

# 我国工业锅炉技术特点和发展方向

董 琨<sup>1,2</sup>, 谭厚章<sup>3</sup>, 许鑫玮<sup>3</sup>, 王学斌<sup>3</sup>, 李永田<sup>2</sup>

(1. 神华国华电力研究院有限公司, 北京 100024; 2. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072;

3. 西安交通大学 能源与动力学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 工业锅炉作为工业生产中重要的热动力设备, 具有燃料杂、容量小、参数低、启停频繁和负荷变化巨大等特点, 使得工业锅炉较电站锅炉热效率低而排放高。论述了链条炉、流化床、小型煤粉炉等典型工业锅炉优缺点, 分析了工业锅炉低效高排放的主要问题。提出在全国布置优质烟煤粉磨站, 采用集中制粉供粉方式和新型工业煤粉炉超低氮燃烧器、烟气再循环、高浓度送粉、空气分级技术, 并结合炉内 SNCR 技术, 不需烟气脱硝装置 SCR 即可实现锅炉效率大于 90%, NO<sub>x</sub> 排放可控制在 100 mg/m<sup>3</sup> 以下。

**关键词:** 工业锅炉; 锅炉效率; NO<sub>x</sub> 排放

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)S2-0001-06

## Technical characteristics and development direction of industrial boilers in China

DONG Kun<sup>1,2</sup>, TAN Houzhang<sup>3</sup>, XU Xinwei<sup>3</sup>, WANG Xuebin<sup>3</sup>, LI Yongtian<sup>2</sup>

(1. Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100024, China; 2. School of Environmental Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** As an important thermal power equipment in industrial production, industrial boilers have lower thermal efficiency and higher emissions than utility boilers, which comes from the various coal-type and the low parameter of industrial boiler. The advantages of typical industrial boilers such as chain grate boilers, CFB boilers and pulverized-coal boilers were summarized. The main reasons which led to the low efficiency and high emissions of industrial boilers was applied. It is proposed to arrange high-quality bituminous coal grinding station in the country and adopt centralized powder feeding method for the supply for industrial boilers. A new type of industrial pulverized-coal De-NO<sub>x</sub> burner is designed, which including the flue gas recirculation, and air classification technology. By using this burner and SNCR technology, the NO<sub>x</sub> emissions can be controlled below 100 mg/m<sup>3</sup> with 90% boiler efficiency.

**Key words:** industrial boilers; boiler efficiency; NO<sub>x</sub> emission

## 0 引 言

据统计, 2017 年末我国年煤炭消耗总量为 38.57 亿 t, 其中用于电站锅炉发电供热共 19 亿 t, 用于生活消费 1.67 亿 t, 用于工业锅炉超过 7 亿 t<sup>[1]</sup>。工业锅炉作为工业生产中重要的热动力设备, 产生工业生产中必须的蒸汽、冬季供暖的热水或民用热水<sup>[2]</sup>。截至 2009 年末, 全国在运行工业锅炉保有量超过 58.48 万台, 平均容量逐年上升, 但单机容量仍较小<sup>[3]</sup>。与电站锅炉相比, 工业锅炉具有容量小、产生蒸汽的参数低、启停频繁、负荷变化大等

特点。我国工业锅炉平均管理及运行水平不高, 很多锅炉实际在不足 50% 的负荷下长期运行, 使得工业锅炉实际运行效率较低, 锅炉热效率大多在 60%~70%。

据统计, 燃煤释放的 SO<sub>2</sub> 占全国总排放的 85%, CO<sub>2</sub> 占 85%, NO<sub>x</sub> 占 60%, 粉尘占 70%<sup>[4]</sup>。我国每年工业锅炉的污染物排放约为: 烟尘 800 万 t, SO<sub>2</sub> 900 万 t, CO<sub>2</sub> 12.5 亿 t<sup>[5]</sup>。工业燃煤锅炉每年向大气排放 SO<sub>x</sub> 约占全国排放总量的 27%; 烟尘约占全国总排放量的 50% 左右<sup>[6]</sup>。随着大型电站锅炉超低排放改造完成, 工业燃煤锅炉排放造成的环境问题日益严峻, 国家出台了一系列严格的污染物排放

