞灰含碳量/%	5.86	5.16	4.86
底渣含碳量/%	1.66	1.56	1.28
燃烧效率/%	97.38	97.68	97.81

## 2.4 残炭炉 NO<sub>x</sub> 排放

表4为残炭炉运行期间 NO<sub>x</sub> 排放特性。为测量原始排放数据,SNCR 脱硝系统不投用,脱硝剂入口气动阀关闭,采集尾部空气预热器、SCR 入口 NO<sub>x</sub> 排放平均数值。由表4中可知,在3种负荷下飞灰残炭炉 NO<sub>x</sub> 原始排放均小于 100 mg/m<sup>3</sup>,在90%负荷下残炭炉 NO<sub>x</sub> 原始排放较80%负荷高。这是由于残炭炉在90%负荷整体配风量较80%负荷高,且二次风量当量比也稍高。随着负荷的提升炉内沿炉膛高度方向的温度都有升高,造成 NO<sub>x</sub> 原始排放升高,但远比常规循环流化床燃煤炉 NO<sub>x</sub> 原始排放水平低。主要原因有3方面:(1) 残炭炉是一个逐步预热、着火、燃烧过程,整个炉膛内不存在明显的高温区,在整个炉内停留时间也短,不利于 NO<sub>x</sub> 生成量的增加;(2) 残炭炉核心区域的燃烧温度较燃煤炉低,而且炉内温度分布比较均匀,可以有效降低热力 NO<sub>x</sub> 的生成;(3) 气化残炭挥发分极低,进入炉膛在床面进行预热过程中,整体处在一个强还原性气氛环境中,NO 的转化率较低,生成的 NO 进行还原反应,使 NO 还原为 N<sub>2</sub>。

表4 残炭炉 NO<sub>x</sub> 排放

Tab.4 NO<sub>x</sub> emission of residual carbon boiler

参数	工况1	工况2	工况3
锅炉负荷/%	80	85	90
一次风当量比	0.3	0.3	0.3
左侧 SCR 入口/mg·m <sup>-3</sup>	62.40	65.68	74.30
右侧 SCR 入口/mg·m <sup>-3</sup>	65.80	66.87	68.1
左侧空预器入口/mg·m <sup>-3</sup>	54.96	55.68	59.30
右侧空预器入口/mg·m <sup>-3</sup>	57.88	58.32	58.40

## 3 结 论

(1) 残炭炉平均床温超过 850 ℃,气化残炭可充分着火燃烧,随着气化残炭的增加,炉内温度及沿炉膛高度方向的温度都有提升。

(2) 一次风当量比为 0.3 的条件下,飞灰残炭炉可稳定运行,当二次风当量比超过 0.78 时,尾部烟道中飞灰含碳量可低于 6%。

(3) 残炭炉运行中底部床面为预热燃料阶段,在二次风的分级配风下直接燃烧,不存在着火过程,床面没有气化残炭的热量释放,炉内流化良好,床温

可分布均匀。

(4) 残炭炉炉内 NO 的转化率较低,NO<sub>x</sub> 原始排放小于 100 mg/m<sup>3</sup>。

(5) 残炭炉可以采取一路三次风优化布置,进一步控制炉内气化残炭燃烧热量的释放过程,从返料器斜腿进入炉膛底部充分预热后,与二次风、三次风接触后直接燃烧,可促进气化残炭燃尽性能,提升残炭炉的燃烧效率。

## 参考文献:

- [1] 王辅臣. 煤气化技术在中国:回顾与展望[J]. 洁净煤技术, 2021,27(1):1-33.  
WANG Fu-chen. Coal gasification technologies in China: review and prospect[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1):1-33.
- [2] 戴厚良,何祚云. 煤气化技术发展的现状和进展[J]. 石油炼制与化工, 2014,45(4):1-7.  
DAI Hou-liang, HE Zuo-yun. Status and progress of coal gasification technology [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2014,45(4):1-7.
- [3] 张东亮. 中国煤气化工艺(技术)的现状与发展[J]. 煤化工, 2004(2):1-5.  
ZHANG Dong-liang. Present status and future development of coal gasification technology in China [J]. Coal Chemical Industry, 2004(2):1-5.
- [4] 李争起,任 枫,刘光奎,等. W 火焰锅炉高效低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术[J]. 动力工程学报, 2010,30(9):645-662.  
LI Zheng-qi, REN Feng, LIU Guang-kui, et al. Combustion technologies of down-fired boilers with high efficiency and low-NO<sub>x</sub> emissions [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010,30(9):645-662.
- [5] 兰艳旭,王 晖,邱福岗,等. 乏气风布置对“W”型火焰锅炉低氮燃烧特性的影响[J]. 洁净煤技术, 2017,23(6):76-82.  
LAN Yan-xu, WANG Hui, QIU Fu-gang, et al. Influence of tertiary air arrangement on low-NO<sub>x</sub> combustion characteristics for a "W" type flame boiler [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(6):76-82.
- [6] 宋 健. W 型火焰锅炉低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术的数值模拟与应用 [J]. 湖南电力, 2020,40(5):82-86.  
SONG Jian. Numerical simulation and application of low NO<sub>x</sub> emission technology based on combined combustion for a W-shaped flame boiler [J]. Hunan Electric Power, 2020,40(5):82-86.
- [7] 骆仲浚,何宏舟,王勤辉,等. 循环流化床锅炉技术的现状及发展前景[J]. 动力工程, 2004,24(6):761-767.  
LUO Zhong-yang, HE Hong-zhou, WANG Qin-hui, et al. Status quo-technology of circulating fluidized bed boiler and its prospects of development [J]. Journal of Power Engineering, 2004,24(6):

