

# 中国煤粉富氧燃烧的工业示范进展及展望

郭军军, 张泰, 李鹏飞, 柳朝晖\*, 郑楚光

(煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

## Industrial Demonstration Progress and Trend in Pulverized Coal Oxy-fuel Combustion in China

GUO Junjun, ZHANG Tai, LI Pengfei, LIU Zhaohui\*, ZHENG Chuguang

(State Key Laboratory of Coal Combustion (Huazhong University of Science and Technology),

Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Oxy-fuel combustion technology is one of the most promising large-scale carbon capture technologies for coal-fired power plants. This study introduced the development and demonstration of oxy-fuel combustion technology in the world, then systematically reviewed the lessons learned from the Yingcheng 35MW oxy-fuel combustion industrial demonstration plant, including combustion characteristics, heat transfer characteristics, boiler efficiency, pollutant emissions, operation control and system economy, etc. The successful operation indicates that the oxy-fuel combustion technology has completed its full-process verification in a 10 MW-level power plant, proving that it has the technical capability for the construction of a 100 MW-level large-scale demonstration project. To achieve the large-scale demonstrations and applications, the economics of oxy-fuel combustion technology is expected to be further improved in the following aspects: the development of low-cost oxygen production technology, scaling-up the oxy-fuel burner, exploration of new low-NO<sub>x</sub> oxy-fuel combustion systems such as staged oxy-fuel and flameless oxy-fuel, carrying out the research of acid gas co-compression technology, coupling optimization of the whole plant system, and developing new generation of oxy-fuel combustion technologies etc.

**KEY WORDS:** carbon capture; oxy-fuel combustion; coal combustion; demonstration project

**摘要:** 富氧燃烧技术是最具潜力的燃煤电厂大规模碳捕集技术之一。在简要介绍国内外富氧燃烧技术的研发示范进展的基础上,系统地回顾了近年来应城 35 MW 富氧燃烧工业示范项目的研究成果,包括燃烧特性、传热特性、锅炉效率、

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFB0605300); 国家自然科学基金项目(51906075)。

National Key R & D Program of China (2018YFB0605300); National Natural Science Foundation of China (51906075).

污染物排放与脱除、运行控制以及经济性等,总结了示范项目的经验与教训。富氧燃烧碳捕集工业示范电厂的成功运行,标志着该技术已完成了在 10MW 级电厂的全流程验证,证明该技术已具备了建设百万吨级大规模示范电站的技术基础。通过发展低能耗、低成本的制氧技术,进一步实施富氧燃烧器放大,并探索分级富氧、无焰富氧等新型低 NO<sub>x</sub> 富氧燃烧系统,开展酸性气体共压缩工艺研发,进行全厂系统耦合优化,研发新一代富氧燃烧技术等方法,有望进一步提高富氧燃烧技术经济性,促进大规模示范及应用。

**关键词:** 碳捕集; 富氧燃烧; 煤燃烧; 示范项目

## 0 引言

《巴黎协定》明确了全球共同追求的“硬指标”:将全球平均气温较工业化前水平升高控制在 2℃之内,并为将升温控制在 1.5℃之内努力。习近平主席在第 75 届联合国大会一般性辩论上指出:中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,CO<sub>2</sub> 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。

富氧燃烧最早是由美国 Abraham 于 1982 年提出,目的是为了生产 CO<sub>2</sub> 用于提高石油采收率<sup>[1]</sup>。近 30 年来,富氧燃烧作为能够大规模减少 CO<sub>2</sub> 排放的主流碳捕集技术之一,成为全球研究者关注的热点。该技术可以应用于电站锅炉、燃料电池、整体气化联合循环及多联产能源系统等领域。其中,在电站锅炉中的应用,不仅可以是新建煤粉富氧燃烧锅炉,同时也可以是对现行电厂的改造,因此,该技术被认为是最具潜力的能够有效减少 CO<sub>2</sub> 排放的新型燃烧技术<sup>[2-4]</sup>。

富氧燃烧的技术原理如图 1<sup>[5]</sup>所示,它是在现有电站锅炉系统基础上,用氧气代替助燃空气,同

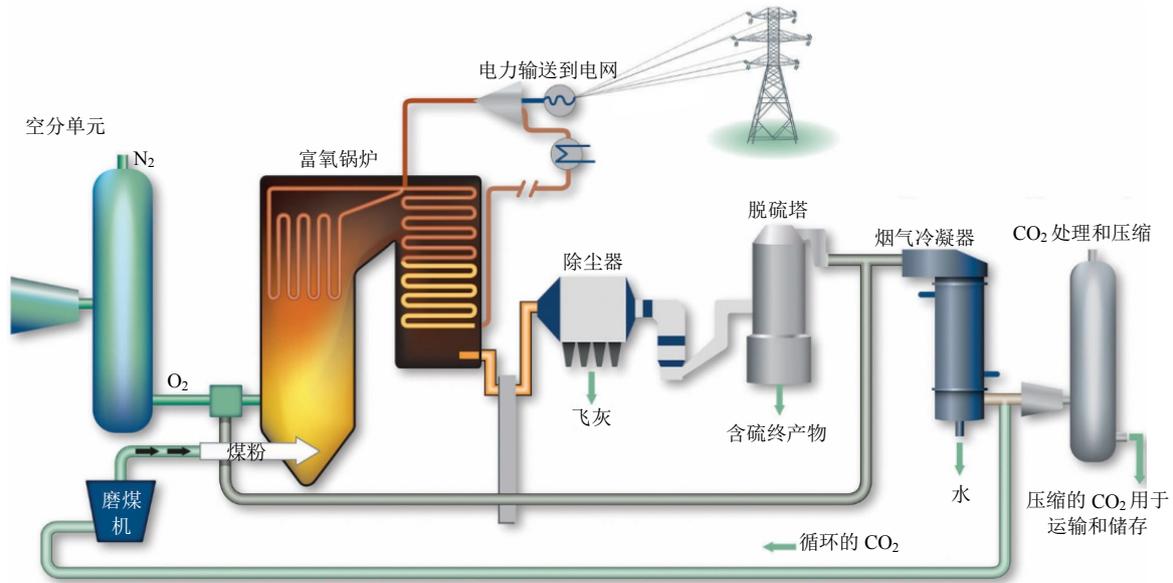


图1 煤粉富氧燃烧技术原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of oxy-coal combustion technology

时结合大比例烟气循环(约 70%)调节炉膛内的燃烧和传热特性,可直接获得富含高浓度  $\text{CO}_2$  (>80%)的烟气,从而以较低成本,实现  $\text{CO}_2$  封存或资源化利用。众多分析表明,富氧燃烧在全生命周期碳减排成本、大型化等方面都具有优越性,与现有主流燃煤发电技术具有良好的承接性,同时也是一种“近零”排放发电技术,容易被电力行业接受。

富氧燃烧条件下,烟气富含高浓度的  $\text{CO}_2$ ,且入炉氧分压通常高于空气燃烧,煤粉在炉内的物理和化学过程有别于空气燃烧。自富氧燃烧概念提出以来,全球范围内对富氧燃烧的着火、燃烧、传热和污染物排放等已开展了大量且深入的研究,煤粉富氧燃烧的基本特性已经得到了很好的认识。众多学者对富氧燃烧的基础研究结果进行综述<sup>[2-4,6-11]</sup>。

目前,富氧燃烧技术已在多个国家完成了工业示范,验证了其技术可行性,并进行了多项富氧燃烧大型示范的可行性研究。表1列举了国内外主要富氧燃烧工业示范项目。在国际上,德国瀑布电力公司黑泵(Schwarze Pumpe)电厂 30MW 富氧燃烧示范系统<sup>[12]</sup>于 2008 年建成,到 2014 年项目终止为止,运行时间约 18000h,其中在富氧燃烧下运行超过

13000h。由 Alstom 和 Air liquid 公司合作建成的法国道达尔 Lacq 30MW 改造电厂<sup>[13]</sup>,于 2009 年建成,2013 年停止运营,运行时间超过 11000h,成功封存了约 51000 吨  $\text{CO}_2$ 。西班牙 CIUDEN 富氧燃烧示范项目<sup>[14]</sup>于 2012 年建成,可实现 20MW 煤粉锅炉及 30MW 循环流化床锅炉的富氧燃烧运行。澳大利亚 Callide 富氧燃烧项目<sup>[15]</sup>于 2012 年建成,到 2015 年项目终止,成功完成了 10200h 的富氧燃烧运行,同时实现了 5600h 的  $\text{CO}_2$  捕集。在工业示范的基础上,德国、英国、美国 and 韩国等已进行了多项富氧燃烧大型示范的可行性研究。表 2 列举了主要的大型示范项目,包括德国 Janeschwalde 250MW<sup>[16]</sup>、美国 FutureGen2.0 计划 168MW<sup>[17]</sup>、韩国 Yongdong 100MW<sup>[18]</sup>、英国 White rose 436MW<sup>[19]</sup>和西班牙 Endesa 340MW<sup>[20]</sup>等。

