

内循环流化床锅炉技术及发展前景

王怀彬 张子栋 董勇 (哈尔滨工业大学)

袁松 (哈尔滨工业锅炉厂)

[摘要]本文介绍了内循环流化床锅炉的定义,及国内外研究者对发展内循环流化床锅炉所做出的重要贡献,并指出,内循环流化床锅炉必将成为工业锅炉的主导产品。

关键词 锅炉 内循环 流化床 述评

分类号 TK229.66

1 ICFB 锅炉研究背景及特点

循环流化床锅炉以其特有的一系列突出优点,受到世界各工业技术发达国家的高度重视,并以惊人的速度发展。从世界上首台循环流化床锅炉建成至今,仅十几年时间,单机容量 500 t/h 的大型循环流化床锅炉已投入稳定运行^[1~3]。但是,经过进一步技术经济比较后,权威人士认为,容量小于 100 t/h 的循环流化床锅炉没有明显的优越性^[4]。国际上几家掌握循环流化床锅炉技术的大公司,近年来也仅发展大容量循环流化床锅炉。世界上最早发展循环流化床锅炉的西德鲁奇(Lurgi)公司和芬兰奥斯龙(Ahlstron)公司,出售该种锅炉的平均容量分别为 160 t/h 和 120 t/h^[1]。其主要问题是:在小容量范围内,投资成本过高,运行维护费用大,系统复杂操作不便等。为解决上述问题,在近五年内,研究了内循环流化床锅炉(ICFB, Internal Circulation Fluidized Bed)。关于内循环流化床锅炉定义,作者在以前的研究论文中多次用

过^[5~8]。国内研究者也曾使用过^[9,16]。1991年国外研究者 Jason, Makansi 也公开发表了介绍内循环流化床的文章^[10]。它不仅具有循环流化床锅炉燃料适应性广、燃烧效率高、高效脱硫、氮氧化物排放低、负荷调节比大及负荷调节快等优点,还具有结构简单紧凑、投资省、运行维护费用低、操作控制容易等特点。目前已成为国际煤燃烧界研究热点。不仅中国、美国、德国、日本、前苏联、澳大利亚和英国等均开展了内循环流化床锅炉技术的研究,其中有些国家已开始进入工业应用阶段^[11,12]。

2 ICFB 锅炉类型

根据粒子在炉内的分离机理,可把现有的内循环流化床锅炉分为三种类型:即在炉内稀相区实现立式旋风分离、在炉内稀相区实现卧式旋风分离和在炉内稀相区实现冲击惯性碰撞分离。下面将介绍作者及其它作者

收稿日期 1994-11-18 修改定稿 1995-04-02

黑龙江省自然科学基金资助项目

本文联系人 王怀彬 男 1953年生 副教授 150001 哈尔滨工业大学动力工程系热工教研室

研究出的创意精巧的内循环流化床锅炉 (ICFB) 及其实现粒子炉内分离循环的机理。

2.1 哈尔滨工业大学研制的 ICFB 锅炉

(图 1)

粒子在炉内分离循环是由装在稀相区的气固分离器实现的。气固分离器中设置有若干个带一定立面角和切面角的喷管,当气流均匀地通过这些喷管时,在炉内稀相区便形成强烈的高速下旋流场。当床内上浮粒子被引入该流场时,由于其自身质量的存在,必然受到离心力的作用。当该离心力足够大时,粒子便被甩向壁面而分离。粒子不断地由床内带出上浮,又不断地返回,即实现了炉内循环流化燃烧与传热。

该内循环机理是作者 1985 年提出的,1988 年正式获得中国专利^[12]。其主要特点

是:巧妙地把上部稀相区与分离器捕集分离空间合为一体,在此处粒子既进行燃烧,又产生内分离循环。由于下旋流的作用,整个稀相区扰动强烈,混合充分,粒子停留时间长,传热及燃烧效率高。同时,又由于属分级低温燃烧,物料炉内循环,大大提高了脱硫剂利用率和脱硫率,有效降低 NO_x 和 SO_x 的排放量。对已建成的 1.4 MW 该型 ICFB 锅炉燃烧 I 类烟煤进行热工测试,结果为,燃烧效率达 97.15%。

