

# 中国富氧燃烧技术研发进展

郑楚光, 赵永椿, 郭欣

(煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

## Research and Development of Oxy-fuel Combustion in China

ZHENG Chuguang, ZHAO Yongchun, GUO Xin

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

Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Oxy-fuel combustion is one of the most potential carbon reduction technologies for large scale coal-fired power plant. The progress of research and development of oxy-fuel combustion in China was summarized here. The fundamental research including the combustion characteristics, pollutant emission, mineral transformation and ash deposit, thermodynamic calculation, dynamic simulation, and economic assessment of oxy-fuel combustion was introduced; the deployment of oxy-fuel demonstration project and the roadmap of oxy-fuel combustion was described; and finally the trends of development in the field of oxy-fuel combustion in China were briefly discussed.

**KEY WORDS:** Carbon capture; oxy-fuel combustion; fundamental research; demonstration project

**摘要:**富氧燃烧技术是最具潜力的燃煤电厂大规模碳减排技术之一,文中对中国富氧燃烧的研发进展进行了系统的综述,介绍了富氧燃烧技术在中国的基础研究现状,包括燃烧特性、污染物排放、矿物转化灰沉积、热力计算、动态仿真、经济性评价等,描述了中国富氧燃烧工程示范部署以及技术路线图,并简要讨论了富氧燃烧技术未来的发展趋势。

**关键词:**碳捕集;富氧燃烧;基础研究;示范工程

## 0 引言

中国是世界上最大的煤炭生产和消费国,《2012 中国能源发展报告》显示,2011 年我国能源消费总量达  $3.478 \times 10^9$  t 标准煤,大量煤炭的消耗排放了大量的  $\text{CO}_2$ 。2007 年我国  $\text{CO}_2$  排放量已达

到  $5.96 \times 10^9$  t,超过美国的  $5.82 \times 10^9$  t,成为世界上最大的  $\text{CO}_2$  排放国。能源供给与  $\text{CO}_2$  的排放压力巨大。2009 年 11 月 26 日,中国宣布了控制温室气体排放的清晰量化目标,决定到 2020 年单位国内生产总值  $\text{CO}_2$  排放比 2005 年下降 40%~45%。在 2011 年德班气候大会上,中国政府承诺有条件地进行 2020 年后的量化减排协议谈判。

碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术是应对气候变化的最可行的技术之一,中国政府十分重视 CCUS 技术的发展。国家科技部门先后围绕 CCUS 技术减排潜力、 $\text{CO}_2$  捕集、 $\text{CO}_2$  生物转化利用、 $\text{CO}_2$  驱油和地质封存相关的基础研究、技术研发与示范等方面进行了较系统的部署。其中,碳捕集技术的投资和能耗均占 CCUS 技术的 2/3 以上,是提高 CCUS 技术经济性的关键。目前,基于燃烧前、燃烧中和燃烧后不同方式的碳捕集技术都在研发和示范中。对于燃烧前的技术示范,中国华能绿色煤电在天津已建成 250 MW IGCC 级示范电站机组,并计划依托其建设 30 MW 燃烧前捕集示范装置。此外,2008 年我国首个燃煤电厂  $\text{CO}_2$  燃烧后捕集示范工程在华能北京热电厂正式建成投产,年  $\text{CO}_2$  捕获能力为 3000 t;2009 年底,华能上海石洞口第二电厂建成并投运了年  $\text{CO}_2$  捕获能力为  $1.2 \times 10^5$  t 的示范项目。

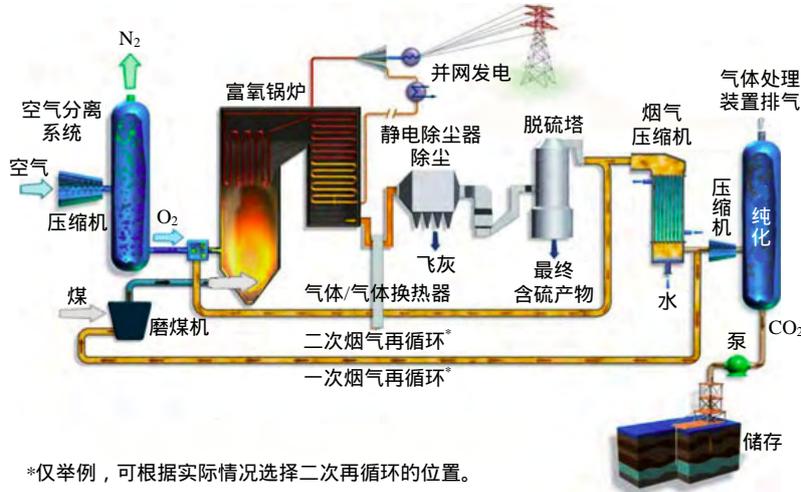
燃烧中碳捕集即富氧燃烧技术,它是在现有电站锅炉系统基础上,用高纯度的氧气代替助燃空气,同时辅助以烟气循环的燃烧技术,可获得高达富含 80% 体积浓度的  $\text{CO}_2$  烟气,从而以较小的代价冷凝压缩后实现  $\text{CO}_2$  的永久封存或资源化利用;具有相对成本低、易规模化、可改造存量机组等诸多

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2011CB707301);国家科技支撑计划项目(2011BAC05B00);国际科技合作专项项目(2012DFB60100)。

The National Basic Research Program of China (2011CB707301); National Key Technology R&D Program (2011BAC05B00); Program of International S&T Cooperation (2012DFB60100).