国内从 20 世纪 90 年代开始关注富氧燃烧技术,华中科技大学、东南大学、华北电力大学、清华大学等在富氧燃烧的燃烧特性、污染物生成等基础研究方面开展了诸多研究<sup>[21-28]</sup>。近年来,本团队依托华中科技大学煤燃烧国家重点实验室、中美清洁能源研究中心、国家能源清洁低碳发电技术研发

表1 全球富氧燃烧工业示范项目

Table 1 Industry demonstration projects of oxy-fuel combustion in the world

工业示范电厂	功率/MW	燃烧器布局	新建/改造	建成时间	燃料	发电	$\text{CO}_2$ 浓缩	$\text{CO}_2$ 分离利用
Schwarze Pumpe(德国)	30	顶部	新建	2008	煤	否	是	是
Lacq(法国)	30	前墙	改造	2009	天然气	是	是	是
CIUDEN(西班牙)	30	对冲	新建	2012	煤	否	是	否
Callide(澳大利亚)	30	前墙	改造	2012	煤	是	是	否
应城(中国)	35	前墙	改造	2015	煤	否	否	否

表 2 全球富氧燃烧大型示范项目可行性研究  
Table 2 Feasibility studies on Large-scale demonstration project of oxy-fuel combustion in the world

大型示范电厂	功率/MW	新建/改造	燃料 <sup>1</sup>	研究深度
Janeschwalde(德)	250	新建	C	可研
FutureGen2.0(美)	168	改造	C	可研
Yongdong(韩)	100	改造	C	可研
White rose(英)	436	新建	C/B	可研
Endesa(西)	340	新建	C	可研
神木(中)	200	新建	C	可研
广汇(中)	170	改造	C	预可研
太原(中)	350	新建	C	预可研
大庆(中)	350	新建	C	预可研

注：1-C-煤；C/B-煤/生物质。

(实验)中心、湖北省(国际)CCUS 研发及产业促进中心等平台，在国家科技支撑计划、973 计划、863 计划以及国家自然科学基金重点项目等的支持下，拟定了煤粉富氧燃烧技术发展和放大的路线图，先后建成了 0.3MW 小试规模富氧燃烧综合试验台<sup>[29-30]</sup>、3MW 富氧燃烧全流程试验系统<sup>[31]</sup>、35MW 富氧燃烧工业示范系统<sup>[32]</sup>等，如图 2 所示。其中，应城 35MW 富氧燃烧工业示范于 2015 年建成，是目前国内规模最大的富氧燃烧燃煤碳捕集示范系统，完成了富氧燃烧器、富氧锅炉、低纯氧空分等关键装备的研发，实施了“空气燃烧-富氧燃烧”兼容设计方案，并实现了浓度高达 82.7%的烟气 CO<sub>2</sub> 富集。在大型示范方面，神华集团已经牵头完成了 200MW 等级煤粉富氧燃烧项目的可行性研

究<sup>[33-34]</sup>。山西阳光热电、新疆广汇、黑龙江大庆等也先后与国外制造商合作，进行了 350MW 等级的富氧燃烧大型示范预可行性研究<sup>[35]</sup>。总体而言，国内煤粉富氧燃烧技术的发展与国际同步。

本团队 2014 年<sup>[7]</sup>对中国富氧燃烧技术的基础研究以及小试试验进行了总结，并对示范工程进行了展望；进一步地，在 2015 年<sup>[8]</sup>对煤粉富氧燃烧技术兼容设计方案的基础和技术挑战进行了综述，对下一代富氧燃烧技术的发展进行了探讨；2017 年出版了富氧燃烧专著<sup>[10]</sup>，详细介绍了富氧燃烧的基础理论和实践。鉴于应城 35MW 工业示范的重要性，而此前相关研究成果分散在多篇论文中报道，本文将主要对其进行系统地整理回顾，对煤粉富氧燃烧技术发展所面临的关键问题以及最新研究趋势也将进行总结，以期为推动中国富氧燃烧技术的商业化进程提供参考。

### 1 煤粉富氧燃烧工业示范

35MW 富氧燃烧工业示范是我国第一套十万吨/年级富氧燃烧碳捕集装置，包括空分系统、锅炉及燃烧系统、烟气净化和烟气循环系统等完整的工艺流程。采用中温中压(过热蒸汽参数 3.82MPa, 450℃)，自然循环，π形单汽包锅炉，额定蒸发量 38t/h。炉膛采用单炉膛、微正压运行。尾部采用双烟道，一二次风分开布置，使用管式空气预热器。锅炉前墙品字形布置有 3 台旋流燃烧器，单只热输出功率为 12MW。在燃烧器上方设有两个燃尽风喷

