

双流化床锅炉和双流态高效洁净燃烧工艺

刘 学 冰

(山东华聚能源股份有限公司, 山东 邹城 273500)

摘 要:为了从源头控制燃煤电厂烟气污染物,实现“超低排放”,在对煤燃烧过程中 NO_x 、 SO_2 生成机理、控制措施进行探讨的基础上,借鉴循环流化床锅炉和鼓泡流化床锅炉的技术特点,提出了双流化床锅炉技术方案及其高效洁净燃烧技术工艺,通过参数解耦等技术可以实现运行指标的优化控制,分别控制 NO_x 和 SO_2 的生成及脱除,从而实现煤的高效燃烧和烟气污染物的“超低排放”。通过理论分析论证和流化床运行实践佐证,双流化床锅炉及双流态高效洁净燃烧工艺可以在燃烧过程中实现污染物的“超低排放”。

关键词:双流化床锅炉;污染物超低排放;清洁燃烧;燃煤电厂

中图分类号:TK229.6

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2016)03-0084-06

Double fluidized bed boiler and double fluidization efficient clean combustion technology

LIU Xuebing

(Shandong Huaju Energy Co., Ltd., Zoucheng 273500, China)

Abstract: In order to reduce pollutant emission of flue gas from coal-fired power plant, a double fluidized bed boiler was developed and the relevant efficient clean combustion technology was introduced on the basis of SO_2 and NO_x formation mechanism as well as their emission reduction methods. The operation could be optimized by index decoupling technology. The formation and remove of SO_2 and NO_x also could be controlled. Due to the new equipment and technology, the coal could burn efficiently and the flue gas could be reduced through theoretical analysis and actual production.

Key words: double fluidized bed boiler; ultra low emissions of pollutants; clean combustion; coal-fired power plant

0 引 言

近几年,我国雾霾等环境问题日益突出,引起社会公众广泛关注,国家环保政策日益严苛,尤其是《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》(发改能源[2014]2093号)、《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》等政策出台后,煤电行业正面临前所未有的压力与挑战;各大城市纷纷“禁煤”,燃煤锅炉难以为继。目前部分大型燃煤电厂实现了“超低排放”,基本上是采用 20 世纪中后期开发的成熟技术,加大系统、设备容量对锅炉后部烟气进行除尘、脱硫、脱硝。如:除尘增加了湿

式电除尘器;石灰石-石膏湿法脱硫主要是增加系统的裕度和复杂度,如原来脱硫吸收塔喷淋层为 3 层,现改为 5 层或者增加一个吸收塔; NO_x 控制仍采用常规选择性催化还原法,但是增加了催化剂用量。新建煤电机组,如果烟尘排放浓度从 20 mg/m^3 下降至 10 mg/m^3 (不增加湿式电除尘器), SO_2 浓度从 50 mg/m^3 下降至 35 mg/m^3 , NO_x 浓度从 100 mg/m^3 下降至 50 mg/m^3 , 环保一次性投资与运行费用增加 30% 左右^[1]。

双流化床锅炉的双流态高效洁净燃烧工艺,按照清洁生产理念,通过研究烟气污染物产生的机理,采用双流化床燃烧工艺,通过鼓泡床和循环流化

收稿日期:2015-12-09;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.03.018

作者简介:刘学冰(1964—),男,山东邹县人,研究员,工程硕士,中国资源综合利用发电咨询委员会专家,从事循环流化床锅炉燃烧、环保、节能等领域的研究。E-mail:lxbecca@163.com

引用格式:刘学冰.双流化床锅炉和双流态高效洁净燃烧工艺[J].洁净煤技术,2016,22(3):84-89.

LIU Xuebing. Double fluidized bed boiler and double fluidization efficient clean combustion technology[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3): 84-89.