- 761 - 767.
- [8] 何宏舟, 骆仲泮, 岑可法. 影响福建无烟煤在锅炉中燃尽的若干因素[J]. 动力工程, 2006, 26(3): 359 - 364.  
HE Hong-zhou, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa. Factors influencing the burn-out rate of Fujian anthracite in CFB boilers[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(3): 359 - 364.
- [9] 何宏舟, 骆仲泮, 岑可法. 细颗粒无烟煤焦在 CFB 锅炉燃烧室内的燃尽特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 97 - 102.  
HE Hong-zhou, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa. Modeling research on the burnout characteristics of fine anthracite char particle in CFB combustor [J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(19): 97 - 102.
- [10] 周祖旭, 么 瑶, 朱建国, 等. 煤气化残炭的预热燃烧试验研究[J]. 锅炉技术, 2015, 46(5): 39 - 43.  
ZHOU Zu-xu, YAO Yao, ZHU Jian-guo, et al. Experimental study on combustion characteristics of residual carbon of coal gasification[J]. Boiler Technology, 2015, 46(5): 39 - 43.
- [11] 周祖旭. 细粉碳燃料在循环流化床的流动特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2015.  
ZHOU Zu-xu. Flow characteristics research of fine particles in circulating fluidized beds[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Institute of Engineering Thermophysics), 2015.
- [12] 朱书骏, 吕清刚, 朱建国, 等. 基于循环流化床预热的半焦燃烧试验研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(4): 887 - 892.  
ZHU Shu-jun, LYU Qing-gang, ZHU Jian-guo, et al. Experimental study on pulverized char combustion preheated by a circulating fluidized bed[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(4): 887 - 892.
- [13] 么 瑶, 朱建国, 欧阳子区, 等. 细粉半焦预热燃烧过程中氮的迁移特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 38(8): 2188 - 2194.  
YAO Yao, ZHU Jian-guo, OUYANG Zi-qu, et al. Experimental study on nitrogen transformation in pulverized char during preheated combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 38(8): 2188 - 2194.
- [14] 么 瑶, 吕清刚, 朱建国, 等. 细粉半焦循环流化床预热过程实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4417 - 4421.  
YAO Yao, LYU Qing-gang, ZHU Jian-guo, et al. Experimental study on preheating process of fine char in a circulating fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4417 - 4421.
- [15] 李 伟, 李诗媛, 任强强, 等. 宁夏石沟驿煤气化残炭燃烧特性研究[J]. 煤炭转化, 2013, 36(3): 19 - 23.  
LI Wei, LI Shi-yuan, REN Qiang-qiang, et al. Combustion characteristics of residual carbon after gasification of coal from Ningxia Shigouyi [J]. Coal Conversion, 2013, 36(3): 19 - 23.
- [16] 郑洪岩, 贾丁丁, 赵 言, 等. 气化残炭与低阶煤混燃特性及动力学分析[J]. 华电技术, 2020(7): 74 - 79.  
ZHENG Hong-yan, JIA Ding-ding, ZHAO Yan, et al. Co-combustion characteristics and kinetics analysis of residual carbon from gasification and low-rank coals [J]. Huadian Technology, 2020(7): 74 - 79.
- [17] 满承波, 朱建国, 吕清刚, 等. 100 t/d 气化飞灰预热燃烧锅炉设计与运行[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3): 88 - 93.  
MAN Cheng-bo, ZHU Jian-guo, LYU Qing-gang, et al. Design and operation of a 100 t/d gasification fly ash boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 88 - 93.
- [18] OUYANG Zi-qu, ZHU Jian-guo, LYU Qing-gang. Experimental study on preheating and combustion characteristics of pulverized anthracite coal[J]. Fuel, 2013, 113: 122 - 127.
- [19] WANG Jun, ZHU Jian-guo, LYU Qing-gang. Experimental study on combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emissions of pulverized anthracite preheated by circulating fluidized bed[J]. Journal of Thermal Science, 2011, 20(4): 355 - 361.
- [20] 欧阳子区, 满承波, 李增林, 等. 35 t/h 纯燃超低挥发分碳基燃料预热燃烧锅炉运行特性研究[J]. 华电技术, 2020, 40(7): 50 - 56.  
OUYANG Zi-qu, MAN Cheng-bo, LI Zeng-lin, et al. Study on operation characteristics of a 35 t/h preheating combustion boiler with pure ultra-low volatile carbon-based fuels [J]. Huadian Technology, 2020, 40(7): 50 - 56.
- [21] 朱建国, 贺 坤, 欧阳子区, 等. 0.2 MW 细粉半焦预热燃烧试验研究[J]. 电站系统工程, 2015(5): 9 - 12.  
ZHU Jian-guo, HE Kun, OUYANG Zi-qu, et al. 0.2 MW experimental study on preheated combustion of pulverize semi-coke [J]. Power System Engineering, 2015(5): 9 - 12.

(姜雪梅 编辑)