

文章编号: 1005-8893 (2004) 01-0061-04

循环流化床锅炉的特点、现状及在我国的发展前景

肖立川¹, 薛国新², 王政伟¹

(1. 江苏工业学院 机械工程系, 江苏 常州 213016; 2. 江苏工业学院 计算机科学与工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 指出了循环流化床燃烧锅炉具有 NO_x 排放低、脱硫效果好、能烧劣质煤且燃烧效率高、负荷调节能力强等优点, 介绍了近年来在国内外的的发展状况, 并从我国的以煤为主要能源结构的状况和对环境保护越来越高的要求出发进行分析, 指出循环流化床锅炉在我国具有广阔的发展前景。

关键词: 循环流化床锅炉; 发展; 前景

中图分类号: TK 229.6

文献标识码: A

循环流化床 (CFB) 燃烧锅炉是近 20 年发展起来的一种新型锅炉。由于它具有氧化氮排放低、脱硫效果好、负荷调节性能好、能烧劣质煤等一系列的优点, 因此近年来在国内外得到了迅速的发展。我国是世界上燃煤量最大的国家, CFB 在我国一定具有广阔的前景。

1 循环流化床锅炉的特点

循环流化床 (CFB) 燃烧技术作为一种新型成熟的高效低污染清洁燃煤技术, 具有许多其它燃烧方式没有的优点^[1,2]。

1.1 污染物排放量低

二氧化硫和氮氧化物的排放量都远低于煤粉炉, 达到环保排放量的标准。在 CFB 锅炉中, 通过加入石灰石 (CaCO_3) 或白云石 ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) 进行脱硫。由于炉内燃烧温度 ($825 \sim 850^\circ\text{C}$) 正好是脱硫反应的最佳温度范围, 再加上石灰石随床料多次循环, 使石灰石的利用率大大提高, 在 Ca/S 为 $1.8 \sim 2.5$ 时, 脱硫效率可达 90% 以上, 排放烟气中 SO_2 质量分数可低于 0.035%。而其脱硫的初投资及运行费用都远低于煤粉锅炉。同样由于较低的燃烧温度, 加以分级送风, 使 CFB 锅炉排放的 NO_x 可小于 0.01%^[3], 是煤粉燃

烧锅炉的 $1/3 \sim 1/4$ 。而对煤粉炉即使采用了低 NO_x 燃烧器, 其 NO_x 的排放仍在 0.04%~0.06% (对烟煤) 和 0.065%~0.1% (对无烟煤) 的范围内, 达不到排放要求。国外有采用催化还原脱硝技术, 可使 NO_x 排放控制在 0.01% 以下, 但其价格相当昂贵, 目前只在少数发达国家采用。

1.2 燃料适应性广, 燃烧效率高

适合于低热值劣质煤。由于大量灰粒的稳定循环, 热容量大, 使新加入 CFB 锅炉的燃料只占床料很小的份额, 又由于燃料在 CFB 内呈“流态化”燃烧, 使其中的质量和热量交换非常充分, 这就为新加入燃料的预热、着火创造了十分有利的条件。而未燃尽的煤粒子通过多次循环既可增加其在炉内停留的时间又可多次参与床层中剧烈的质量和热量交换。这就使 CFB 锅炉可燃用几乎所有种类的煤种及各种低热值、高灰分或高水分的矽石、石油焦、工农业垃圾及城市垃圾。

1.3 负荷调节性能好

不投油最低稳定负荷可降到额定负荷的 20% 左右。这是因为 CFB 锅炉中物料的循环量是可以调节的, 因而 CFB 锅炉的负荷可以很低, 而不会象煤粉炉那样在低负荷的情况下容易熄火。

收稿日期: 2004-02-16

作者简介: 肖立川 (1946-), 男, 江苏靖江人, 教授。

1.4 截面热强度高

由于流化床中剧烈的质量和热量交换,不仅使燃烧过程能在较小截面内完成,还使床内和烟气与水冷壁之间的传热系数也大大增加,其炉膛热负荷可达 $1.5 \sim 2 \text{ MW/m}^2$,是煤粉炉的 8~11 倍,这就使 CFB 锅炉的炉膛截面和容积可小于同容量的链条炉和煤粉炉。

