

# 我国燃煤工业锅炉现状及分析

刘建航<sup>1,2,3</sup>

(1. 煤科院节能技术有限公司,北京 100013;2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;  
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

**摘要:**不同类型燃煤工业锅炉具有各自的技术优势及应用范围,为了给用户在项目立项、选择锅炉时提供正确参考,阐述了3种主流燃煤工业锅炉的技术特点、应用现状,并着重针对循环流化床锅炉和现代煤粉工业锅炉,从燃烧组织方式和技术特点两方面进行了系统的技术对比分析。经分析认为,流态化燃烧组织是循环流化床锅炉的技术基础,浓相室燃燃烧组织是现代煤粉工业锅炉的技术基础。依托密相床炉料的巨大热容量,循环流化床锅炉定位于处理高灰劣质燃料;依托低变质高活性清洁煤粉快响应着火喷燃,现代煤粉工业锅炉定位于油(气)锅炉的备份及互换。因此,二者非取舍而是互为补充的关系。

**关键词:**燃煤工业锅炉;循环流化床锅炉;煤粉工业锅炉;链条炉排锅炉

**中图分类号:**TK229.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2017)04-0107-07

## Progress and situation analysis of coal fired industrial boilers in China

Liu Jianhang<sup>1,2,3</sup>

(1. Coal Research Institute Energy Conservation Technology Co., Ltd, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In China, coal fired industrial boilers are dominated in industry. In order to provide the reference option for user choosing appropriate boilers in the project, the technical features and application status of three different types of coal fired industrial boilers were discussed. Circulating fluidized bed boiler and pulverized coal fired industrial boiler were analyzed in terms of combustion method and technical characteristics. It was thought that fluidized combustion is the basis of circulating fluidized bed boiler technology, and dense phase chamber combustion is the foundation of modern pulverized coal boiler. Relying on the huge heat capacity of dense bed, circulating fluidized bed boiler is suited for processing high ash fuel; and likely, dependent on low rank, high activity, and clean pulverized coal jet combustion ignition and fast response, pulverized coal fired industrial boiler is fit for oil (gas) boiler's backup and swapping. Therefore, circulating fluidized bed boilers and pulverized coal industrial boilers have their own scope of application, the two technologies are not trade-offs but complementary relationship.

**Key words:** Coal fired industrial boiler; Circulating fluidized bed industrial boiler; Pulverized coal industrial boiler; Chain grate boiler

## 0 引 言

作为供热、供汽的重要设备,工业锅炉广泛应用于国民生产生活的各个领域。目前我国的在用工业锅炉约62万台。而其中燃煤工业锅炉约47万台,占工业锅炉总数的80%以上,其年消耗标准煤约4亿t,约占全国煤炭消耗总量的1/4<sup>[1]</sup>。相当一段时

期内,我国能源消费结构仍会以煤为主。因此,燃煤工业锅炉在工业锅炉中占主导地位的局面,短期内不会发生改变<sup>[2]</sup>。经多年发展,我国燃煤工业锅炉主要形成3种技术形式:基于颗粒煤(<30 mm)移动床层状燃烧原理的链条炉排锅炉、基于粉煤(<10 mm)流化床(流态化)燃烧原理的循环流化床锅炉,以及近年来出现的基于高级煤

收稿日期:2016-12-23;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.017

基金项目:北京市重大科技成果转化落地培育资助项目(Z161100004816012)

作者简介:刘建航(1977—),男,辽宁阜新,工程师,从事煤粉工业锅炉技术研发工作。E-mail:ljhtu3007@163.com

引用格式:刘建航.我国燃煤工业锅炉现状及分析[J].洁净煤技术,2017,23(4):107-113.

Liu Jianhang. Progress and situation analysis of coal fired industrial boilers in China[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 107-113.

粉( $<0.1\text{ mm}$ )浓相气流床燃烧原理的现代煤粉工业锅炉。以上3类燃煤工业锅炉具有各自的技术优势及应用范围,因此选择何种形式的燃煤工业锅炉成为用户最为关切的问题之一。本文阐述了3类锅炉的技术特点、应用现状,并对循环流化床锅炉和现代煤粉工业锅炉进行较为系统的技术经济对比,为用户项目立项、选择锅炉提供参考。

## 1 链条炉排锅炉

链条炉排锅炉已经有100多年的历史。截至目前,链条炉排锅炉仍占在用燃煤工业锅炉总数的90%以上。传统链条炉排炉运行时,煤在炉排上边移动边燃烧,单面着火,运行时燃料沿炉排长度方向燃料层有明显的分区。从燃烧反应的速度、燃烧产生的时空效率以及燃烧组织的质量和难易程度上看,层燃燃烧劣于流化床燃烧和浓相室燃燃烧。因此链条炉排工业锅炉热效率不高,为60%~70%<sup>[3-4]</sup>。