收稿日期: 2019-09-29; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19092901

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0603902)

作者简介: 董 琨(1979—), 男, 天津人, 高级工程师, 从事发电机组热力系统节能方面的工作。E-mail: 16800807@chnenergy.com.cn

引用格式: 董琨, 谭厚章, 许鑫玮, 等. 我国工业锅炉技术特点和发展方向[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(S2): 1-6.

DONG Kun, TAN Houzhang, XU Xinwei, et al. Technical characteristics and development direction of industrial boilers in China[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(S2): 1-6.

标准,高污染高能耗低效率工业锅炉的整改和替换已成为当下重要的节能减排工作<sup>[7]</sup>。

当前国内使用的工业锅炉类型主要包括层燃炉、循环流化床锅炉和工业煤粉炉 3 种。我国燃煤工业锅炉以层燃锅炉为主,而层燃锅炉对煤种的适应性较差<sup>[8]</sup>。层燃炉中的链条炉占比最大,其次是流化床锅炉和小型煤粉炉。但链条炉由于其实际锅炉效率很低(60%~70%), $\text{NO}_x$ 排放高,缺乏 SCR 脱硝合适的烟温窗口,难以实现  $\text{NO}_x$  超低排放,目前,链条炉生产使用逐渐减少,流化床和小型煤粉炉由于锅炉运行效率高(可大于 90%), $\text{NO}_x$  排放易于控制,是未来工业燃煤锅炉的发展方向。

## 1 层燃炉

### 1.1 层燃炉的发展和现状

煤的炉排燃烧(层燃炉)是小型到中型锅炉常用的燃烧方式。最早的炉排燃烧方法是固定炉排,人工添煤,但耗费人力,燃烧效率低,热损失大,已较少采用。目前采用较多的是链条炉排,也称运动炉排,是用链轮带动炉块,由前向后运动将煤从煤仓中带入炉中燃烧,煤燃烧后的残渣自动排到灰坑中,较多用于中、小型锅炉。另一种燃煤方法是抛煤机配合倒转炉排,由后向前运动的炉排,在某种情况下采用<sup>[9]</sup>。

我国工业锅炉中数量最多的就是层燃炉,而层燃炉中又以链条炉最具代表性,占工业锅炉总台数的 63%~65%;其次为往复炉排炉,占 20%;固定炉排占 10%<sup>[10]</sup>。2010 年我国各省市特种设备检测机构对现有工业锅炉运行热效率在全国范围内进行现场测试,结果表明:① 1~35 t/h 层燃锅炉热效率在 38.36%~86.65%,20 t/h 以上层燃锅炉平均热效率达到 80%以上,且随着锅炉容量增大热效率逐步提高;② 我国层燃炉 1~35 t/h 全容量平均热效率 65%,先进省份和发达地区全容量层燃锅炉平均热效率在 68%左右<sup>[11]</sup>。

### 1.2 链条炉的技术特点

作为我国发展最早的炉型,链条炉在 20 世纪 60 年代得到发展,20 世纪 80 年代开始进入高速发展阶段。链条炉的优点是能够快速响应锅炉降负荷运行,可以长期实现低负荷运行,调峰性能好。

但链条炉面临的主要问题如下<sup>[9,12-18]</sup>:

1) 炉膛结构复杂,链条炉排的工作温度较高,高温下长时间工作使得炉排片易损坏,燃烧方面也存在较大问题。炉排片之间存在间隙,较小的煤块在燃烧前即从炉排上落下,导致煤耗较高。