美国 Catholic 大学 G·Yang、S·Nieh 和东南大学赵长遂等,在图 2 所示的试验模型上进行了类似研究。不同的是,他们在稀相区布置了上下两至三层仅有下切面的喷管。他们发表了不少有关研究报告^[13,14,15]。

1995 年 S·Nieh 又与浙江大学合作,准备开发类似的 ICFB 锅炉。浙江大学岑可法教

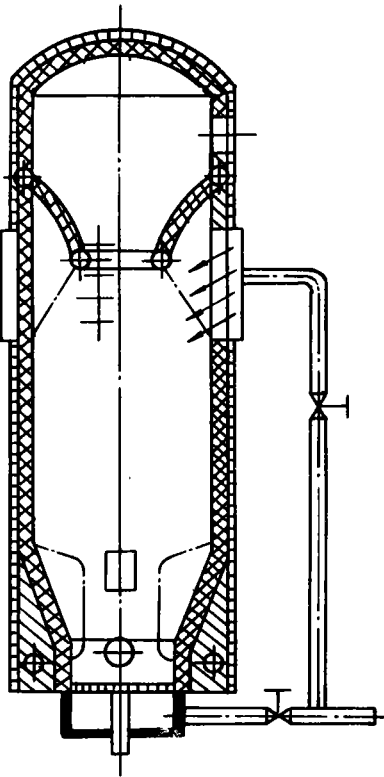


图 1 哈尔滨工业大学研制的 ICFB 锅炉

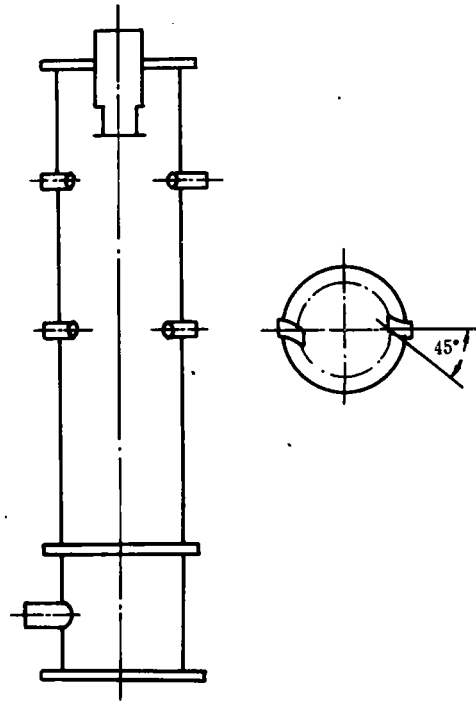


图 2 美国 Catholic 大学、东南大学的 ICFB 锅炉试验台

授等也对循环流化床中加入切向二次风,从而达到内循环分离进行了数值模拟^[16]。

广州能源所缪德林等在流化床上部,四角布置可燃气体喷燃器,在炉膛中心形成切圆,即平面旋流,从而延长了细粒子在高温区的停留时间,提高了燃烧效率^[17]。

2.2 清华大学与北京锅炉厂合作研制的ICFB锅炉

图3所示为该锅炉简图,采用“V”型布风板分级燃烧,粒子在炉内分离循环是由装在稀相区的卧式旋风分离器实现的。当床内上浮的气固混合物被切向引入卧式旋风分离器时,便在其中强烈旋转,粒子由于离心力的作用被分离,并经壁式多孔半自流阀送回密相床。如此周而复始,即实现了炉内循环流化燃烧和传热。