尽管近年来,链条炉排锅炉的节能改造较广泛,包括抛煤机锅炉经强化燃烧改造、前后拱改造、增加二次风甚至四角切圆三次风、应用炉内槽型分离和飞灰复燃技术等,取得了一定的节能效果,但是仍然存在燃烧效率低、漏煤严重等无法解决的问题。很多锅炉用户将链条炉排锅炉的层燃燃烧方式改造为室燃燃烧,以便从根本上提高锅炉效率,但是这种改造面临诸多困难,链条炉排锅炉室燃改造尚无成熟技术路线,燃烧器的布置、炉膛结构协同设计、异型炉膛热负荷分布、辐射换热方等关键技术面临重大挑战<sup>[5-6]</sup>。

综上所述,由于环境保护、节能降耗及煤炭消费总量控制的形势所迫,低效能、高污染常规混煤(非规范化颗粒煤)链条炉排锅炉的发展空间越来越小,取而代之的是热效率高、污染物排放少,综合性能及品质卓越的其它型式的燃煤锅炉。常规混煤层燃锅炉被循环流化床锅炉及现代煤粉工业锅炉取代,是社会及技术发展的必然。

## 2 循环流化床锅炉

### 2.1 概述

粉煤流态化燃烧从流态化催化反应(化工)过程嫁接而来,距今有近100年的发展史。主要利用流态化床层炉料蓄热量大、温度场分布均一的特点。我国的流化床燃烧技术研究始于20世纪60年代,

20世纪80年代末至21世纪初的10余年是鼎盛时期。经历鼓泡流化床和循环流化床两个阶段。鼓泡流化床因效率低、技术落后,基本淘汰。循环流化床是在鼓泡流化床的基础上发展而来,是近20年来迅速发展的一项高效低污染清洁燃烧技术<sup>[7]</sup>。

### 2.2 燃烧系统构造及循环流态床燃烧组织方式

循环流化床锅炉燃烧系统如图1<sup>[7]</sup>所示。主要由燃烧室(炉膛)、布风板(含风帽)、飞灰分离收集装置(如旋风分离器)、料腿及飞灰回送器等组成,燃烧室又分成密相区(主燃烧区)和稀相区(悬浮区或辅燃烧区)两部分。燃烧系统也可称之为前部及后部两个竖井。前部竖井为总吊结构,四周布置膜式水冷壁,自下而上,依次为一次风室、密相区、稀相区;后部竖井为支撑结构,一般无水冷壁布置,自上而下,旋风分离器的旋风子通过底部竖管与密封料腿及回料器连接。通常,密相区及分离器内部表面均设有绝热防磨内衬。

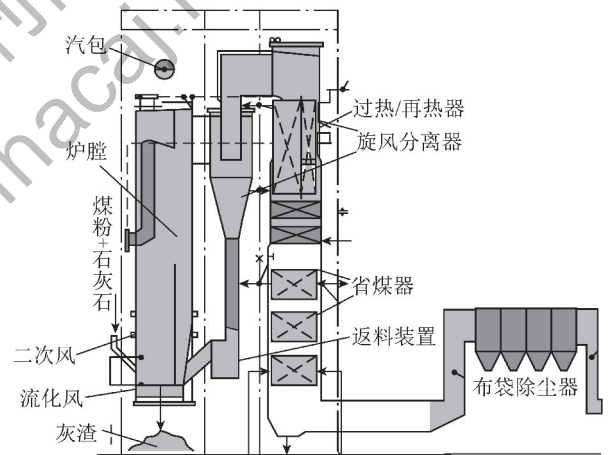


图1 循环流化床锅炉系统

Fig. 1 System diagram of CFB boilers

运行过程中,符合粒度要求的粉煤由输送带、埋刮板或螺旋等输送装置送入炉内,并与布风板上部密相区的高温炉料混合,完成脱水、干馏及燃烧等过程。布风板下部从风室进入的高压一次风为全部炉料提供流态化所需的动力,也是主燃区的助燃风;密相区上部侧壁高速送入的二次风为稀相区的助燃风,也即燃尽风。出稀相区的烟气夹带颗粒进入高温旋风分离器,分离器底部收集的未燃尽颗粒(含颗粒灰)通过密封料腿及回送器重新返回密相区。为了维持床层稳定,运行过程中产生的多余大颗粒高温灰渣,需采用干式方法从燃烧室底部间歇性或连续性排出,经冷却回收热量后进一步处理<sup>[8]</sup>。