2) 燃烧效率较低。由于链条炉入炉煤颗粒只控制在 50 mm 以下,燃料粒径太大,在链条上面又是单面燃烧,下煤层易燃烧不完全。炉渣排放温度太高(600 °C 以上),炉渣含碳量高(炉渣含碳在 30%~50%),炉膛温度偏低等造成链条炉燃烧效率低。链条炉的设计燃烧效率在 85%左右,但实际运行中,优质煤的链条炉燃烧效率通常不到 70%。加之工业锅炉经常运行在低负荷,炉膛温度更低,进一步降低了燃烧效率。

3) 煤种适应性差,不能烧混煤、次煤以及灰熔融温度较低的煤,否则烧熔的灰渣易出现板结。链条炉对煤种有一定要求,灰熔融温度太低的煤和贫煤均不适用于链条炉,贫煤燃烧过程中易破碎成小块颗粒,小颗粒易被一次风携带离开炉排表面,未经燃烧直接与烟气一同离开炉膛,降低锅炉热效率;灰熔融温度较低的煤易在高温的炉排表面熔融并板结,使得炉排布风不均,燃烧恶化。

4)  $\text{NO}_x$  排放量高。由于炉内温度不均匀,无法实施 SNCR 技术脱硝,由于缺乏合适的脱硝温度窗口(310~410 °C),难以实现烟气脱硝 SCR 工艺。链条炉实现超低  $\text{NO}_x$  排放存在困难。

## 2 循环流化床工业燃煤锅炉

### 2.1 循环流化床锅炉的发展和现状

循环流化床工艺应用于煤燃烧设备的设想最早产生于 20 世纪 60 年代,十多年后,芬兰奥斯龙(Ahlstrom)公司 20 t/h 循环流化床锅炉(1979 年)<sup>[19]</sup>和德国鲁奇(Lurgi)公司 50 t/h 循环流化床锅炉(1981 年)相继投运,标志着作为煤燃烧设备的循环流化床锅炉诞生了。目前,世界各主要循环流化床制造商也都在开展循环流化床相关研发工作,包括阿尔斯通(ALSTOM)、福斯特惠勒(Foster Wheeler)公司等。

20 世纪 60 年代末开始,我国开始了鼓泡流化床(沸腾炉)的研究和产品开发工作,从 20 世纪 70 年代初起 4~130 t/h 鼓泡流化床相继投运。1981 年,国家科委下达了“煤的流化床燃烧技术研究”课题,标志着我国循环流化床锅炉的产品研究和产品开发工作正式启动。到 20 世纪 90 年代中期,投入运行的 75 t/h 以下容量的循环流化床锅炉已有近 200 台。

### 2.2 循环流化床的技术特点

循环流化床技术是指炉膛内料层自下而上快速通入空气,使整个料层达到流化状态进行燃烧的燃烧技术。通过空气与颗粒相之间较大的相对速度,

保证空气与燃料之间较高的传质和传热速率; 单次燃烧后炉膛出口烟气中还携带着大量的未燃尽煤粉颗粒, 为保证燃尽率将烟气送入旋风分离器中, 通过旋风分离器筛选未燃烧完全的颗粒通过返料器将未燃尽的颗粒返回炉膛内再次燃烧, 直至未燃尽的颗粒粒径小于旋风分离器的选择粒径。循环流化床炉膛内燃料较和炉内温度非常均匀, 也较低(850~900℃), 能有效抑制  $\text{NO}_x$  的生成, 降低  $\text{NO}_x$  排放。与此同时, 通过在料层内添加石灰石还可有效降低  $\text{SO}_x$  的排放。

循环流化床作为新一代的高效燃烧技术, 具有燃烧稳定、煤种适应性广、污染物排放较低等优点。随着国内对污染物排放日渐严苛的控制, 循环流化床低污染物生成特性受到重视, 循环流化床锅炉已成为首选的高效低污染且适应燃烧劣质煤的新型燃烧技术。

但循环流化床应用于工业锅炉上的缺点也很明显<sup>[20-26]</sup>:

