

# 加压循环流化床富氧燃烧中试研究

孔润娟<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 任强强<sup>1,2</sup>, 刘志成<sup>1</sup>

(1.中国科学院工程热物理研究所,北京 100190;2.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**二氧化碳捕集和封存技术(CCUS)是减少温室气体排放,实现全球环境可持续发展的有效技术手段。加压富氧燃烧技术是一种低成本 CCUS 技术。循环流化床燃烧技术(CFB)是目前商业化程度最好的清洁煤燃烧技术之一,加压循环流化床富氧燃烧耦合了加压富氧燃烧和循环流化床燃烧的诸多优点,具有很强的工业应用前景。但加压循环流化床富氧燃烧系统结构复杂,燃烧工况的切换和烟气再循环导致其在启动、控制、运行等方面面临巨大挑战。目前对于加压循环流化床富氧燃烧的研究大多处于理论建模、机理研究和小试试验阶段。为了更深入地探究加压循环流化床富氧燃烧的启动和运行方法,中国科学院工程热物理研究所在 MW 级加压循环流化床富氧燃烧中试试验平台上进行了中试研究,实现了加压富氧燃烧的稳定运行,获得了中试尺度加压富氧燃烧运行模式,以及启动和运行过程中温度、压力、给煤量和风量的变化曲线。加压富氧燃烧工况运行中整体 O<sub>2</sub> 体积分数为 29%,压力为 0.30 MPa,功率为 0.84 MW,尾部烟气中 CO<sub>2</sub> 体积分数达 91%,可较好地实现 CO<sub>2</sub> 产品的捕集和压缩纯化。中试尺度加压富氧燃烧启动和运行的主要流程为:启动阶段—常压 O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 燃烧阶段—常压富氧燃烧—加压富氧燃烧阶段,各阶段切换平稳。

**关键词:**加压富氧燃烧;循环流化床锅炉;中试试验;运行模式

中图分类号:TK16

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)02-0225-06

## Pilot-scale study on pressurized oxy-fuel combustion in circulating fluidized bed

KONG Runjuan<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, REN Qiangqiang<sup>1,2</sup>, LIU Zhicheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) is an effective technology to reduce greenhouse gas emissions and achieve sustainable development of the global environment. Pressurized oxy-fuel combustion technology is a low-cost CCUS technology. Circulating fluidized bed combustion technology (CFB) is one of the most commercialized clean coal combustion technologies. The pressurized CFB oxy-fuel combustion combines many advantages of pressurized oxy-fuel combustion and CFB combustion, which has a strong industrial application prospect. However, the complex structure, the switching of combustion conditions and the flue gas recirculation lead to the great challenges in the start-up, control and operation of the pressurized CFB oxy-fuel combustion system. At present, most of the researches on pressurized CFB oxy-fuel combustion are in the stage of theoretical modeling, mechanism research and bench-scale test. In order to further explore the start-up and operation methods of pressurized CFB oxy-fuel combustion, the pilot-scale experiment was carried out in a pilot test platform of MW pressurized CFB oxy-fuel combustion by Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences. The stable operation of pressurized oxy-fuel combustion was realized, and a pilot-scale pressurized oxy-fuel combustion operation mode and the variation curves of temperature, pressure, coal feed rate and air volume during start-up and operation were obtained. During the pressurized oxy-fuel combustion, the overall oxygen volume fraction reaches 29%, the operation pressure is 0.30 MPa, the power is 0.84 MW, and the CO<sub>2</sub> volume fraction of the tail gas reaches 91%, which is benefit to the capture and compression purification of CO<sub>2</sub> product. The main process of the pilot-scale pressurized oxy-fuel combustion operation mode is as follows: start-up stage - atmos-

收稿日期:2020-12-03;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS20120301

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0605303)

作者简介:孔润娟(1995—),女,山西临汾人,博士研究生,主要从事循环流化床富氧燃烧技术。E-mail:kongrunjuan@iet.cn。

通讯作者:任强强,副研究员,主要从事循环流化床清洁高效燃烧技术。E-mail:renqiangqiang@iet.cn。

引用格式:孔润娟,李伟,任强强,等.加压循环流化床富氧燃烧中试研究[J].洁净煤技术,2021,27(2):225-230.