## 2.3 循环流化床锅炉的技术特点

### 1) 不同性质的燃料均有理论上的适应性

流态化燃烧的锅炉炉膛中,床层热容量较大,新加入的冷煤粒进入体积比自身大数十倍的高温炉料中被迅速加热,达到燃烧温度,且高温粒子在床层中剧烈翻腾运动,强化了整个燃烧与传热过程。因而,理论上流态化燃烧组织能适应各种燃料,包括低挥发分的难燃无烟煤和灰分40%~60%的劣质煤<sup>[9-10]</sup>。此外,也可以燃用石油焦、页岩以及固废(含垃圾)等<sup>[11-13]</sup>。但在工程项目实施时,如其他类别的锅炉一样,炉子结构及系统配置必须严格按照属地燃料的属性及品质进行设计;在生产运行中,入炉燃料的质量也需严格控制,各种指标并不允许偏离设计指标太多,更忌讳不同性质的燃料随意切换。否则,脆弱的流态化燃烧组织遭受破坏,锅炉无法维持正常运行<sup>[14]</sup>。

### 2) 可以实现炉内固硫及低 $\text{NO}_x$ 燃烧

炉膛内 $\text{CaO}$ 的最佳固硫温度是 $850\text{ }^\circ\text{C}$ ,流态化燃烧可以在此温度下进行,这是流化床锅炉炉内固硫率高的一个原因;另一个原因是脱硫剂在炉膛内的平均停留时间较长,达数十分钟,尽管进料时的表现 $\text{Ca/S}$ 摩尔比不高,但实际床层内的有效 $\text{Ca/S}$ 摩尔比很高,所以 $\text{SO}_2$ 的捕集率高。流化床锅炉的炉内固硫率可以达到80%以上,燃料的折算全硫低于0.5%时,初始排放浓度可以控制至 $<200\text{ mg/m}^3$ 。

流化床锅炉 $\text{NO}_x$ 浓度低的原因是炉膛的总体温度水平低,热力型 $\text{NO}_x$ 难以生成,只有少量燃料型 $\text{NO}_x$ 。一、二次风也是经典的空气分级配风。因此,一般 $\text{NO}_x$ 的初始排放浓度也可以控制至 $<200\text{ mg/m}^3$ 。值得注意的是,循环流化床 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放远高于煤粉锅炉,其浓度达到 $40\sim 600\text{ mg/m}^3$ <sup>[15]</sup>,成为循环流化床锅炉发展的技术瓶颈<sup>[16]</sup>。

### 3) 系统庞杂,核心及关键设备可靠性不高

为了满足床层稳定流态化及大量未燃高温颗粒的闭路循环,由给煤、卸灰、流化、分离及回送等装置,构成庞杂的循环流化床锅炉燃烧系统。系统的核心是流态化燃烧室,上下游的所有设备配置均围绕密相床的稳定流态化展开。

生产实践证明,高温硬质大颗粒随气流运动(有时高速运动)对设备内表面形成冲刷不能避免,因此燃烧室绝热面与水冷面过渡段及炉膛四角角落膜式壁水管磨蚀、密相床及高温分离器绝热表面磨蚀,就成为困扰锅炉稳定运行的首要问题。除此之

外,由于无法预料的低、高温固体物料流动阻滞原因,输送管路及通道不畅及堵塞是经常现象;由于低负荷及燃料质量变化等原因,床层流态化失效转变成固定床,使床层超温结渣,燃烧迅速恶化,甚至风帽烧毁也频繁发生;高温渣冷却、热量回收装置中的运转部件受热变形、膨胀氧化、卡塞磨损问题较突出;“L”型气吹回料阀同样存在高温磨损问题。

### 4) 稳定流态化的运行影响因素多、操控技能要求高

影响流化床稳定燃烧的第一影响因素是燃料,一台设计好的流化床锅炉对入炉煤的质量指标界定明确。如灰分过低,流态化床层变薄,蓄热量不够,稳定运行难以维持;灰分过高,燃尽困难,排渣带走大量物理显热,使锅炉效率下降。

影响锅炉稳定运行的外部因素很多。高温分离器需要全负荷范围内有高的分离效率,利于物料循环,燃烧效率提高,及沿炉膛高度方向温度分布均匀等;布风及流化装置要求配风均匀,利于消除床层死区和粗颗粒沉淀,减少排渣含碳量;给煤方式要求加入到床层的新鲜燃料在整个床面上播撒均匀,防止局部缺氧、超温;二次风配送要求有足够的动量,穿透能力强,能进入远离壁面的区域,并使炉内烟气混合均匀;床层温度控制要求不得超过灰渣熔融温度,否则炉料结渣使流态化失效,同时也不利于污染物生成控制。

流化床的燃烧效率与运行管理水平、操控技能有较高的关联度。锅炉运行过程中,需要运行人员根据负荷及燃料质量变化,实时调整并协同运行状态参数,如风煤比、床温、料层高度及风室压力等。