1) 成本较高, 循环流化床锅炉的造价高于同蒸发量的煤粉炉和链条炉。

2) 占地面积大于同蒸发量的煤粉炉和链条炉, 因为旋风分离器及返料管的存在, 循环流化床锅炉占地面积的减小受到了限制。

3) 炉膛内高速流动的颗粒对水冷壁、分离器及炉膛内的埋管磨损较大, 管壁变薄后易爆管。金属磨损问题是流化床锅炉运行的大问题。

4) 目前有关循环流化床的研究主要集中在大容量循环流化床锅炉方面, 而对于容量较小的工业锅炉研究相对较少。直接将大容量循环流化床按比例缩小后应用在小容量的工业锅炉不合理。流化床锅炉入炉煤粒径控制在 10~12 mm 仍较大, 需多次循环燃烧才能燃尽。工业锅炉负荷较小, 工业循环流化床锅炉的高度有限, 最低循环速度下停留时间不到 4 s<sup>[27]</sup>, 而停留时间不足会造成飞灰含碳量高, 固体不完全燃烧损失增大, 锅炉效率降低。

### 3 工业煤粉锅炉

#### 3.1 工业煤粉锅炉的发展和现状

工业煤粉锅炉属于悬浮煤粉室燃炉, 煤粉粒径控制在 80  $\mu\text{m}$  以下, 相对于链条炉的入炉煤粒径 50 mm, 流化床的入炉煤粒径 10~12 mm, 非常小, 更易实现煤粉的着火和燃尽。

通过燃烧器将煤粉送入炉膛内组织燃烧。相较于链条炉, 工业煤粉锅炉具有更高的锅炉热效率和更低的起始  $\text{NO}_x$  排放; 与工业循环流化床锅炉相比,

工业煤粉锅炉具有更低的造价和占地面积以及更高的锅炉效率。但工业煤粉锅炉对燃煤品质有较高要求, 煤种适应性不如循环流化床锅炉, 且对入炉煤粉的细度要求较高。

小型煤粉工业锅炉正常运行工况下可达到 90% 的效率, 远高于链条炉的锅炉效率。西安交通大学、煤科院、上海交通大学等积极开发高效低排放工业煤粉锅炉和低氮燃烧器。美国在 1990 年颁布清洁大气法(CAA) 修订案后, 才真正立法制定控制  $\text{NO}_x$  排放的相关标准。目前, 工业锅炉使用的主要控制方法包括: ① 减少过量空气量; ② 空气分级或者燃料分级燃烧; ③ 通过再燃系统将高挥发性燃料喷入高  $\text{NO}_x$  区, 燃料包括极细煤粉、生物质或天然气; ④ 烟气循环减少过量空气量; ⑤ 再燃和氧气循环结合<sup>[28]</sup>。

#### 3.2 工业煤粉炉的优势

1) 巨大的节能效果。工业煤粉炉与链条炉相比具有较高的锅炉效率, 设计工况下煤粉燃尽率达到 98% 以上, 锅炉整体效率达到 90% 以上, 比链条炉高了 20%。

2) 巨大的减排效果。可大幅减少污染物的排放,  $\text{SO}_x$  排放主要与燃料内 S 含量有关, 较高的锅炉热效率使工业煤粉炉在相同负荷下的耗煤量降低, 因而产生的  $\text{SO}_x$  排放较低, 同时工业煤粉炉要求集中供粉, 使炉前脱硫脱灰成为可能, 将目前的中小型燃煤锅炉更新替代为高效煤粉锅炉, 预计可减少  $\text{SO}_2$  排放约 50 万 t, 粉尘排放约 5 万 t<sup>[29]</sup>; 对于  $\text{NO}_x$  排放, 因为煤粉炉的炉膛温度最高, 因此生成的  $\text{NO}_x$  量最高, 但在低氮燃烧器、烟气再循环和空气分级技术的共同作用下, 能有效组织炉内燃烧, 降低  $\text{NO}_x$  生成量, 进而减少  $\text{NO}_x$  排放, 目前最优的工业锅炉燃烧器稳定工况下能将  $\text{NO}_x$  初始生成量控制在 150~180  $\text{mg}/\text{m}^3$  左右。再在炉内实现简单的喷氨(SNCR), 可实现炉膛出口  $\text{NO}_x$  排放小于 100  $\text{mg}/\text{m}^3$ <sup>[30-31]</sup>。