优势，被认为是最可能大规模推广和商业化的 CCUS 技术之一<sup>[1-2]</sup>，其系统流程如图 1 所示：由空气分离装置(ASU)制取的高纯度氧气(O<sub>2</sub> 纯度 95% 以上) ,按一定的比例与循环回来的部分锅炉尾部烟

气混合，完成与常规空气燃烧方式类似的燃烧过程，锅炉尾部排出的具有高浓度 CO<sub>2</sub> 的烟气产物，经烟气净化系统(FGCD)净化处理后 ,再进入压缩纯化装置(CPU)，最终得到高纯度的液态 CO<sub>2</sub>，以备



\*仅举例，可根据实际情况选择二次再循环的位置。

图 1 富氧燃烧技术系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of oxy-fuel combustion system

运输、利用和埋存。

富氧燃烧技术最早是由 Abraham 于 1982 年提出，目的是为了产生 CO<sub>2</sub> 用来提高石油采收率 (EOR)<sup>[3]</sup>。随着全球变暖的加剧以及气候的变化，作为温室气体主要因素的 CO<sub>2</sub> 排放问题逐渐引起了全球的关注。因此，富氧燃烧技术作为最具潜力的有效减排 CO<sub>2</sub> 的新型燃烧技术之一，成为全球研究者关注的热点<sup>[1-2,4-7]</sup>。图 2<sup>[8]</sup>给出了从 20 世纪 80 年代以来各国研究机构从实验室规模到商业应用的历程。

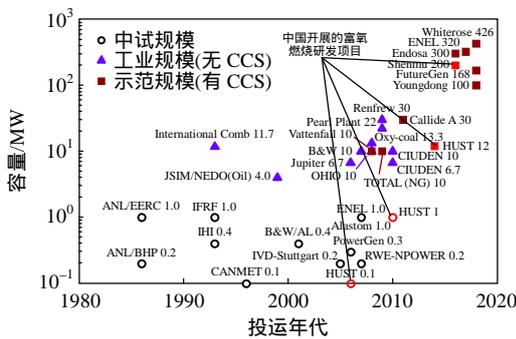


图 2 国际富氧燃烧项目概况

Fig. 2 International research status of oxy-fuel combustion

目前，富氧燃烧技术在美国，日本，加拿大，澳大利亚，英国，西班牙，法国，荷兰等国家都得到重视和发展。主要的研究机构和公司包括：美国的 EERC 和 ANL ,B&W 和 Air Product 以及 Alstom 美国分公司，日本的 IHI、HITACHI，加拿大的

CANMET，荷兰的 IFRF，澳大利亚的 BHP 和 Newcastle 大学、CS Energy，西班牙的 CIUDEN，法国的 Alstom，英国的 Doosan Babcock，以及瑞典的 Vattenfall 电力等。

2005 年以来，富氧燃烧的工业示范取得了突出的进展，瑞典瀑布电力公司 2008 年在德国黑泵建成了世界上第 1 套全流程的 30 MW(th)富氧燃烧试验装置(图 3)；2009 年，法国道达尔 Lacq 30 MW (th) 天然气富氧燃烧示范系统投入运行；澳大利亚 CS Energy 公司 2011 年在 Calide 建成了目前世界上第一套也是容量最大的 30 MW(电)富氧燃烧发电示范电厂(图 4)，西班牙 CIUDEN 技术研发中心建成了一套 20 MW(th)的富氧燃烧煤粉锅炉和世界上第一套 30 MW(th)富氧流化床试验装置(图 5)。

此外，欧盟、美国、英国等相继宣布将在 2015 年前后对多座电厂进行富氧燃烧大型示范项目。2010 年 8 月，美国能源部宣布启动基于富氧燃烧实



图 3 黑泵 30 MW(th)煤粉富氧项目，德国(2008)

Fig. 3 Schwartz pumpe 30 MW(th) project, germany (2008)



图4 Calide 30 MW(e)煤粉富氧项目, 澳大利亚(2011)

Fig. 4 Calide 30 MW(e) project, Australia (2011)



图5 CIUDEN 富氧燃烧项目, 西班牙(2012)

Fig. 5 CIUDEN project, Spain (2012)

现碳捕获的 FutureGen2.0 计划, 资助 10 亿美元(项目总的预算为 13 亿美元)建设 200 MWe(现调整为 168 MW(e))商业规模的富氧燃烧电站, 其目标是获得 90% 的碳捕集率, 并将脱除绝大部分的  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、Hg 和颗粒物等污染物。2013 年 12 月, 英国能源与气候变化部宣布斥资数千万英镑支持位于约克郡的白玫瑰项目(426 MW(e))富氧燃烧碳捕集大型示范项目, 进行工程预可行性研究(FEED)。西班牙的 Compostilla 项目 OXY-CFB300 也在开展基于循环流化床富氧燃烧  $\text{CO}_2$  捕集、运输和埋存示范工程的技术可行性研究。

富氧燃烧技术在中国的研发历程也有近 20 年, 本文对富氧燃烧技术在中国的发展现状进行了系统的综述, 尤其是富氧燃烧基础研究相关成果进行了归纳和总结, 对富氧燃烧未来的发展趋势进行了展望, 以期为推动富氧燃烧商业化进程及相关技术领域的发展提供参考。