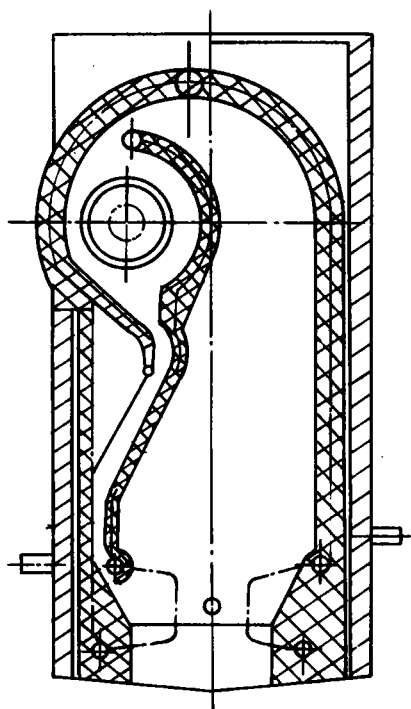


图3 清华大学与北京锅炉厂合作研制的ICFB锅炉

该锅炉的卧式旋风分离器阻力损失小,分离效率高。当燃用低热值无烟煤末与造气炉渣的混合燃料时,燃烧效率达(97.04~98.58)%^[11]。

东北电力学院也进行了类似的研究,并在20 t/h工业锅炉上试验成功,并通过鉴定,已申报国家专利。

2.3 西德研制的ICFB锅炉

图4所示为该锅炉简图,粒子在炉内分离循环是由装在主燃烧室上部的槽型冲击式惯性分离器实现的。当床内上浮的气固混合物进入该分离器时,由于惯性碰撞的作用,粒子被由气流中分离出来,沿壁面返回到密相床。如此循环往复,即实现了炉内循环。

该锅炉的特点是:分离器阻力损失小,

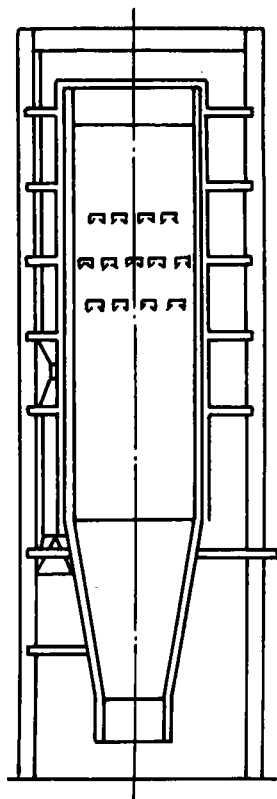


图4 西德研制的ICFB锅炉

动力消耗少,热惯性小,锅炉启动和负荷跟踪能力好,稀相区物料分布均匀,传热强,燃烧效果好。

3 ICFB 锅炉关键技术的研究

3.1 第一种类型的 ICFB 锅炉的重要研究成果

作者主要完成以下几方面工作:

3.1.1 以床内粒子最小带出率为优化目标,对 16 种可能组合的不同空间角度的喷管及 7 种可能的布置方式,进行了优化实验研究,得到了喷管立面角与切面角空间的最优组合数值以及对称密布为最佳的喷管布置方式^[18]。

3.1.2 在优化的喷管空间角度及其布置方式条件下,对气固分离区进行了两相流实验研究,得到了下述结论:第一,强下旋流场切向速度最大值发生在距壁面一定距离处,在近壁区的切向速度有所减小,下旋流场的旋转及扰动波及到床轴心区域,并使该区域的气流具有一定的旋转强度,轴向速度在喷管中部截面附近出现负值,有利于粒子的内循环;第二,粒径越大,床位越高,分离效率越高,飞出炉外的粒子直径随床高的增加而减小;第三,二次风率存在最佳范围,分离效率先随二次风率及射流速度的增加而增加,然后下降^[19]。

3.1.3 在较低的循环倍率 K 下,ICFB 锅炉中含碳粒子分离效率 η_t 与燃烧效率 η_r 之间存在如下关系^[6]:

K 与 η_r 的关系为:

$$K = \frac{C^y(\eta_r - \eta_1)}{A^y a_{fn} \eta_2} + \frac{(\eta_r - \eta_1)}{N(1 - \eta_r) \eta_2} + 1$$

η_t 与 η_r 的关系为:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\frac{C^y(\eta_r - \eta_2)}{A^y a_{fn} \eta_2} + \frac{(\eta_r - \eta_1)}{N(1 - \eta_r) \eta_2} + 1}$$

式中, η_1 、 η_2 分别为燃料颗粒一次通过炉膛的

燃烧效率和参与循环的含碳粒子的燃烧效率; C^y 、 A^y 分别为燃料的应用基碳和灰分; a_{fn} 为飞灰粒子份额; N 为参与循环的含碳粒子组份与飞灰粒子组份的比例系数^[6]。