3) 自动化程度高。工业煤粉锅炉整个系统密闭运行, 自动气力输送供煤、集中排灰, 工作环境良好, 同时自动化程度较高, 操作较为简单, 易于控制, 可降低人员成本。

#### 3.3 工业煤粉炉发展面临的主要问题

1) 燃尽问题。工业锅炉的容量相对较小, 锅炉占地面积受投入资金的限制, 通常也较小, 为了保证蒸汽参数, 除了采用紧凑式的炉膛布置外, 还需尽量提高换热面面积。很多工业锅炉整个炉膛水冷度高达 100%, 因此炉膛整体温度较低, 而较小的锅炉体积进一步限制了煤粉的停留时间, 使得燃尽成为了

工业煤粉锅炉需要解决的一大问题。

2) 燃料问题。工业煤粉锅炉的资金投入有限,此外,为了保证工业煤粉炉燃料的燃尽率,工业煤粉炉燃烧用的煤粉细度要求比电站锅炉更高,通常烟煤的 $R_{90}$ 为25%~35%就可满足电站煤粉锅炉使用,但工业煤粉锅炉要求 $R_{74}$ 为3%左右<sup>[32]</sup>。若采用炉前制粉,则制粉成本升高。此外,工业煤粉炉负荷较小,为每台锅炉配置炉前制粉系统的经济性较低。这使得煤粉炉燃料的制备成为限制工业煤粉炉发展的问题之一。

3) 排放问题。若不采用炉内燃烧结构优化或低氮燃烧器技术,相较于其他工业锅炉更高的炉膛温度会导致工业煤粉炉有更高的 $\text{NO}_x$ 排放量,同时因为燃料由煤块变为煤粉,导致飞灰生成量急剧增大。针对工业煤粉炉小容量低负荷特点的炉内燃烧组织和低氮燃烧器技术的基础研究较为缺乏,缺少指导性的技术方案,导致工业煤粉炉的技术推广较慢。

4) 负荷变动问题。为了满足实际需要,工业锅炉负荷随季节和时间变化较大,可能出现频繁启停和长期低负荷运行。若长期运行在50%负荷下,煤粉炉的炉膛内燃烧变得不稳定,易出现熄火停炉问题。

若解决了以上问题,工业煤粉锅炉相对于其他类型工业锅炉的高燃烧效率、低排放优势明显,在日益严苛的环保政策大环境下,工业煤粉锅炉替换传统低效高排放的工业锅炉成为大势所趋。

## 4 工业煤粉炉发展方向

### 4.1 集中制粉技术

采用集中大规模制粉,用车送到用户的办法可解决制粉系统难于维护的困难<sup>[33]</sup>。煤粉加工过程包括烘干和磨制2个步骤,按照加工方式可将煤粉加工分为2种:分步烘干磨制和同时磨制烘干<sup>[34]</sup>。第1种方式对设备和控制系统的要求较低,在基本设备下就可实施,且工艺链长、功能分散,适用于小规模制粉;第2种制粉方式较为简单,但对制粉设备的安全性和工艺性有较高要求,在大规模制粉中较为适合。目前,大规模制粉的经济覆盖半径约为100 km左右<sup>[35]</sup>,在该范围内,各煤粉用户可通过直接购买获得现成的高质量高细度煤粉,既节约了磨煤机的占地面积和磨煤所需的电耗,又能够保证煤粉种类和质量的稳定。需要注意,煤粉的定价及制粉厂的位置还需要统筹。煤粉属于易燃易爆品,长距离运输存在安全隐患,且经济性较低。