## 1 中国富氧燃烧技术发展历程

国内关于富氧燃烧的基础研究早在 20 世纪 90 年代中期即已开始, 华中科技大学、东南大学、华北电力大学、浙江大学等在国内最早开始关注富氧燃烧的燃烧特性、污染物排放和脱除机制等<sup>[9-14]</sup>。华中科技大学 2006 年先后承担了国内第 1 个  $\text{CO}_2$  减排国家 863 计划项目和国家 973 计划项目, 启动了国内对于富氧燃烧技术的研发和试验工作, 建成了 300 kW 富氧燃烧台架, 取得了较系统的基础研究成果和小试台架运行经验, 证明其是一种容易获取烟气中  $\text{CO}_2$  浓度达 90% 以上, 且同时兼具脱硫、脱硝和脱汞能力的近“零”排放燃烧方式。近年来, 围绕煤燃烧的 2 种主要类型: 煤粉炉和流化床的富氧燃烧的研究和平台建设都十分活跃<sup>[5,14]</sup>。2011 年, 华中科技大学建成了全流程富氧燃烧试验台(3 MW(th))富氧燃烧碳捕获试验平台; 迄今为止, 该平台仍然是国内最大的全流程富氧燃烧试验系统。

华中科技大学依托中美清洁能源研究中心、国家能源煤炭清洁低碳发电技术研发(试验)中心和武汉新能源研究院, 提出了中国富氧燃烧技术路线图(图 6)。目前正与神华集团、东方电气集团、四川



图6 中国富氧燃烧技术研发路线图

Fig. 6 R&amp;D Roadmap of oxy-fuel combustion in China

空分集团等产业部门合作，争取在 2015—2016 年完成富氧燃烧技术的百万吨级大规模工业示范。

## 2 中国富氧燃烧技术基础研究进展

### 2.1 煤粉在富氧燃烧条件下的着火和燃烧特性

富氧燃烧条件下，煤粉颗粒的着火和燃烧特性与常规空气燃烧有明显差异。Wang 等调查了富氧燃烧条件下煤样热解和燃烧特征，发现煤样在  $\text{CO}_2$  气氛下的低温热解反应性与  $\text{N}_2$  气氛下相似<sup>[15]</sup>。Fei 等采用随机孔模型研究了煤焦的反应性<sup>[16]</sup>。Qiao 等采用金属丝网反应器研究了  $\text{CO}_2$  对煤焦着火温度的影响<sup>[17]</sup>，结果发现各气氛下着火温度依次为  $\text{O}_2/\text{Ar} < \text{O}_2/\text{N}_2 < \text{O}_2/\text{CO}_2 < \text{O}_2/\text{He}$ 。Huang 等对中国典型动力煤在富氧燃烧下的着火特性开展了系统研究<sup>[14]</sup>，通过分析颗粒的光强分布特征(图 7)，揭示了低氧浓度条件下，用  $\text{CO}_2$  替代  $\text{N}_2$  导致着火时间的延长和脱挥发分燃尽的延迟的原因：由于富氧燃烧气氛下  $\text{CO}_2$  的大量存在，导致气相体积比热容上升，使得着火时间有所延长；同时高浓度  $\text{CO}_2$  还使得燃料和氧气扩散速率降低，进而影响挥发分的燃尽。Hu 等发现在富氧燃烧气氛下， $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的气化反应对低阶煤(褐煤和亚烟煤)煤焦的燃尽有显著的促进作用<sup>[18]</sup>。

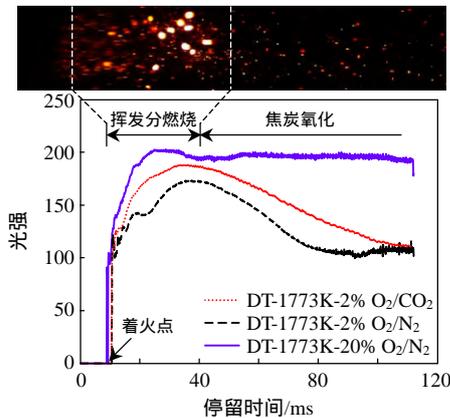


图 7 DT 烟煤颗粒光强分布曲线

Fig. 7 Average particle ignition temperatures for the lignite coal during different atmospheres

### 2.2 富氧燃烧污染物释放和控制

对于富氧燃烧方式下  $\text{SO}_x$  的生成特性和反应机制的研究也有不少报道<sup>[19]</sup>，富氧燃烧方式下炉内钙基的脱硫效率较常规空气气氛下高，高  $\text{CO}_2$  浓度对  $\text{CaO}$  烧结的抑制是钙基固硫效率显著提高的主要原因，高  $\text{CO}_2$  浓度抑制了  $\text{CaCO}_3$  的分解使得其直接脱硫效率大幅提高<sup>[20-22]</sup>。

富氧燃烧方式下  $\text{NO}_x$  的生成相较于空气燃烧方式下低，Sun 等研究了富氧燃烧条件温度对燃料 N 的转化及循环 NO 的还原的影响规律<sup>[23]</sup>。Wang 等在固定床反应器系统上深入探讨了温度、气氛等因素对焦炭燃烧过程中 NO 的生成和转化特性的影响<sup>[24]</sup>。影响富氧燃烧条件下 NO 的排放因素包括：燃料 N 向 NO 的转化、煤焦和 NO 的异相反应、循环的 NO 还原、循环 NO 与燃料 N 的交互作用等<sup>[21,25-26]</sup>。Liu 等详细比较了各种因素对富氧燃烧条件下 NO 排放的贡献率(图 8)，结果表明循环 NO 的减少是富氧燃烧条件下低 NO 排放的主要原因(贡献率超过 70%)。