床燃烧室的耦合,将锅炉运行过程中相互影响的参数进行解耦,从源头上控制 NO_x 的产生,在燃烧过程中治理 SO_2 ,提高锅炉燃烧效率,可以减少燃煤电厂锅炉后部烟气脱硫脱硝系统,降低电厂建设一次性投资与运行费用,是解决燃煤电厂和燃煤锅炉“超低排放”的根本出路。

1 循环流化床燃烧技术现状

双流态高效洁净燃烧技术工艺是在循环流化床(简称循环床)燃烧技术基础上的突破性创新,为清晰阐述双流化床锅炉及双流态高效洁净燃烧工艺,首先要对循环床燃烧技术现状进行简述。

1.1 循环流化床燃烧技术特点

循环床燃烧技术具有清洁、环保、煤种适应广等特点,受到世界各国的普遍重视,在近三十年得到了迅速发展,也是目前商业化程度最好的清洁煤燃烧技术。循环床锅炉清洁煤燃烧的优势在于低温燃烧、分段燃烧:其炉膛温度只有 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 左右;炉膛底部保持欠氧燃烧,以控制 NO_x 的生成,实现低氮燃烧;在炉膛中下部给入二次风,补足氧气强化燃烧,提高燃烧效率,同时喷入钙粉进行炉内脱硫,降低 SO_2 的排放。试验表明,氧化钙的存在,对 NH_3 氧化生成 NO_x 的反应有催化促进的作用,所以在循环流化床中,加入石灰石脱硫以后,烟气中 NO_x 的排放浓度增高^[2-3]。

实际应用中低氮燃烧的欠氧需求(抑制 NO_x 的形成)和炉内脱硫的富氧要求(脱硫需要)这两种不同含氧量的要求在一个炉膛内难以调和,往往此消彼长,过份的低氧,会降低低温过程燃料燃烧的氧化速率,难以协调控制,制约了循环床锅炉优势的充分发挥,不能同时实现 SO_2 、 NO_x 的低污染排放^[4]。

1.2 循环床锅炉与煤粉炉的对比分析

煤粉炉是以煤粉为燃料的锅炉设备,具有燃烧迅速、完全、容量大、效率高、适应煤种广,便于控制调节等优点。煤粉燃烧几乎是所有大型燃煤锅炉的燃烧方式,但是煤粉炉的烟气处理工艺比较复杂,必须配备功能强大的烟气除尘、脱硫、脱硝等处理系统及设备。

大型化循环床锅炉与煤粉炉相比仍然存在燃烧效率低、磨损大、自用电耗率高等问题,在环保标准要求不太高时,由于不需要后续的烟气脱硫、脱硝系统,具有很好的实际应用价值。环保标准提高之后,循环床锅炉产生的烟气仍然需要复杂的烟气脱硫、

脱硝处理系统,制约了洁净煤燃烧优势的发挥,与煤粉炉相比失去了环保优势,仅在燃用低热值煤等特殊情况下才选用循环床锅炉。

1.3 循环流化床燃烧技术工艺的局限性

循环床定态设计概念和流态图谱是近年循环床技术标志性进步,确立了我国循环床锅炉在理论方面的国际领先地位。

循环床技术的进步主要体现在“流态重构”,所述“流态重构”是指在维持循环床锅炉炉膛上部快速床流化状态的前提下,维持流化风速和循环流率不变,通过优化床料质量,改变炉膛中下部浓度分布,从而降低风机能耗和减轻受热面磨损,下部流态的改变对燃烧、传热、混合及污染物排放的影响是该技术的关键。

循环床锅炉燃料粒度具有宽筛分特性,为 $0\sim 10\text{ mm}$,窄一些的也要在 $0\sim 6\text{ mm}$,粒度一般按照正态分布,实际应用中,粒度分布偏差较大,不同粒径颗粒对应的流化风速差异很大,炉膛内不同高度只有相对固定的烟气流速,不利于控制宽筛分粒径物料的流化质量^[5-6]。