1.5 燃料制备系统相对简单

仅需将煤破碎成 $0 \sim 1 \text{ mm}$ 的颗粒后送入 CFB 锅炉中燃烧,而不需煤粉炉复杂的制粉系统。

1.6 灰渣综合利用性能好

由于灰渣处于中温活性区,无二次灰渣污染,容易实现综合利用,如可做水泥填料,也可用于稀有金属的提取。

CFB 锅炉主要缺点是烟—风系统阻力较高,受热面磨损问题比较严重,对辅助设备要求较高,某些辅助设备,如冷渣器或高压风机的性能或运行问题都可能严重影响锅炉的正常安全运行。这些问题在 CFB 锅炉的发展过程中大多已经得到较好的解决。如适当的炉膛设计可完全避免水冷壁的磨损;正确选择和设计分离器,既可保证很高的分离效率也能避免自身的磨损;而冷渣器 and 高压风机等主要辅助设备随着 CFB 锅炉的发展,也都有了成熟的产品。

2 国外 CFB 锅炉发展现状

由于对环境保护的日益严格的要求,近 20 年来,CFB 锅炉在国外得到了迅速发展,技术已趋于成熟。无论是锅炉本体的大型化还是各种配套技术和设备,都已经能适应用户的各种不同要求。国外 CFB 锅炉技术已经形成了几个各具特色的主要炉型。

2.1 德国鲁齐 CFB 锅炉

其特点是采用高循环倍率,高温旋风分离器和外置流化床热交换器。目前这种 CFB 锅炉的大型化问题已顺利解决,最大容量锅炉是装在法国普罗旺斯 (Provence) 电厂配 250 MW 机组的 700 t/h 亚临界压力 CFB 锅炉。该锅炉已于 1996 年 4 月投入商业运行^[4]。

2.2 芬兰奥斯龙 CFB 锅炉

其特点是采用高循环倍率,高温旋风分离器,在炉膛内布置少量受热面但不设外置流化床热交换器。这种锅炉的大型化问题也已经解决。最大容量的是装在美国宾夕法尼亚州约克郡的 783 t/h 亚临界压力 CFB 锅炉 (配 250 MW),该锅炉已于 1997 年上半年投入商业运行^[5]。

2.3 福斯特惠勒 CFB 锅炉

已占有较大的 CFB 锅炉市场,规模从较小的工业 CFB 锅炉到几百 MW 级的公用电站 CFB 锅炉。其炉型与奥斯龙相近,其主要不同在于使用水冷高温旋风分离器和在大型亚临界 (或超高压) 锅炉上采用特殊的循环灰/过热蒸汽热交换器。我国镇海炼油厂 $2 \times 220 \text{ t/h}$ CFB 锅炉、四川内江的 410 t/h CFB 锅炉都是引进 Foster Wheeler 的 CFB 的技术^[6]。

2.4 美国巴特尔 CFB 锅炉

是美国巴特利试验室开发的一种多固体 CFB 锅炉。其特点是采用专门的惰性固体作床料,且其密相区下部不布置受热面,因而对煤的粒度要求不高。按其设计意图,大颗粒煤 (如 20 mm 或更大) 可通过不断循环使其燃尽。这种炉型的最大容量是日本三井的 300 t/h 多固体 CFB 锅炉。目前采用这种炉型的用户较少。

2.5 德国巴高克 CIRCOFLUIDCFB 锅炉

这是德国巴高克在欧共体资助下开发的一种低速 (低倍率) CFB 锅炉,其设计意图是尽可能将鼓泡床和高速循环床的优点很好地结合起来。其特点是采用低的循环倍率和中温 ($400 \sim 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 旋风分离。锅炉采用塔式布置,在分离器前、炉膛稀相区的上方布置大量对流受热面。这种锅炉的结构相对简单,但大型化,特别是再热器的布置,有一定困难。目前最大容量的这种锅炉是装在捷克的燃褐煤的 350 t/h 高压电站锅炉。

2.6 美国巴威内循环锅炉

这种锅炉的特色是采用高速床和两级分离器。在炉膛出口前后的高温区装有两组 U 型 (惯性) 分离器作为第一级分离,而分离下来的飞灰将在炉膛上部形成内部循环。据介绍,其累计分离效率可