KONG Runjuan, LI Wei, REN Qiangqiang, et al. Pilot-scale study on pressurized oxy-fuel combustion in circulating fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(2): 225-230.



移动阅读

pheric O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> combustion stage – atmospheric oxy-fuel combustion – pressurized oxy-fuel combustion stage, and each stage switches stably.

**Key words:** pressurized oxy-fuel combustion; circulating fluidized bed boiler; pilot-scale experiment; operation mode

## 0 引言

随着全球工业化进程加剧,化石能源大规模开采和使用,导致温室气体在大气中的含量急剧攀升,全球气候变暖产生的气候异常引起了严重的环境危机。在温室气体中,CO<sub>2</sub>以其较长的寿命年限及超高的排放量而对“温室效应”的贡献最大。BP集团首席执行官戴德立指出,全球能源消费和使用能源过程中产生的碳排在2018年的增速达到自2010、2011年以来的最高水平,各国应尽快做出改变<sup>[1]</sup>。2018年,我国CO<sub>2</sub>排放总量增长2.5%(2.3亿t),达9.5 Gt,已超过美国成为世界碳排放第一大国<sup>[2]</sup>,面临较大的CO<sub>2</sub>减排压力。但目前我国以煤为主的能源结构短期内仍难以改变,因此要完成在《巴黎协定》中承诺的2030年碳强度下降60%~65%的目标<sup>[3]</sup>,还需持续开展煤炭的清洁高效利用、节能减排<sup>[4]</sup>。

CO<sub>2</sub>捕集及封存利用(CCUS)技术有望实现化石能源使用的CO<sub>2</sub>近零排放,是温室气体排放控制方案的重要组成部分<sup>[5]</sup>。其中,富氧燃烧技术具有较大的优势和可行性,其初投资和发电成本较低,可用于现有燃烧设备的改造,适合目前的工业和技术水平<sup>[6]</sup>。但常压富氧燃烧存在高压制氧和烟气高压压缩导致的能量损失,发电净效率相比传统的空气燃烧下降10%~12%,无法商业化应用,因此,提高富氧燃烧的发电净效率成为该技术能否应用的关键。

常压富氧燃烧技术的空分制氧和高浓度CO<sub>2</sub>烟气压缩过程均在高压下进行,而富氧燃烧在常压下进行,系统压力经历升—降—升的过程,能量损失较严重<sup>[7]</sup>。加压富氧燃烧技术从空分制氧、煤燃烧与锅炉换热,直到烟气压缩捕集CO<sub>2</sub>的全过程均维持在高压下完成,避免了加压、降压产生的能耗。在高压下锅炉排烟中的水分凝结温度大幅提高,使原本无法利用的水蒸汽汽化潜热得到有效利用,降低了排烟损失,提高了锅炉效率。此外,高压设备结构紧凑、规模较小,占地面积减少<sup>[8-11]</sup>;加压富氧燃烧技术在提高煤的燃烧效率及控制污染物排放方面具有一定优势,因此逐渐成为国内外的研究热点之一。

## 1 加压流化床富氧燃烧技术研究现状

在富氧燃烧基础上,美国 ThermoEnergy 公司在

2000年提出了一种采用增压流化床锅炉的富氧燃煤整体化发电系统的概念设计方案<sup>[12]</sup>。加压循环流化床富氧燃烧系统结构复杂、燃烧工况改变、烟气循环额外增添以及各子系统之间的耦合运行相互作用等,导致其在启动、控制、运行等方面面临巨大挑战。