循环床燃烧是一个多参数、强耦合、大滞后的复杂系统。比如,根据 75 t/h 循环流化床锅炉的运行经验,当烟气含氧量控制在 $1\%\sim 3\%$ 时, NO_x 可以控制到 150 mg/m^3 左右, SO_2 达到 800 mg/m^3 左右;而要把 SO_2 降低到 200 mg/m^3 以下,烟气含氧量需要提高到 6% 左右, NO_x 将达到 300 mg/m^3 以上。试图使得流态、循环、燃烧、传热、防磨等均达到最优,同时控制 NO_x 的产生、进行炉内脱硫,从源头上使 SO_2 、 NO_x 实现“超低排放”,并降低自用电消耗,诸多指标在一个系统,特别是一个炉膛中均要实现高水平控制,是困扰循环床锅炉技术发展的难题。

2 双流化床锅炉及双流态高效洁净燃烧技术工艺

为克服循环床锅炉燃烧多参数、大滞后、强耦合造成的各项指标的相互制约的复杂关系,研发了双流化床锅炉及其双流态高效洁净燃烧技术工艺,在流态化理论基础上,通过工艺和装置的改进,将流化床各项指标调整过程中相互制约,甚至相互冲突的参数进行分解调整,使各项指标可以通过单一参数或少量参数进行调节,以便最大限度地优化运行指标,从而实现锅炉的高效燃烧和 NO_x 、 SO_2 的“超低排放”。

2.1 双流化床锅炉的结构

双流化床锅炉结构示意图如图1所示。

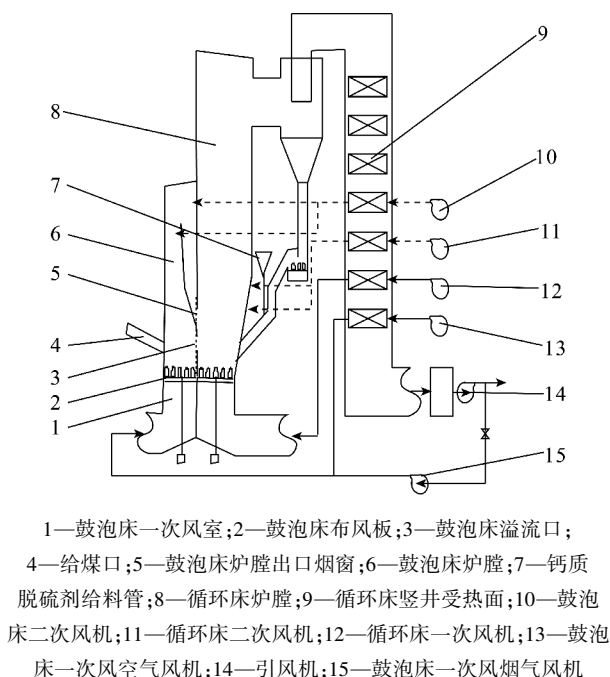


图1 双流化床锅炉结构示意图

Fig. 1 Structure scheme of double fluidized bed boiler

双流化床锅炉是将循环床与鼓泡流化床(简称鼓泡床)进行协同组合而形成的一种创新设备。在常规循环床锅炉炉膛侧面至少设置一组鼓泡床,鼓泡床炉膛下部设置给煤口,且鼓泡床炉膛下部与循环床炉膛之间设有鼓泡床溢流口,鼓泡床炉膛呈“U”型布置,末端与循环床炉膛之间的炉壁上设有烟窗。

鼓泡床一次风室通过风道连接到鼓泡床一次风烟气风机,鼓泡床一次风烟气风机入口通过烟气调节阀与锅炉引风机出口烟道相连接;鼓泡床一次风空气风机通过空气预热器,与鼓泡床一次风烟气风机出口相连,空气、烟气混合均匀后进入鼓泡床一次风室。

