

国内燃煤锅炉富氧燃烧技术进展

刘建华

(华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

[摘要] 富氧燃烧技术在 CO₂ 减排捕集方面的优势使其在近年来燃煤锅炉领域受到重点关注。本文从富氧燃烧对燃煤锅炉燃烧、传热和污染物排放特性的影响方面, 对近年来燃煤锅炉富氧燃烧技术的理论研究进展进行阐述, 并对近年来富氧燃烧在传统煤粉锅炉和循环流化床(CFB)锅炉两个工艺路线的应用进展进行了总结, 认为基于氧/燃料双向分级的富氧燃烧着火、传热与污染抑制, 基于加压富氧燃烧的 CFB 燃烧、传热和污染抑制, 富氧燃烧工业示范装置自动控制, 以及富氧燃烧系统集成优化是燃煤锅炉富氧燃烧技术的研究难点和重点。今后除了在本成本最大的制氧技术上寻求技术突破以外, 还需要在分级富氧燃烧、加压富氧燃烧以及系统集成优化等方面进行深入研究。

[关键词] 富氧燃烧; 燃煤锅炉; CFB 锅炉; 污染物控制; CO₂ 捕集; 清洁燃烧; 理论研究

[中图分类号] TK221 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfid.202002053

[引用本文格式] 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.

Research and development of oxy-fuel combustion for coal-fired boiler in China

LIU Jianhua

(North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: Due to its advantages in terms of CO₂ reduction and capture, oxy-fuel combustion technology has attracted much attentions in the field of coal-fired boilers in recent years. The theoretical research progress of coal-fired boiler oxy-fuel combustion technology in recent years was described in terms of the effects of oxy-fuel combustion on the combustion, heat transfer and pollutant emission characteristics of coal-fired boilers. The application progress of oxy-fuel combustion on the conventional coal-fired boilers and fluidized bed boilers in recent years was introduced. The ignition, heat transfer and pollution emission of oxygen/fuel staged oxy-fuel combustion, and the ignition, heat transfer and pollution emission of oxy-fuel combustion in a pressurized fluidized bed, and the automatic control of oxy-fuel demonstration project, and integration optimization of oxy-fuel combustion system should be the research difficulties and key points. In addition to seeking technological breakthroughs in the most costly oxygen production technology, further studies should be carried out on the staged oxy-fuel combustion, the pressurized oxy-fuel combustion and the system integration optimization.

Key words: oxy-fuel combustion, coal-fired boiler, CFB boiler, pollution emission, CO₂ capture, clean combustion, theoretical research

我国目前是世界上最大的 CO₂ 排放国家。2016 年《巴黎气候协定》的签署对中国的 CO₂ 减排提出了更高的要求, 单纯采取提高能源效率和增加新能源比重的方式, 很难实现其减排目标, 而碳捕集、利用与封存(CCUS)技术作为可实现大规模减排 CO₂ 的最可行技术之一受到广泛关注。国内最主要的 CO₂ 排放是由燃煤锅炉产生的, 因此需要开展燃煤锅炉的碳捕集技术研究。燃烧中碳捕集技术即富氧燃烧

技术, 是指用高浓度(体积分数)的 O₂ 与 CO₂ 的混合气体代替空气在锅炉内与煤粉进行燃烧反应。其中, O₂ 是利用工业级的空分装置获得, CO₂ 是通过烟气循环的方式从锅炉排放的烟气中获得, 通过不断的 CO₂ 循环和富集使得烟气中 CO₂ 浓度不断升高, 理论上干烟气下 CO₂ 的浓度可高达 80% 以上, 便于进行 CO₂ 的压缩与分离, 具有成本低、易规模化、适于存量机组改造等优点, 其系统流程如图 1 所示。

收稿日期: 2020-02-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0605304)

Supported by: National Key Research and Development Program (2018YFB0605304)

作者简介: 刘建华(1972), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高效清洁燃烧发电技术, liu.jh@jibei.sgcc.com.cn.

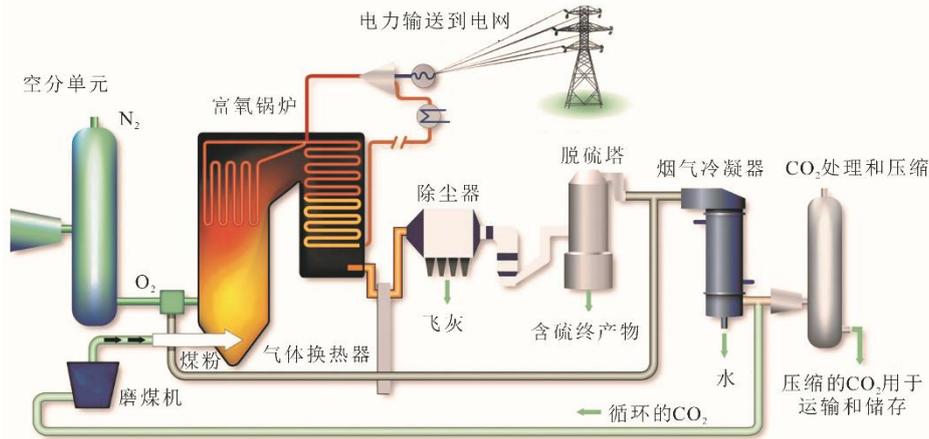


图1 富氧燃烧系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the oxy-fuel combustion system