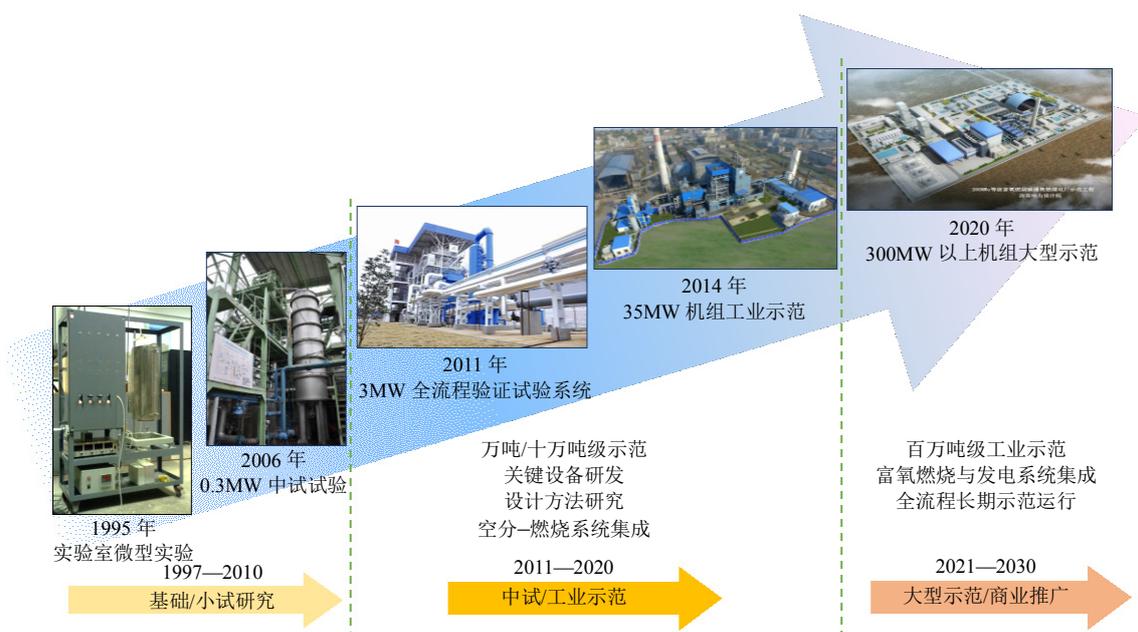


图 2 中国煤粉富氧燃烧技术研发路线图  
Fig. 2 R&D roadmap of oxy-coal combustion in China

口,磨煤机乏气可进入炉膛,实现分级燃烧。烟气净化系统包括三分仓静电除尘器,双碱液脱硫塔和烟气冷凝器等设备。根据富氧燃烧所需氧气压力和

纯度较低的特点,该示范系统采用了低能耗的三塔空分流程。图3<sup>[32]</sup>所示为35MW富氧燃烧工业示范系统流程图。

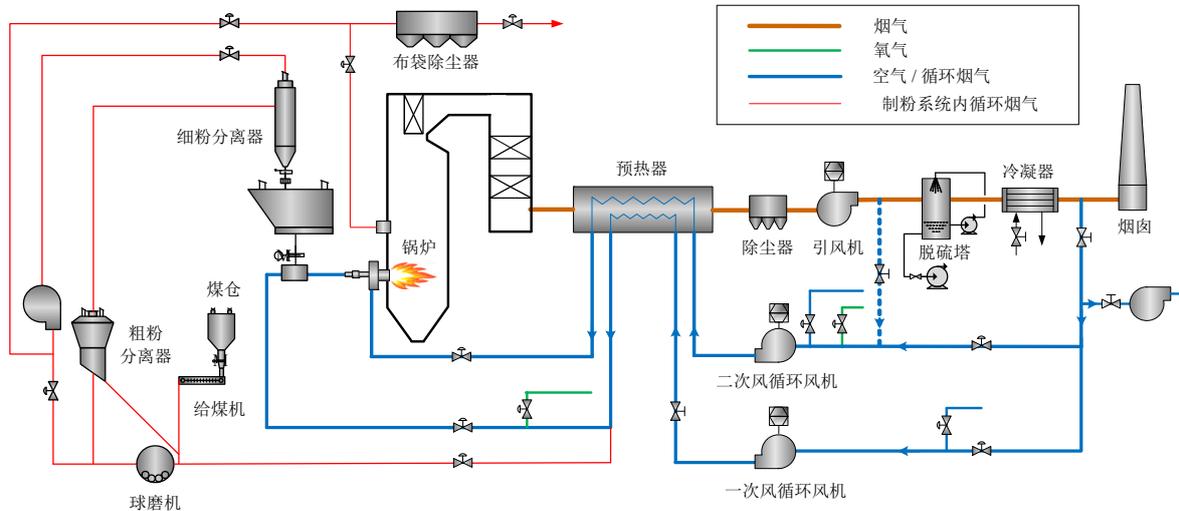


图3 35MW富氧燃烧燃煤碳捕集示范系统流程图

Fig. 3 Schematic diagram of the 35MW oxy-fuel combustion carbon capture demonstration system

与国际同类装置比较,该系统具有以下6方面特点:1)采用“空气燃烧-富氧燃烧兼容”设计方案,系统可在空气燃烧和富氧燃烧下满负荷运行,提高设备的可用率;2)采用新型富氧旋流燃烧器,确保着火的稳定性和良好的后期混合,易于工业放大研究;3)系统兼具干、湿两种烟气循环方式,增大了试验燃料使用的灵活性;4)采用微正压运行,结合风门调节,低成本地实现了烟气中CO<sub>2</sub>高浓度富集;5)采用低能耗三塔空分系统,降低了空分装置的能耗;6)空气燃烧和富氧燃烧可实现氧/燃料双向分级燃烧方式,降低燃烧过程中NO<sub>x</sub>生成。

### 1.1 燃烧特性

燃烧器是保证煤粉稳定高效燃烧的关键设备。由于助燃剂成分和流量的变化,富氧燃烧器的技术方案不同于空气燃烧,至少应满足以下4个要求:1)应保证稳定的煤粉富氧燃烧;2)应提供与空气燃烧相似的炉内流场和温度分布,以便在富氧燃烧和空气燃烧之间保持相似的对流和辐射传热特性;3)应能够在空气燃烧下运行,以便在富氧燃烧和空气燃烧模式之间切换;4)应避免过高的火焰温度,以抑制NO<sub>x</sub>的形成,同时通过烟气循环进一步降低NO<sub>x</sub>含量(NO再燃)。

综合考虑以上几点要求,并结合煤粉燃烧器设计原理,自主开发了单只额定热功率为12MW的富氧旋流低NO<sub>x</sub>燃烧器<sup>[36-37]</sup>。图4<sup>[32]</sup>所示为该燃烧器的结构示意和实物照片。通过保持合适的一、二次

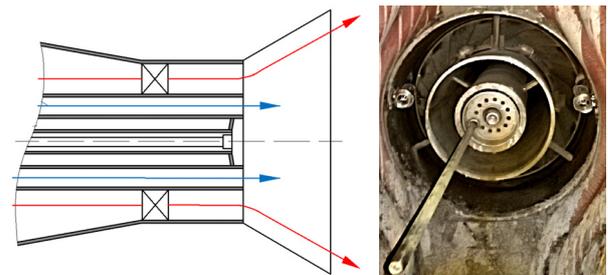


图4 旋流低NO<sub>x</sub>富氧燃烧器

Fig. 4 Swirling low-NO<sub>x</sub> oxy-fuel burner

风动量比和旋流数,可生成稳定的内部回流区来稳定燃烧;试验中保持入炉平均氧分压为26%~28%,以实现相似的火焰温度和辐射传热;保持一次风中氧含量约为21%,以同时兼顾着火稳定性和煤粉运输的安全性。

该富氧煤粉旋流燃烧器在空气燃烧和富氧燃烧下都能够稳定运行。在试验过程中,综合采用火检信号、火焰电视以及烟气氧含量来监视炉内的燃烧状态。图5所示为火焰电视获得的空气燃烧和富氧燃烧下的火焰图像。空气燃烧下的火焰图像更明亮;富氧燃烧火焰相对较暗,其光谱辐射特性、火焰震荡特性与空气燃烧存在显著差异,需要注意相应调整火检的参数。在试验锅炉右侧墙,与第一层燃烧器中心相同高度,距离燃烧器出口不同距离,开设有四个测孔。在该处采用OMEGA手持式辐射高温计,对燃烧器区域的烟气温度进行了测量,结果显示富氧燃烧下的各测点的火焰温度普遍降低了约100K;与此同时,高浓度的CO<sub>2</sub>也使得在富

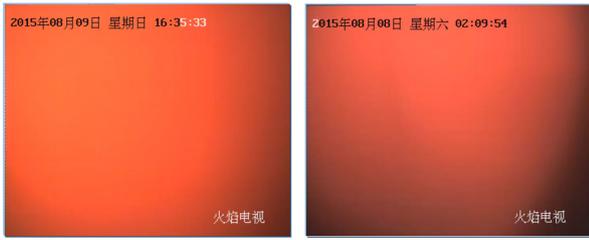


图 5 空气燃烧和富氧燃烧火焰图像

Fig. 5 Flame photos in air-fuel and oxy-fuel combustion  
氧燃烧中炉内温度更加均匀。

### 1.2 传热特性

辐射传热的计算方法是锅炉设计的关键，而传热匹配是锅炉进行富氧燃烧改造需考虑的重要因素。图 6<sup>[32]</sup>所示为采用改进的灰气体加权模型计算得到的沿该炉膛高度方向的气体和颗粒平均吸收系数分布。相比空气燃烧，富氧燃烧中炉内三原子气体浓度增大，使得气体吸收系数增大，且富氧湿循环的气体吸收系数略大于富氧干循环；与此同时，在富氧燃烧条件下，炉内烟气量减少使得颗粒浓度增大，颗粒的吸收系数也会增大。实际测量结果表明，在空气燃烧、富氧湿/干循环下，静电除尘器入口处的粉尘浓度分别为 15.7、21.8 和 22.8g/m<sup>3</sup>。并且，颗粒吸收系数约为气体的 2 倍。因此，在该炉膛内，颗粒在辐射热传递方面的贡献比气体更大。

在实际运行条件下，通过水冷壁和过热器工质流量和状态的统计，可获得不同燃烧条件下的受热面传热量，如图 7<sup>[32]</sup>所示。图中也给出了基于改进辐射特性模型的炉内传热预报结果，为了方便比较，采用输入热功率对传热量进行了归一化。由图可见，尽管空气燃烧的火焰温度高于富氧燃烧，但由于富氧燃烧下高浓度的 CO<sub>2</sub> 和增加的颗粒浓度增强了辐射传热能力，富氧燃烧湿、干循环相比于空气燃烧下水冷壁传热份额分别增加了约 9%和

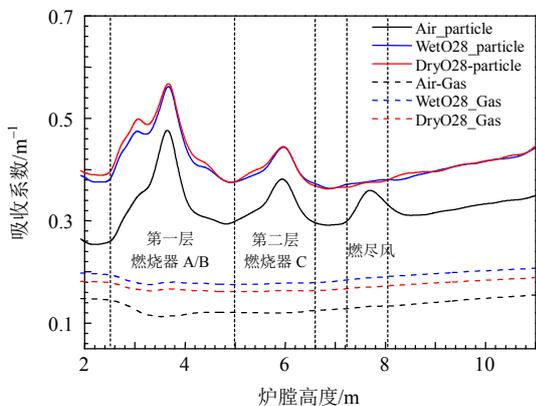


图 6 平均气体和颗粒吸收系数沿炉膛高度方向的分布  
Fig. 6 Averaged absorption coefficients along the furnace height in the air-fuel and oxy-fuel combustion