### 4.2 煤粉安全运输、储存技术

限制集中制粉技术发展的一个重要问题是煤粉的安全运输和储存问题。煤制成煤粉后,比表面积迅速增大,与空气的接触面积大,析出的挥发分更多,且阴燃温度降低,易出现自然或自爆现象。为此,煤粉整个制备、运输和储存过程中,应充分重视安全问题,应设置多种保护措施进行保护,包括:  
① 全程隔绝空气,使用惰性气体填充、覆盖煤粉表面,防止挥发分自燃和煤粉阴燃。  
② 使用传感器对温度进行监控,温度出现超温趋势时,及时从下方充入 $\text{N}_2$ 驱赶空气及挥发分,之后在煤粉上方冲入 $\text{CO}_2$ 覆盖在煤粉表面隔绝空气与挥发分。  
③ 设置防爆门泄压泄爆,并采用耐压的壳体材料,防止壳体泄露导致煤粉泄出与空气接触,引发大规模爆炸。  
④ 密封罐运输车应设置降温装置,防止罐体在阳光下长期暴露导致罐体整体温度上升,产生安全隐患,同时罐装车应设置静电接地装置,防止运输过程中摩擦产生电火花引燃煤粉。

将煤粉从罐装车向储存塔转移时,使用压缩空气对罐车内的煤粉进行加压流化,之后开启进料阀门,煤粉通过密相模式进入储存塔的燃料加注管内<sup>[35]</sup>,之后煤粉在自重下下落,输送风在上部经过滤器排放至空气中,若输送过程出现温度迅速升高,则启用惰性气体保护装置,迅速从下方充入 $\text{N}_2$ 排出空气,再在粉层上方覆盖 $\text{CO}_2$ 隔绝空气。

### 4.3 低 $\text{NO}_x$ 燃烧器开发

燃烧器是煤粉锅炉燃烧系统中的关键设备,燃烧器决定了炉膛内部流场、煤粉着火燃烧和炉膛结构。燃烧器的优劣直接影响煤粉着火的稳定性、燃料的燃尽程度、炉内燃烧的稳定性以及 $\text{NO}_x$ 生成。

当前工业锅炉低氮燃烧器的主要思想可以类比空气分级技术,通过对一二次风配风量调整,分级送风,在保证煤粉流稳定着火的前提下,通过组织气流流动,延迟二次风与一次风粉气流的混合时间,使煤粉在着火后处于低氧的环境下燃烧。氧气迅速消耗后,炉膛内形成还原性气氛,生成的 $\text{NO}_x$ 前驱物HCN能将挥发分N析出氧化生成的NO还原成 $\text{N}_2$ ,同时抑焦炭N向NO的转化,减少燃料型 $\text{NO}_x$ 的生成;此外,由于空气分级,燃烧初期供氧不足,导致燃烧反应速度降低,火焰温度降低,抑制热力型 $\text{NO}_x$ 的生成,随着二次风的混入,逐渐完全燃烧,此时虽然氧量增加,但火焰温度已经较低,同样可以控制热力型 $\text{NO}_x$ 的生成量<sup>[36]</sup>。低氮燃烧器比普通燃烧器,燃烧行程变长,温度在炉膛内的分布更加平均,火焰峰值温度更低,能避免出现局部高温,结合炉膛分级

燃烧,能够有效将  $\text{NO}_x$  排放量降至  $150 \sim 180 \text{ mg/m}^3$  左右<sup>[37-38]</sup>。

与电站锅炉比,工业锅炉具有更小的占地面积,更低的炉膛温度,更短的停留时间,更频繁的启停和更长时间的低负荷运行,使得工业锅炉的燃烧器具更有稳定的着火和燃烧能力。设计时,燃烧器出口气流具有更大的旋流强度,以产生更大的回流区来卷吸高温烟气以稳定着火,同时增大燃烧后期送风对炉膛内部燃烧的扰动能力,增强混合,强化燃尽。