鼓泡床炉膛上部设有鼓泡床炉膛二次风口,在循环床炉膛中下部设有二次风口,二次风口接受来自空气预热器的热空气。

2.2 双流态高效洁净燃烧技术工艺

双流态洁净燃烧工艺过程:将燃煤破碎至0~8 mm(根据煤的特性可调整),按照燃煤含硫量掺入一定比例的石灰石,根据锅炉负荷需要连续均匀将燃煤给入鼓泡床炉膛中。鼓泡床一次风室中送入炉膛的一次风由烟气和空气组成,调节鼓泡床一次风(烟气+空气)流量,即调节鼓泡床流化风速(2 m/s

左右低速流化),可以控制鼓泡床流化状态;调节鼓泡床一次风中空气含量,即调节鼓泡床一次风的含氧量,可以控制鼓泡床内燃料燃烧强度,从而控制鼓泡床床层燃烧温度,设计时主要考虑挥发分全部燃烧所需氧气,因缺氧固定碳燃烧的机会很小。此时,加入的燃煤在鼓泡床内加热,挥发分析出并在强还原性气氛中进行缺氧燃烧。

煤加热析出的挥发分、细颗粒煤、水分和缺氧燃烧产生的烟气在鼓泡床炉膛内上升,至顶部折转向下,经过烟窗进入循环床炉膛中下部,加入循环床的流化燃烧运行;根据鼓泡床炉膛温度,通过调节二次风向鼓泡床炉膛补充空气量,调整鼓泡床炉膛内的燃烧温度场。

中等粒度的煤颗粒在沸腾状态,经过溢流口进入循环床炉膛密相区中;大颗粒的煤在鼓泡床炉膛密相区的下部,经过热爆、燃爆、磨损成为较小的煤颗粒并可以经过溢流口或烟窗进入循环床炉膛中。

循环床炉膛无给煤口,循环物料及燃煤全部来自鼓泡床溢流口或烟窗流入的颗粒,在鼓泡床炉膛内物料量及粒度结构一定的情况下,鼓泡床溢流物料量取决于密相区和过渡区的高度,通过调节鼓泡床一次风量,可以调节鼓泡床密相区流化高度,从而调节自鼓泡床炉膛经过溢流口进入循环床炉膛中的物料数量、速度;经过溢流口进入到循环床炉膛中的颗粒粒度很细,筛分较窄,均匀的细颗粒物料有利于循环流化床的运行,流化风速控制在4 m/s左右,风室压力控制在5 kPa左右,从而实现低风压、低风速运行。

循环床与鼓泡床之间可以设计成一体结构也可以设计成分体结构,鼓泡床可以布置在循环床炉膛的前侧,也可以布置在两侧或后侧,两者之间通过烟气窗口和溢流口进行贯通,并进行参数协同、配合调控,形成新的双流态洁净燃烧技术工艺^[7]。

3 双流化床锅炉 NO_x 的“超低排放”原理

3.1 煤燃烧过程中 NO_x 的生成及控制

3.1.1 煤燃烧过程中 NO_x 的生成

1)“热力型”NO_x,燃烧用空气中的N₂在高温下氧化而产生,低于1 350℃几乎不生成,超过1 500℃大量生成,在循环床燃烧条件下产生量很低。

2)“燃料型”NO_x,燃料中含有的氮在燃烧过程中氧化而生成。煤中的氮元素通常以原子状态与各

种碳氢化合物形成胺族($\text{N}-\text{H}$ 和 $\text{N}-\text{C}$)或氰化物($\text{C}=\text{N}$ 链)等,加热时挥发分中的氮化合物热解生成 HCN 、 NH_3 、 CN ,然后被氧化为 NO ,生成 NO_x ,在煤燃烧过程中占总的 NO_x 排放量的80%~90%,是煤燃烧时产生 NO_x 的主要来源^[8-9]。