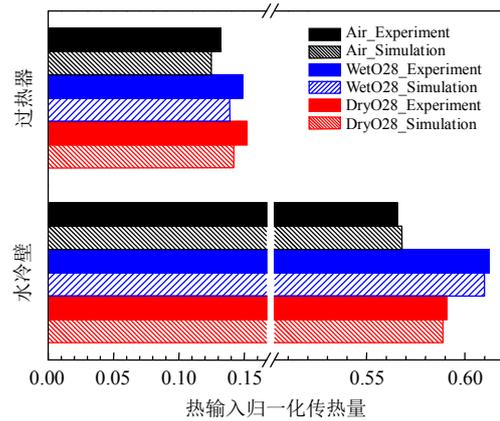


图 7 不同工况下的归一化传热量比较

Fig. 7 Normalized heat transfer by thermal input

6%。湿循环条件下的颗粒浓度与干循环条件下的相似，但随着 H<sub>2</sub>O 与 CO<sub>2</sub> 摩尔比的增加，气体吸收系数进一步增加。与干循环条件相比，在湿循环条件下，水冷壁的热量增加了约 3%，这是由燃烧器区域平均温度和气体辐射能力的增加共同导致的。

烟气循环倍率是富氧燃烧锅炉的关键运行参数，在总氧量不变时，可通过控制烟气循环倍率来调节入炉氧分压，从而调整各受热面的传热份额。图 8<sup>[32]</sup>所示为不同氧分压下的归一化的传热量份额；随着入炉氧分压的降低，水冷壁的传热份额减少，而过热器中的传热份额略有增加。由于水冷壁中传热量减少，主蒸汽的流量下降，进而过热蒸汽的流量减小，过热器的过热度增加，减温水量相应增加。存在一个最佳的烟气循环倍率或入炉氧分压，使得富氧燃烧和空气燃烧之间的传热量得以匹配。在试验过程中观察到，当烟气循环倍率从 0.71 增加至 0.73，入炉氧分压从 28%降低至 27%，主蒸汽流量从 30.96 t/h 下降至 29.75 t/h，减温水的用量从 2.76t/h 增加至 3.14t/h。当入炉氧分压为 27%，水冷壁的传热量与空气燃烧的传热量相似；但减温

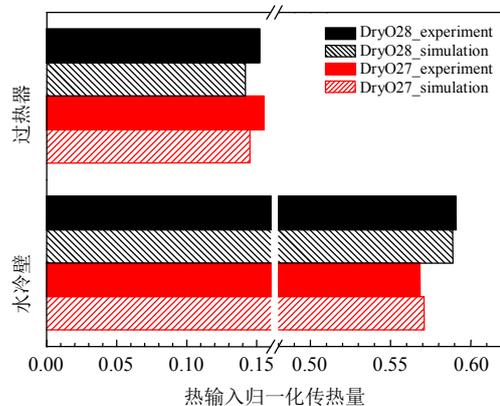


图 8 不同循环倍率下各受热面的传热量

Fig. 8 Normalized heat transfer by thermal input in oxy-fuel combustion with different recycle ratios

水流量增加,导致锅炉性能下降。因此,在实际运行中建议采用稍高的入炉氧分压以增加主蒸汽流量,降低过热水流量,从而提高锅炉运行性能。

目前,锅炉热力性能计算通常采用前苏联提出的1973年锅炉热力性能计算标准。由于富氧燃烧与空气燃烧之间的物性参数和传热特性的差异,需要对热力计算方法的子模型进行修正,以适用于富氧燃烧锅炉<sup>[38]</sup>。通过对富氧燃烧下烟气吸收系数、水冷壁结垢系数、省煤器灰沉积系数的修正,35MW富氧燃烧锅炉热力性能计算结果<sup>[38]</sup>与试验数据很好的吻合,从而初步建立了适用于富氧燃烧锅炉的热力性能计算方法。

### 1.3 锅炉效率

空气燃烧下的锅炉运行性能考核通常可依据GB 10184—1988《电站锅炉性能试验规程》。在富氧燃烧下,由于大比例烟气循环的引入,锅炉运行性能的评价方法需要作相应调整。

采用反平衡法,锅炉效率计算公式为

$$E_f = (1 - \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6}{Q_{\text{net.ar.to}}}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $Q_2$ — $Q_6$ 分别为每千克燃料产生的排烟热损失量、气体未完全燃烧热损失量、固体未完全燃烧热损失量、锅炉散热损失量、灰渣物理显热损失量;

$Q_{\text{net.ar.to}}$ 为入炉燃料低位发热量。

富氧工况下,由于烟气循环的存在,重点需要对排烟热损失 $Q_2$ 的定义加以修改和补充。参照ASME PTC 4-1998标准对有烟气回热系统时的锅炉效率定义,可对富氧燃烧锅炉热效率计算的边界和计算方法进行修正。富氧锅炉排烟损失 $Q_2$ 包括两部分:1)循环烟气热损失量 $Q_{2,\text{RFG}}$ ,即循环烟气离开系统边界和进入系统边界时的热量差;2)烟囱排烟热损失量 $Q_{2,\text{ex}}$ 。计算公式为

$$Q_2 = Q_{2,\text{RFG}} + Q_{2,\text{ex}} = (\varepsilon Q_t - Q_{\text{in}}) + (1 - \varepsilon) Q_t \quad (2)$$

式中: $\varepsilon$ 为循环倍率; $Q_t$ 为气体离开锅炉边界时携带的总热量,在空气燃烧下 $Q_t$ 即为 $Q_2$ ;  $Q_{\text{in}}$ 为循环烟气进入锅炉系统边界时携带的能量。

表3所示为根据实验过程中采集的数据,按照修正方法得到的35MW工业示范系统各工况下的锅炉效率及各项热损失。由于富氧燃烧工况下的排烟量减小,且循环烟气带回部分热量,排烟热损失 $Q_2$ 明显降低。相比于空气燃烧,干循环的排烟热损失降低约0.5%~0.8%,湿循环的排烟热损失降低约1.5%~2.2%;与富氧干循环相比,富氧湿循环由于循环烟气温度提高,被循环烟气带回系统的热量也增加,因此其排烟损失更低。

表3 空气燃烧和富氧燃烧的锅炉效率以及各项热损失

Table 3 Boiler efficiency and heat loss in air-fuel combustion and oxy-fuel combustion

项目	空气燃烧	富氧干循环	富氧湿循环
排烟热损失 $Q_2$	3.52~4.25	3.01~3.43	1.97~2.05
气体未完全燃烧热损失 $Q_3$	0.025~0.027	0.066~0.068	0.087~0.091
固体未完全燃烧热损失 $Q_4$	3.18~6.26	4.79~6.26	5.79~6.44
锅炉散热损失 $Q_5$	1.60~1.75	1.55~1.72	1.64~1.78
灰渣物理热损失 $Q_6$	0.145~0.155	0.140~0.155	0.185~0.186
锅炉热效率 $\eta$	87.76~90.69	88.86~90.99	89.38~90.37

### 1.4 污染物排放与脱除特性

试验过程中,对各污染物控制设备前后的烟气中污染物浓度进行了测量,并计算了排放量,结果汇总于表4。

脱硫和烟气冷却过程对烟气中 $\text{NO}_x$ 的浓度影响较小:富氧燃烧工况下 $\text{NO}_x$ 浓度是空气燃烧下的1.54~1.83倍,而排放量仅为空气工况下的0.38倍。虽然富氧燃烧条件会抑制燃烧过程中 $\text{NO}_x$ 的生成,但由于烟气循环的富集效应,富氧燃烧下烟气中的 $\text{NO}_x$ 浓度依然大于空气燃烧;同时烟气循环使得富氧燃烧下的烟气排放量远小于空气燃烧,所以 $\text{NO}_x$ 的排放量大幅降低。

富氧干循环的烟气循环点均在脱硫塔之后,而湿循环下二次风中的烟气循环点在脱硫塔之前。由于有脱硫设备的投入,富氧干循环中 $\text{SO}_2$ 的浓度仅为空气工况下的1.5倍,其浓度的增长主要是富氧燃烧工况下烟气量的减小导致的;而在富氧湿循环中,由于大部分循环烟气没有经过脱硫设备,烟气循环使得烟气中 $\text{SO}_2$ 发生了富集,其浓度为空气工况下的2.9倍。烟气冷凝器也能明显降低 $\text{SO}_2$ 的排放,各工况下系统的综合脱硫效率均超过95%。由于有脱硫设备的运行,各工况下 $\text{SO}_2$ 的排放量均较低(14~26mg/MJ)。