其它研究者对如图 2 所示的带切面角的 ICFB 锅炉的颗粒质量流率进行了详细测试。结果表明,在此条件下,质量流率沿床高方向呈马鞍形分布,二次风喷口高度出现波谷,喷口上附近出现峰值,质量流率沿床高衰减快,沿径向分布很不均匀,中心区很低,近壁区比中心区高得多^[13,14]。他们还对气固悬浮流进行了数值模拟。

3.2 第二种类型的 ICFB 锅炉的重要研究成果

研究者对卧式旋风分离器和壁式多孔半自流阀进行了一系列实验研究,得到了以下结论:第一,分离器结构简单紧凑,效率高,放大对细粒的分离效果不敏感,水冷,耐磨,启停可快。其阻力约 300 Pa,分级效率 η_k 与粒径 d_p 有下列关系:

$$\eta_k = 1 - \exp[-2 \ln 2 (\frac{d_p^{0.5873}}{8.6})\%]$$

第二,分离器由主旋涡室、次旋涡室和端部旋涡室构成。次旋涡室能有效地降低回料道入口处的二次夹带问题,端部旋涡室主要依靠惯性分离;第三,数值计算得知,常温下,端部旋涡室内 $d_p \geq 8 \mu\text{m}$ 的颗粒可以全部被分离出来, $d_p < 8 \mu\text{m}$ 的可以部分被分离出来,具体数值与入口位置有关。在 900℃ 烟温下,相应数值为 $d_p \geq 11 \mu\text{m}$,与实验值基本接近;第四,壁式多孔半自流阀能自动建立料封,加少量二次风后,可大大提高回送量,调节范围大,回料在炉内分布均匀,有利于燃尽和脱硫剂反应^[11]。文中给出了回料特性曲线。

3.3 第三种类型的 ICFB 锅炉的重要研究成果

槽型冲击式惯性分离器是关键部件。国外资料并未公开报导其研究结果。作者在实

验研究的基础上,进一步研究探讨了该分离器的计算模型。经实验及理论研究得到如下有益的结论:

3.3.1 槽深与槽宽之比 b/a 最佳值为 $1:1$;

3.3.2 槽型分离元件之间的最佳横向相对节距 $S_1/a = 2.38$;最佳纵向相对节距 $S_2/b = 1.60$;纵向排数为 $4 \sim 6$ 排;

3.3.3 槽型惯性分离器分离效率随 st_k 数的变化规律为: $\eta_s = 1/(1.11 + 1/st_k)$;

3.3.4 理论上可以把槽型分离元件内粒子的分离机理归结为“惯性碰撞”与“离心分离”综合作用的结果。惯性碰撞的捕集分离效率为: $\eta_s = a_1/a$, 其中 a_1 为上下两极限轨迹的距离。离心分离效率为:

$$\eta_c = 2[(1 + \frac{4\rho_s d_{2k} Q_1 \varphi}{\mu f a^2 L \ln 1.5})^{\frac{1}{2}} - 1]$$

其中 φ 为转角, $f = 1 + Re^{\frac{2}{3}}/6$, L 为分离元件长度, Q_1 为进口流量, μ 为气流粘度。分离元件的综合捕集分离效率的串联模型为: $\eta_z = 1 - (1 - \eta_s)(1 - \eta_c)$, 即粒子被某一机理捕集分离, 则不再被另一机理捕集分离;

3.3.5 槽型分离器的分离效率模型为: $\eta = 1 - (1 - \eta_2)^i$, 其中 i 为分离元件的纵向排数。

4 在中国发展 ICFB 锅炉的前景

中国由于燃料政策的限制,工业锅炉几乎全部都是燃煤锅炉。据 1988 年统计,全国拥有工业锅炉 33 万多台,50 万蒸吨,容量为 $0.1 \sim 65$ t/h, 压力 ≤ 2.5 MPa, 年燃用煤 3 亿吨左右,占全国煤碳产量 $1/3$ 。这些锅炉中,层燃炉占 90% 以上,其存在的主要问题是运行热效率低,平均为 65% 左右;烟尘污染环境, SO_2 、 NO_x 等有害气体造成的严重环境污染无法解决。

