

富氧燃烧工程示范系统集成研发及运行性能

毛宇¹ 柳朝晖² 陈灿¹ 刘泰生¹ 胡修奎¹ 郑楚光²

1. 东方电气东方锅炉股份有限公司清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 成都 611731; 2. 华中科技大学, 武汉 430074

摘要: 35 MW_{th}富氧燃烧工业示范工程, 是国家“十二五”科技支撑计划项目, 该试验基地的建成和调试成功, 标志了我国在富氧燃烧的关键装备研发、系统集成和调试运行等方面的能力总体达到了国际的前沿。本文介绍了国内首个富氧燃烧工业性示范工程的建设背景及典型工程系统, 对35 MW_{th}富氧燃烧示范工程系统集成设计的特点进行了简要介绍。示范项目于2015年9月完成全部试验研究, 各项指标达到立项目标, 系统集成成果得到了验证, 达到富氧燃烧示范的预期效果, 形成了具有自主知识产权的富氧燃烧关键技术。

关键词: 富氧燃烧; 系统集成; 性能

中图分类号: TK227

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2017)02-0017-07

DOI:10.13661/j.cnki.issn1001-9006.2017.02.004

Integrated Research and Operating Performance of Oxyfuel Combustion Demonstration Engineering System

MAO Yu, LIU Zhaohui, CHEN Can, LIU Taisheng, HU Xiukui, ZHENG Chuguang

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;

2. Huazhong University of Sci. & Tech; 430074, Wuhan, China)

Abstract: The 35 MW_{th} oxyfuel industrial demonstration project is one of the “twelfth five - Year” Plan key projects supported by National Science and Technology. Its successful operation marks China reaches the technological frontier all over the globe in aspects of the key equipment research, system integration and commissioning operation, etc. This paper introduces the construction background, engineering system, as well as the characteristics of the integrated system of the first domestic oxygen-rich combustion demonstration project. All the research work in this demonstration project has been completed by September of 2015. All of the indicators reached the goal of project and the desired results of system integration were verified and achieved. This project developed a key technology with proprietary intellectual property rights.

Key words: oxyfuel combustion; system development; operating performance

CO₂因具有温室效应被普遍认为是导致全球气候变暖的重要原因之一^[1], 因此, 降低CO₂排放成了全球应对气候变化共同努力的目标。我国以煤为主的能源结构决定了CO₂减排工作的长期性、独特性以及所面临的严峻形势^[2]。哥本哈根气候变化大会后, 我国碳减排工作也从外部压力转为内部重视, 国家加快了各种碳减排技术从实验室研究向工程示范的步伐。

富氧燃烧是在现有电站锅炉系统基础上用高

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^[3], 可获得富含80%~95%体积浓度的CO₂烟气, 从而以较小的代价冷凝压缩后实现CO₂的永久封存或资源化利用^[4], 较为容易实现CO₂的大规模化富集和减排, 并且由于这种新型燃烧方式与现有电站燃烧方式在技术上具有良好的承接性, 也容易被电力行业接受。

针对我国电力行业低碳发展的需求, 开展基于富氧燃烧技术的燃煤锅炉大规模碳捕获技术开

收稿日期: 2016-08-22

作者简介: 毛宇(1969-), 男, 高级工程师, 2014年毕业于重庆大学动力工程领域, 工程硕士学位。现在东方电气东方锅炉工作, 主要从事锅炉和环保新技术研发及产品性能研究。

发和先导性工程示范，突破专用燃烧器开发、富氧燃烧锅炉设计及运行优化、专用低成本空分等关键技术的研发，对于我国先进煤电重大装备制造核心技术创新具有直接的示范和推动作用。

1 富氧燃烧两种典型工艺系统

对富氧燃烧煤粉炉而言，为保证磨煤机的正常运行，富氧燃烧系统的一次风通常都采用经过脱硫和冷凝除湿处理后的干循环烟气。二次风循环烟气抽取的位置则有多种选择，根据具体抽取位置的不同，富氧循环燃烧系统主要有湿循环、

干循环两种典型工艺系统。

1.1 湿循环工艺系统

湿循环工艺系统是在脱硫系统之前抽取烟气作为二次风，循环烟气温度一般较高（120℃~160℃），在一定程度上可减少排烟热损失；同时由于后续需净化处理的烟气量减少（约为富氧干循环的一半），后续烟气净化系统所需处理的烟气量降低，可以较大程度的减小该系统的规模，降低成本；但由于二次风循环烟气未经脱硫脱水处理，烟气中含水量可高达20%，炉内绝热火焰温度降低，燃烧器的稳燃相对困难。