采用等速飞灰取样器在除尘器入口进行飞灰取

表 4 空气燃烧和富氧燃烧下烟气中污染物浓度以及污染物排放

Table 4 Pollutant concentration in flue gas and pollutant emission in air combustion and oxy-fuel combustion

项目	空气燃烧	富氧燃烧		
		干循环	湿循环	
CO <sub>2</sub> (dry)/%	16.2(±0.3)	80.5(±0.8)	68.7(±1.4)	
NO <sub>x</sub> (6% O <sub>2</sub> , dry)/(mg/m <sup>3</sup> )	脱硫塔入口	165(±7.1)	300(±7.2)	253(±10.7)
	冷凝器入口	168(±2.4)	—	237(±8.6)
	烟囱入口	161(±7.2)	—	225(±8.7)
NO <sub>x</sub> 排放量/(mg/MJ)	90(±11.7)	37(±0.9)	34(±1.6)	
SO <sub>2</sub> (6% O <sub>2</sub> , dry)/(mg/m <sup>3</sup> )	脱硫塔入口	1022(±34.4)	1559(±13.6)	2928(±40.0)
	冷凝器入口	96(±4.3)	—	95(±2.7)
	烟囱入口	49(±2.8)	—	67(±6.0)
SO <sub>2</sub> 排放量/(mg/MJ)	26(±1.5)	—	14(±0.4)	
脱硫效率/%	95.2	—	97.7	
飞灰浓度/(g/m <sup>3</sup> )	除尘器入口	15.70	22.83	21.78
	除尘器出口	n.d.	n.d.	n.d.
烟气中气态 Hg(μg/m <sup>3</sup> )	除尘器入口	3.3(±0.4)	5.6(±0.6)	—
	脱硫塔入口	—	4.8(±0.4)	—
	烟囱入口	—	2.2(±0.3)	—
颗粒中 Hg <sup>2+</sup> /(ng/g)	除尘器入口	98(±13)	355(±21)	300(±15)

样，并对收集到的飞灰分别进行了电阻率和灰成分测试，据此评价了电除尘特性<sup>[39]</sup>。结果表明，富氧燃烧下由于烟气量减少，颗粒浓度有所增加，空气燃烧和富氧湿、干循环下烟气中的粉尘浓度分别为 15.7、21.8 和 22.8g/m<sup>3</sup>；在富氧尤其是湿循环条件下，飞灰中的碱金属和硫酸盐含量显著上升；富氧燃烧产生的飞灰在 90~150℃温度区间具有更低的比电阻；富氧条件下飞灰的表观迁移速率略有增加。总体而言，富氧燃烧下静电除尘器的除尘性能有所提高，其设计选型可以参考常规空气燃烧的方法。

富氧燃烧对挥发性重金属(例如汞)的排放特性和赋存形态也有显著的影响。由于烟气再循环的累积效应和烟气量减少，在除尘器入口处，富氧燃烧烟气中含有较高浓度的气相汞。除尘器和脱硫塔等污染控制设备有助于降低气相汞含量：对于富氧干循环，大约 14%的气相汞被飞灰吸附，然后被除尘器捕获；在烟气脱硫中，约有 46%的气相汞被进一步降低，这可归因于烟气脱硫对 Hg<sup>2+</sup>的捕获，因为 Hg<sup>0</sup> 不溶并且难以被烟气脱硫系统捕获。富氧燃烧工况飞灰中的 Hg<sup>0</sup> 量远高于空气燃烧。在富氧燃烧下，鉴于其飞灰含碳量与空气燃烧相似，烟气再循环是造成其飞灰中汞富集的主因。飞灰中汞的富集有利于污染控制装置对汞的移除。飞灰中汞的形态也存在差异：空气燃烧下飞灰中汞主要是三角红 HgS；富氧燃烧下，与有机物结合的汞(Hg-OM)显著增加，Hg-OM 和三角红 HgS 均占主导地位。富氧燃烧气氛

有利于形成富氧官能团，尤其是 C=O 基团，后者促进飞灰中汞的吸附和 Hg-OM 的形成<sup>[40]</sup>。

### 1.5 模式切换与运行控制

通常富氧燃烧锅炉是在空气燃烧工况下启动，待系统运行稳定后，通过模式切换操作将系统切入到富氧燃烧。模式切换是富氧燃烧机组运行面临的新问题。

在 35MW 富氧燃烧平台上实施并验证了两种模式切换控制方案<sup>[41]</sup>：1) 分步切换方案，即首先完成二次风切换，再进行一次风的切换。该方案在美国 B&W 公司的富氧燃烧试验中首先得到应用，澳大利亚 Callide 示范平台也采用了类似的方法，其优点是切换过程中每次仅操作一个风门，各操作的系统响应可追溯，但切换周期较长。2) 同步切换方案，即一次风、二次风同时进行切换操作，其优点是切换过程较迅速，切换过程的动态焓损失小<sup>[42]</sup>，但操作较复杂。试验表明，两种切换方案均可成功实现空气燃烧和富氧燃烧之间的切换。其中，分步切换约耗时 1.5h，同步切换约耗时 1.0h。图 9<sup>[43]</sup>所示为采用同步切换方案时，切换过程中各阀门开度、蒸汽状态以及烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度变化。切换过程中蒸汽压力和温度保持平稳。CO<sub>2</sub> 浓度随着切换过程逐渐升高。待系统达到稳定，烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度稳定在 80%以上，最高浓度达 82.7%。

基于过程模拟软件 Aspen Plus(AP)，采用 Aspen Custom Modeler 工具自定义汽包和炉膛辐射传热模

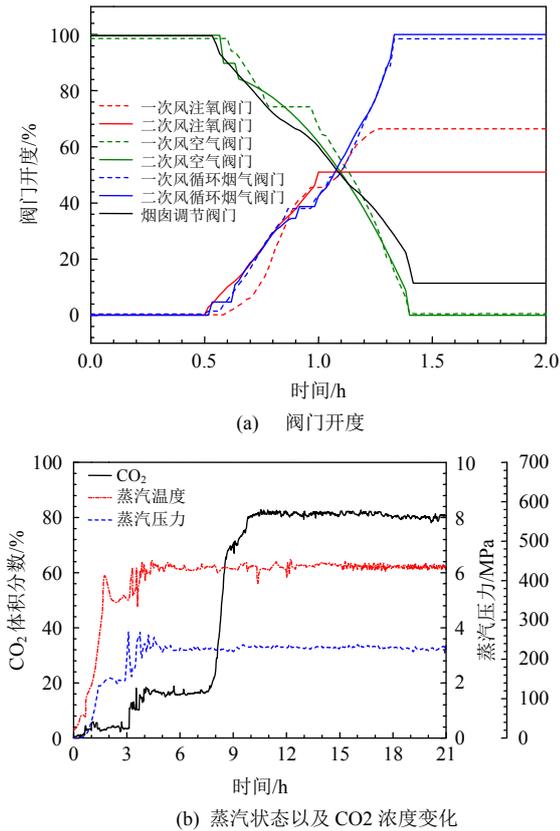


图9 空气燃烧向富氧燃烧切换过程中阀门开度蒸汽状态以及CO<sub>2</sub>浓度变化

Fig. 9 Changes in valve opening, steam status and CO<sub>2</sub> level during the switch from air-fuel to oxy-fuel combustion

型并嵌入AP中,建立了35MW富氧燃烧锅炉岛稳态模型<sup>[42-43]</sup>。从质量平衡和能量平衡的角度对模型进行了详细验证,在空气燃烧和富氧燃烧两种工况下均能与实验结果匹配。采用适用于Aspen Plus Dynamics(APD)动态仿真模型的煤粉转化计算方法,将AP稳态模型转化为APD动态模型。针对锅炉系统及整个燃烧系统的动态响应特性,采用试验数据对动态仿真模型进行了验证。