尽管加压循环流化床富氧燃烧在理论建模和分析上已进行了很多研究,但目前国内外对于加压循环流化床富氧燃烧的试验研究很少,且大多处于实验室研究阶段。波兰煤炭化学加工研究所<sup>[13-14]</sup>在一台实验室规模的鼓泡床上研究发现,加压富氧燃烧抑制NO和SO<sub>2</sub>的生成。2016年底美国能源部(Department of Energy, DOE)和加拿大国家研究委员会(National Research Council, NRC)启动1 MW 加压流化床富氧燃烧中试联合项目,但至今未见进一步的报道<sup>[15]</sup>。

阎维平等<sup>[16]</sup>提出了增压鼓泡流化床燃煤发电系统,该系统中,煤在增压鼓泡流化床锅炉中完成富氧燃烧与炉内换热,吸热蒸汽推动汽轮机做功。李皓宇等<sup>[17]</sup>构建了增压流化床富氧燃烧系统的流动模型,分析了压力对床料流化速度的影响,提出了流化速度的计算公式。霍志红<sup>[18]</sup>建立了加压循环流化床富氧燃烧传热模型,并与增压循环流化床锅炉的传热试验数据进行比较,验证了模型的正确性。刘慧敏等<sup>[19-20]</sup>建立了增压循环流化床富氧燃烧NO<sub>x</sub>生成模型和二维流动模型。Shi等<sup>[21]</sup>建立了加压循环流化床富氧燃烧系统(燃烧压力为0.105~3.000 MPa),研究结果表明随着燃烧压力的增加,空分系统能耗升高,CO<sub>2</sub>压缩纯化系统的能耗降低,在最佳压力1.1 MPa时,净效率从27.2%提高到30.5%。

段伦博等<sup>[22-24]</sup>在微型加压流化床和二维可视化加压鼓泡流化床上研究了热力状态下加压富氧流化床的流动特性和鼓泡行为,并搭建了10 kW<sub>th</sub>的连续加料加压鼓泡流化床,研究了压力、气氛、温度和燃料种类对富氧燃烧污染物排放的影响。钟文琪等<sup>[25-26]</sup>建立了15 kW 加压流化床富氧燃烧试验台,进行0.1~0.4 MPa下的富氧燃烧试验,研究了压力、氧浓度对温度分布、燃烧效率、未燃尽碳、飞灰成分和氮氧化物排放的影响。

目前国内尚未有加压循环流化床富氧燃烧中试

平台研究。中国科学院工程热物理研究所搭建了15 kW-100 kW-1 MW 系统试验平台,完成了常压、高 O<sub>2</sub>浓度(50%)富氧燃烧的小试试验研究和中试验证<sup>[27-31]</sup>。在此基础上,在江苏无锡搭建了 MW 级加压循环流化床富氧燃烧中试试验平台,设计热功率为 0.8 MW。本文主要介绍中试平台的运行特性,旨在对加压循环流化床富氧燃烧的发展起促进作用。

## 2 MW 级加压循环流化床富氧燃烧中试平台

MW 级加压循环流化床富氧燃烧中试平台(以下简称“中试平台”)如图 1 所示,现场照片如图 2 所示,该中试平台可在空气燃烧、常压富氧燃烧和加压富氧燃烧多种模式下运行。中试平台的主要设计参数见表 1,其主要由 CFB 燃烧系统、供风系统、烟气冷却系统、给料系统和测控系统等组成。