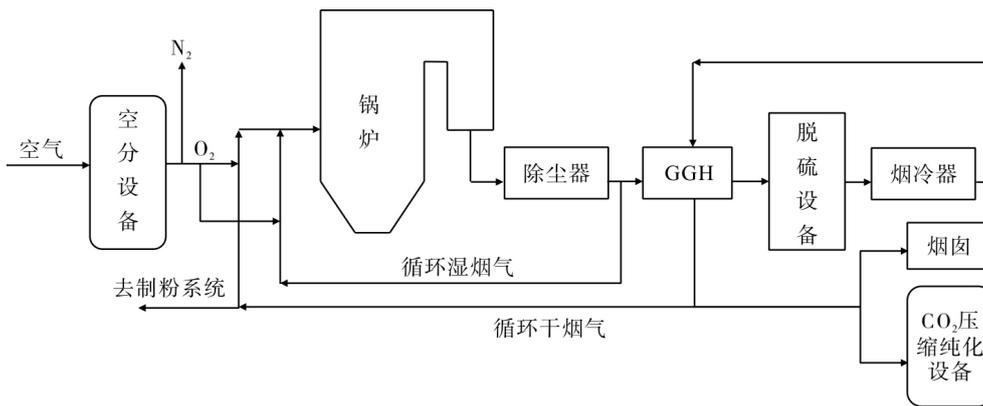


图1 富氧燃烧湿循环工艺系统示意图

1.2 干循环燃烧工艺系统

干循环燃烧工艺系统是所有烟气均经过脱硫系统和烟冷器，由于烟气均需经过烟气净化系统，其所需处理的烟气量相比常规空气燃烧系统略有所降低（约为常规锅炉的3/4），相对其他系统而言

投资较大。由于循环烟气的含水量较低，绝热火焰温度、炉内烟气流量等与空气燃烧时差异较小，燃烧稳定性较好，各风道流量与空气燃烧时最为接近，因此风机选型相对较易。该系统与常规空气燃烧系统差异最小，因而工程上较容易实现。

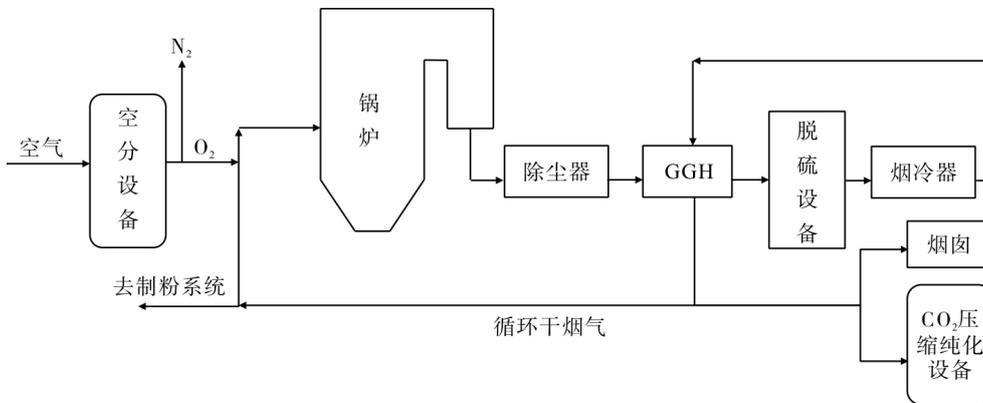


图2 富氧燃烧干循环工艺系统示意图

对于本项目而言，需要同时兼顾空气燃烧和富氧燃烧，并且能同时实现富氧干、湿循环，因此，锅炉本体和系统集成设计是个极大的挑战。

2 工程概况

35 MW_{th}富氧燃烧示范工程是由华中科技大学

牵头，联合东方锅炉、四川空分、国华电力、久大盐业共同承担的国家科技支撑计划项目，东方锅炉负责 35 MW_{th}富氧燃烧锅炉及关键部件的研发和锅炉岛的系统集成设计及供货。

本项目选址于湖北应城久大盐业有限公司的自备电厂内(原应城县热电厂)，热电厂一期工程始建于1985年，二期工程建于1989年。一期工程安装2×35 t/h中温中压锅炉和2×3 000 kW中温中压背压式汽轮机，二期工程仅安装1台65 t/h锅炉，现已停产。该示范工程利用原厂预留的4[#]炉位置，新建一套35 MW_{th}富氧燃烧锅炉及相关配套的工艺系统。