从20世纪80年代起国内外很多学者就进行了大量关于 CO_2 气氛下富氧燃烧的实验研究,推动了富氧燃烧技术从实验室规模研究到工业示范的发展。其中,瑞典的瀑布电力公司建立了世界上第一个全流程的煤粉锅炉富氧燃烧技术示范装置,功率为 30 MW_{th} 。西班牙的CIUDEN技术研发中心建立了世界上第一套循环流化床(CFB)富氧燃烧技术示范装置,功率为 30 MW_{th} 。

近年来,随着国家对碳捕集技术的日益关注和重视,国内对富氧燃烧技术的研究也日益活跃,研究方向不断拓宽,无论是理论研究还是示范应用都取得了很大的进展。其中,国内的高校在20世纪90年代中期开始对煤粉富氧燃烧技术进行一些实验研究^[1]。郑楚光等^[1]在2014年对中国富氧燃烧技术的研发进展进行了综述。Chen等人^[2]2012年对CFB富氧燃烧技术进行了较全面的总结。为了全面把握燃煤锅炉富氧燃烧技术研究动态,本文将对近年来燃煤锅炉富氧燃烧技术的研究和应用进展进行阐述和总结,并探讨燃煤锅炉富氧燃烧技术的研究难点和重点。

1 富氧燃烧对燃煤锅炉燃烧及传热特性影响

1.1 对燃煤锅炉燃烧特性的影响

富氧燃烧采用烟气再循环使烟气中 CO_2 浓度提高,因此燃煤锅炉的富氧燃烧是在 O_2/CO_2 气氛下的燃烧,这与传统的 O_2/N_2 气氛下的燃烧有明显不同。很多学者多年来对 O_2/CO_2 气氛下煤的着火和燃烧特性开展的大量理论和试验室规模的研究

表明:煤在 O_2/CO_2 气氛下与 O_2/N_2 气氛相比存在明显的着火延迟;而高浓度的 O_2 会减少着火延迟和脱挥发分时间,提高燃烧速率;而且随着 O_2 浓度逐渐升高,最低着火温度会有所降低,燃烧温度有一定程度提高。近年来,很多学者对于这些结论进行了更详细和细致的研究。吴迪等^[3]进一步研究了 CO_2 的物理化学属性对煤粉富氧燃烧着火性能的影响,对引起着火延迟的原因进行了分析;刘彦丰等^[4]在热重分析仪上对烟煤掺烧褐煤在 O_2/CO_2 气氛下的燃烧特性进行了多变量的混烧实验研究;Yuan等人^[5]在Hencken平面火焰燃烧器上开展了不同温度和不同气氛(O_2/CO_2 气氛与 O_2/N_2 气氛)下煤颗粒着火和表面温度的试验研究;Duan等人^[6]在试验台上开展了CFB锅炉不同位置处煤颗粒在 O_2/CO_2 气氛与 O_2/N_2 气氛下的着火特性研究。随着研究的深入,很多学者近年来比较关注煤在富氧燃烧条件下的灰渣特性。孙青等^[7]在马弗炉和平面火焰携带流反应器上的研究表明富氧燃烧条件下神华煤的结渣特性会加重。张大兴^[8]在煤粉气流着火温度试验炉和改造后的一维火焰试验台架上进行国内典型烟煤和贫煤在不同 O_2 浓度下的煤粉气流着火温度、燃尽率和结渣性能测试,结果表明随着 O_2 浓度增加,不同煤种均呈现着火温度下降、燃尽率上升和结渣性能加重的趋势。吴海波等^[9]进一步通过数值模拟发现大型富氧燃烧锅炉燃用神华煤时主燃烧区域的水冷壁以及过热器屏底的结渣和高温腐蚀趋势加剧。Zhang等人^[10]利用计算机控制扫描电镜(CCSEM)技术分析了富氧条件下高碱煤的灰渣特性,表明随着 O_2 浓度增加会增加铁在小颗粒的分布,增大高碱煤的结渣趋势。