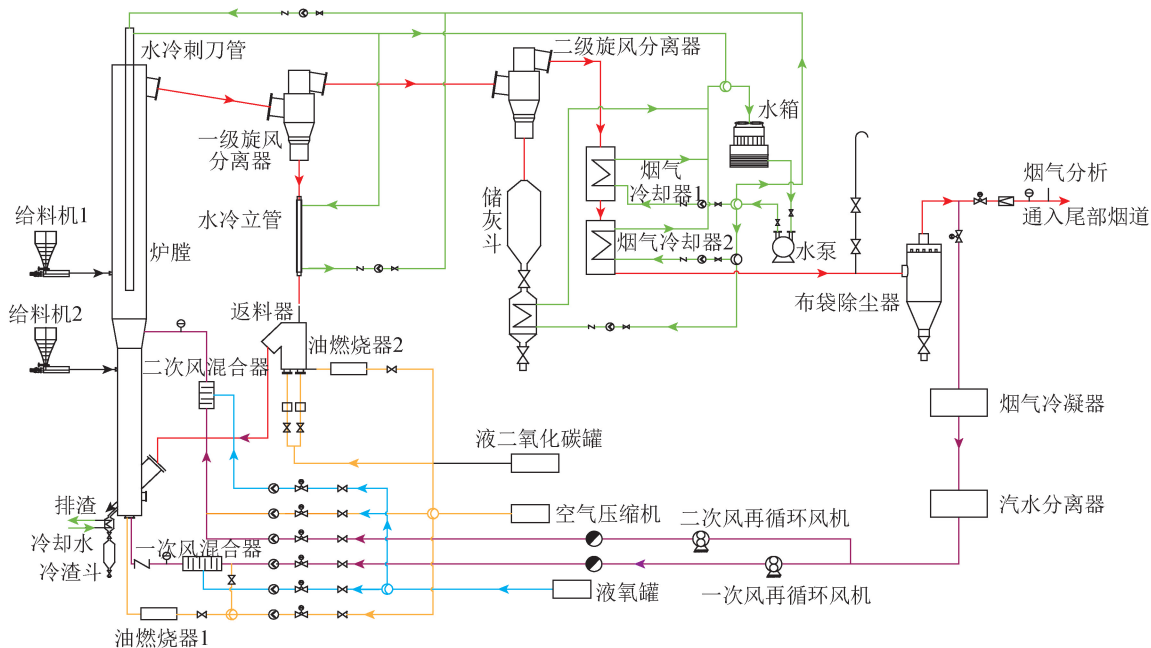


图 1 中试平台工艺流程

Fig.1 Flow diagram of the pilot-scale platform



图 2 现场照片

Fig.2 Photo of test site

表 1 中试平台主要设计参数

Table 1 Main design parameters of pilot-scale platform

额定燃料量/( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	操作压力(表压)/MPa	进口 O <sub>2</sub> 体积分数/%	炉膛温度/℃	烟气冷却器出口烟气/℃	炉膛高度/m
140	0.1~0.5	21~50	850~900	160	16.5

CFB 燃烧系统由 CFB 炉膛、旋风分离器、二级旋风分离器以及返料器组成。炉膛横截面为圆形,炉膛净高 16.5 m,炉膛侧壁由耐火材料、保温材料分层敷设,最外层为钢护板,炉膛内设一根长度为 15 m 的垂直水冷刺刀管受热面。中试平台采用油燃烧器点火升温,在炉膛底部一次风管和返料器风管上共布置 2 台 30 kg/h 的柴油点火燃烧器,用于炉膛、返料器和旋风分离器预热。点火结束后,返料器风管的油燃烧器拆除,更换为返料风管。

烟气冷却系统采用循环水冷却。整个中试平台冷却水分 4 路:炉膛内的垂直水冷刺刀管、立管内水冷埋管、尾部烟气冷却器、再循环烟气冷凝器和烟气再循环风机冷却。

供风系统包括空气、氧气、再循环烟气和 CO<sub>2</sub>。空气由空压机提供,压力为 1.0 MPa,分别供应一次风空气、二次风空气和返料风。O<sub>2</sub> 由氧气槽车提供,分别供应一次风氧气和二次风氧气,压力为 1.0 MPa。再循环烟气的抽气口位于布袋除尘器后管道上,再循环烟气首先经过再循环烟气冷凝器和汽水分离器冷

凝除水,最后通过2个再循环风机,分别供应一次风再循环烟气和二次风再循环烟气。由于再循环风机的最小气量大于工况试验所需的最大风量,因此在再循环风机出口管道布置了回流管道,将多余的烟气回流到烟气冷凝器前。 $\text{CO}_2$ 由二氧化碳槽车提供,供应返料风,压力为1.0 MPa。中试平台炉膛布置一次风和二次风,二次风高度为1 000 mm,一次风和二次风均为 $\text{O}_2$ /再循环烟气混合气或空气, $\text{O}_2$ 和再循环烟气的混合通过静态混合器混合。返料风在启动过程中采用空气,切入富氧气氛后采用 $\text{CO}_2$ 。