本工程设计配备一套38.5 t/h锅炉及辅助系统，锅炉岛系统集成设计由东方电气集团中央研

究院集成所负责，锅炉本体设计及锅炉岛、脱硫岛设备供货由东方锅炉负责。安装7 000 Nm³/h空气分离设备一套，由四川空分设计、供货。

3 系统集成设计及工程示范

本示范工程由于是国内首个富氧燃烧工业示范项目，需要考虑富氧试验后长期空气燃烧运行的可行性，因此在整个工艺流程上锅炉和辅机需要兼顾空气燃烧和富氧燃烧的需要；同时还需兼顾富氧燃烧干、湿循环工况的需要，从而大大增加了在受热面布置、设备选型和整个系统匹配上的难度。

本工程锅炉岛、脱硫岛系统集成设计及性能计算以下图3所示锅炉岛原则性系统流程图为基础进行。

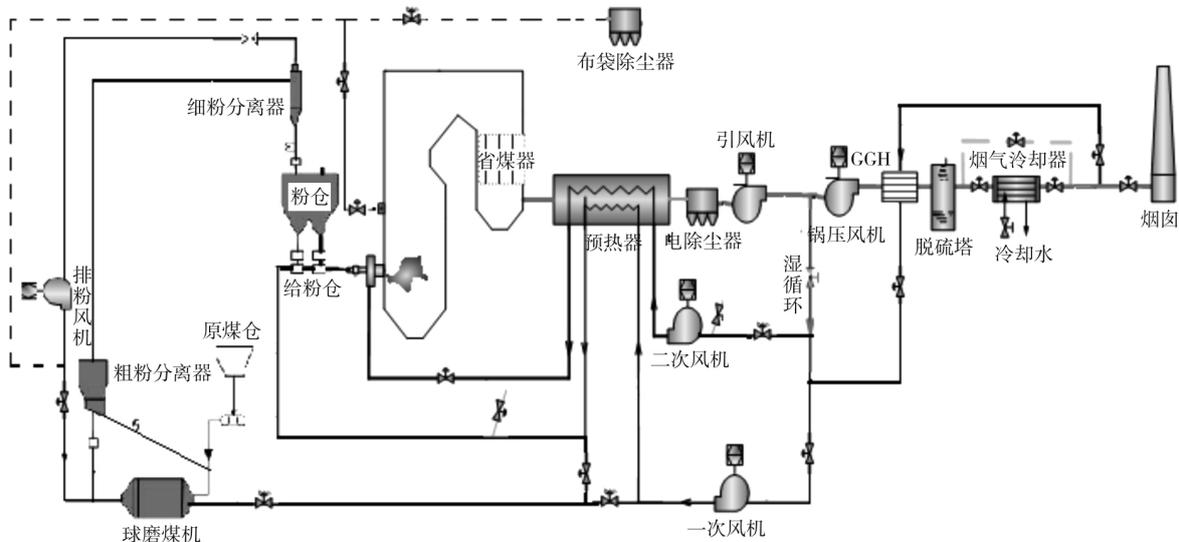


图3 富氧燃烧原则性热力系统流程图

3.1 煤质资料

煤质资料见表1。

3.2 系统集成设计特点

3.2.1 系统整体布置

系统整体布局上，考虑尽可能利用原有建(构)筑物，减少拆迁，减少投资，不影响一期的机组运行。结合本项目特点，本着分区合理、流程顺捷、布局紧凑、节约用地的原则，将锅炉岛、脱硫岛、空分岛按不同功能分区布置。

在锅炉本体布置上，原规划尽可能利用原有设施和厂房，后因原厂房建设年代久远，原始基础资料缺失，原有预埋件及锅炉基础无法利用，将已废弃3[#]炉体及4[#]炉厂房屋顶、墙体全部拆除，