## 3 现代煤粉工业锅炉

### 3.1 概述

大型或超大型煤粉稀相室燃是世界火电工业的命脉和基础。始于20世纪80年代中后期的0.7~22 MW中小容量煤粉浓相喷燃,广泛应用于欧洲发达国家(如德国、法国等)的燃煤工业锅炉和工业炉(窑)行业,形成了完备的装备制造、能源服务和技术标准体系。煤科院借鉴发达国家的理念与经验,开发有中国特色的自主现代煤粉工业锅炉技术体系<sup>[17]</sup>。基本出发点是燃烧与污染物控制是一个有机的统一体,始终把煤粉浓相着火燃烧组织、前置稳燃室强化燃烧组织、炉膛内温和燃烧组织作为锅炉实现即开即停、宽负荷调节、低氮燃烧及炉内固硫



等操作与运行的技术基础。

由于“海量”煤粉需炉前在线制备及多线路煤粉输配的特殊技术障碍,常规运行电站锅炉煤粉与一次风的固气比小于 $1\text{ kg/kg}^{[18-19]}$ ,并未实现浓相燃烧。中小型工业锅炉的燃烧环境劣于巨型电站锅炉,生产又有启停频繁、超低负荷运行等基本需求。上述因素决定了工业锅炉在大多数场合不能采用与电站锅炉等同的燃烧方式。但工业锅炉较电站锅炉燃料消耗量少得多,所以煤粉集中制备、统一配送及“锅炉岛”设置独立浓相送料(煤粉与一次风的固气比 $3\sim 4\text{ kg/kg}$ )为工业锅炉实现浓相燃烧提供了可能<sup>[20]</sup>。

### 3.2 气流床浓相喷燃燃烧组织原理

现代煤粉(工业)锅炉烟风系统工艺流程如图2所示。主要包括煤粉储罐(塔)、供料器、燃烧器、锅炉本体、污染物协同脱除装置、灰库、点火油(气)站、压缩空气站、惰性气体保护站及测控等10多个子系统。在整个系统中,连续稳定、无脉动、高固气比供(喂)料是“瓶颈”,多要素集成稳燃(包括一次风携带煤粉中心逆喷、二次风对数螺旋线强旋流、双锥强制烟气回流与“钝体”烟气回流的嵌套等)是关键,煤粉浓相着火是核心。根源是这种燃烧组织方式着火热需求量小,仅为传统稀相燃烧的 $1/6$ ,着火迅速,燃烧稳定<sup>[21]</sup>。

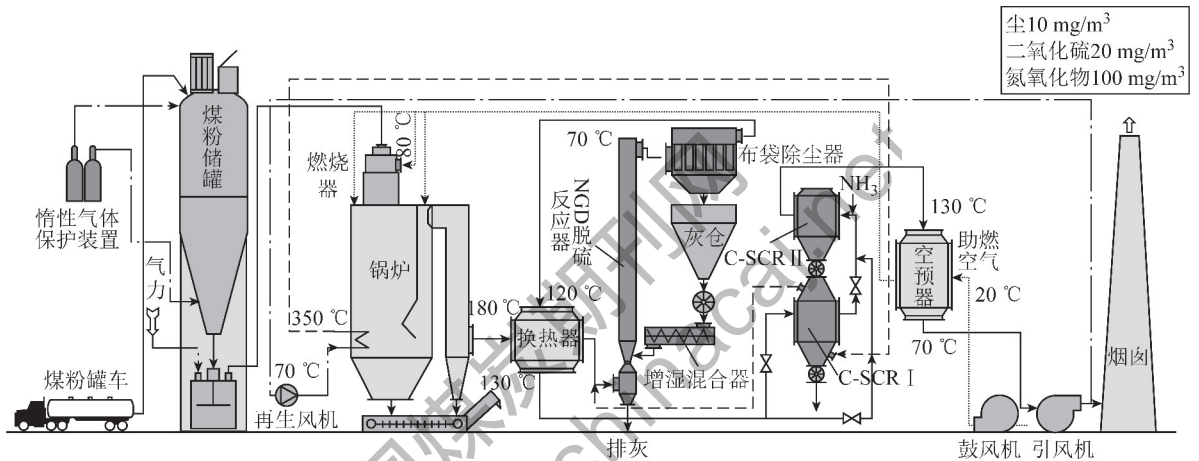


图2 煤粉工业锅炉系统工艺流程

Fig. 2 Operational process of pulverized coal industrial boilers

如同流态化燃烧室是循环流化床锅炉的核心一样,煤粉浓相逆喷燃烧器是现代煤粉工业锅炉烟风系统的核心,上下游设备的配置围绕逆喷燃烧器展开。完整的燃烧器由二次风仓、二次风导流圈、点火仓及附属、对数螺旋线切向导流叶片旋流子(布风盘)、双锥稳燃室、煤粉喷管(含回流帽)等多部件构成。煤粉喷管穿过点火仓及导流叶片布风盘,置于双锥稳燃室的中轴线上,回流帽喷出口端面与前、后锥接口平面重合。稳燃室前锥为扩散锥,后锥为收敛锥。煤粉中心逆喷双锥燃烧器具有强化煤粉燃烧组织,推进燃烧进程的作用。燃烧器结构及流场示意如图3<sup>[22]</sup>所示。