3.1.2 低 NO_x 燃烧技术研究

燃料型 NO_x 生成量与煤的挥发分析出和燃烧过程中氧的浓度有关:在氧化气氛下,挥发分氮直接被氧化成 NO_x ;在还原气氛下,已生成的 NO_x 被挥发分氮生成的 NH_3 和 CN 等中间产物还原成 N_2 。

尚校等^[10]和谢建军等^[11]所述煤炭解耦燃烧试验过程,验证了煤在气化、还原性气氛中燃烧的低氮效果。

东方锅炉股份有限公司多台循环流化床锅炉低氮燃烧研究及实践经验表明:燃用无烟煤、贫煤、烟煤, NO_x 浓度分别可以控制到 <100 、 $100\sim150$ 、 $200\sim250\text{ mg/m}^3$,表明燃煤中的挥发分对 NO_x 的生成影响很大。

目前低 NO_x 燃烧技术思路是:在燃烧过程中,控制燃烧温度,创造富燃料区,降低局部氧浓度,保持氧和氮分开,不仅能抑制 NO_x 的生成,还可以创造有利于 NO_x 还原的条件^[4];在循环床和煤粉炉降低 NO_x 燃烧控制方面均取得了显著的效果,但是锅炉要保证燃烧效率,炉内富燃料区(还原性气氛)的控制是有限的,因而也限制了低 NO_x 燃烧技术的发挥。

3.2 双流化床锅炉鼓泡床欠氧燃烧抑制 NO_x 产生

双流化床锅炉的燃煤全部由设置在鼓泡床炉膛下部的给煤口给入,燃煤在鼓泡床高温料层中被加热、析出挥发分、着火,同时燃煤颗粒热爆、燃爆、磨损成为较小的颗粒。由于燃煤给入量大、相对集中,低速流化的鼓泡床内无受热面,为控制鼓泡床炉膛温度,鼓泡床一次风中的空气量及炉膛上部的鼓泡床二次风提供的空气量很低,鼓泡床炉膛内严重缺氧燃烧,形成强还原性气氛,挥发分 N 难以生成 NO_x ,即使生成少量的 NO_x ,也会被 NH_3 和 CN 等中间产物还原成 N_2 。燃煤给入鼓泡床后经过较长时间高温干馏,挥发分 N 充分析出。在煤的燃烧温度下,燃料型 NO_x 主要来自挥发分 N ,形成的半焦燃料基本没有挥发分^[12-13],进入循环床进行富氧低温强化燃烧, NO_x 产生份额很低。

双流态洁净燃烧锅炉整个燃烧过程中没有生成 NO_x 的条件,是名副其实的低氮燃烧,能够确保稳定

实现 NO_x 的“超低排放”($<50\text{ mg/m}^3$)。

4 双流化床锅炉 SO_2 “超低排放”原理

4.1 双流化床锅炉鼓泡床脱硫研究

范红宇^[14]研究表明,燃煤中的硫分在强还原气氛中燃烧主要产物为 H_2S ,在鼓泡床中加入石灰石或方解石,在 $>830\text{ }^\circ\text{C}$ 时, H_2S 容易与 CaO 或 CaCO_3 反应,生成 CaS ,可以使90%以上的 H_2S 固化,大幅度降低含硫气体的逃逸,但是 CaS 的缺点是不稳定。 CaS 随固体物料进入循环床。

4.2 双流化床锅炉循环床脱硫研究

CaS 在循环床氧化气氛中被氧化,在 $700\sim900\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内直接转化为 CaSO_4 ,比 CaO 与 SO_2 反应更容易。

双流化床锅炉中的循环床实现了流态优化重构,通过调整风煤配比,多层二次风的调配,可以使循环燃烧温度场均匀;不必像常规循环床再考虑分段燃烧,全炉膛配以较富裕的含氧量,并调控适合钙法炉内脱硫的温度需要;同时由钙质脱硫剂给料管补充加入石灰石或白云石等钙质脱硫剂颗粒,使烟气处于浓厚的 CaO 气氛中,可以达到高效脱硫,实现 SO_2 “超低排放”。