在35MW动态仿真模型上,进行了富氧燃烧控制策略设计研究,建立了富氧燃烧锅炉岛的闭环控制系统<sup>[44]</sup>,如图10<sup>[44]</sup>所示。将制定的控制目标和控制策略应用于动态仿真模型中,对35MW富氧燃烧系统动态切换过程进行了仿真模拟。结果表明,切换过程中系统参数都能保持稳定,且仿真结果和实验结果吻合。进一步对建立的控制系统进行组态设计,制定了相应的SAMA逻辑组态简图,为搭建完整的控制逻辑组态,并在35MW机组控制系统上实施应用奠定了基础。

### 1.6 运行成本

示范机组的运行成本也是试验过程中重点关注的问题,表5列出了35MW示范系统在空气燃烧和富氧燃烧干循环下的运行成本(根据实际运行数据推算)。其中,运行费用主要包括燃料、水、电等

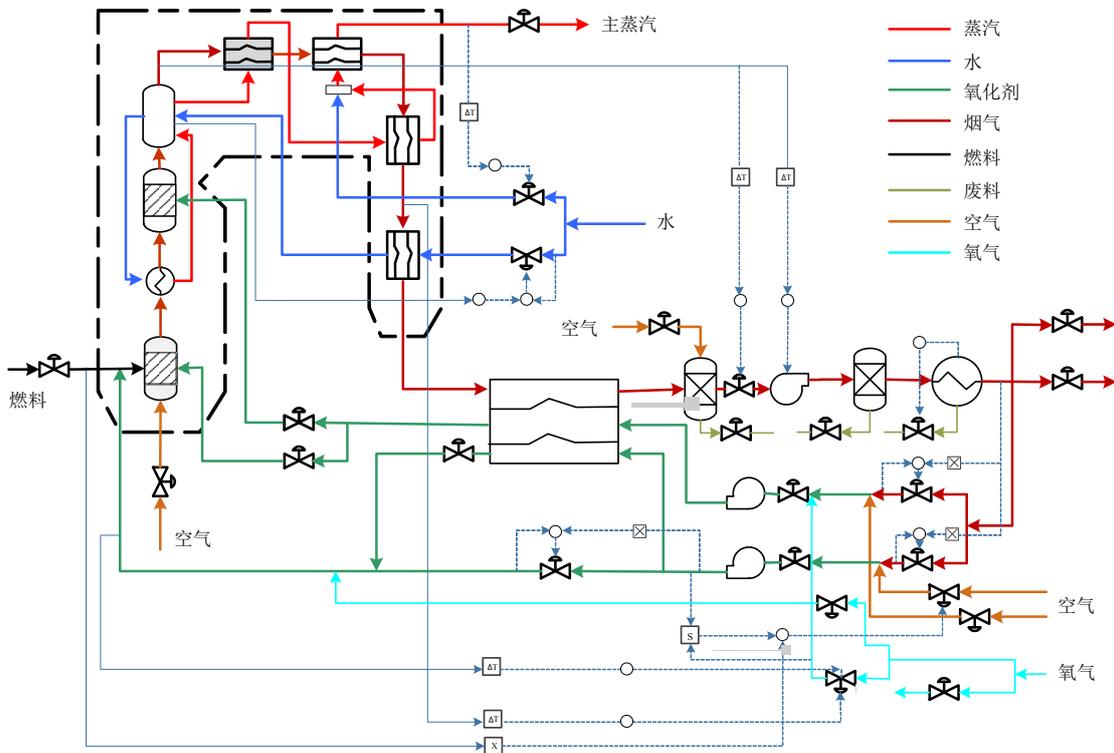


图10 35MW富氧燃烧锅炉岛闭环控制系统

Fig. 10 Closed-loop control system of 35MW oxy-fuel combustion boiler island

表5 35MW 富氧燃烧系统运行成本  
Table 5 Energy consumption of several key equipment.

参数	空气工况		富氧燃烧	
	数值	费用小计	数值	费用小计
制粉系统	235		218	
电耗/(kW·h)	207		212	
风机	238		317	
烟气处理系统	—	204	3315	1502
空分系统	—		945	
压缩纯化*	0.3		0.3	
电价/(元/kW·h)	6		6	
煤耗/(t/h)	600	3600	600	3600
煤价/(元/t)	40	120	80	240
水耗/(t/h)	3		3	
水价/(元/t)	0.046		0.045	
脱硫剂消耗/(t/h)	606	28	606	27
脱硫剂价格/(元/kg)	16	80	29	145
人员数	5		5	
人员报酬/(元/h/人)	4032		5514	
运行费用/(元/h)	38.5		38.5	
高温蒸汽/(t/h)	105		143	
蒸汽生产成本/(元/t 蒸汽)	—		11.3	
CO <sub>2</sub> 捕集量*/(t/h)	—		488	
CO <sub>2</sub> 捕集成本/(元/tCO <sub>2</sub> )				

\*—根据假设条件获得的 Aspen Plus 仿真结果。

消耗以及运行人员和管理人员的劳务报酬。电价的选取对于成本有很大的影响，为对大型发电机组具有参考性，这里采用大型机组的自产电电价(0.3 元/(kW·h))。与此同时，尽管该示范系统尚未包含 CO<sub>2</sub> 压缩纯化系统，根据 AP 仿真结果，表中计入了 CO<sub>2</sub> 捕集系统的附加能耗，采用如下出口条件：液态 CO<sub>2</sub>，压力 3MPa，纯度 95%，捕集率为 90%，捕集量为 11.3t/h。

在空气工况下，系统每小时的运行费用为 4032 元/h，其中煤耗成本占比最大，达到了 89%，其次是电耗成本，占比 5%。在富氧工况下，由于空分系统的运行增加了大量的电耗，电耗成本大幅增加，占总成本的 27%，煤耗成本占比为 65%。此外，运行人员和维修人员的费用也有一定增加，富氧燃烧系统每小时的运行费用为 5514 元/h，是空气工况的 1.37 倍。在空气工况下，高温蒸汽产量为 38.5 t/h，蒸汽的生产成本为 105 元/t 蒸汽；在富氧燃烧工况下，蒸汽的生产成本增加为 143 元/t 蒸汽(计入压缩纯化能耗)，CO<sub>2</sub> 捕集成本为 488 元/tCO<sub>2</sub>(计入压缩纯化能耗)。

富氧燃烧电厂较常规空气燃烧电厂增加了空分制氧设备以及 CO<sub>2</sub> 压缩纯化装置，降低其投资和

能耗是提高富氧燃烧机组经济性的关键。在 35MW 示范系统上，根据富氧燃烧所需氧气压力和纯度较低的特点，采用了更适合富氧燃烧的低能耗三塔空分流程，较常规的双塔精馏，能有效降低 11%~15% 的能耗<sup>[45]</sup>。CO<sub>2</sub> 压缩纯化装置可采用酸性气体共压缩工艺，在烟气压缩纯化过程中，同步实现氮、硫氧化物的协同脱除，从而免去额外的脱硫、脱硝设施，降低富氧燃烧系统的投资成本。在 50kg/h 的 CO<sub>2</sub> 压缩纯化测试平台<sup>[46-47]</sup>上初步验证了这一技术，获得了纯度超过 99% 的液态 CO<sub>2</sub>，最佳工作温度和压力分别为 -30℃ 和 3MPa。总体平均脱硫和脱硝效率均超过 98%，并且 SO<sub>2</sub> 与 NO<sub>x</sub> 的比率变化对脱硫脱硝效率几乎没有影响。

## 2 总结与展望

通过实施应城 35MW 富氧燃烧工业示范，系统地研发了富氧锅炉、富氧燃烧器、氧气注入器、烟气冷凝器、低能耗空分系统、监测控制系统等关键技术和装备，制定了富氧燃烧机组启动、运行方案和性能试验方法等，形成了富氧燃烧碳捕集系统和装备的设计、运行和性能评价的技术导则和标准，为富氧燃烧技术的大型工业化应用奠定了基础。35MW 富氧燃烧工业示范系统在空气燃烧/富氧燃烧兼容设计、低能耗三塔空分流程等方面具有创新性，锅炉排烟 CO<sub>2</sub> 浓度达到 82.7%，达到国际同类装置的最佳水平。

为实现富氧燃烧技术推广应用，函待在以下方面开展持续研发工作，以进一步降低该系统的附加投资成本、运行成本和碳捕集成本，提高该技术的市场竞争力：

1) 富氧燃烧器：大型燃煤发电机组的旋流煤粉燃烧器单支热功率达 30~40MW，需进一步技术放大并完成相应的性能考核试验，并探索分级富氧、无焰富氧等新型低 NO<sub>x</sub> 排放富氧燃烧系统。