给料系统为一套加压进料系统,在炉膛不同高度上布置2个给料点,给料高度分别为700 mm和

3 700 mm,给料量为0~200 kg/h。

中试平台的整个系统采用PLC控制,系统中各点的温度、压力、流量、气体成分分析等均实时以列表和曲线形式显示并保存。管道上的电动阀门、各辅机设备的开关及调节均可远程控制。

### 3 试验原料

试验中所用物料包括石英砂、轻柴油、蒙煤,蒙煤的煤质分析见表2,粒径为0~2 mm。

石英砂包括:0.125~0.212 mm和0.212~0.428 mm的混合砂子,作为循环床料;0.212~0.428 mm和0.428~0.655 mm的混合砂子,作为密相区床料。

表2 蒙煤煤质分析

Table 2 Quality analysis of Mongolia coal

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ad}}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
$M_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$V_{\text{ad}}$	$FC_{\text{ad}}$	$C_{\text{ad}}$	$H_{\text{ad}}$	$O_{\text{ad}}$	$N_{\text{ad}}$	$S_{\text{ad}}$	
3.14	20.48	29.10	47.28	56.55	3.57	35.66	1.07	0.78	22.21

## 4 中试平台运行模式

图3、4分别为中试平台运行过程炉膛和返料器温度、一二次风量、给煤量等的变化趋势。可以看出,整个过程需经历启动阶段、常压 $\text{O}_2/\text{N}_2$ 燃烧阶段、常压富氧燃烧、加压富氧燃烧阶段。

1) 启动阶段。该阶段主要是建立循环,保证中试平台正常运转。通过油燃烧器将炉膛温度升至高于燃料燃点(600℃),再通过间断给煤将炉膛温度升至800℃以上,停燃烧器后连续给煤,通过给入0.125~0.212 mm和0.212~0.428 mm的混合砂子作为循环床料,直至物料循环建立。

2) 常压 $\text{O}_2/\text{N}_2$ 燃烧阶段。该阶段主要提高炉膛和返料器温度。炉膛内布置长为15 m的竖直刺刀管,使空气无法升高炉膛顶部温度。此阶段需加入 $\text{O}_2$ ,在 $\text{O}_2/\text{N}_2$ 气氛下运行, $\text{O}_2$ 体积分数为35%左右。

3) 常压富氧燃烧。该阶段主要进行常压 $\text{O}_2/\text{N}_2$ 燃烧向富氧燃烧切换,测试再循环风机和冷凝器等再循环烟气回路的运行状况,为加压富氧燃烧试验做准备。主要操作是缓慢停止空气,并替换成再循环烟气和 $\text{O}_2$ 。

4) 加压富氧燃烧阶段。该阶段主要进行加压富氧燃烧试验,缓慢升压至设计压力,由于加压富氧燃烧过程中 $\text{O}_2$ 浓度较低,再循环烟气比例大,导致系统的升压较缓慢。中试平台从常压升至0.3 MPa,用时3 h。在升压过程中,需根据系统压力变化,同步提高一次风和二次风的进气量,保证炉膛内的流化风速不低于3 m/s。待压力达到运行设定