锅炉本体由最初的室内布置调整为全露天布置。

脱硫岛布置在锅炉房炉后靠近烟囱砖烟道后面，有利于烟道和烟囱的连接。

空分岛生产工艺具有独立性。由于在锅炉房西侧空余地为低洼水塘，为减少土方，将其布置在锅炉房南侧原厂区道路旁。

3.2.2 燃烧制粉系统

本工程采用钢球磨中间储仓式热风送粉系统，空气工况下按闭式系统设计，富氧工况下按开式设计：制粉乏气经布袋收尘器后排入大气。球磨机干燥所需风由一次风机提供。

锅炉采用管式空预器，一、二次风分开送风。锅炉分别配一次风机、送风机、引风机各一台，均

表1 设计煤种及校核煤种

	项目	单位	设计煤	校核煤
工业分析	低位发热值 $Q_{\text{net, ar}}$	kJ/kg	21530	20670
	收到基全水份 M_t	%	9.22	6.72
	收到基灰份 A_{ar}	%	22.77	27.06
	收到基挥发份 V_{daf}	%	24.89	19.10
	空气干燥基水份 M_{ad}	%	2.24	1.89
元素分析	收到基碳 C_{ar}	%	54.14	52.96
	收到基氢 H_{ar}	%	3.65	3.03
	收到基氧 O_{ar}	%	9.40	8.99
	收到基氮 N_{ar}	%	0.50	0.58
	收到基全硫 $S_{\text{t, ar}}$	%	0.32	0.66
	可磨性系数 HGI	-	75	70
灰变形温度 DT	°C	1270	1330	
灰软化温度 ST	°C	1330	1420	
灰熔化温度 FT	°C	1400	1460	

采用离心式。风机风量及风压裕量按相关标准进行选择。

富氧工况时，一次风机及送风机入口烟气均来自引风机后的净烟气，在入炉前注入氧气，取代常规燃烧方式中的空气。

干循环工况时，一、二次风及磨机干燥风均来源于经脱硫、脱水后的干烟气。一次风机入口介质参数按 95°C 设计，送风机按 70°C 设计(考虑到注氧的影响)。锅炉燃烧所需一次风注氧量按 O_2 浓度 18% 设计，且在风粉混合器前注氧，二次风所需氧量按 O_2 浓度 29% 设计，在送风机前注氧。

湿循环工况时，一次风及磨机所需干燥风仍采用干循环方式，仅二次风不经脱硫、脱水处理，自引风机后直接接入送风机入口，此时送风机入口介质按 150°C 设计。此方式下，一次风注氧量仍维持 O_2 浓度 18%，二次风注氧量按 O_2 浓度 33%。

3.2.3 锅炉本体

本工程锅炉本体采用露天布置，平衡通风，单炉膛 π 型布置、全钢结构、尾部双烟道、自然循环汽包锅炉，可在空气工况和富氧工况下运行。锅炉前墙布置有 3 个旋流煤粉燃烧器和 2 个乏气燃烧器。空气工况下炉膛为负压运行，富氧工况下炉膛为微正压运行，采用一二次风分开的双烟道

管式空预器。一级(高温)过热器和二级(低温)过热器之间布置有喷水减温器用于调节过热蒸汽温度，减温水为锅炉给水。

锅炉主要参数如下表 2。

表2 锅炉主要参数

名称	BMCR
过热蒸汽流量/($t \cdot h^{-1}$)	38.5
过热器出口蒸汽压力/MPa(g)	3.82
过热器出口蒸汽温度/°C	450

3.2.4 热力系统

示范项目锅炉岛的热力系统中所有设备均利用现运行机组的设备。锅炉出口主蒸汽采用一根直径 159 × 7 的管道接入现有主蒸汽母管，供 3 000 kW 背压汽轮机和生产用汽。

给水系统在老厂原有母管制基础上扩建，高压给水由原厂除氧间 7 m 层高压给水母管的扩建端接出。在锅炉房运转层设主给水操作台，一路 100% 调节阀和一路 30% 调节阀，给水还向过热器低压段供减温水。

锅炉的放水、排污水接入现有一期定期排污扩容器和连续排污扩容器。

3.2.5 脱硫系统

本工程采用钠-钙双碱法，即吸收 SO_2 是用钠基碱。因为它易吸收 SO_2 ，反应速度快，反应充分，与钙基相比，在较低液气比时得到较高的脱硫效率。而运行中实际消耗的是价廉的石灰(钙基)，因为吸收 SO_2 的废水进入反应池用石灰进行再生，使 NaOH 或 Na_2CO_3 再生，重新进入吸收塔内与 SO_2 发生反应。由于生成 $CaSO_3$ 沉淀反应不在吸收塔内部，而是在沉淀池中进行，因此，不会在吸收塔及管道中产生结垢和堵塞现象，在吸收塔内部是吸收反应，生成的是 Na_2CO_3 。所以双碱法具有高脱硫率、不易堵塞结垢等优点，而实际消耗是便宜的石灰，运行费用也较低。