达 95%~97%。在锅炉尾部省煤器之后还有一多级旋风分离器作第二次分离, 二级分离器分离出来的细颗粒借助气动力或重力输送系统返回到炉内。这种锅炉的结构使炉内传热效率高、炉温控制能力强、碳和吸附剂颗粒停留时间长, 并使锅炉的高度和占地面积都相对较小。目前最大容量的这种锅炉是装在美国宾夕法尼亚州的燃高灰份煤(含灰量达 45%) 的 211 t/h 高压 CFB 锅炉^[5]。

3 国内发展情况

我国虽然早在 60 年代初就开始发展鼓泡(流化)床锅炉, 但 CFB 锅炉的起步较晚, 直到 1989 年 11 月才有首台 35 t/h CFB 锅炉在山东明水电厂投入运行。此后 CFB 锅炉的生产和应用得到了迅速的发展。经过十多年的快速发展, 中小型 CFB 技术在我国已趋于成熟。近年来我国热电建设中广泛采用 CFB 锅炉, 目前国内已有近 20 家锅炉厂能生产 CFB 锅炉的本体, 在运行的 CFB 锅炉已达 1 200 多台, 其中 90% 以上是 75 t/h 以下的小型 CFB 锅炉, 大型 CFB 锅炉也正在加速进行并已取得一定进展。世界最大循环流化床工程四川白马 30 万千瓦示范电站已于 2003 年 8 月全面开工(引进阿尔斯通公司技术)。在这些运行或在制造中的 CFB 锅炉中, 绝大部分是国内科研单位、大专院校和锅炉制造厂联合攻关开发研制的、具备自主知识产权的产品, 只有少量是引进技术生产的。自行研制或生产的 CFB 锅炉主要有以下几种。

3.1 两级分离 CFB 锅炉

中科院工程热物理所开发的两级分离 CFB 锅炉, 其最初设计采用简单的高温百叶窗分离器, 经多次改进, 包括在尾部加装旋风分离器, 较好地解决了分离效率不高, 出力不足和受热面磨损等问题。目前已有大量这种锅炉在运行中, 绝大部分为 75 t/h 级中压锅炉。较大型的有与武汉锅炉厂联合开发的 220 t/h CFB 锅炉, 与上海锅炉厂有限公司联合攻关的 135 MW 级超高压再热循环流化床锅炉已经投入运行, 并开始了 200 MW~300 MW 等级循环流化床锅炉的研发工作。

3.2 炉内分离 CFB 锅炉

清华大学开发的炉内分离 CFB 锅炉, 采用炉内分离, 其最初设计采用简单的平面流分离器。为解决分离效率不高, 出力不足和受热面磨损等问

题, 经多次改进和试验, 以炉内异型水冷分离器取代平面流分离器, 获得良好的效果。目前运行中的这种 CFB 锅炉也多为 75 t/h 级中压锅炉, 更大的、高压的机组尚在建设过程中。

此外, 还有清华大学与另一些锅炉厂联合开发的三旋涡水内冷分离器 CFB 锅炉, 哈工大与一些工厂开发的低倍率 CFB 锅炉, 华中科技大学与一些工厂联合开发的下排气旋风分离器 CFB 锅炉, 西安热工研究院与一些工厂联合开发的 CFB 锅炉, 以及一些锅炉厂利用国外技术合作生产的 CFB 锅炉, 如与德巴(BLK)、阿尔斯通(Alstom)、美国福斯特惠勒(Foster Wheeler)、日本石川岛播磨重工(IHI)、三井造船(MES)、瑞典KVAERNER等大公司合作等公司合作生产的 CFB 锅炉^[5]。

4 国内 CFB 锅炉发展前景

由于工业化的出现, 人类生态环境的日益恶化, 从 1950 年到 1990 年全球的二氧化硫排放量增加了约 1 倍, 目前已超过 1.5 亿 t/a。全球氮氧化物的排放量也接近 1 亿 t/a。造成二氧化硫和氮氧化物的主要原因是矿物燃料的大量燃烧, 而在矿物燃料中主要是煤。