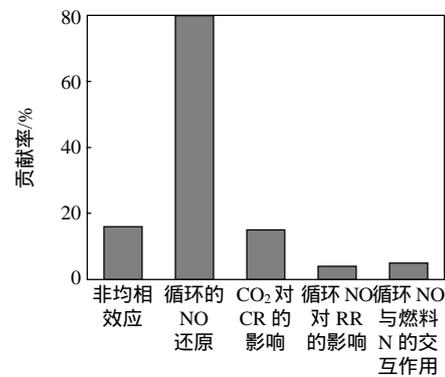


图 8 各种因素对 NO 排放的贡献率(氧/燃料比 = 0.7)

Fig. 8 Contributions of various factors at an oxygen/fuel stoichiometric ratio of  $\lambda = 0.7$

富氧燃烧气氛下颗粒物和重金属的排放也与常规空气燃烧有较大差异，高  $\text{CO}_2$  浓度使得脱挥发分过程中生成的焦颗粒尺寸更小，进而同等氧浓度水平下富氧燃烧气氛下将产生更多的细灰颗粒<sup>[27]</sup>。富氧燃烧气氛在一定程度上会抑制痕量元素的蒸发，同时  $\text{CO}_2(\text{g})$  也会抑制痕量元素向气相次氧化物及单质的转化；烟中  $\text{As}(\text{g})$ 、 $\text{Hg}(\text{g})$ 、 $\text{Sb}(\text{g})$  等稳定存在的温度范围变窄<sup>[28]</sup>。Chen 等对比分析了富氧燃烧气氛和常规空气气氛下 Cr 的形态演化，高  $\text{CO}_2$  对  $\text{Cr}^{3+}$  的氧化有一定的促进作用<sup>[29]</sup>。他们指出炉内钙基脱硫促进了有毒的  $\text{Cr}^{6+}$  的生成，并提出了  $\text{CaO}$  氧化  $\text{Cr}^{3+}$  的新通道。

### 2.3 富氧燃烧方式下矿物质转化及灰熔融特征

富氧燃烧条件下高  $\text{CO}_2$  浓度会加剧灰沉积的形成<sup>[30]</sup>，各种矿物质的迁移转化也有较大差异<sup>[31]</sup>。与常规空气燃烧相比，富氧燃烧气氛下黄铁矿的分解氧化过程失重稍增加， $\text{CO}_2$  浓度的增加会导致黄铁矿分解过程缩短，氧化过程延长。Yu 等采用沉降炉研究了高 Fe 煤及掺铁煤样在富氧燃烧气氛下含

铁矿物的迁移规律<sup>[30]</sup>,与空气燃烧相比,富氧燃烧气氛下含铁矿物更倾向转化为赤铁矿( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ );随着 $\text{O}_2$ 浓度由21%增加到32%,灰中赤铁矿含量增加,而磁铁矿含量减少;这也对灰沉积产生重要影响。

#### 2.4 富氧燃烧热力计算方法研究

富氧燃烧方式下烟气成分的变化导致传热特性与常规空气燃烧方式差异显著,为了更准确的进行富氧燃烧气氛下的锅炉热力计算,需要对原有的计算方法进行一系列的修正,包括对辐射传热和对流传热计算方法的修正,发展新型的富氧燃烧计算方法。华中科技大学富氧燃烧团队以基于高分辨率HITEMP数据库的LBL模型和FSK模型为基准模型,以发射率为比较对象,对WSGG模型的参数进行优化和修正,获得修正后的WSGG模型,并运用其对氧燃烧的湿循环工况和干循环工况下的辐射系数进行了模拟计算,计算结果表明应用改进的辐射模型可以得到更好的结果,文献[32]中模型在高温下低估近20%。

#### 2.5 富氧燃烧系统仿真

华中科技大学富氧燃烧团队建立了详细的氧燃烧系统仿真模型,在基准工况仿真结果的基础上,对氧燃烧系统中的一些主要参数,如循环率、氧气浓度、空气过量系数等进行了分析、讨论。选取的仿真对象是一600 MW超临界富氧煤粉燃烧发电厂,整个富氧燃烧系统被分为4个子系统:锅炉岛,汽水循环,空气分离以及尾气处理,系统中包含38个部件以及73条物流/能流。结果显示,由于空分和烟气压缩纯化的能耗,富氧燃烧系统净效率较传统燃烧低了10.84%,不同循环倍率对锅炉模型中物流量、烟气成分有较大的影响;对冷烟气循环,循环倍率最佳范围0.705~0.726,采用热烟气循环方式时最佳循环倍率为0.617<sup>[33]</sup>。