烟气系统将未净化的烟气引入吸收塔内，将脱硫后的洁净烟气经烟冷器降温除水后再经由 GGH 升温后外排或重新循环回锅炉。

3.2.6 烟冷器

为保证磨煤机的正常运行，富氧燃烧系统的

一次风通常都采用经过脱硫和冷凝处理后的干循环烟气，二次风抽取的位置则有多种选择，根据具体抽取位置的不同，富氧循环燃烧系统可以分为湿循环燃烧系统、干循环燃烧系统和高温循环燃烧系统几种典型类型。而几种不同系统都需要对烟气进行冷凝处理，即需要使用烟气冷凝器。

烟气冷凝器利用温度较低的水或气体冷却烟气，实现烟气温度降低到露点温度以下，使其中的水蒸气凝结成水，并分离，达到降低烟气湿度的目的。要获得较低的湿度，冷却后烟气的温度也必须较低。

本项目采用直接接触式烟冷器，烟冷器冷却水采用循环冷却方式。烟冷器塔身材质为碳钢，内部采用耐酸耐腐蚀的材质以应对运行过程中可能产生的酸腐蚀或增加碱性的溶剂以减少塔身内酸性液体产生的腐蚀。

3.2.7 除灰渣系统

本项目除飞灰系统包括三电场静电除尘器、气力输灰系统、碎渣系统、布袋收尘器等。在尾部烟道布置一套三电场的静电除尘器，静电除尘器三个电场下部分别设置3个灰斗，灰斗下部接一套飞灰输送系统，将经电除尘器收集的烟气中的飞灰输送至老厂灰库。

在炉膛底部渣斗下部设置2台碎渣机和冲渣系统。

本系统还设置有一套布袋收尘器，用于收集

富氧工况时乏气中的煤粉。

3.2.8 火检等冷却风、密封风系统

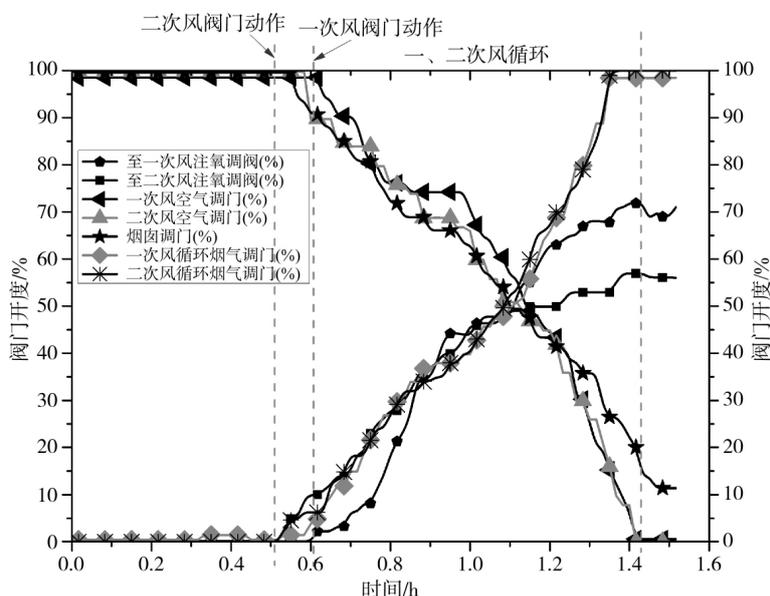
为确保富氧燃烧工况排烟中较高的CO₂浓度，须尽量减少漏风和空气混入烟气系统中，专门设置了火检、火焰电视等冷却风、密封风系统。该系统设置有小型增压风机和面式水冷却器。火检、火焰电视等冷却风、密封风取自一次风机出口，富氧工况下为保证火检、火焰电视冷却风温度≤50℃，需投入火检风水冷却器。厂用压缩空气为备用气源。