从上游风粉管道送来的煤粉进入燃烧器喷管,接着被喷管出口处设置的回流帽阻挡, $180^\circ$ 转向,从喷管与回流帽形成的环形缝隙中喷出,进入前锥腔室。煤粉气流环绕喷管,依靠惯性力沿前锥中心区域上行至旋流子出口附近。已快速升温至 $800^\circ\text{C}$ 左

右的煤粉与从导流叶片导入前锥的新鲜二次风相遇,被迅速点燃,接着二次折返下行,逐渐混入旋流二次风中,最终形成稳定的锥管状主火焰。主火焰螺旋下行,推进至前后锥接口端面下游附近某处(滞点)时,约 $1/2$ 的高温烟气回流,形成后续新鲜冷煤粉气流的稳定加热源。其余高温烟气(半煤气火焰)受后锥压迫,至出口处以 $100\sim 150\text{ m/s}$ 的速度喷出,进入下游炉膛,与直接进入炉膛的高速缠绕三次风相遇,继续完成燃烧与燃尽<sup>[22]</sup>。

中心逆喷双锥燃烧器形成“风包火,火包火”的独特流场,双锥腔室内返混剧烈,燃烧体积效率高,稳定性好。出喷口时的煤粉燃烧进程不低于40%,最高可达60%。

### 3.3 现代煤粉工业锅炉的技术特点

#### 1) 类油(气)燃烧系统,流程简捷

煤粉浓相喷燃借鉴了轻柴油、天然气等低着火点高级燃料的燃烧及燃烧器结构设计理念,燃料质

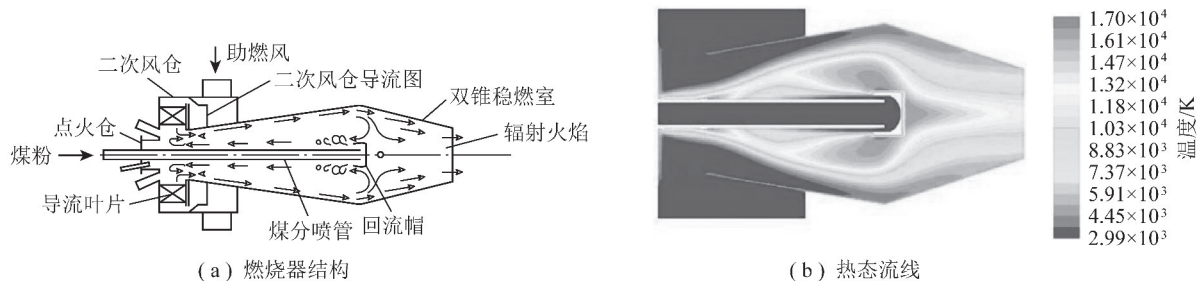


图3 燃烧器结构和热态流线示意

Fig. 3 Structure and thermal flow field of the combustor

点与助燃空气快速混合、快速着火及快速燃尽是基本出发点。所以,烟风系统能够采用与油(气)锅炉完全等同的表现形式,流程简洁。如22 MW以下小容量锅炉本体采用了火管锅壳型式,基于较高的气密性,通常可以取消引风机,进行微正压燃烧;42 MW以上容量系统采用大功率多燃烧器顶置下喷,获得与等容量天然气锅炉相似的火焰形状。所有容量锅炉的助燃风系统,一般无空预器设置,所以管路敷设较简单;所有容量的锅炉系统可配置双燃料燃烧器,方便实现高级煤粉与天然气的快速切换,达到互为备份的目的。

锅炉系统的设备配置,无高温受热运转部件,无长期接受硬质颗粒剧烈冲刷的表面,设备的可靠性较高。

#### 2) 稳定运行的影响因素少、操控简单

区别于循环流化床锅炉,现代煤粉工业锅炉的运行影响因素比较少。内因仍然是燃料的品质,但一般接受质量标准约束,且在入炉前,经过了严格的“事前控制”,如煤炭的分选、配置、烘干脱水、磨制及质量检验等,所以燃料质量引起的燃烧效果变差是偶然事件。锅炉系统运行过程中,各种变量的调整和控制,可通过测控系统迅速实现,并达到最优化。锅炉系统无人值守,实现智能化远程控制。