值,中试平台进行加压富氧燃烧工况的运行。

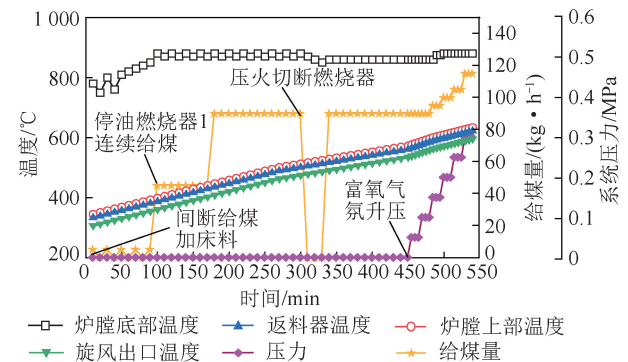


图3 启动曲线-温度、压力和给煤量曲线

Fig.3 Starting curve-temperature, pressure and coal feed rate curves

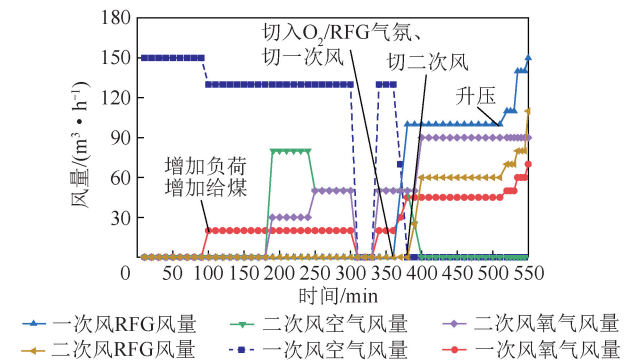


图4 启动曲线-风量曲线

Fig.4 Starting curve-air volume curves

## 5 加压富氧燃烧运行

中试平台成功启动并切入常压富氧燃烧后开始加压,系统压力达0.3 MPa后,进入加压富氧燃烧工

况,工况稳定时间为4 h,验证了加压富氧燃烧的可行性,运行参数见表3。加压富氧燃烧工况下,给煤量为136 kg/h,功率为0.84 MW,一次风再循环烟气流为212 Nm<sup>3</sup>/h,一次风氧气为72 Nm<sup>3</sup>/h,一次风氧气体积分数为26%;二次风再循环烟气流为251 Nm<sup>3</sup>/h,二次风氧气为120 Nm<sup>3</sup>/h,二次风氧气体积分数为32%;整体氧气体积分数为29%,炉膛底部温度为836℃。

表3 运行参数

Table 3 Operation parameters

给煤量/ (kg·h <sup>-1</sup> )	尾部 O <sub>2</sub> 体积分 数/%	一次风再循环 烟气流 量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	一次风 O <sub>2</sub> 流量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	一次风 O <sub>2</sub> 体积分 数/%	二次风再循 环烟气流 量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	二次风 O <sub>2</sub> 流量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	二次风 O <sub>2</sub> 体积分 数/%	总 O <sub>2</sub> 体 积分数/ %	炉膛下部 温度/ ℃	炉膛流化 风速/ (m·s <sup>-1</sup> )
136	3.21	212	72	26	251	120	32	29	836	5.31

图5为加压富氧燃烧运行下系统压力曲线,加压富氧燃烧工况连续稳定运行过程中,系统压力大于0.3 MPa。

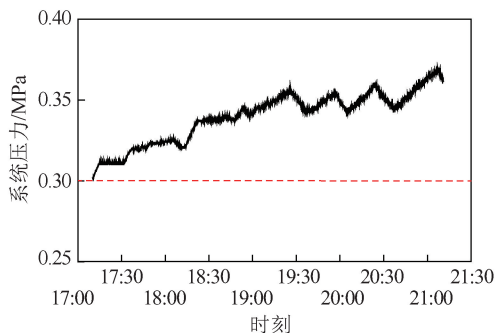


图5 系统压力曲线

Fig.5 Pressure curve of system

在加压富氧运行状态下,采用 Testo 烟气分析仪测定尾部烟气中 CO<sub>2</sub> 体积分数达 91%。由于加压富氧燃烧过程中,整个系统的压力高于大气压力,烟气管道中并无常压富氧燃烧过程中的空气渗入,因此尾部烟气中 CO<sub>2</sub> 体积分数比常压富氧燃烧高。

## 6 结 论

1) 试验验证了加压循环流化床富氧燃烧的可行性,获得了加压循环流化床燃烧的运行模式,其主要流程为:启动阶段—常压 O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 燃烧阶段—常压富氧燃烧—加压富氧燃烧阶段,各阶段切换平稳。

2) 在加压富氧燃烧试验过程中,平台运行稳定。工况运行中压力为 0.30 MPa,功率为 0.84 MW,尾部烟气中 CO<sub>2</sub> 体积分数超过 90%,为 91%,可较好地实现 CO<sub>2</sub> 产品的捕集和压缩纯化。

## 参考文献 (References):

[1] BP Group. BP statistical review of world energy [R/OL]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-statistical-review-of-world-energy-2019.html>.