1.2 对燃煤锅炉传热特性的影响

由于 CO_2 气氛下富氧燃烧时产生的烟气中三原子气体、固体颗粒和煤烟浓度都将导致烟气具有更强的辐射特性和对流换热能力,因此在富氧燃烧条件下的热力计算和锅炉设计与空气燃烧条件下相比要进行一定的修正和变化。在早期的研究中,主要针对富氧条件下的热力计算包括辐射换热和对流换热的计算方法或模型修正,发展新的富氧燃烧计算方法^[1]。近年来部分学者针对计算方法进行更细致的研究并通过实际锅炉试验对计算方法进行了验证,如张艳伟等^[11]提出了一种用指统计窄带模型结合 Mie 氏散射理论计算富氧燃烧锅炉炉膛内烟气黑度的方法。李建波等^[12]通过数值模拟与实炉试验数据对富氧燃烧锅炉炉膛辐射传热计算方法进行了修正和验证,Zhang 等人^[13]提出了一种修正的热力计算方法并在 1 台 35 MW_{th} 富氧燃烧锅炉上进行了验证。更多的针对传热特性的研究侧重于以模拟的方法开展实际燃煤锅炉的传热设计影响分析。廖海燕^[14]以 200 MW 富氧燃烧煤粉锅炉为对象研究了富氧燃烧锅炉传热特性的变化和相应的设计优化方法,结果表明富氧燃烧锅炉高烟温区段传热量高于空气燃烧,低烟温区段传热量小于空气燃烧,而且在富氧燃烧各受热面传热量与空气燃烧一致前提下,富氧燃烧受热面在设计时会显著减小。高建强等^[15-17]进一步利用数值模拟方法分别研究了不同漏风系数、 O_2/CO_2 配比和循环倍率对富氧燃烧锅炉传热特性的影响。

2 富氧燃烧对燃煤锅炉污染物排放特性影响

2.1 对烟尘排放特性影响

由于富氧燃烧条件下烟气成分的差异,富氧燃烧条件下煤灰的沾污结渣特性要高于空气燃烧条件。姚丹花^[18]在 3 MW 煤燃烧试验台上研究了褐煤在空气和富氧燃烧条件下的沾污沉积特性,结果表明在 2 种气氛下各受热面沉积灰样的化学组成没有显著变化,富氧燃烧条件下煤灰熔融温度更低。Wu 等人^[19]对 1 台 35 MW_{th} 富氧燃烧锅炉在不同运行模式(空气燃烧、干循环富氧燃烧和湿循环富氧燃烧)下的烟尘排放特性进行了分析和对比,结果表明由于富氧燃烧模式烟气量的减少使得烟尘浓度大约是空气燃烧模式的 1.4 倍,在 90~170 °C 范围内富氧燃烧模式下的飞灰电阻率明显小于空气燃烧模式,而这均有利于提高电除尘的除尘效果。

2.2 对 NO_x 排放特性影响

富氧燃烧方式下 NO_x 的生成量相较于空气燃烧方式下更低,这一点已经通过很多学者从理论和实验室规模试验方面得到了验证。Guo 等人^[20]在 3 MW_{th} 富氧燃烧试验台上,对空气燃烧、不同循环倍率的循环燃烧工况进行对比试验,结果表明与空气工况相比,富氧燃烧工况下烟气中 NO_x 质量浓度上升 56%~167%,排放量降低 46%~69%。王勇等^[21]利用一维沉降炉进一步分析了富氧条件下导致 NO_x 排放降低的因素贡献率,结果表明,循环 NO 的还原是最主要的因素。谔伊竺等^[22]在加压水平管式富氧燃烧试验系统上探索了不同压力和不同气氛下加压煤粉富氧燃烧的 NO_x 排放特性,结果同样表明 O_2/CO_2 气氛下的 NO_x 生产量小于空气气氛下,而且随着压力的提高 NO_x 生产量逐渐减小。

2.3 对 SO_2 排放特性影响

对于富氧燃烧方式下 SO_2 的生成特性和反应机制已开展了很多研究,结果表明富氧燃烧条件下, SO_2 排放量相对于空气条件下变化不明显。Guo 等^[20]在 3 MW_{th} 富氧燃烧试验台上试验结果表明,与空气工况相比,富氧燃烧工况下烟气中 SO_2 质量浓度上升幅度没有 NO_x 明显,而且高浓度 CO_2 对煤中 S 的转换影响较小,对脱硫设备的运行基本没有影响。谔伊竺等^[22]在加压水平管式富氧燃烧试验系统上的试验表明 O_2/CO_2 气氛下的 SO_2 生产量小于空气气氛下,而且随着压力的提高 SO_2 生产量明显减少。