#### 2.6 经济性评价

为了对富氧燃烧技术在国内发展的经济可行性进行合理评估,Xiong等选取了国内典型的300 MW亚临界和600 MW超临界燃煤发电机组所对应的氧燃烧系统进行了技术经济学评价<sup>[34-35]</sup>。结果表明:富氧燃烧系统发电成本是传统燃烧系统的1.39~1.42倍,氧燃烧系统 $\text{CO}_2$ 减排成本和 $\text{CO}_2$ 捕获成本的范围分别为160~184和115~128元/t。考虑到氧燃烧技术在燃烧效率、脱硫脱硝效率等方面的优势,如果对电厂排放的 $\text{CO}_2$ 征收碳税和找到高浓度 $\text{CO}_2$ 的销售出口,或对电厂建设的融资和原煤

价格进行政策倾斜,或提高制氧系统和烟气处理系统的功耗价格比,富氧燃烧电站可望达到或接近传统电站的经济性。

在焓分析和成本分析结果的基础上,利用热经济学结构理论对600 MW富氧燃烧系统以及传统燃烧系统建立了热经济学成本模型,并引入环境成本,对两系统进行了环境热经济学成本分析<sup>[36-37]</sup>。分析结果显示:富氧燃烧系统中组件产品的单位焓成本约为传统燃烧系统中相应值的1.1倍,而单位热经济学成本是传统燃烧系统中对应值的1.22倍左右。当考虑环境因素的影响时,在环境损害模型下求得的组件产品单位环境热经济学成本最大,这表明对污染物质进行脱除是必要且有利的,减排 $\text{CO}_2$ 的富氧燃烧技术不仅对环境友好,且具有经济竞争力。税收是将环境损害的外部性内部化的有效措施,当前分析工况下的合理 $\text{CO}_2$ 排放税收额为140元/t左右。

### 3 中国富氧燃烧技术中试试验研究及示范

#### 3.1 富氧燃烧器设计及数值模拟

2011年底,华中科技大学在武汉建成国内第一套全流程3 MW(th)富氧燃烧碳捕获试验平台,该平台为国内现阶段最大容量的富氧燃烧试验平台,热输入为3 MW(th),年捕获 $\text{CO}_2$ 量达7000 t。整个系统从空气分离制氧开始,到 $\text{CO}_2$ 富集、压缩、纯化,涵盖富氧燃烧技术全流程,主要包含空分系统、富氧燃烧锅炉、烟气净化-除湿、 $\text{CO}_2$ 压缩和纯化等,现已完成了综合调试运行,突破了空分制氧与锅炉燃烧系统耦合的瓶颈问题,实现了锅炉岛出口烟气中 $\text{CO}_2$ 浓度超过80%的目标。试验系统如图9所示。



图9 3 MW(th)全流程富氧燃烧碳捕获试验系统(武汉)

Fig. 9 3 MW(th) full-chain oxy-fuel combustion experimental system (Wuhan)

针对3 MW(th)富氧燃烧 $\text{CO}_2$ 捕获中试/示范系统进行了富氧燃烧器的设计<sup>[38]</sup>,富氧工况的循环倍率为0.7,燃烧器采用了障碍环结构(图10),不仅能实现高速氧气射流,可以弥补富氧条件下二次风动量不足的缺点,还可以延迟一、二次风的混合,

保护燃烧器喷嘴不被烧坏。对 3 种典型的工况进行了数值模拟，对炉内温度场和速度场进行了统计分析。分析结果表明：富氧燃烧时火焰温度较高，燃烧效果好，是因为二次风动量大，中心回流区大，卷吸高温烟气的能力强。在 3 MW(th) 试验系统中，富氧燃烧工况和空气燃烧工况下均实现了 95% 的燃尽率。

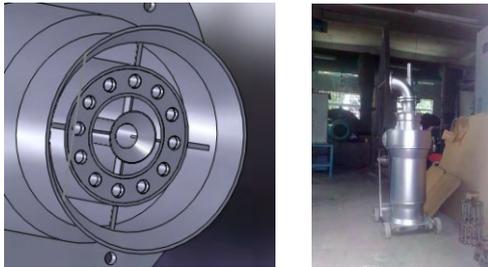
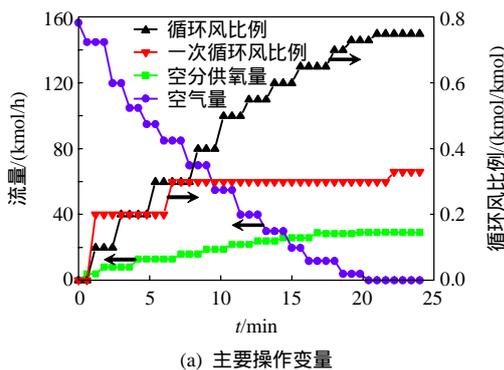


图 10 3 MW(th)富氧燃烧器  
Fig. 10 3 MW(th) oxy-coal burner

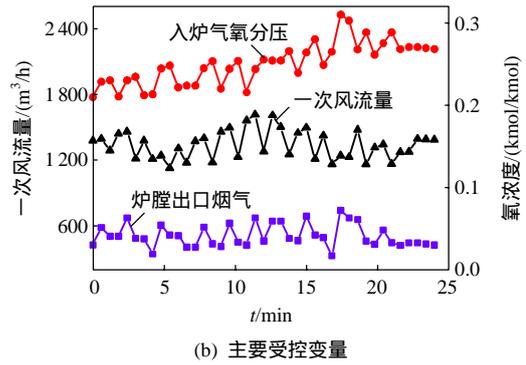
### 3.2 空气燃烧切换到富氧燃烧过程中锅炉的动态特性

以富氧燃烧烟气全干循环为例，对其切换过程的动态特性进行了模拟研究。通过炉膛出口氧浓度、炉膛进气氧浓度和一次风量等 3 个变量控制指标，相应调节进入炉膛的空气量和纯氧量以及循环烟气量等，获得了切换过程中烟气温度、流量和组分等的变化情况(图 11)。