[2] 吴璇. 2018 年全球 CO<sub>2</sub> 现状报告 [J]. 石油石化绿色低碳, 2019, 4(3): 70.

体积分数为 26%;二次风再循环烟气流为 251 Nm<sup>3</sup>/h,二次风氧气为 120 Nm<sup>3</sup>/h,二次风氧气体积分数为 32%;整体氧气体积分数为 29%,炉膛底部温度为 836℃。

WU Xuan. Global CO<sub>2</sub> status report in 2018 [J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2019, 4(3): 70.

[3] 巴黎气候变化协定—2016 年签署的气候变化协定 [EB/OL]. [2016-04-22]. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/zh/climatechange/>.

[4] 米剑锋, 马晓芳. 中国 CCUS 技术发展趋势分析 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2537-2543.

MI Jianfeng, MA Xiaofang. Development trend analysis of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2537-2543.

[5] 韩桂芬, 张敏, 包立. 关于 CCUS 技术发展与标准建设的思考 [J]. 电力科技与环保, 2013, 29(5): 28-31.

HAN Guifen, ZHANG Min, BAO Li. Thoughts on the technology development and standard construction of CCUS [J]. Electric Power Environmental Protection, 2013, 29(5): 28-31.

[6] 郑楚光, 赵永椿, 郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3856-3864.

ZHENG Chuang, ZHAO Yongchun, GUO Xin. Research and development of oxy-fuel combustion in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(23): 3856-3864.

[7] DUAN Y, DUAN L, ANTHONY E J, et al. Nitrogen and sulfur conversion during pressurized pyrolysis under CO<sub>2</sub> atmosphere in fluidized bed [J]. Fuel, 2017, 189: 98-106.

[8] HONG J, FIELD R, GAZZINO M, et al. Operating pressure dependence of the pressurized oxy-fuel combustion power cycle [J]. Energy, 2010, 35(12): 5391-5399.

[9] HONG J, CHAUDHRY G, BRISSON J G, et al. Analysis of oxy-fuel combustion power cycle utilizing a pressurized coal combustor [J]. Energy, 2009, 34(9): 1332-1340.

[10] 郑东, 陈晓平, 马吉亮, 等. 75 t/h 加压/常压富氧燃烧循环流化床锅炉方案设计及分析 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4226-4236.

ZHENG Dong, CHEN Xiaoping, MA Jiliang, et al. Design and analysis of 75 t/h pressure/ atmospheric oxy-fuel combustion circulating fluidized bed boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4226-4236.

[11] SOUNDARARAJAN R, GUNDERSEN T. Coal based power plants using oxy-combustion for CO<sub>2</sub> capture: Pressurized coal combustion to reduce capture penalty [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(1): 115-122.