2.4 对痕量金属排放特性影响

近年来国内有关富氧燃烧痕量金属排放特性的研究比较少,大部分研究重点关注了 Hg 在富氧燃烧条件下的排放。王海亮等^[23]认为富氧燃烧方式下,重金属 Hg 的排放量会增加。胡长兴等^[24]对富氧燃烧烟气中汞的氧化机理进行了研究。董静兰^[25]利用化学热力平衡软件 FACTSAGE 对富氧燃烧气氛不同系统压力下痕量元素(Hg、As)的排放特性进行了模拟计算,结果表明 Hg 主要以 Hg(g)、HgCl₂(g)和 HgO(g)的形式存在,As 主要以 AsO(g)、As₄O₆(g)和 As₂O₅(s)的形式存在。

3 富氧燃烧技术在国内燃煤锅炉应用现状

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,包括对富氧燃烧的燃烧特

性、结渣特性、污染物排放特性和脱除机制等的研究。在2000年以后,很多高校如华中科技大学、东南大学,以及中国科学院工程热物理研究所等开始建立实验室规模的煤燃烧试验台架开展应用研究。其中,华中科技大学在2006年开始启动了对于富氧燃烧技术的研发和试验工作,建成了300 kW煤粉富氧燃烧试验台,证明了该技术在CO₂减排方面具有巨大潜力^[1]。近年来,围绕富氧燃烧在燃煤锅炉的应用主要有传统煤粉锅炉和CFB锅炉2种技术路线。

3.1 传统煤粉锅炉

在传统煤粉锅炉的CO₂气氛下富氧燃烧领域华中科技大学相关团队一直处于国内的引领地位。华中科技大学牵头东方锅炉股份有限公司、四川空分设备集团有限公司等关键设备厂家和一些科研机构先后于2011年和2015年在湖北武汉和应城建成了国内第一套全流程3 MW_{th}富氧燃烧中试试验平台和35 MW_{th}富氧燃烧工程示范平台。其中3 MW_{th}富氧燃烧中试试验平台完成了锅炉排放烟气中CO₂浓度超过80%的目标^[20],而35 MW_{th}富氧燃烧工程示范平台进一步新建了涵盖富氧燃烧技术全流程的工业示范系统,包括空气分离制氧系统、富氧燃烧煤粉锅炉CO₂循环燃烧系统、烟气除尘脱硫系统、烟气除湿系统,并预留CO₂压缩纯化和地下埋存系统,开发了富氧燃烧煤粉锅炉、燃烧器等关键设备,获得了大量的煤粉锅炉富氧燃烧运行参数、温度分布、常规和非常规污染物排放特性、关键参数动态特性及初步控制方法等重要的试验和经验数据,并最终实现了烟气中CO₂浓度达到82.7%的优异结果,为更大级别富氧燃烧技术推广奠定坚实基础^[26-27]。

3.2 CFB 锅炉

CFB富氧燃烧的燃料适应性非常广泛,除了可以煤单独燃烧,也可以掺烧生物质等燃料,而且其负荷调节性能优越,在污染物脱除方面也具有一定优势,受到国内外很多科研机构的关注。国内的中国科学院工程热物理研究所、东南大学等单位对CFB富氧燃烧技术进行了大量的应用研究^[28-29],搭建了多种类型和容量的试验平台,其中东南大学建造了国际上首台可实现温烟气循环的50 kW_{th} CFB燃烧试验平台,并与B&W公司合作建设了2.5 MW_{th} CFB富氧燃烧实验装置^[1],中国科学院工程热物理研究所建立了1 MW_{th} CFB装置^[30]。

CFB燃料适应性广,因此除了单纯的煤富氧燃烧CFB以外,混合燃料特别是煤与生物质的混合燃料CFB富氧燃烧技术也受到广泛关注,因为该技术不但可以实现富氧燃烧对于CO₂的捕集,而且可以利用生物质生长过程中对CO₂的吸收^[31]。中国科学院工程热物理研究所、重庆大学等单位开展了这一方面的实验室应用研究,其中Zhang和Wang等人分别在50 kW_{th}和0.1 MW_{th}的CFB试验台上开展了煤和生物质的富氧混烧试验,研究了氧浓度、配风方式等对温度分布、飞灰特性、烟气成分和污染物排放等的影响^[32-33]。

加压富氧燃烧是近年来新兴的碳捕集技术,通过将燃烧室的压力提高到0.5~1.0 MPa,避免了常压富氧燃烧系统中的升压—降压—升压过程,可有效抑制系统漏风,并充分回收烟气中水蒸气的热焓,从而有望将碳捕集成本降低到每吨CO₂ 25~30美元。目前,意大利国家电力公司、美国气体技术公司已分别开展5 MW水煤浆、1 MW CFB加压富氧燃烧中试研究。在国内,加压富氧燃烧还停留在相关的基础研究和20/50 kW等级小试研究。Duan等人^[34]建立了10 kW_{th}的连续加料加压鼓泡CFB,文献^[35-36]建立10~40 kW_{th}加压CFB富氧燃烧试验系统,在0.1~0.4 MPa压力试验中研究了压力和氧浓度对温度分布、燃烧效率、飞灰和污染物排放等因素的影响。总体而言,国内外关于加压富氧燃烧相关机理性研究还很缺乏,兆瓦级的研究才刚起步。