#### 3) 清洁煤粉的质量控制要求严格

现代煤粉工业锅炉的定位是油(气)锅炉备份或互换,所以对燃料的质量指标提出严格要求。为了保证较高的煤粉流动性,要求入炉煤粉的空干基水分小于5%;为了保证煤粉高的燃烧效率,要求煤粉粒度 $R_{90} \leq 15\%$ ;为了满足用户“即开即停、宽负荷调节”等需求,要求22 MW以下小容量系统使用低变质高活性燃料(如褐煤、长焰煤、不黏煤等),22 MW以上系统才可扩展至中高变质较低活性燃料(如弱黏煤、气煤、肥煤等);为了满足系统的低(超低)排放特性,要求清洁煤粉的灰分小于15%(最好在10%以内),全硫小于0.5%。

#### 4) 供料器技术、燃烧器技术创新要求高

煤粉浓相供(喂)料是煤粉锅炉系统的“瓶颈”及难点技术,供料器是系统中最为“要害”的设备,锅炉系统的运行质量维系在供料器上,因为它担负着连续、均匀、稳定地给燃烧器喂料的任务。要求无脉动,偏差小,且固气比越高越好。发达国家依托良好的工业制造基础,研究起步较早,浓相供料取得突破,如采用容积式流态化多孔转盘及转子秤,供料浓度达到 $4.0 \text{ kg/m}^3$ (每立方空气的输粉质量,)以上,约为发电厂一次风粉浓度的10多倍,供料精度可以控制小于 $\pm 1\%$ 。国内尚在发展阶段,容积式双锁气阀耦合文丘里供料器取得进展,供料浓度达到 $3.0 \text{ kg/m}^3$ (每立方空气的输粉质量)左右,供料精度可控制小于 $\pm 2\%$ 。

燃烧器是锅炉系统的核心,中心逆喷、双锥强制回流的燃烧组织原理与发达国家同行相近。但由于对双锥稳燃室内的空气动力场,如助燃二次风强旋流、高温烟气回流及燃料与空气(烟气)紊流混合的客观规律认识还不深,燃烧器结构与国际水平有一定的差距,着火阶段的燃烧组织质量有较大的提升空间。通常燃料至双锥稳燃室出口时若达不到设定的燃烧进程,将给炉膛燃尽带来困难。机械不完全燃烧损失( $q_4$ )增高,燃烧效率下降。

## 4 循环流化床锅炉与现代煤粉工业锅炉的技术经济对比

### 4.1 综合技术对比

由于技术形成的背景与时代不同,2种锅炉系统的使用效果迥异。表1列出两者的直观性能对比<sup>[23-24]</sup>。

### 4.2 经济性对比

以75 t/h中温中压蒸汽锅炉为例,对循环流化床锅炉和高效煤粉锅炉的经济性进行比较。2类锅炉项目的初投资见表2。

表1 循环流化床锅炉与现代煤粉工业锅炉系统的性能对比

Table 1 Performance comparison between CFB boilers and pulverized coal industrial boilers

锅炉类型	定位	使用场所	技术特点	烟气污染物脱除及(超)低排放
循环流化床锅炉	处理高灰劣质燃料	矿区、坑口及周边的城镇	优点:①对煤的适应性较广,可以燃烧劣质燃料;②炉内可固硫,可低NO <sub>x</sub> 燃烧 缺点:①系统庞杂、设备配置多,储煤场、备煤、输煤及灰场等功能区占地面积大;②锅炉启停时间长,烘炉、助燃耗油大。稳定流态化燃烧影响因素多,运行操作技能要求高;③绝热内衬及特殊部位的水冷壁磨损(蚀)严重,设备运行可靠性较低;④动力消耗大,用电负荷高;⑤燃料消耗大,废物产出多,烟风系统密闭性差,环境卫生标准及等级低	①使用高灰粉煤,烟尘初始排放浓度高,除尘负荷高,需要配置先进可靠的除尘设施,运行成本高;②飞灰中活性CaO浓度高,SO <sub>2</sub> 初始浓度低,采用半干法烟气脱硫,运行成本低;③低温,分段送风,NO <sub>x</sub> 初始排放浓度低,采用SNCR及SCR,运行成本低
现代煤粉工业锅炉	天然气锅炉的备份或互换	远离矿区、坑口的现代城镇	优点:①系统简单、设备配置少,罐储煤粉及飞灰,无堆场和灰场,占地面积小;②类油(气)燃烧,锅炉启停灵活,操控简单、可实现无人值守;③燃烧效率高、锅炉效率高;④燃烧设备维护保养工作量少、无故障运行周期长,可靠性高;⑤燃料消耗少,废物产出少;⑥系统全密闭,环境卫生标准及等级高 缺点:对入炉燃料质量要求严格	①使用低灰清洁煤粉,烟尘初始排放浓度低,除尘负荷低,运行成本低;②低硫清洁煤粉中配置脱硫剂,炉内固硫,飞灰中活性CaO浓度高,采用半干法烟气脱硫,运行成本低;③(半)煤气化深度空气分级燃烧,NO <sub>x</sub> 初始排放浓度低,采用NGD与C-SCR耦合,运行成本低