3.3 工程示范结果

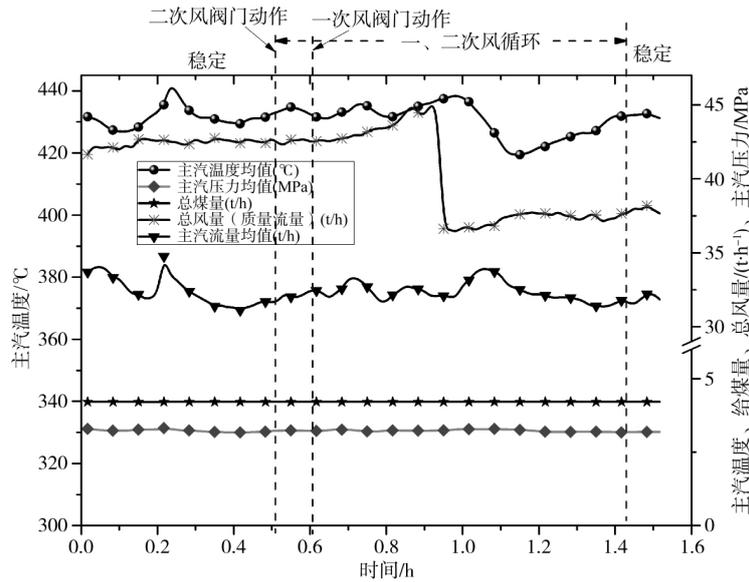
在项目参与单位的通力合作下，本项目研发范围内的富氧燃烧关键技术装备及系统在示范项目上得到了很好的验证。其中，空气工况锅炉最大负荷达到42 t/h，富氧燃烧稳定工况干烟气CO₂浓度最高达到82.7%（干烟气体积比）。通过运行表明，锅炉能够适应富氧燃烧和空气燃烧工况。本项目试运情况表明，锅炉空气工况、富氧工况燃烧稳定，主蒸汽参数满足设计要求，达到国家科技支撑计划立项目标。

锅炉无论是在空气燃烧还是在富氧燃烧以及空气/富氧切换过程中，负荷、蒸汽参数等均能维持相对运行稳定。

图4表明，锅炉平稳快速地实现一、二次风同时操作的空气工况切富氧干循环工况，同时保证切换过程中主汽参数、减温水量等均无大的波动，燃烧稳定，运行安全可靠。



(a) 切换期间主要阀门开度变化曲线



(b) 切换期间主要参数变化曲线

图4 空气切富氧工况主要阀门及参数变化情况

从图5可以看出，富氧燃烧可实现烟气中CO₂的富集，试验期间空预器出口干烟气中CO₂浓度最高达到82.7% (体积比)，是迄今为止世界上已

投运的富氧示范项目CO₂浓度富集达到的最高水平，实现了CO₂的富集，从而证明了富氧燃烧在技术上是可行的。

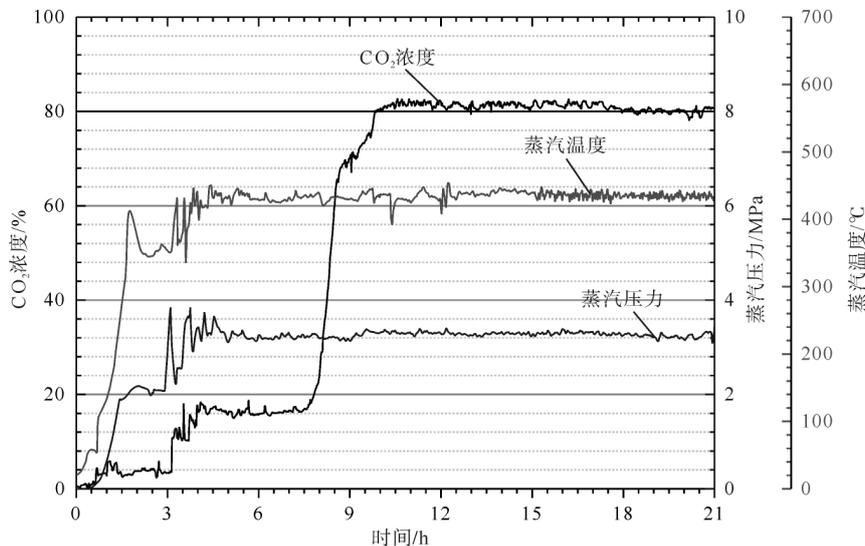


图5 空气工况到富氧干循环燃烧的切换及运行

图6给出了富氧干循环燃烧到空气工况的切换及运行情况。可以看出，系统可以平稳快速的切出富氧燃烧工况，并不会对主蒸汽参数产生影响。

CO₂的浓度达到了68%~72%，同样实现了CO₂的富集。

图7给出了空气工况到富氧湿循环燃烧的切换及运行情况。由图可知，系统可以平稳快速的切入富氧燃烧工况，同时保证主蒸汽参数没有明显的变化。在富氧燃烧湿循环全流程运行工况中，