4 富氧燃烧技术研究方向

作为可较低成本实现CO₂封存或资源化利用的碳减排技术,较高的附加投资成本(50%~70%)、运行成本(30%~40%)、每吨CO₂捕集成本(40~60美元)和较低的可靠性,仍是富氧燃烧技术研发过程中面临的关键难点,而且当前我国煤电机组污染物减排的压力仍然很大,在保证煤电富氧燃烧技术低成本的基础上,低污染物排放的要求也必须要实现。针对这些难点和要求,在当前的设备技术水平下,需要重点围绕以下几个方面,开展经济、安全和可靠的富氧燃烧技术研究工作。

4.1 基于氧/燃料双向分级的富氧燃烧着火、传热与污染抑制

传统的富氧燃烧条件下,NO_x的排放总量会显著降低,但NO_x和SO₂的排放质量浓度由于烟气量的减少要达到目前国内对于煤电机组超低排放的

要求还有一定难度。因此有必要对传统煤粉燃烧领域污染物排放特别是 NO_x 抑制方面具有显著效果的分级燃烧进行研究,在开展基于氧/燃料双向分级的富氧燃烧火焰组织、传热调控与污染抑制原理研究的基础上,为中试或工业示范平台的分级燃烧设计提供理论基础,并通过中试或工业示范平台的燃烧试验进行验证。

目前在分级富氧燃烧方面的研究主要通过数值模拟开展。赵星海等^[37]对墙式切圆锅炉分级富氧燃烧对 NO_x 生成量影响进行了数值模拟研究,结果表明墙式切圆燃烧煤粉锅炉采用分级富氧燃烧后炉膛出口 NO_x 生成量较传统的空气分级燃烧降低了 47.03%。对于分级富氧燃烧的试验研究还较少, Wu 等人^[38]利用固定床反应炉膛系统开展富氧条件下挥发分 N 和焦炭 N 的分级燃烧,分析了环境温度、颗粒大小和循环 NO 质量浓度等对 NO 排放特性的影响,为富氧分级燃烧提供理论基础分析。目前东方锅炉股份有限公司正在牵头完成 50 kW 分级燃烧试验平台的搭建,探索不同局部化学当量比、局部氧分压条件下的 NO_x 生成和排放规律,形成优化的富氧分级配风方案,为满足国内电站锅炉污染物排放要求的燃烧系统设计提供可行性方案。

4.2 基于加压富氧燃烧的 CFB 燃烧、传热和污染抑制

基于加压富氧燃烧的优点和研究的必要性,开展加压富氧燃烧、辐射传热和污染物排放特性研究,研制加压富氧燃烧锅炉与装备方案,获得加压富氧燃烧系统运行控制难点和运行控制策略并在兆瓦级加压富氧燃烧系统上进行试验验证。

目前中国科学院工程热物理研究所正在牵头完成 MW 级加压 CFB 富氧燃烧装置的研发和安装调试,有望在近期开展 MW 级加压 CFB 富氧燃烧的中试试验。

4.3 富氧燃烧工业示范装置自动控制技术

针对目前富氧燃烧工业示范装置系统运行过程多模式、模式切换稳定性要求高、风烟系统控制因素多和安全性措施更严格的特点,开发安全可靠的富氧燃烧系统自动控制技术非常有必要,通过在现有工业示范装置如 35 MW_{th} 富氧燃烧工业示范系统进行实施和验证,获得工况切换及负荷变动过程中的系统动态特性,可以优化控制策略和参数,而且也有利于富氧燃烧技术的工业化推广应用。

为了更好地了解富氧燃烧电站锅炉的控制特性,很多学者开展了基于静/动态仿真手段的富氧燃

烧电站锅炉控制仿真模拟^[39-40]。黄勇理等^[41-42]在建模仿真的基础上进一步开展了基于华中科技大学 3 MW_{th} 和 35 MW_{th} 富氧燃烧示范装置为对象的控制方案设计和运行工况切换研究。目前,华中科技大学正牵头东方锅炉股份有限公司、华北电力科学研究院等单位开展 35 MW_{th} 富氧燃烧工业示范装置的自动控制方案设计和验证,为富氧燃烧电站锅炉的大型化和自动化提高控制策略参考^[43]。