5 双流态洁净燃烧技术工艺效果

5.1 循环床运行物料得到优化

在双流化床锅炉中,鼓泡床对锅炉燃料、灰渣等物料具有粒度分级功能。鼓泡床分为底部的密相区、中下部的过渡区和中上部的稀相区,鼓泡床的流态化将固体颗粒按照粒径大小自下而上进行粒度自然分级。细颗粒由烟气携带在鼓泡床炉膛内向上流动,至上部绕过烟气转流屏,转向下流动,自鼓泡床炉膛尾部烟窗流出,进入循环床炉膛中下部,加入循环床的流化燃烧运行;密相区上部、过渡区的中等粒度物料,通过鼓泡床溢流口流出,进入循环床炉膛下部,加入循环床的循环流化燃烧运行,鼓泡床溢流口为循环床循环物料的主要来源;较大粒度物料集中在鼓泡床炉膛密相区中下部,在低速鼓泡流化状态下热爆、燃烧、燃爆、磨损,逐步转化为中小颗粒,进入循环床;少量的矽石等保持大颗粒状态的物料,经过长时间烧透、积聚,可由鼓泡床放渣管排除^[7]。

常规循环床最新技术成果主要体现在“流态重构”理论,其技术关键是通过优化床料质量,改变炉膛中下部粒度分布;双流化床锅炉的鼓泡床对物料

进行预处理,筛分特性窄,粒度细且均匀,无需再加热即可着火燃烧,是理想的循环物料,彻底优化了循环床炉膛物料浓度分布,密相区下部无超大颗粒物料和死料,真正实现了低床压、低风速运行,将“流态重构”理论充分发挥到实际应用中。

5.2 锅炉容易操控,运行指标得到优化

5.2.1 参数解耦,便于调节

1) 鼓泡床流化与燃烧解耦。鼓泡床流化状态和床层高度,可以通过调节鼓泡床一次风流量,即调节鼓泡床流化风速来控制;鼓泡床炉膛下部燃烧强度及床层温度,可以通过调节鼓泡床一次风中空气含量,即调节鼓泡床一次风含氧量来控制,从而实现鼓泡床流化状态和燃烧强度(温度场)分别调节,使鼓泡床流化状态可以通过调节鼓泡床一次风流量单一参数进行最大限度的优化;鼓泡床燃烧强度和床层温度可以通过调节鼓泡床一次风空气中的空气(含氧)量单一参数进行最大限度的优化;鼓泡床炉膛上部燃烧强度及温度场可通过调节鼓泡床二次风量单一参数进行最大限度的优化^[7]。

2) 脱硫、脱硝参数控制解耦。脱硝、脱硫可分别通过调节鼓泡床、循环床运行状态进行控制,对烟气含氧量、温度场等参数的需求和调节互不干扰。

5.2.2 消除大滞后,燃烧调控更简单

鼓泡床相当于循环床的炉前仓,循环床循环物料及燃煤来自鼓泡床,在鼓泡床炉膛内物料量及粒度结构一定的情况下,鼓泡床溢流物料量取决于密相区和过渡区的高度,鼓泡床流化风速直接影响密相区和过渡区的高度,调节鼓泡床一次风量即可控制循环床燃煤给料量。溢流燃煤进入循环床炉膛无需预热;循环床床温、负荷与给料量的关系直接而敏感,消除了常规循环床增加给煤后,床温先降低再升高的大滞后现象,使燃烧控制更直观、易行,便于实现燃烧自动控制。