4 结语

建成后的35 MW_{th}富氧燃烧示范工程全景见图8。

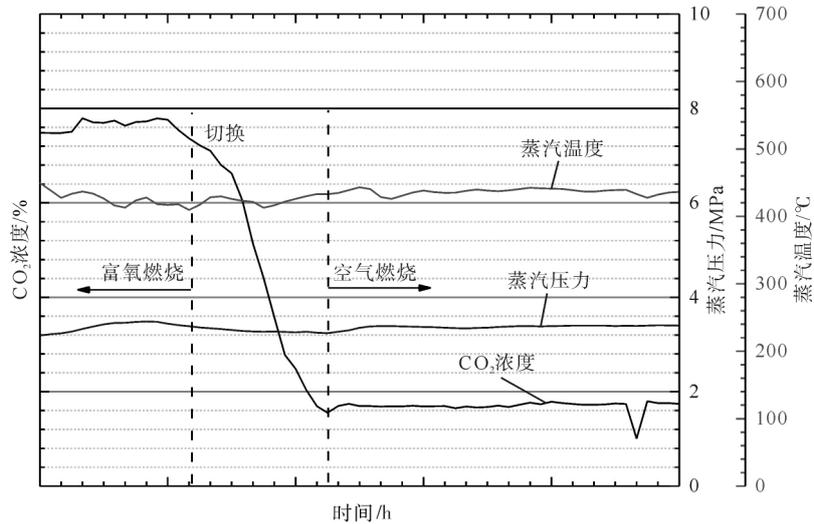


图6 富氧干循环燃烧到空气工况的切换及运行

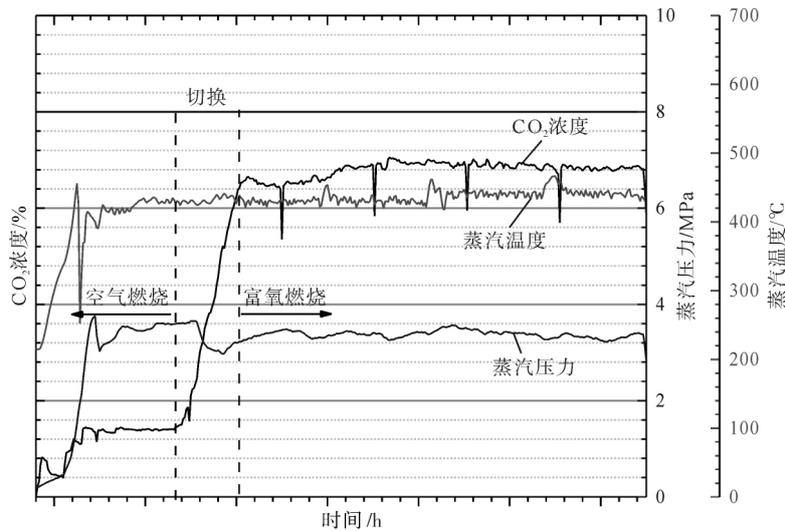


图7 空气工况到富氧湿循环燃烧的切换及运行



图8 应城 35 MW_{th}富氧燃烧工业性示范工程全景

本示范工程场地属利旧，由于原有厂房基础等建成时间已久，原有资料缺失，给系统设计带来较大的困难。同一系统既要富氧燃烧，还要兼顾空气燃烧，既要满足富氧干循环，还要能实现富氧湿循环，对系统集成无疑是个巨大的挑战。

在整个研发团队的精诚协作下，上述困难均得到克服，空气燃烧、富氧燃烧、富氧干/湿循环均得到实现，达到预期效果。

参考文献：

- [1] 郑博福, 邓红兵. 我国未来能源消费及其对环境的影响分析 [J]. 环境科学, 2005, 26(3): 1-61
- [2] Xiong J, Zhao H B, Zhang C, Zheng C G, Luh P B. Thermo-economic operation optimization of a coal-fired power plant [J]. Energy, 2012(42): 486-496
- [3] 刘彦丰, 薛宪阔. O₂/CO₂ 燃烧方式的锅炉热力计算方法研究与分析 [J]. 华东电力, 2008, 36(3)
- [4] 阎维平. 洁净煤电技术(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008