4.4 富氧燃烧系统集成优化和性能评估

富氧燃烧系统投资成本和运行成本较高,主要成本在于制氧系统的投资和运行,在目前制氧系统的相关技术和工艺设备的成本无法有效降低的现实情况下,对于整个富氧燃烧系统进行集成优化研究,开展全系统热—水—电综合分析,以降低资源能耗为目标,进行富氧燃烧系统全流程优化,并开展富氧燃烧电站能效分析,完成电站的投资概算和成本分析。

2015 年神华国华(北京)电力研究院有限公司已经牵头华中科技大学、东方锅炉股份有限公司等单位完成了 200 MW 煤粉富氧燃烧大型示范可行性研究,达到了初步设计深度^[14,40,44]。目前,神华国华(北京)电力研究院有限公司进一步牵头华中科技大学、东方锅炉股份有限公司、华北电力设计院等单位开展 350 MW 超临界富氧燃烧系统的集成优化分析,尽可能降低系统净供电效率损失。

5 结 语

富氧燃烧技术是最具工业应用前景的燃烧中碳捕集技术,成本、安全性和可靠性是该技术要推广应用的关键难点。今后除了在成本最大的制氧技术上寻求技术突破以外,发展符合中国国情的富氧燃烧技术,需要在分级富氧燃烧、加压富氧燃烧以及系统集成优化等方面做深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 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):3856-3863.
ZHENG Chuguang, ZHAO Yongchun, GUO Xin. Research and development of oxy-fuel combustion in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(23): 3856-3863.
- [2] 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.
- [3] 吴迪,邹春,蔡磊,等. CO_2 的物理化学属性对于煤粉富氧燃烧着火的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(6): 558-562.