5.3 高效燃烧,节能降耗

1) 燃烧效率高。燃煤进入鼓泡床后,细颗粒粉煤与热解出的可燃气体随烟气携带由鼓泡床炉膛内向上流动,期间加入二次风补氧并进行扰动,通过“ $\cap$ ”型炉膛,进入循环床炉膛中下部,同时循环床补入二次风,在循环床炉膛内扰动混合上行,加入循环床的流化燃烧运行,循环床旋风分离器难以分离的极细颗粒粉煤与可燃气体燃烧路径和时间均为常规循环床锅炉的近2倍;循环床物料的优化,易于实现流态优化重构和燃烧优化的统一,同时热态燃煤

由鼓泡床进入富氧的循环床炉膛即可进行剧烈燃烧;宽筛分的燃煤粒度一般呈正态分布,较大粒度物料份额较少,在低速鼓泡流化状态下热爆、燃爆、磨损,逐步转化为中小颗粒,少量的保持大颗粒状态的物料,可以在鼓泡床密相区停留足够长的时间进行烧透,并根据运行情况进行排渣(或排入循环床强化燃烧)。总体燃烧效率可以接近或大于煤粉炉。

2) 排烟温度低。由于在锅炉内脱除了 SO_2 、 NO_x 等酸性气体,锅炉排烟酸露点将降低,因而在锅炉设计排烟温度可以适当降低,从而降低锅炉排烟损失。

3) 运行电耗低。双流化床锅炉的鼓泡床和循环床均为低风速流化,风阻较小;特别是与目前“超低排放”的大型电厂相比,减少了烟气脱硫、SCR脱硝等系统,烟气阻力大幅度降低,其风机电耗很低。

5.4 运行稳定性、可靠性高

双流化床锅炉的鼓泡床和循环床均为低风速流化,由于磨损与流速3次方成正比,所以本锅炉部件磨损很轻甚至消除。

6 结 语

双流化床锅炉及双流态高效清洁燃烧工艺,通过鼓泡床和循环流化床燃烧室的耦合,将鼓泡床流化与燃烧解耦、脱硫与脱硝参数控制解耦,可以通过对双床分别进行燃烧优化调整,实现 SO_2 、 NO_x “超低排放”;通过鼓泡床的预处理,循环流化床运行物料得到优化,可以实现低风压、低风速优化循环燃烧,从而实现锅炉高效燃烧、节能降耗、稳定可靠。

参考文献(References):

- [1] 何 珺. 算一算煤电超低排放的经济账[EB/OL]. (2015-01-27)[2015-12-09]. <http://news.bjx.com.cn/html/20150127/585314-2.shtml>.
- [2] 岑可法,倪明江,骆仲泱,等. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京:中国电力出版社,1998:3-5.
- [3] 胡昌华,卢啸风,雷秀坚. 600 MW 超临界循环流化床锅炉设备与运行[M]. 北京:中国电力出版社,2012:100-106.
- [4] 赵红轮,张燕飞,程昌业. 循环流化床锅炉高效低氮燃烧一体化技术介绍[EB/OL]. (2013-03-29)[2015-12-09]. <http://www.doc88.com/p-7502991242255.html>.
- [5] 杨 石,杨海瑞,吕俊复,等. 基于流态重构的低能耗循环流化床锅炉技术[C]//全国电力行业CFB机组技术交流服务协作网第九届年会暨第二届中国循环流化床燃烧理论与技术学术会议论文集. 北京:中国电力企业联合会,2010:95-103.
- [6] 苏建民. 基于流态重构的循环流化床锅炉节能燃烧技术的应