为保证切换过程中炉膛辐射换热量的稳定，切换过程中炉膛进气的氧浓度缓慢升高，最终稳定在 26.8%，保持在最佳范围之内；炉膛出口氧浓度波动上升，最后稳定到 3%，保证了炉膛内煤粉的安全和经济燃烧；一次风量在很小的范围内波动，保证了送粉过程的安全和稳定；切换过程中，炉膛绝热火焰温度和炉膛出口烟气温度均有一定的波动。切换过程结束，炉膛绝热火焰温度和炉膛出口烟气温度均有一定的下降，这说明炉内气氛的变化对炉膛辐射换热过程有很大影响。通过优化调节，华中



(a) 主要操作变量



(b) 主要受控变量

图 11 切换过程中主要烟风参数的变化曲线

Fig. 11 Dynamic transition of gas parameters on 3 MW(th) oxy-fuel combustion system

科技大学富氧燃烧团队在 3 MW(th) 试验系统上成功获得超过 80% 的烟气 CO<sub>2</sub> 浓度(图 12)。

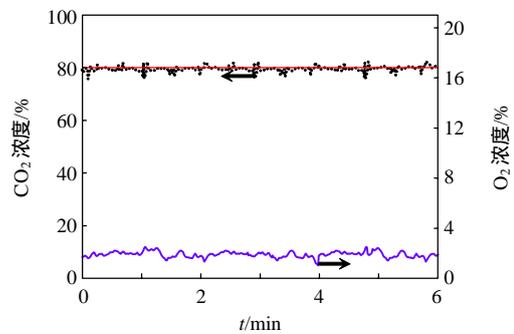


图 12 3 MW(th)富氧燃烧干烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度

Fig. 12 CO<sub>2</sub> concentration in dry flue gas of 3 MW(th) oxy-fuel combustion

### 3.3 CFB 富氧燃烧技术中试研究

结合循环流化床的优势和特点，东南大学、浙江大学等对循环流化床富氧燃烧技术进行了详细的研究<sup>[39-43]</sup>。东南大学率先建造了国内首台可实现烟气循环、国际上首台可实现温烟气循环的循环流化床 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃烧试验装置(50 kW(th))，其试验系统如图 13 所示。利用该试验平台成功进行了 300 h 温



图 13 50 kW(th)循环流化床富氧燃烧实验台

Fig. 13 50 kW(th) oxy-CFB experimental facility

烟气循环试验,氧气浓度轻微升高时,富氧燃烧的床内温度与空气燃烧时的温度处于同一范围;而在较高的 $[Ca]/[S]$ 比的条件下,脱硫效率可以达到80%以上;此外,以 $mg/MJ$ 作为排放单位时,富氧燃烧下的 $NO$ 排放量大大少于空气燃烧下的排放,其减少的程度与燃料的性质有较大的关系。对于某一特定燃料, $CO$ 排放量在 $ppm$ 的计量单位下并未增加,而在 $mg/MJ$ 的计量方式下却明显下降。由于烟气循环中没有进行水蒸气的冷凝处理,从而使烟气中的水蒸气含量有较大的增加。烟气中的水蒸气浓度对 $CaO$ 的碳酸化和硫化有重要影响<sup>[44]</sup>。

目前东南大学与B&W合作建设2.5 MW(th)循环流化床富氧燃烧实验系统已初步建成(图14)。特别指出的是,所设计的并行床换热器突破了传统循环流化床外置床仅靠循环灰作为热载体的局限,引入部分未燃碳燃烧放热,在鼓泡床方式下运行,传热系数高;通过供风调节循环量,调节方便;换热量可达整个锅炉热负荷的15%以上,从而实现了通过在并行床布置受热面解决高氧气浓度条件下受热面布置受限的问题,极大的减小了锅炉的体积并且使循环流化床富氧燃烧技术更加成熟。这些研究成果让富氧燃烧技术在未来电厂的商业化应用又进了一大步。



图14 2.5 MW(th)循环流化床富氧燃烧实验台

Fig. 14 2.5 MW(th) oxy-CFB experimental system

### 3.4 中国富氧燃烧技术示范工程项目进展和部署

为进一步推进富氧燃烧技术的发展,华中科技大学于2011年5月启动了35 MW(th)富氧燃烧碳捕获关键装备研发及工程示范项目(图15),该项目由国家科技部、华中科技大学、东方锅炉(集团)股份有限公司、四川空分设备(集团)有限责任公司和久大(应城)制盐有限责任公司等共同投资建设,新建一台38.5 t/h的锅炉,配备深冷空气分离制氧系统,用高纯度的氧代替助燃空气,同时采用烟气循环调

节炉膛内的介质流量和传热特性,预期项目建成后,能实现烟气中 $CO_2$ 浓度高于80%、年捕集 $CO_2$ 能力 $1 \times 10^5 t$ 。该项目已于2012年12月开始安装建设,预计于2014年完成全部的调试运行工作。该项目现阶段以进行工业试验为主要目的,整个系统包括空气分离制氧单元、富氧燃烧锅炉 $CO_2$ 富集单元、烟气净化除湿单元,并预留 $CO_2$ 压缩纯化和地下埋存单元,涵盖富氧燃烧技术全流程,将为更大级别富氧燃烧技术推广奠定坚实基础。