如前所述,ICFB 锅炉技术上已趋于成熟,基本达到了工业化应用阶段。它的出现,从根本上解决了小容量工业锅炉在应用循环

流化床燃烧技术上主要存在的成本高和自用电耗高的问题。ICFB 锅炉的热效率比一般层燃工业锅炉高出 (10 ~ 15)%。由于低温燃烧,或分级燃烧, NO_x 的生成量远低于层燃炉,通常不采用专门的脱硝设备,即可使烟气中的 NO_x 排放量达到目前的环保要求。又由于能在炉内脱硫而不需要炉外设置价格昂贵的烟气脱硫设备,即能满足环保标准对 SO_2 排放量的限制。

ICFB 锅炉的燃料适应性广,尤其能较好地燃用一般层燃炉所无法燃用的劣质燃料,如煤矸石、石煤、油页岩、生物燃料、城市垃圾等。

ICFB 锅炉较一般层燃炉易实现燃烧过程的自动控制。

总之,无论从节约能源、保护生态平衡、劣质燃料利用,或是从综合技术经济指标角度考虑,在中国工业锅炉中大力推广 ICFB 锅炉都无可置疑。ICFB 锅炉技术是在总结了循环流化床燃烧技术应用中小工业锅炉时存在的成本高、电耗大等问题的基础上开发研制的。因此,它更有针对性和先进性。实践证明,该技术不仅适合我国国情,也已广为世界各国所认可。随着环保标准的日益严格和节能工作不断深入,ICFB 锅炉最终取代工业层燃锅炉,不久的将来,在我国将有着广阔的发展远景。

参 考 文 献

- 1 冯俊凯,毛健雄.煤燃烧技术发展前景预测.动力工程,1990,10(6)
- 2 张凤民.循环流化床锅炉的调研报告.全国工业锅炉循环流化床技术论文集,1992;20~28
- 3 林志杰,刘德昌等.循环流化床锅炉设计若干问题探讨.全国工业锅炉循环流化床技术论文集,1992;35~46
- 4 Prabir Basu, Scott A. Fraser. Circulating fluidized bed boilers design and operations. Butterworth-Heinemann, 1991
- 5 王怀彬,陈崇枢等.内循环流化床及其粒子带出率的试

- 验研究. 热能动力工程, 1991, 6(6)
- 6 王怀彬. 内循环流化床锅炉含碳粒子的分离与燃烧效率的研究. 应用能源技术, 1991(4)
- 7 王怀彬, 何伟才等. 内循环流化床除尘效率的试验研究. 环境保护, 1991(7)
- 8 王永武, 王怀彬等. 内循环流化床分离效率的影响因素的试验研究. 热能动力工程, 1994, 9(2)
- 9 姜秀民, 孙 健. 高效低污染炉内循环燃烧工业流化床锅炉系列设计. 全国工业锅炉循环流化床技术论文集, 1992: 60~63
- 10 Jason Makansi. Fluidized-bed boilers, -Internal circulation. Power, 1991, 135(3): 20~22
- 11 曹柏林, 宋泽唏等. 带旋风分离器的循环流化床锅炉的试验研究. 动力工程, 1990. 10(6)
- 12 王怀彬. 中国专利. 内除尘沸腾床燃烧室. 87213069, X, 1988.
- 13 Yang G, Nieh G. On the suspension layers in the freeboard of vortexing fluidized beds. Power Technology, 1989, 57, 171~179
- 14 赵长遂. 旋涡流化床悬浮段气固悬浮流试验研究. 东南大学学报, 1990, 20(2)
- 15 赵长遂. 旋涡流化床自由空间冷态气-固流场研究. 第五届全国流态化会议论文集, 北京, 1990, 4: 296~300
- 16 岑可法, 樊建人等. 循环流化床中加入切向二次风后气固多相流动的研究. 工程热物理学报, 1990, 11(4)
- 17 缪德林, 李戩洪等. 流化旋涡综合燃烧电站锅炉研究. 第六届全国流态化会议论文集, 1993, 317~322
- 18 王怀彬, 赵广播等. 内循环流化床下旋流喷嘴角度的优化及其布置方式. 哈工大学报, 1996
- 19 王怀彬, 李瑞扬等. 内循环流化床气固分离两相流实验研究. 哈工大学报, 1995, 27(1)
- 20 王怀彬, 张子栋等. 低倍率循环流化床锅炉槽型惯性分离器分离机理的研究与探讨. 哈工大学报, 1993, (3)
- 21 何伟才, 张子栋, 王怀彬. 低倍率循环流化床锅炉槽型惯性分离器的试验研究. 热能动力工程, 1993. 8(1)
- 22 上官新会, 张子栋等. 冲击式惯性分离器效率及影响因素的试验研究. 热能动力工程, 1991, 6(6)
- 22 何佩敷. 开发我国循环流化床锅炉的燃烧技术. 热能动力工程, 1992, 7(3)