结合烟气再循环系统,通过抽取一定比例烟道中的低温烟气,与二次风混合后送入炉膛内燃烧,循环烟气可降低二次风氧量,能够抑制  $\text{NO}_x$  的生成,同时能够提高二次风温度,有助于稳定燃烧。

#### 4.4 炉内 SNCR 技术

与 SCR 技术相比,SNCR 技术具有不单独占地、对锅炉改造较小、不消耗催化剂、成本低、经济性好等优点。但工业煤粉炉炉膛温度较电站锅炉低,为满足温度窗口的要求,喷氨位置可能由炉膛出口提前至炉膛内部,但需要结合炉膛氧量进行考虑,若氧量过高,则不利于 SNCR 反应进行。工业锅炉相较电站锅炉,容积更小,停留时间更短,如何组织射入方式,使还原剂在有限的空间和时间内能够迅速与烟气混合进而产生反应,很大程度上决定了工业煤粉炉上 SNCR 技术实际效率的高低。

#### 4.5 工业煤粉锅炉容量

锅炉容量、炉膛高度及容量大小不能保证煤粉在炉内充分燃尽。因此建议工业煤粉锅炉设计容量在  $35 \text{ t/h}$  以上。炉膛高度要充分考虑,炉膛容积热负荷不能太高。鉴于国外成功经验和国内技术实践,煤粉工业锅炉的开发推广应用符合国家节能减排政策导向,通过替代目前量大面广、能效普遍偏低的在用燃煤工业锅炉(特别是  $10 \text{ t/h}$  以下层燃炉)可大幅提高运行效率,实现节能目标,替代油气锅炉,节约优质能源<sup>[39]</sup>。

## 5 结 语

对于我国富煤烧油少气的资源现状,燃煤业锅炉数量庞大且不可能完全替代,作为仅次于火电厂的第二大燃煤锅炉,其污染物控制技术研发迫在眉睫。而工业煤粉锅炉具有高燃尽率,高锅炉效率,低氮氧化物排放等优势,在日渐严峻的环境形势下,具有很好的应用前景。尤其是适用于工业煤粉炉的低氮燃烧技术更需进一步研究。

#### 参考文献:

[1] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2018[M].北京:中

国统计出版社,2019.