2) 制氧技术：发展低能耗、低成本的制氧技术，是降低富氧燃烧技术附加成本和投资的共性需求。低氧压三塔深冷空分工艺可降低制氧能耗约 15%，相对成熟且容易大型化，是目前的主要研究方向；与此同时，化学链制氧和膜分离制氧有望降低制氧能耗 50%，也是国际上的研究热点。

3) 酸性气体共压缩工艺：在高浓度 CO<sub>2</sub> 烟气压缩纯化过程中，同步实现 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 Hg 的协同氧化脱除，可降低富氧燃烧系统的投资成本 10~20%，国内函待开展该技术的 MW 级和 10MW

级的示范验证。

4) 全厂系统耦合优化: 进行空分系统-锅炉系统-压缩纯化系统耦合优化, 是降低富氧燃烧发电系统能耗和成本的有效途径。例如, 通过压缩机废热加热给水等措施, 600MW 富氧燃烧机组发电效率可提高 2%~3%(绝对值), CO<sub>2</sub> 捕集成本可低至 129 元/tCO<sub>2</sub><sup>[48]</sup>。

5) 新一代富氧燃烧技术: 通过提升富氧燃烧系统的运行压力, 或者和新型的热力循环系统结合, 有望显著提高富氧燃烧系统的经济性, 例如: 增压富氧燃烧、富氧燃气轮机(Oxy-GT)、直接燃烧 sCO<sub>2</sub> 循环等, 是近年来的新兴研发热点。

### 致谢

应城 35MW 富氧燃烧工业示范项目的设计、建设、调试和运行, 得到了东方电气集团东方锅炉股份有限公司、东方电气集团中央研究院、四川空分设备(集团)有限责任公司、中国神华能源股份有限公司国华电力分公司、广东电网有限责任公司电力科学研究院、九大(应城) 制盐有限责任公司和华中科技大学碳捕集利用封存研究所等单位同仁的大力支持, 在此向他(她)们表示衷心的感谢。

### 参考文献

- [1] ABRAHAM B M, ASBURY J G, LYNCH E P, et al. Coal-oxygen process provides CO<sub>2</sub> for enhanced recovery [J]. Oil and Gas Journal, 1982, 80(11): 68-70, 75.
- [2] HADJIPASCHALIS I, KOURTIS G, POUILLIKAS A. Assessment of oxyfuel power generation technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2637-2644.
- [3] TOFTEGAARD M B, BRIX J, JENSEN P A, et al. Oxy-fuel combustion of solid fuels[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(5): 581-625.
- [4] STANGER R, WALL T, SPÖRL R, et al. Oxyfuel combustion for CO<sub>2</sub> capture in power plants[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 40: 55-125.
- [5] MARION J, BACK A, ISON R, et al. Overview of Alstom's efforts to commercialize oxy-combustion for steam power plants[C]//Proceedings of the 5th Meeting of the IEAGHG International Oxyfuel Combustion Research Network. Wuhan, China: ALSTOM, 2015.
- [6] CHEN Lei, YONG S Z, GHONIEM A F. Oxy-fuel combustion of pulverized coal: characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(2): 156-214.
- [7] 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 Chuguang, ZHAO Yongchun, GUO Xin. Research and development of oxy-fuel combustion in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(23): 3856-3864(in Chinese).
- [8] ZHENG Chuguang, LIU Zhaohui, XIANG Jun, et al. Fundamental and technical challenges for a compatible design scheme of oxyfuel combustion technology[J]. Engineering, 2015, 1(1): 139-149.
- [9] YIN Chungeng, YAN Jinyue. Oxy-fuel combustion of pulverized fuels: combustion fundamentals and modeling [J]. Applied Energy, 2016, 162: 742-762.
- [10] ZHENG C, LIU Z. Oxy-fuel combustion: fundamentals, theory and practice[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2017.
- [11] 刘建华. 国内燃煤锅炉富氧燃烧技术进展[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 48-54. LIU Jianhua. Research and development of oxy-fuel combustion for coal-fired boiler in China[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 48-54(in Chinese).
- [12] STRÖMBERG L, LINDGREN G, JACOBY J, et al. Update on Vattenfall's 30MW<sub>th</sub> oxyfuel pilot plant in Schwarze Pumpe[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 581-589.
- [13] COPIN D. The storage dimension of the oxy-combustion based integrated CCS project of Lacq and Rousset[C]// Proceedings of the 3rd Oxy-fuel Combustion Conference (OCC3). Ponferrada, Spain: 2013.
- [14] LUPION M, ALVAREZ I, OTERO P, et al. 30MW<sub>th</sub> CIUDEN Oxy-CFB boiler-first experiences[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 6179-6188.
- [15] FUJIMORI T, YAMADA T. Realization of oxyfuel combustion for near zero emission power generation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 2111-2130.
- [16] ANHEDEN M, BURCHHARDT U, ECKE H, et al. Overview of operational experience and results from test activities in Vattenfall's 30MW oxyfuel pilot plant in Schwarze Pumpe[J]. Energy Procedia, 2011, 4: 941-950.
- [17] McDonald D K. FutureGen 2.0: Power block design and integration[C]//Proceedings of the the 3rd Oxyfuel Combustion Conference. Ponferrada, Spain, 2013: 9-13.
- [18] KUCZYNSKI K, Kaliyaperumal M, Hesselmann G, et al. Young Dong Unit 1 oxyfuel feasibility study and FEED[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 1357-1364.
- [19] White rose carbon capture and storage plant, North Yorkshire[DB/OL]. PowerTechnology, [2020-10-14]. <https://www.power-technology.com/projects/white-rose-ca>

- rbon-capture-and-storage-plant-north-yorkshire/.
- [20] ENDESA, CIUDEN, Wheeler F. OXYCFB300 compostilla, carbon capture and storage demonstration project, knowledge sharing FEED report[R]. Spain: Endesa, 2013.
- [21] 段翠九, 谭力, 赵科, 等. 0.15MW 循环流化床富氧燃烧试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(S1): 138-142.  
DUAN Cuijiu, TAN Li, ZHAO Ke, et al. Experimental study on combustion at oxygen-enriched atmosphere in 0.15MW circulating fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(S1): 138-142(in Chinese).
- [22] 王福珍, 刘石, 贾磊, 等. 微型燃气轮机富氧燃烧室优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(2): 300-308.  
WANG Fuzhen, LIU Shi, JIA Lei, et al. Optimal design of oxygen enriched combustors for micro gas turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(2): 300-308(in Chinese).
- [23] 游卓, 周志军, 王智化, 等. 分级富氧燃烧控制  $\text{NO}_x$  的一维模型和试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(26): 4462-4468.  
YOU Zhuo, ZHOU Zhijun, WANG Zhihua, et al. One-dimensional model and experimental study of  $\text{NO}_x$  control by staged oxy-fuel combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(26): 4462-4468(in Chinese).
- [24] 刘冰, 詹扬, 张海, 等. 毫米级单颗煤粒富氧条件下着火特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3267-3274.  
LIU Bing, ZHAN Yang, ZHANG Hai, et al. Experimental study on the ignition characteristics of single coal particles with several mms in diameter at  $\text{O}_2/\text{N}_2$  and  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  atmospheres[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3267-3274(in Chinese).
- [25] DUAN Lunbo, SUN Haicheng, ZHAO Changsui, et al. Coal combustion characteristics on an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor with warm flue gas recycle[J]. Fuel, 2014, 127: 47-51.
- [26] 王学斌, 刘梓晗, 韩旭, 等. 加压富氧燃烧下  $\text{SO}_3$  生成特性的动力学机理研究[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(6): 1357-1361.  
WANG Xuebin, LIU Zihan, HAN Xu, et al. Dynamics mechanism investigation on the formation of  $\text{SO}_3$  during pressurized oxy-fuel combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(6): 1357-1361(in Chinese).
- [27] 张泰, 柳朝晖, 黄晓宏, 等. 3MW<sub>th</sub> 富氧燃烧气体污染物生成与排放特性研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(8): 1652-1655.  
ZHANG Tai, LIU Zhaohui, HUANG Xiaohong, et al. Experimental study of gaseous pollutant formation and emission on 3MW<sub>th</sub> oxy-fuel pilot test facility[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(8): 1652-1655(in Chinese).
- [28] 郭军军, 黄晓宏, 柳朝晖, 等. 3MW<sub>th</sub> 富氧燃烧煤粉锅炉的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(5): 1007-1010.  
GUO Junjun, HUANG Xiaohong, LIU Zhaohui, et al. Numerical simulation of oxy-fuel combustion on 3MW<sub>th</sub> coal-fired boiler[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(5): 1007-1010(in Chinese).
- [29] 刘敬樟. 富氧煤粉燃烧器数值优化设计及试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
LIU Jingzhang, A study of numerical optimization design and experiment on oxy-coal burner[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012(in Chinese).
- [30] LI Pubo, WANG Feifei, TU Yaojie, et al. Moderate or intense low-oxygen dilution oxy-combustion characteristics of light oil and pulverized coal in a pilot-scale furnace[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(2): 1524-1535.
- [31] GUO Junjun, ZHANG Tai, HUANG Xiaohong, et al. Oxy-fuel combustion characteristics of pulverized coal in a 3MW pilot-scale furnace[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(10): 10522-10529.
- [32] GUO Junjun, LIU Zhaohui, HUANG Xiaohong, et al. Experimental and numerical investigations on oxy-coal combustion in a 35MW large pilot boiler[J]. Fuel, 2017, 187: 315-327.
- [33] GUO Junjun, LIU Zhaohui, WANG Peng, et al. Numerical investigation on oxy-combustion characteristics of a 200MW<sub>e</sub> tangentially fired boiler[J]. Fuel, 2015, 140: 660-668.
- [34] GUO Junjun, LIU Zhaohui, HU Fan, et al. A compatible configuration strategy for burner streams in a 200MW<sub>e</sub> tangentially fired oxy-fuel combustion boiler[J]. Applied Energy, 2018, 220: 59-69.
- [35] ANDREW M, ZHENG C, LIU Z, et al. People's Republic of China: Road map for carbon capture and storage demonstration and deployment[R]. Asian Development Bank, 2015.
- [36] 柳朝晖, 刘敬樟, 郑楚光, 等. 一种富氧燃烧器: 中国, 101825278B[P]. 2012-01-25.  
LIU Zhaohui, LIU Jingzhang, ZHENG Chuguang, et al. Oxygen-rich combustor: China, 101825278B[P]. 2012-01-25(in Chinese).
- [37] 陈寅彪, 柳朝晖, 郭军军, 等. 锅炉以及锅炉的配风方法: 中国, 108397766B[P]. 2020-06-05.  
CHEN Yinbiao, LIU Zhaohui, GUO Junjun, et al. Boiler and air distribution method of boiler: China, 108397766B[P]. 2020-06-05(in Chinese).