我国是世界上少数几个以煤为主要能源的国家之一, 占能源消耗的 70%。探明的储量已超过 1 万亿吨, 占我国石化燃料总储量的 95% 以上, 居世界第三位。目前国内年煤炭消费量在 12.8 亿 t 左右^[7], 这种以煤为主的结构在相当长的时间里不会有根本的改变。我国煤炭中含硫量大于 1% 的高硫煤占 25% 以上, 平均含硫量约为 1.1%, 燃烧高硫煤导致大量的 SO₂ 排放, 而 SO₂ 是形成酸雨的重要组成部分。2002 年全国废气中二氧化硫排放量达 1 927 万 t, 其中工业二氧化硫排放量为 1 562 万 t, 占二氧化硫排放总量的 81.1%^[8]。

随着环境问题对燃煤电站提出了新的、更高的要求, 它要求不仅要效率高、投资少、可靠性好、燃料适应性广, 更重要的是要求低排放。节约能源与环境保护已成为现有燃煤技术所需解决的主要问题。因此寻求一种高效、低污染燃烧技术, 开发新的燃烧设备成为当务之急。

为清洁、高效地利用煤炭资源, 不少国家的能源和电力行业进行了大量的试验研究和开发工作。出现了许多清洁、高效地利用煤炭的技术和洁净燃煤发电系统。到目前为止, 只有 CFB 锅炉、整体

煤气化联合循环发电系统和压力流化床联合循环发电系统已经（或趋于）成熟并实现商业化。但后两种的技术较为复杂且初投资高而难于迅速推广，中国 21 世纪议程^[9]优选项目计划引进建设 200 MW 煤气化联合循环发电（IGCC）示范电厂，项目共需 3.11 亿美元；引进建设 150 MW 燃煤增压流化床联合循环示范电厂预计需资金 8 700 万美元。

在降低煤粉燃烧锅炉污染排放问题上虽然已作了很多努力，但技术经济上存在着局限性。如采用低 NO_x 燃烧器，但 NO_x 排放仍然在 400 ~ 600 mg/m^3 ，而且还在一定程度上影响燃烧效率。

因此，针对我国的能源以直接燃烧原煤为主、燃煤与环保的矛盾日益突出、我国电厂负荷调节范围较大的特点，CFB 锅炉已成为首选的高效低污染的新型燃烧技术。无论从技术经济上还是从环境保护的社会效益上讲，CFB 锅炉都是非常适合我国国情的。可以说，CFB 锅炉在我国仍将具有广阔的市场前景。

参考文献：

- [1] 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．
- [2] 陈学俊，陈听宽．锅炉原理 [M]．北京：机械工业出版社，1991．
- [3] Belin F, Maryamchik M, Walker D J. Babcock & Wilcox CFB Boilers—Design and Experience [A]. 16th International Conference on FBC [C]. Reno, Nevada, McDermott Company, 2001.
- [4] Adarling S L. The Lurgi/CE Circulating Fluidized Bed Boilers Design and Operating [A]. Proceedings of the 1st International Conference on Fluidized Bed Combustion [C]. 1984.
- [5] Gamble R, Hyppanen T. Pyroflow Compact, A Second Generation CFB Boiler by Ahlstrom Pyropower [A]. Proceedings of the 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion [C]. San Diego, ASME Press, 1993.
- [6] 陈干锦．循环流化床锅炉在我国的发展 [J]．锅炉技术，2002，33（7）：1—6．
- [7] 国家计委经济所中国经济形势与政策研究中心、新华在线．中国行业景气分析报告 [R]．2002—2003．
- [8] 国家环境保护总局．全国环境统计公报（2002 年）[R]．2003—06—05．
- [9] 中国 21 世纪议程 [M]．北京：（中国 21 世纪人口、环境、与发展白皮书）中国 21 世纪议程管理中心出版，2002．

The Characteristics, Status and Prospect of Circulating Fluidized Bed Boilers in China

XIAO Li—chuan¹, XUE Guo—xin², WANG Zheng—wei¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou, 213016, China; 2. Department of Computer Science and Technology, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou, 213016, China)

Abstract: This paper points out the merits of CFB boiler such as low NO_x emission, high desulphurization efficiency, high combustion efficiency on poor quality coal, wide load control range and good load response. It reviews the recent development on CFB boiler around the world and points out that CFB boiler has a bright future in our country by analyzing the situation that our country's energy infrastructure is based mainly on coal and that the requirement for environmental protection is becoming increasingly strict.

Key words: circulating fluidized bed boilers; development; trend