- 用实践[J]. 动力工程学报, 2011, 31(3): 170-175.
- Su Jianmin. Application practices of energy saving combustion technologies for circulating fluidized bed boiler based on flow pattern reconstruction[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(3): 170-175.
- [7] 刘学冰. 双流态洁净燃烧锅炉及双流态洁净燃烧工艺: 201410415265, 2014. 11[P].
- [8] 吴碧君. 燃烧过程中 NO_x 的生成机理[J]. 电力环境保护, 2003, 19(4): 9-12.
- Wu Bijun. The composing mechanism of NO_x in combustion[J]. Electric Power Environmental Protection, 2003, 19(4): 9-12.
- [9] 姜鹏志. 循环流化床锅炉低 NO_x 排放特性及利用 SNCR 脱氮技术[C]//全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网第八届年会论文集. 北京: 中国电力企业联合会, 2009: 34-40.
- [10] 尚 校, 高士秋, 汪 印, 等. 不同煤燃烧方式降低 NO_x 排放比较及解耦燃烧应用[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(6): 672-679.
- Shang Xiao, Gao Shiqiu, Wang Yin, *et al.* Comparison of NO_x reduction among different coal combustion methods and the application of decoupling combustion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(6): 672-679.
- [11] 谢建军, 杨学民, 丁同利, 等. 煤炭解耦燃烧过程 N 迁移与转化 VI: 循环流化床煤炭解耦燃烧 NO_x 排放[C]//中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集. 杭州: 中国工程热物理学会, 2011.
- [12] 汤秋林, 李 英. 影响煤挥发分测定结果的主要因素分析[J]. 煤质技术, 2010(5): 45-46, 51.
- Tang Qiulin, Li Ying. Analysis on main factors of influencing the determination of coal volatile[J]. Coal Quality Technology, 2010(5): 45-46, 51.
- [13] 石金明, 向 军, 赵清森. 原煤与煤焦热解气化过程氮转化特性研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(12): 2129-2132.
- Shi Jinming, Xiang Jun, Zhao Qingsen, *et al.* Study on conversion characteristics of nitrogen during pyrolysis and gasification with raw-coal and char[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(12): 2129-2132.
- [14] 范红宇. 不同气氛下高温固硫产物硫酸钙和硫化钙相互转化机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- 范红宇. 不同气氛下高温固硫产物硫酸钙和硫化钙相互转化机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- (上接第 73 页)
- [11] 锡林郭勒通力锆业有限责任公司. 低品质低品位含锆粉状褐煤在链条炉中挥发富集提取锆精矿的方法: 103361496[P]. 2013-12-23.
- [12] 锡林郭勒通力锆业有限责任公司. 一种从褐煤中提取锆的方法: 101186975[P]. 2008-05-28.
- [13] 云南冶金集团总公司技术中心. 从褐煤干馏提取含锆物质并制半焦的方法: 1814701[P]. 2006-08-09.
- [14] Levêque G, Abanades S. Investigation of thermal and carbothermal reduction of volatile oxides (ZnO , SnO_2 , GeO_2 , and MgO) via solar-driven vacuum thermogravimetry for thermochemical production of solar fuels[J]. Thermochim Acta, 2015, 605: 86-94.
- [15] Halmann M, Frei A, Steinfeld A. Vacuum carbothermic reduction of Al_2O_3 , BeO , MgO - CaO , TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 + ZrO_2 , SiO_2 , SiO_2 + Fe_2O_3 , and GeO_2 to the metals: a thermodynamic study[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal, 2011, 32(4): 247-266.
- [16] Ito S, Kodaira K, Matsushita T. Vapor growth of hexagonal GeO_2 needle crystals[J]. Mater Res Bull, 1978, 13(2): 97-100.
- [17] Smith R D, Campbell J A, Nielson K K. Concentration dependence upon particle size of volatilized elements in fly ash[J]. Environmental Science & Technology, 1979, 13(5): 553-558.
- [18] Smith R D. The trace element chemistry of coal during combustion and the emissions from coal-fired plants[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1980, 6(1): 53-119.
- [19] Swaine D J. Trace elements in coal and their dispersal during combustion[J]. Fuel Processing Technology, 1994, 39(1/2/3): 121-137.
- [20] Querol X, Fernández-Turiel J, López-Soler A. Trace elements in coal and their behaviour during combustion in a large power station[J]. Fuel, 1995, 74(3): 331-343.