图15 35 MW(th)富氧燃烧示范工程(湖北应城)

Fig. 15 35 MW(th) oxyfuel semi-industrial demonstration system

在此基础上,华中科技大学牵头联合神华集团、东方电气集团、四川空分、久大制盐有限责任公司等大型企业成立了富氧燃烧产业联盟,致力于富氧燃烧技术在200~600 MW规模电厂上的应用。神华集团国华电力公司已经对200 MW等级富氧燃烧项目的可行性研究进行立项,并由华中科技大学、东方锅炉集团有限公司、西南电力设计院等单位联合开展前期研究。此外,中国大唐新华电厂和山西国际电力也分别与Alstom、Babcock&Wilcox公司合作进行了350 MW等级富氧燃烧电站的可行性研究工作。

## 4 结论

鉴于我国的温室气体排放量由于经济加速发展而急剧上升的状况,中国必然成为全球 $CO_2$ 减排的焦点,所承受的压力也会越来越大。作为一个负责任的大国,中国政府正在承担起应尽的义务。富氧燃烧技术由于其自身独特的技术优势,对以燃煤火力发电为主的中国,是最容易实现大规模减排 $CO_2$ 的技术之一;国内已完成实验室基础理论和实验研究,已建成投运3 MW(th)的全流程试验平台,35 MW(th)富氧燃烧示范装置也即将建成,商业化规模的大型机组正在进行可行性研究,现阶段正是富氧燃烧技术快速发展的黄金时期。受制于资金、

政府政策支持、碳埋存条件法规、输送网络的建立，许可等因素，虽然目前还没有商业规模项目开始实施建设，但是中国的研究机构 and 大型企业已经明确了富氧燃烧的技术发展路线，明确了基础研究、中试和示范项目的总体规划和安排，力争率先建设商业规模的示范电站。在政府资金和政策的有力支持下，中国有望在未来 5 年左右的时间内完成具有自身特色的富氧燃烧技术储备与工业示范，推动和引领国际碳捕获技术发展。

## 参考文献

- [1] Hadjipaschalis I, Kourtis G, Poullikkas A. Assessment of oxyfuel power generation technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(9): 2637-2644.
- [2] 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.
- [3] Abraham B M, Asbury J G, Lynch E P, et al. Coal-oxygen process provides CO<sub>2</sub> for enhanced recovery[J]. *Oil Gas Journal*, 1982, 80(11): 68-75.
- [4] Buhre B J P, Elliott L K, Sheng C D, et al. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2005, 31(4): 283-307.
- [5] Sturgeon D W, Cameron E D, Fitzgerald F D. Demonstration of an oxyfuel combustion system[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 471-478.
- [6] Davidson R, Santos S. Oxyfuel combustion of pulverised coal[M]. London: IEA Clean Coal Centre, 2010: 66.
- [7] Chen L, 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.
- [8] Wall T, Stanger R, Santos S. Demonstrations of coal-fired oxy-fuel technology for carbon capture and storage and issues with commercial deployment[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(S1): S5-S15.
- [9] 郑楚光. 温室效应及其控制对策[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 202.  
Zheng Chuguang. Greenhouse effect and control measures[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001: 202(in Chinese).
- [10] 樊越胜, 邹峥, 高巨宝, 等. 煤粉在富氧条件下燃烧特性的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(24): 118-121.  
Fan Y S, Zou Z, Gao J B, et al. Study of oxygen content on combustion characteristics of pulverized coal[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 25(24): 118-121(in Chinese).
- [11] 陈春香, 马晓茜. 燃煤机组富氧燃烧发电的生命周期评价[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(S1): 82-87.  
Chen Chunxiang, Ma Xiaolian. Life cycle assessment on oxygen-enriched combustion of coal-fired power generation units[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(S1): 82-87(in Chinese).
- [12] 孔红兵, 柳朝晖, 陈胜, 等. 600 MW 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 600 MW O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Power Plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(2): 53-60(in Chinese).
- [13] 段翠九, 谭力, 赵科, 等. 0.15 MW 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 0.15 MW circulating fluidized bed[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(S1): 138-142(in Chinese).
- [14] Huang X, Li J, Liu Z, et al. Ignition behavior of pulverized coals in lower oxygen content O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere[C]//2nd oxyfuel combustion conference, Queensland, Australia, 2011.
- [15] Wang C A, Zhang X M, Liu Y H, et al. Pyrolysis and combustion characteristics of coals in oxyfuel combustion[J]. *Applied Energy*, 2012(97): 264-273.
- [16] Fei H, Sun L S, Hu S, et al. The combustion reactivity of coal chars in oxyfuel atmosphere: Comparison of different random pore models[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 91(1): 251-256.
- [17] Qiao Y, Zhang L, Binner E, et al. An investigation of the causes of the difference in coal particle ignition temperature between combustion in air and in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>[J]. *Fuel*, 2010, 89(11): 3381-3387.
- [18] Hu S, Sayre A N, Sarv H, et al. Char Burnout of US and Chinese Coals Under Oxy-Combustion Conditions[C]//29th Ann. Int. Pittsburgh Coal Conf., Pittsburgh, PA, USA, 2012.
- [19] Stanger R, Wall T. Sulphur impacts during pulverised coal combustion in oxy-fuel technology for carbon capture and storage[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37(1): 69-88.
- [20] Chen J, Yao H, Zhang L. A study on the calcination and sulphation behaviour of limestone during oxy-fuel combustion[J]. *Fuel*, 2012(102): 386-395.
- [21] Liu H, Yao H, Yuan X, et al. Efficient desulfurization in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion: dependence on combustion conditions and sorbent properties[J]. *Chemical engineering communications*, 2012, 199(8): 991-1011.
- [22] Zou C, Huang Z J, Xiong J, et al. A pilot scale study on co-capture of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> recycled coal combustion and techno-economic evaluation[J]. *Science*