- WU Di, ZOU Chun, CAI Lei, et al. Effect of physical and chemical properties of CO₂ on ignition of coal particle in O₂/CO₂ atmosphere[J]. Journal of Combustion and Technology, 2016, 22(6): 558-562.
- [4] 刘彦丰, 陈启召, 殷立宝. O₂/CO₂气氛下烟煤掺烧褐煤燃烧特性[J]. 热力发电, 2017, 46(3): 7-12.
LIU Yanfeng, CHEN Qizhao, YIN Libao. Co-combustion on characteristics of bituminous coal and lignite in O₂/CO₂ atmosphere[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3): 7-12.
- [5] YUAN Y, LI S Q, XU Y, et al. Experimental and theoretical analyses on ignition and surface temperature of dispersed coal particles in O₂/N₂ and O₂/CO₂ ambients[J]. Fuel, 2017, 21: 93-98.
- [6] DUAN L B, LI L, LIU D Y, et al. Fundamental study on fuel-staged oxy-fuel fluidized bed combustion[J]. Combustion and Flame, 2019, 206: 227-238.
- [7] 孙青, 张泰, 黄晓宏, 等. 富氧燃烧方式下神华煤熔融特性实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(2): 179-185.
SUN Qing, ZHANG Tai, HUANG Xiaohong, et al. Study of ash fusion behavior of Shenhua coal during oxygen enriched combustion[J]. Journal of Combustion and Technology, 2016, 22(6): 179-185.
- [8] 张大兴. 国内典型煤种在富氧条件下的燃烧性能[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(2): 90-95.
ZHANG Daxing. Oxygen-enriched combustion characteristics of typical coals in China[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(2): 90-95.
- [9] 吴海波, 白明, 柳朝晖, 等. 大型富氧燃烧锅炉结渣趋势数值模拟分析[J]. 电站系统工程, 2016, 32(4): 6-8.
WU Haibo, BAI Ming, LIU Zhaohui, et al. Numerical simulation analysis of slagging trend of large-scale oxygen fuel combustion boiler[J]. Power System Engineering, 2016, 32(4): 6-8.
- [10] ZHANG T, LIU Z H, HUANG X H, et al. Computer-controlled scanning electron microscopy investigation on ash formation characteristics of a calcium-rich coal under O₂/CO₂ environments[J]. Energy & Fuels, 2017, 31: 319-327.
- [11] 张艳伟, 葛学利, 聂宇宏. 富氧燃烧锅炉炉膛内烟气辐射特性计算[J]. 锅炉技术, 2016, 47(5): 51-54.
ZHANG Yanwei, GE Xueli, NIE Yuhong. Calculation of flue gas emissivity in oxy-coal combustion boiler[J]. Boiler Technology, 2016, 47(5): 51-54.
- [12] 李建波, 李德波, 冯永新, 等. 富氧燃烧锅炉辐射传热计算方法研究进展与展望[J]. 广东电力, 2018, 31(3): 21-26.
LI Jianbo, LI Debo, FENG Yongxin, et al. Research progress and expectation of computational method for radiative heat transfer of oxygen-enriched combustion boiler[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(3): 21-26.
- [13] ZHANG Z W, LI X S, LUO C, et al. Investigation on the thermodynamic calculation of a 35 MW_{th} oxy-fuel combustion coal-fired boiler[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 71: 36-45.
- [14] 廖海燕. 富氧燃烧锅炉传热特征分析及设计优化[J]. 中国电力, 2015, 48(2): 7-13.
LIAO Haiyan. Heat transfer characteristics analysis and design optimization for oxy-fuel boilers[J]. Electric Power, 2015, 48(2): 7-13.
- [15] 高建强, 王立坤, 孙少东, 等. 漏风对300 MW富氧煤粉燃烧锅炉参数影响的研究[J]. 华北电力大学学报, 2015, 42(2): 72-77.
GAO Jianqiang, WANG Likun, SUN Shaodong, et al. Research on affecting of air leakage on parameters of a 300 MW oxy-coal fired boiler[J]. Journal of North China Electric Power University, 2015, 42(2): 72-77.
- [16] 吴海波. 不同 O₂/CO₂ 配比下锅炉的富氧燃烧特性研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(2): 50-53.
WU Haibo. Study on the characteristics of oxygen fuel combustion boiler in different O₂/CO₂ ratio[J]. Boiler Technology, 2017, 48(2): 50-53.
- [17] 郭军军, 胡帆, 蒋旭东, 等. 0.5 MW 富氧燃烧煤粉炉循环倍率对辐射传热的影响[J]. 工程热物理论, 2019, 40(1): 223-228.
GUO Junjun, HU Fan, JIANG Xudong, et al. Effect of flue gas recycle ratio on radiative heat transfer in a 0.5 MW oxy-fuel combustion furnace[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(1): 223-228.
- [18] 姚丹花. 富氧燃烧条件下煤灰的沾污沉积特性研究[J]. 锅炉技术, 2018, 49(3): 1-5.
YAO Danhua. Experimental study on coal ash deposition characteristics under oxy-fuel combustion condition[J]. Boiler Technology, 2018, 49(3): 1-5.
- [19] WU H B, LIU Y, CHEN W, et al. Experimental study on dust removal of flue gas under O₂/CO₂ combustion[J]. Energy & Fuels, 2019, 33: 12549-12557.
- [20] GUO J J, ZHANG T, HUANG X H, et al. Oxy-fuel combustion characteristics of pulverized coal in a 3 MW pilot-scale furnace[J]. Energy & Fuels, 2018, 32: 10522-10529.
- [21] 王勇, 黄晓宏, 卢兴, 等. 富氧燃烧条件下燃煤 NO_x 排放的实验研究[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3751-3755.
WANG Yong, HUANG Xiaohong, LU Xing, et al. Experimental study of NO_x emissions from coal combustion under oxy-fuel conditions[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3751-3755.
- [22] 谔伊竺, 邵应娟, 钟文琪. 煤颗粒固定床加压富氧燃烧特性及污染物生成试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 164-170.
CHEN Yizhu, SHAO Yingjuan, ZHONG Wenqi. Combustion characteristics and formations of pollutants of coal particles in pressurized oxy-fuel fixed bed combustion[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(1): 164-170.
- [23] 王海亮, 王运军, 魏继平, 等. 富氧气氛下煤粉燃烧产生的污染物排放研究进展[J]. 锅炉技术, 2014, 45(2): 41-43.
WANG Hailiang, WANG Yunjun, WEI Jiping, et al. Process of research on pollutant emission characteristic in coal-fired oxy-fuel combustion[J]. Boiler Technology, 2014, 45(2): 41-43.
- [24] 胡长兴, 李威, 虞效益, 等. 富氧燃烧烟气中汞的氧化机理研究进展[J]. 热力发电, 2015, 44(7): 1-7.
HU Changxing, LI Wei, YU Xiaoyi, et al. Research progress in homogeneous oxidation mechanism of element mercury in oxy-fuel combustion flue gas[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(7): 1-7.
- [25] 董静兰. 高压富氧气氛下痕量元素排放形态研究[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 50-53.
DONG Jinglan. Emission forms of trace elements during oxygen-enriched combustion at high pressure[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 50-53.
- [26] 曾洁, 潘绍成, 冉燊铭, 等. 35 MW 富氧燃烧煤粉锅炉开发与研究[J]. 东方电气评论, 2016, 30(4): 24-28.
ZENG Jie, PAN Shaocheng, RAN Shenming, et al. Research