[12] 阎维平, 董静兰. 增压富氧煤燃烧烟气焓值计算方法的研究

- [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 1-4.  
YAN Weiping, DONG Jinglan. The study of flue gas enthalpy calculation of pressurized oxy-coal combustion[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2010, 37(1): 1-4.
- [13] LASEK J A, JANUSZ M, ZUWALA J, et al. Oxy-fuel combustion of selected solid fuels under atmospheric and elevated pressures [J]. Energy, 2013, 62(1): 105-112.
- [14] LASEK J A, GLOD K, JANUSZ M, et al. Pressurized oxy-fuel combustion: A study of selected parameters [J]. Energy & Fuels, 2012, 26: 6492-6500.
- [15] 刘沁雯, 钟文琪, 邵应娟, 等. 固体燃料流化床富氧燃烧的研究动态与进展 [J]. 化工学报, 2019, 70(10): 3791-3807.  
LIU Qinwen, ZHONG Wenqi, SHAO Yingjuan, et al. Research trends and recent advances of oxy-fuel combustion of solid fuels in fluidized beds [J]. CIESC Journal, 2019, 70(10): 3791-3807.
- [16] LEI M, HUANG X, WANG C, et al. Investigation on SO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>2</sub> release characteristics of Datong bituminous coal during pressurized oxy-fuel combustion [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 126(3): 1067-1075.
- [17] 李皓宇, 阎维平, 王春波, 等. 增压流化床热态临界流化速度的实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(32): 8-15.  
LI Haoyu, YAN Weiping, WANG Chunbo, et al. Experimental study on minimum fluidization velocity at elevated pressure and high temperature [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(32): 8-15.
- [18] 霍志红. 增压富氧燃烧 CFB 传热特性研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2011.  
HE Zhihong. Study on heat transfer of the pressurized oxygen-enriched combustion circulating fluidized [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2011.
- [19] 刘慧敏. 增压富氧流化床燃烧下 NO<sub>x</sub> 的生成模型 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.  
LIU Huimin. NO<sub>x</sub> formation modeling of pressurized oxy-fuel fluidized bed combustion [J]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [20] 刘慧敏, 白彦飞, 乔木森, 等. 增压富氧循环流化床的二维流动模型 [J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(3): 107-112.  
LIU Huimin, BAI Yanfei, QIAO Musen, et al. Two-dimensional hydrodynamic modeling of pressurized oxy-fuel CFB [J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(3): 107-112.
- [21] SHI Y, ZHONG W, SHAO Y, et al. Energy efficiency analysis of pressurized oxy-coal combustion system utilizing circulating fluidized bed [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150: 1104-1115.
- [22] LIN L, DUAN Y, DUAN L, et al. Flow characteristics in pressurized oxy-fuel fluidized bed under hot condition [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 108: 1-10.
- [23] DUAN Y, DUAN L, HU H, et al. Combustion and pollutant emission characteristics of coal in a pressurized fluidized bed under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere [J]. Journal of Southeast University, 2015, 31(2): 188-193.
- [24] DUAN Y, DUAN L, WANG J, et al. Observation of simultaneously low CO, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emission during oxy-coal combustion in a pressurized fluidized bed [J]. Fuel, 2019, 242: 374-381.
- [25] 陈超, 邵应娟, 钟文琪, 等. 煤在加压流化床富氧燃烧条件下的碳转化规律 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 171-177.  
CHEN Chao, SHAO Yingjuan, ZHONG Wenqi, et al. Carbon conversion rules of oxy-fuel coal combustion in pressurized fluidized bed [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(1): 171-177.
- [26] PANG L, SHAO Y, ZHONG W, et al. Experimental investigation of oxy-coal combustion in a 15 kW<sub>th</sub> pressurized fluidized bed combustor [J]. Energy & Fuels, 2019, 33: 1694-1703.
- [27] 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.
- [28] LI H, LI S, REN Q, et al. Experimental results for oxy-fuel combustion with high oxygen concentration in a 1 MW<sub>th</sub> pilot-scale circulating fluidized bed [J]. Energy Procedia, 2014, 63: 362-371.
- [29] LI S, LI W, XU M, et al. The experimental study on nitrogen oxides and SO<sub>2</sub> emission for oxy-fuel circulation fluidized bed combustion with high oxygen concentration [J]. Fuel, 2015, 146: 81-87.
- [30] LI W, LI S, REN Q, et al. Study of oxy-fuel coal combustion in a 0.1 MW<sub>th</sub> circulating fluidized bed at high oxygen concentrations [J]. Energy & Fuels, 2014, 28(2): 1249-1254.
- [31] LI S, LI H, LI W, et al. Coal combustion emission and ash formation characteristics at high oxygen concentration in a 1 MW<sub>th</sub> pilot-scale oxy-fuel circulating fluidized bed [J]. Applied Energy, 2017, 197: 203-211.