表2 循环流化床锅炉和高效煤粉锅炉投资成本比较

Table 2 The investment comparison between CFB boilers and pulverized coal industrial boilers

万元

炉型	设计费用	基建投资	设备投资			热控电气投资	安装费	调试费
			锅炉本体	锅炉岛	环保设备			
循环流化床锅炉	65	2 500	750	1 500	1 000	300	700	40
高效煤粉工业锅炉	54	2 000	800	1 400	500*	250	600	10

注:基建投资包括锅炉房工程、桩基础、烟囱工程、土地费用等;设备投资:除尘系统、风机、水泵、水处理、脱硫塔、输煤带、出渣机、筑炉保温、环保设备等;调试费包括调试试水电费、燃料费等,设计费用按照设备投资的2%进行计算;\*表示高效煤粉锅炉采用煤科院研发的,适用于煤粉工业锅炉的灰钙联合循环脱硫脱硝技术。

按照蒸汽压力1.0 MPa,蒸汽温度184℃,锅炉年供蒸汽量7.2万t,给水温度104℃,吨蒸汽耗水量1.2 t,人工年费用4万元计算,平均电价0.7元/kWh,水价4元/t。计算得到两类燃煤工业锅炉的运行成本,见表3。由表3可以看到,由于高效煤粉工业锅炉的效率、燃料热值较高,而吨蒸汽耗电、运管人数较低,因此高效煤粉锅炉的吨蒸汽成本要比循环流化床锅炉的吨蒸汽成本低9.33元。

从表1~3可以看出,循环流化床主要强调的还是燃料的适应性,即实用性,而煤粉工业锅炉则更多体现的是系统的先进性、安全性和可靠性,在经济性上两者是统一的。因此,2种锅炉系统技术应具有良好的互补性,必须从用户的实际需求和主要煤源性质综合考虑,选择适合的锅炉系统技术。

表3 循环流化床锅炉和高效煤粉锅炉运行成本比较

Table 3 Cost of CFB boilers and pulverized coal industrial boilers

项目	循环流化床锅炉	高效煤粉工业锅炉
设计锅炉热效率/%	85	93
实际锅炉热效率/%	81	89
燃料低位热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	20.93	25.12
燃料单价 <sup>a</sup> /(元·t <sup>-1</sup> )	900	1 100 <sup>b</sup>
吨蒸汽燃料消耗/(kg·t <sup>-1</sup> )	138.25	104.83
吨蒸汽耗电/kWh	13.14	11
吨蒸汽脱硫成本/元	1.50 <sup>c</sup>	5 <sup>c</sup>
运管人数	14	5
吨蒸汽人工成本/元	7.78	2.78
吨蒸汽维修成本/元	1.00	1.00
吨蒸汽成本/元	143.90	134.57

注:a 燃煤单价按照2012年动力煤价格;b 高效煤粉工业锅炉燃料价格考虑到煤种差异和制粉成本;c 循环流化床采用炉内脱硫技术,高效煤粉锅炉采用煤科院研发的灰钙联合循环脱硫技术。

## 5 结 语

1)从技术角度讲,循环流化床锅炉燃料适应范



围较宽泛,但运行操作复杂、锅炉启停时间长、炉内磨损严重、故障率高;现代煤粉工业锅炉效率高、操作简便、锅炉启停灵活,但对入炉燃料的质量控制要求严格。因此,循环流化床锅炉定位于处理高灰劣质燃料,现代煤粉工业锅炉定位于油(气)锅炉的备份及互换。

2)从经济角度讲,循环流化床锅炉的项目初投资和运行成本均略高于现代煤粉工业锅炉项目。

3)二者各有各的使用场所与适用范围,是互为补充的关系,应根据用户需求和煤源性质,选择适合的锅炉系统。

#### 参考文献 (References):

[1] 郭水文. 关于当前推进中国煤炭产业供给侧改革的思考[J]. 煤炭经济研究,2016(4):22-27.  
Guo Shuiwen. Consideration on present promotion on supply front reform of China coal industry[J]. Coal Economic Research,2016(4):22-27.

[2] 余洁. 中国燃煤工业锅炉现状[J]. 洁净煤技术,2012,18(3):89-91.  
Yu Jie. Status and transformation measures of industrial coal-fired boiler in China[J]. Clean Coal Technology,2012,18(3):89-91.

[3] 赵钦新. 我国工业锅炉发展回顾与“十二五”展望[J]. 工业锅炉,2011(6):1-8.  
Zhao Qinxin. Reviews and prospects in china's industrial boiler development[J]. Industrial Boiler,2011(6):1-8.

[4] 王善武,吕岩岩,吴晓云,等. 工业锅炉行业节能减排与战略性发展[J]. 工业锅炉,2011(1):1-9.  
Wang Shanwu, Lyu Yanyan, Wu Xiaoyun, et al. Energy conservation and emission reduction, strategical development for industrial boiler industry[J]. Industrial Boiler,2011(6):1-9.