- and development of 35 MW oxy-fuel combustion PC boiler[J]. Dongfang Electric Review, 2016, 30(4): 24-28.
- [27] 毛宇, 柳朝晖, 陈灿, 等. 富氧燃烧工程示范系统集成研发及运行性能[J]. 东方电气评论, 2017, 31(2): 17-23. MAO Yu, LIU Zhaohui, CHEN Can, et al. Integrated research and operating performance of oxy-fuel combustion demonstration engineering system[J]. Dongfang Electric Review, 2017, 31(2): 17-23.
- [28] 卜昌盛, 庄亚明, 刘道银, 等. 单颗粒流化床富氧燃烧特性研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(5): 1143-1147. BO Changsheng, ZHUANG Yaming, LIU Daoyin, et al. Fluidized bed combustion of a single coal particle in oxy-fuel environment[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(5): 1143-1147.
- [29] 李伟, 李诗媛, 徐明新, 等. 循环流化床富氧燃烧 NO 和 N₂O 的排放特性[J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(4): 307-312. LI Wei, LI Shiyuan, XU Mingxin, et al. NO and N₂O emission characteristics of oxy-fuel circulating fluidized bed combustion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015, 21(4): 307-312.
- [30] LI W, XU M X, LI S Y. Calcium sulfation characteristics at high oxygen concentration in a 1 MW_{th} pilot scale oxy-fuel circulating fluidized bed[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 171: 192-197.
- [31] 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.
- [32] ZHANG X T, LI S Y, LI W. Study on NO and N₂O emission characteristics during co-combustion of biomass and coal in oxy-fuel CFB combustor[J]. Renewable Energy Resource, 2017, 35(2): 159-165.
- [33] WANG X, REN Q Q, LI W, et al. Nitrogenous gas emissions from coal/biomass co-combustion under a high oxygen concentration in a circulating fluidized bed[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(3): 3234-3242.
- [34] DUAN Y Q, DUAN L B, WANG J, et al. Observation of simultaneously low CO, NO_x and SO₂ emission during oxy-coal combustion in a pressurized fluidized bed[J]. Fuel, 2019, 242: 374-381.
- [35] PANG L, SHAO Y J, ZHONG W Q, et al. Experimental investigation on the coal combustion in a pressurized fluidized bed[J]. Energy, 2018, 165: 1119-1128.
- [36] 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换规律[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 combustion in a pressurized fluidized bed[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(1): 171-177.
- [37] 赵星海, 白贵生. 墙式切圆锅炉分级富氧燃烧对 NO_x 生产量影响的数值模拟[J]. 热力发电, 2017, 46(5): 63-68. ZHAO Xinghai, BAI Guisheng. Numerical study on effect of staged oxy-fuel combustion on NO_x production in wall type tangentially fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(5): 63-68.
- [38] WU X F, FAN W D, REN P, et al. Interaction between volatile-N and char-N and their contributions to fuel-NO during pulverized coal combustion in O₂/CO₂ atmosphere at high temperature[J]. Fuel, 2019, 255: 115856.
- [39] 高建强, 张晨. 300 MW 机组富氧煤粉锅炉燃烧和烟气系统动态特性仿真分析[J]. 热力发电, 2017, 46(2): 94-99. GAO Jianqiang, ZHANG Chen. Numerical simulation on dynamic performance of combustion and flue gas system in a 300 MW oxy-coal fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 94-99.
- [40] 王鹏, 陈寅彪, 廖海燕, 等. 200 MW 富氧燃烧锅炉炉配风优化数值模拟研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(2): 98-103. WANG Peng, CHEN Yinbiao, LIAO Haiyan, et al. Numerical simulation on optimization of air distribution mode for a 200 MW oxy-fuel combustion boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(2): 98-103.
- [41] 黄勇理, 刘杰, 柳朝晖, 等. 富氧燃烧电站锅炉风烟燃烧过程控制方案设计[J]. 动力工程学报, 2015, 35(10): 786-791. HUANG Yongli, LIU Jie, LIU Zhaohui, et al. Design of control programs for air/gas circulation and combustion subsystem of an oxy-fuel combustion boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(10): 786-791.
- [42] 黄勇理, 刘杰, 任建, 等. 典型富氧燃烧锅炉风烟系统稳态过程分析[J]. 动力工程学报, 2016, 36(11): 862-869. HUANG Yongli, LIU Jie, REN Jian, et al. Analysis on steady-state process of air/gas system for a typical oxy-fuel combustion boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(11): 862-869.
- [43] CHEN Z H, ZHANG X, LUO W, et al. Dynamic modeling on the mode switching strategy of a 35 MW_{th} oxy-fuel combustion pilot plant[J]. Energy & Fuels, 2020, 34: 2260-2271.
- [44] WU H B, MAO Y, LIU Z H, et al. Numerical simulation of oxy-fuel combustion characteristics in a 200 MW_e coal-fired boiler[J]. Greenhouse Gases Science and Technology, 2019, 9: 276-286.

(责任编辑 马昕红)