- [38] ZHANG Zewu, LI Xiaoshan, LUO Cong, et al. Investigation on the thermodynamic calculation of a 35MW oxy-fuel combustion coal-fired boiler[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 71: 36-45.
- [39] WU Haibo, LIU Yi, CHEN Wei, et al. Experimental study on dust removal of flue gas under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(12): 12549-12557.
- [40] YANG Jianping, MA Siming, ZHAO Yongchun, et al. Mercury emission and speciation in fly ash from a 35MW<sub>th</sub> large pilot boiler of oxyfuel combustion with different flue gas recycle[J]. Fuel, 2017, 195: 174-181.
- [41] 柳朝晖, 余学海, 罗威, 等. 锅炉系统及其运行方法: 中国, 108844060B[P]. 2019-12-20.  
LIU Zhaohui, YU Xuehai, LUO Wei, et al. Boiler system and operation method therefor: China, 108844060B[P]. 2019-12-20(in Chinese).
- [42] 罗威. 基于动态仿真的富氧燃烧锅炉岛控制策略优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
LUO Wei, Dynamic simulation based control strategy optimization for boiler island of oxy-fuel combustion plant[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016(in Chinese).
- [43] CHEN Zihan, ZHANG Xiang, LUO Wei, et al. Dynamic modeling on the mode switching strategy of a 35MW<sub>th</sub> oxy-fuel combustion pilot plant[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(2): 2260-2271.
- [44] 余祖珏. 35MW<sub>th</sub>富氧燃烧锅炉岛动态仿真及运行控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.  
YU Zujue, Research on dynamic simulation and operation control for boiler island of 35MW<sub>th</sub> oxy-fuel combustion [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018(in Chinese).
- [45] 黄科, 谢波, 魏义江. 从空气中制取低纯度氧气的深冷法分离方法及其装置: 中国, 102809261B[P]. 2014-07-23.  
HUANG Ke, XIE Bo, WEI Yijiang. Cryogenic separation method and cryogenic separation device for preparing low-purity oxygen from air: China, 102809261B[P]. 2014-07-23(in Chinese).
- [46] WU Haibo, WU Jinhua, LI Yanbing, et al. Study on the key technology of CO<sub>2</sub> compression and purification in oxy-fuel combustion coal-fired power plant[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(4): 3349-3356.
- [47] WU Haibo, XU Mingxin, LI Yanbing, et al. Experimental research on the process of compression and purification of CO<sub>2</sub> in oxy-fuel combustion[J]. Applied Energy, 2020, 259: 114123.
- [48] 孔红兵, 柳朝晖, 陈胜, 等. 600MW富氧燃烧系统过程建模及优化[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(2): 53-60.  
KONG Hongbing, LIU Zhaohui, CHEN Sheng, et al. Process simulation and optimization of a 600MW O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(2): 53-60(in Chinese).



郭军军

在线出版日期: 2020-11-17。

收稿日期: 2020-09-01。

作者简介:

郭军军(1991), 男, 工学博士, 研究方向为燃烧过程数值模拟, jguo@hust.edu.cn;

张泰(1986), 男, 工学博士, 研究方向为富氧燃烧污染物排放, zhtai@hust.edu.cn;

李鹏飞(1986), 男, 工学博士, 副教授, 研究方向为高效清洁低污染燃烧方式、燃烧过程数值模拟、化学反应动力学, pfli@hust.edu.cn;

\*通信作者: 柳朝晖(1972), 男, 工学博士, 教授, 研究方向为碳捕集利用与封存、湍流两相反应流体力学和燃烧过程数值模拟, zliu@hust.edu.cn;

郑楚光(1945), 男, 工学博士, 教授, 研究方向为燃烧污染防治、燃烧过程数值模拟, cgzheng@hust.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)

# Industrial Demonstration Progress and Trend in Pulverized Coal Oxy-fuel Combustion in China

GUO Junjun, ZHANG Tai, Li Pengfei, LIU Zhaohui, ZHENG Chuguang  
(Huazhong University of Science and Technology)

**KEY WORDS:** carbon capture; oxy-fuel combustion; coal combustion; demonstration project

Oxy-fuel combustion technology is one of the most promising large-scale carbon capture technologies for coal-fired power plants. This study introduces the development and demonstration of oxy-fuel combustion technology in the world, then systematically reviews the lessons learned from the Yingcheng 35MW oxy-fuel combustion industrial demonstration plant, including combustion characteristics, heat transfer characteristics, boiler efficiency, pollutant emissions, operation control and system economy, etc.

The successful operation of oxy-fuel industrial project indicates that the oxy-fuel combustion technology has completed its full-process verification in a 10 MW-level power plant, proving that it has the technical capability for the construction of a 100 MWe-level large-scale demonstration project.

Through the implementation of the 35 MW oxy-fuel industrial demonstration project in Yingcheng, The key technologies and equipment are systematically developed for oxy-coal combustion, such as oxy-fuel boilers, oxy-fuel burners, oxygen injectors, flue gas condensers, air separation systems with low energy

consumption, monitoring and control systems, etc. The start-up, operation regulations and performance evaluation methods of oxy-fuel combustion units are developed. This industrial demonstration project laid the foundation for the large-scale industrial application of oxy-fuel combustion technology. The 35 MW oxy-fuel industrial demonstration system is innovative in terms of the compatible design of air-fuel and oxy-fuel combustion, as well as low-energy three-tower air separation process. The CO<sub>2</sub> concentration reaches 82.7% in the flue gas, which is the best level of similar system in the world.

To achieve the large-scale demonstrations and applications of oxy-fuel combustion technology, the economics of this technology is expected to be further improved in the following aspects: the development of low-cost oxygen production technology; scaling-up the oxy-fuel burner, exploration of new low-NO<sub>x</sub> oxy-fuel combustion systems such as staged oxy-fuel and flameless oxy-fuel; carrying out the research of acid gas co-compression technology; coupling optimization of the whole plant system; and developing new generation of oxy-fuel combustion technologies, etc.