- China-Technological Sciences, 2010, 53(1): 155-159.
- [23] Sun S Z, Cao H L, Chen H, et al. Experimental study of influence of temperature on fuel-N conversion and recycle NO reduction in oxyfuel combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 1731-1738.
- [24] Wang C A, Du Y B, Che D F. Investigation on the NO Reduction with Coal Char and High Concentration CO during Oxy-fuel Combustion[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(12): 7367-7377.
- [25] Liu H, Yao H, Yuan X, et al. Scheme of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Combustion with Partial CO<sub>2</sub> Removal from Recycled Gas .Part 2 :High Efficiency of In-Furnace Desulfurization [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(2): 835-841.
- [26] Liu H, Yuan Y, Yao H, et al. Factors Affecting NO Reduction during O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Combustion[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(6): 2487-2492.
- [27] Chen Y, Wang G, Sheng C. Comparison of particle size evolution during pulverized coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Atmospheres[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(1): 136-145.
- [28] 王泉海, 邱建荣, 温存, 等. 氧燃烧方式下痕量元素形态转化的试验和模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(S2): 199-202.
- Wang Quanhai, Qiu Jianrong, Wen Cun, et al. Experimental and simulation research of trace elements partition during oxyfuel combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(S2): 199-202(in Chinese).
- [29] Chen J, Jiao F, Zhang L, et al. Use of Synchrotron XANES and Cr-doped coal to further confirm the vaporization of organically bound Cr and the formation of chromium(VI)during coal oxy-fuel combustion[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(6): 3567-3573.
- [30] Yu D X, Morris W J, Erickson R, et al. Ash and deposit formation from oxy-coal combustion in a 100kW test furnace[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(S1): S159-S167.
- [31] Sheng C D, Lin J, Li Y, et al. Transformation behaviors of excluded pyrite during O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion of pulverized coal[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2010, 5(2): 304-309.
- [32] Johansson R, Andersson K, Leckner B, et al. Models for gaseous radiative heat transfer applied to oxy-fuel conditions in boilers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(1-3): 220-230.
- [33] Xiong J, Zhao H B, Chen M, et al. Simulation study of an 800 MWe Oxy-combustion pulverized-coal-fired power plant[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(5): 2405-2415.
- [34] Xiong J, Zhao H B, Zheng C G. Techno-economic evaluation of oxy-combustion coal-fired power plants[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(31): 3333-3345.
- [35] Xiong J, Zhao H B, Zheng C G, et al. An economic feasibility study of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> recycle combustion technology based on existing coal-fired power plants in China[J]. Fuel, 2009, 88(6): 1135-1142.
- [36] Xiong J, Zhao H, Zhang C, et al. Thermoeconomic operation optimization of a coal-fired power plant[J]. Energy, 2012, 42(1): 486-496.
- [37] Xiong J, Zhao H B, Zheng C G. Thermo-economic cost analysis of a 600 MWe oxy-combustion pulverized-coal-fired power plant[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012(9): 469-483.
- [38] Liu J Z, Chen S, Liu Z H, et al. Mathematical modeling of air and oxy-coal confined swirling flames on two extended eddy-dissipation models[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(2): 691-703.
- [39] Duan L B, Zhao C S, Ren Q Q, et al. NO<sub>x</sub> precursors evolution during coal heating process in CO<sub>2</sub> atmosphere[J]. Fuel, 2011, 90(4): 1668-1673.
- [40] Duan L B, Zhao C S, Zhou W, et al. Sulfur evolution from coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixture[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009, 86(2): 269-273.
- [41] Duan L B, Zhao C S, Zhou W, et al. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> coal combustion characteristics in a 50 kW(th)circulating fluidized bed[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(4): 770-776.
- [42] Duan L B, Zhao C S, Zhou W, et al. Effects of operation parameters on NO emission in an oxy-fired CFB combustor[J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92(3): 379-384.
- [43] Zhou W, Zhao C S, Duan L B, et al. CFD modeling of oxy-coal combustion in circulating fluidized bed[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(6): 1489-1497.
- [44] Wang C B, Jia L F, Tan Y W. Simultaneous carbonation and sulfation of cao in oxy-fuel circulating fluidized bed combustion[J]. Chemical Engineering & Technology, 2011, 34(10): 1685-1690.



郑楚光

收稿日期: 2014-02-19.

作者简介:

郑楚光(1945), 男, 工学博士, 教授, 主要从事燃烧污染防治、燃烧过程数值模拟的研究工作, cgzheng@hust.edu.cn.

(责任编辑 王庆霞)