- [2] 王逸飞.工业锅炉节能技术研究综述[J].应用能源技术,2016(7):25-28.
- [3] 余洁.中国燃煤工业锅炉现状[J].洁净煤技术,2012,18(3):89-91.
- [4] 周一工.中国循环流化床锅炉的发展:从低压到超临界[J].锅炉技术,2009,40(2):22-27.
- [5] 冯俊凯.小型工业锅炉燃烧煤粉的经验[J].锅炉技术,1989,20(1):9-11.
- [6] 梁俊宁,张振文,高晓庆,等.煤质对锅炉大气污染物排放量的影响[J].煤炭转化,2015,38(1):91-96.
- [7] 吕清刚,李诗媛,黄璨然.工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术现状与发展建议[J].中国科学院院刊,2019,34(4):392-400.
- [8] 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.
- [9] 王凡,刘宇,卢长柱,等.层燃锅炉低氮燃烧技术[J].环境工程,2014,32(1):140-143,152.
- [10] 赵钦新,陈晓露,邵怀爽,等.工业锅炉技术创新及发展[J].工业锅炉,2016(6):21-23.
- [11] 吴立新,余洁.美国燃煤工业锅炉技术[J].洁净煤技术,2009,15(6):53-56.
- [12] 张建辉.循环流化床锅炉与层燃锅炉燃烧技术特点分析[J].中国特种设备安全,2008(6):12-15.
- [13] 宋春燕,张鑫,李婷.高效煤粉锅炉替换层燃锅炉技术改造与能效分析[J].洁净煤技术,2015,21(3):98-102,106.
- [14] 杜海亮,张晶,罗永浩,等.不同配风方式下层燃炉煤粉  $\text{NO}_x$  析出特性研究[J].热能动力工程,2013,28(1):86-92.
- [15] 姚芝茂,滕云,李俊,等.中小型烟煤层燃炉  $\text{NO}_x$  排放因子的研究[J].环境科学研究,2009,22(11):1263-1268.
- [16] 姚芝茂,邹兰,王晟.中小型燃用烟煤层燃炉  $\text{NO}_x$  排放特征分析[J].环境工程学报,2010,4(2):422-426.
- [17] 姚芝茂,李俊,滕云.中小型燃用烟煤层燃炉  $\text{SO}_2$  生成特性研究[J].环境工程,2019,37(S1):277-282.
- [18] 季俊杰,罗永浩,陆方,等.分级燃烧对层燃炉  $\text{NO}_x$  减排的效果研究[J].锅炉技术,2016,47(S1):50-53.
- [19] 冯俊凯,沈幼庭,杨瑞昌.锅炉原理及计算[M].3版.北京:科学出版社,2003.
- [20] 贾鑫,王勤辉,胡赞,等.煤灰在流化床热解过程中对硫迁移特性影响[J].热力发电,2019,48(10):77-83.
- [21] 付少闯,周俊杰,张东伟.流化床锅炉气固流动特性数值模拟研究[J].低温与超导,2019(9):73-78.
- [22] 李燕,李文凯,吴玉新,等.600 MWe 超临界循环流化床锅炉的炉膛水冷壁传热[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(2):244-248.
- [23] 王维详.大型超临界循环流化床锅炉技术探析[J].特种设备安全技术,2016(4):12-15.
- [24] 蔡润夏,吕俊复,张缙,等.超超临界循环流化床锅炉流化床换热器热偏差形成的流动基础[J].锅炉技术,2016,47(S1):50-53.
- [25] 单雪媛,马志斌,郭彦霞,等.不同粒径循环流化床粉煤灰组成特性研究[J].煤炭科学技术,2018,46(11):232-238.
- [26] 李斌,滕昭钰,张尚彬,等.不同进气方式的流化床内颗粒混合

- 特性的数值模拟[J].动力工程学报,2019,39(2):85-91.
- [27] 薛晓垒,卢啸风,刘汉周,等.我国中小型循环流化床工业燃煤锅炉存在的问题及分析[J].工业锅炉,2010(1):13-16.
- [28] 王善武.我国工业锅炉节能潜力分析与建议[J].工业锅炉,2005(1):11-15.
- [29] 马培根,房靖华,雷小云.关于煤粉工业锅炉的技术分析与政策思考[J].环境与可持续发展,2011,36(5):28-33.
- [30] 岳涛.中国工业锅炉大气污染物排放时空分布特征及减排潜力研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [31] 王鹏涛,王乃继,程晓磊,等.煤粉工业锅炉空气深度分级数值模拟研究[J].洁净煤技术,2018,24(5):76-68.
- [32] 于清航.煤粉加工配送中心关键技术及经济性分析[J].洁净煤技术,2015,21(4):80-84.
- [33] 刘柏谦.能源工程概论[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [34] 张洪柱.高效工业煤粉炉替代传统工业锅炉的实践与研究[D].天津:天津大学,2017.
- [35] 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.
- [36] DRISCOLL J F, CHEN R H, YOON Y. Nitric oxide levels of turbulent jet diffusion flames: Effects of residence time and damkohler number[J]. Combustion and Flame, 1992, 88(1): 37-49.
- [37] 程晓磊.低氮燃烧技术在煤粉工业锅炉上的应用[J].洁净煤技术,2018,24(4):109-113.
- [38] 杨晋芳.工业燃煤锅炉燃烧优化关键技术探析[J].煤质技术,2019(1):61-64.
- [39] 何心良.我国工业锅炉使用现状与节能减排对策探讨[J].工业锅炉,2010(3):1-8.