[5] 王小娟. DZL型工业锅炉空气动力场的研究设计[D]. 济南:山东大学,2010:37-59.

[6] 季俊杰. 燃煤链条锅炉燃烧的数值建模及配风与炉拱的优化设计[D]. 上海:上海交通大学,2008:66-69.

[7] 冯俊凯,岳光溪,吕俊复. 循环流化床燃烧锅炉[M]. 北京:中国电力出版社,2003:15-20.

[8] 王振波,李国成. 工业锅炉技术[M]. 北京:中国石化出版社,2010.

[9] 王俊. 无烟煤粉循环流化床预热燃烧和NO<sub>x</sub>生成试验研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2011:7-15.

[10] 张庆国,程新华,杨海瑞,等. 循环流化床锅炉燃用贫煤和无烟煤的运行优化分析[J]. 热力发电,2009,38(4):39-43.  
Zhang Qingguo, Cheng Xinhua, Yang Hairui, et al. Operational optimization of CFB boiler burning lean coal and anthracite[J]. Thermal Power Generation,2009,38(4):39-43.

[11] 刘静宇. 桦甸油页岩半焦循环流化床燃烧特性研究[D]. 吉林:东北电力大学,2006:10-25.

[12] 闫涛. 循环流化床焚烧炉中生活垃圾燃烧特性研究[D]. 北

京:清华大学,2004:12-28.

[13] 陈继辉,卢啸风,刘汉周. 城市生活垃圾循环流化床处理技术的研究进展[J]. 燃烧科学与技术,2006,12(5):473-479.  
Chen Jihui, Lu Xiaofeng, Liu Hanzhou. Progress in disposing of municipal solid wastes using circulating fluidized bed combustion technology[J]. Journal of Combustion Science & Technology,2006,12(5):473-479.

[14] 卢刚. 循环流化床锅炉水冷壁磨损特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2005:25-30.

[15] Liu H, Gibbs B M. Reduction of N<sub>2</sub>O emissions from a coal-fired circulation fluidized bed combustor by after-burning[J]. Fule,1998,77(14):1579-1587.

[16] 沈来宏,铃木善三. 流化床内焦炭对N<sub>2</sub>O和NO生成与分解的影响[J]. 环境科学学报,2000,20(4):439-444.  
Shen Laihong, Suzuki Yoshizo. Effect of char on N<sub>2</sub>O and NO emissions in fluidized bed combustion[J]. ACTA Scientiae Circumstantiae,2000,20(4):439-444.

[17] 王乃继,尚庆雨,张鑫,等. 德国煤粉工业锅炉实践及我国研发、推广的现状与发展[J]. 工业锅炉,2016(2):1-10.  
Wang Naiji, Shang Qingyu, Zhang Xin, et al. Practice of pulverized-coal fired industrial boilers in Germany and status its research, promotion in China[J]. Industrial Boiler,2016(2):1-10.

[18] 柳竹欣. 电站锅炉煤粉浓度实时监测系统的设计与应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2007:20-31.

[19] 朱芳波. 电站锅炉煤粉浓度的微波测量方法研究[D]. 南京:南京理工大学,2007:18-28.

[20] 李玉静,于在海,魏恺宁,等. 关于小型煤粉工业锅炉技术推广问题的分析探讨[J]. 工业锅炉,2013(1):45-49.  
Li Yujing, Yu Zhaihai, Wei Kaining, et al. Analysis and discussion on promotion of small-scale pulverized coal industrial boilers industrial boiler[J]. Industrial Boiler,2013(1):45-49.

[21] 何海军,纪任山,王乃继. 高效煤粉工业锅炉系统的研发与应用[J]. 煤炭科学技术,2009,37(11):1-4.  
He Haijun, Ji Renshan, Wang Naiji. Development and application of high efficient pulverized coal fired industrial boiler system[J]. Coal Science and Technology,2009,37(11):1-4.

[22] 姜思源,王永英,周建明. 中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟[J]. 煤炭学报,2014,39(6):1147-1153.  
Jiang Siyuan, Wang Yongying, Zhou Jianming. Numerical simulation on middle volatile coal combustion in reversed injection burner[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(6):1147-1153.

[23] 范玮. 煤粉工业锅炉产业发展现状及投资分析[J]. 洁净煤技术,2012,18(4):4-6.  
Fan Wei. Development and investment analysis of pulverized coal industrial boiler[J]. Clean Coal Technology,2012,18(4):4-6.

[24] 梁兴. 高效煤粉工业锅炉与水煤浆工业锅炉的对比分析[J]. 洁净煤技术,2012,18(5):88-90.  
Liang Xing. Comparison between high Efficient pulverized coal industrial boiler and CWM industrial boiler[J]. Clean Coal Technology,2012,18(5):88-90.