敬 请 注 意

敬告广大读者、作者及有关单位, 由于我编辑部工作地点已发生变化, 现工作地点为: 哈尔滨市香坊区红旗大街 108 号

通讯地址: 哈尔滨 77—7 信箱热能动力工程编辑部

联系电话: 5650900—2092 邮政编码: 150036

热能动力工程编辑部

(CWM) of High Concentration and Its Effect on Flow Characteristics in Pipes [刊,中]/Meng LingJie (Shandong Polytechnical University), Zhang Mingyao (Southeastern University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):85~88

By combining theoretical analysis with experimental research discussed is the slip phenomenon of coal water mixture (CWM) of high concentration flowing in pipes. An analysis is given of the effect of "slip layer" on the flow characteristics of the CWM in pipes. The authors have also come up with a new method for correcting the wall slip of CWM. flowing in pipes and obtaining a true rheological model of the CWM. **Key words:** coal water mixture, slip phenomenon, flow properties

流化床煤燃烧中氮氧化物的生成机理=A study on the Generation Mechanism of Nitrogen-Oxygen Compound During the Process of Fluidized Bed Coal Combustion [刊,中]/Feng Bo, Lin Zhijie, Yuan Jianwei, Cai Xuejun, Liu Dechang (Middle China University of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):89~94

The generation mechanism of N_2O and NO_x during the process of fluidized bed coal combustion is studied in a fluidized bed reactor and a fixed bed reactor. N_2O and NO_x in the fluidized bed coal combustion are found to come mainly from the nitrogen in the coal, i. e. volatilization nitrogen and coke nitrogen, and NO_x is partly from the N_2 in the air. The volatilization nitrogen is mainly in the form of HCN and NH_3 to generate N_2O and NO_x by means of equal phase reaction, and the resultant of N_2O and NO_x from the coke nitrogen is by multi-phase reaction. The removing mechanism of N_2O is different from that of NO_x . The removal of N_2O is by means of the reduction reaction between the hydrogen atom and the oxygen atom, the catalysis-reduction of the solid state substance in the bed layer and self thermal decomposition, and the removal of NO_x is by means of the reaction with CO_2 H_2 NH_3 and coke under the catalysis of solid state substance. **Key words:** Fluidized Bed Reactor, Fluidized Bed Combustion, Nitrogen-Oxygen Compound

内循环流化床锅炉技术及发展前景=Internal Cycle Fluidized Bed Boiler Technology and Its Development Prospects [刊,中]/Wang Huaibin, Zhang Zidong, Dong Yong (Harbin Institute of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):95~100

A definition is given of the internal cycle fluidized bed boiler along with an overview of the major contributions made by experts at home and abroad involved in the development of the said boiler. The authors hold that the above mentioned boiler will eventually be listed as a predominant product among industrial boilers. **Key words:** boiler, internal cycle, fluidized bed, overview

燃机应用于商船的现状和展望=The Present Status and Future Prospects of the Application of Gas Turbines for Merchant Ships [刊,中]/Zhang Hui(Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):101~104

A general review is given of the developments and present status of marine gas turbines employed on board merchant ships. In this connection the merits of the gas turbines as against diesels are described. The prospects of the use of gas turbines for merchant vessels have also been briefly dealt with. **Key words:** gas turbine, power plant, merchant ship application

锅炉装置计算机监测优化控制系统=A Computer-based Monitoring and Optimized Control System for a Boiler Unit