

文章编号:1004-8774(2013)05-0015-05

# 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉的设计

包绍麟<sup>1</sup>,吕清刚<sup>1</sup>,那永洁<sup>1</sup>,孙运凯<sup>1</sup>,王海刚<sup>1</sup>,周托<sup>1</sup>  
沈解忠<sup>2</sup>,毛军华<sup>2</sup>,苏小平<sup>2</sup>,杨浩<sup>2</sup>,钱刚<sup>2</sup>,景磊<sup>2</sup>

(1. 中国科学院工程热物理研究所,北京 100190;

2. 无锡华光锅炉有限公司,江苏 无锡 214028)

**摘要:**介绍了 220 t/h 节能环保型循环流化床(简称 CFB)锅炉的设计原则,探讨了降低锅炉有害气体 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 排放的措施,对满足我国环保政策的 CFB 锅炉研发具有参考意义。

**关键词:**CFB 锅炉;节能环保;设计

中图分类号:TK229.6<sup>+</sup>6 文献标识码:A



第一作者:包绍麟(1963-),男,中国科学院工程热物理研究所研究员,长期从事循环流化床燃烧理论和技术开发工作。

## Design of 220 t/h Circulating Fluidized Bed Boilers with Energy Conservation & Environmental Protection

BAO Shao-lin<sup>1</sup>, LYU Qing-gang<sup>1</sup>, NA Yong-jie<sup>1</sup>, SUN Yun-kai<sup>1</sup>,  
WANG Hai-gang<sup>1</sup>, ZHOU Tuo<sup>1</sup>, SHEN Jie-zhong<sup>2</sup>, MAO Jun-hua<sup>2</sup>,  
SU Xiao-ping<sup>2</sup>, YANG Hao<sup>2</sup>, QIAN Gang<sup>2</sup>, JING Lei<sup>2</sup>

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Wuxi Huaguang Boiler Co. Ltd., Wuxi 214028, China)

**Abstract:** The design principle of 220 t/h circulating fluidized bed (CFB) boilers with energy conservation and environmental protection is introduced, and the measures to reduce NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emission are discussed. It is hoped to provide some reference for the research and development of CFB boilers which meet the environmental requirement in China.

**Key words:** CFB boiler; energy conservation and environmental protection; design

### 1 前言

煤的 CFB 燃烧是一种高效和低污染的清洁燃烧技术,CFB 锅炉具有负荷调节范围广和对燃料的适应性强等突出优点。CFB 锅炉的炉膛温度通常在 850~900℃,这是一个理想的石灰石分解脱硫反应温度区间,通过直接向炉膛加入石灰石,可使烟气中的 SO<sub>2</sub> 脱除效率达到 90% 以上;同时,采用低温和分级送风燃烧,可大大降低 NO<sub>x</sub> 的生成。

中国科学院工程热物理研究所与无锡华光锅炉股份有限公司于 2004 年成功开发了 240 t/h 高温高压 CFB 锅炉,首台锅炉建在洛阳华润热电有限公司<sup>[1]</sup>。随后,广东东莞理文 280 t/h 和南京协鑫 240 t/h 等近 200 多台同容量等级、不同蒸汽参数的 CFB

锅炉陆续建成并投入商业运行,这些 CFB 锅炉的运行调整时间短,系统设计简单,可以做到按需停炉,年连续运行时间达到 7 000 小时以上,特别适应中国的煤质特性和运行条件,形成了具有自主知识产权的 CFB 锅炉技术设计体系,获得用户的普遍好评。其中,洛阳华润热电有限公司的 220 t/h CFB 锅炉在燃用 5 200 kcal/kg 山西晋城无烟煤时,锅炉热效率为 91.10%;陕西渭河洁能有限公司的 240 t/h CFB 锅炉在燃用 5 300 kcal/kg 烟煤时,锅炉热效率为 92.50%。

我国政府于 2012 年颁布了火电厂大气污染物排放标准 GB 13223—2011,要求新建锅炉烟气排放中 SO<sub>2</sub> < 100 mg/m<sup>3</sup> (标态)、NO<sub>x</sub> < 100 mg/m<sup>3</sup> (标态),2014 年将在全国主要省区推广,并逐渐推广到全国。过去,CFB 锅炉首先要保证煤的高效燃烧,现在,NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 排放是否达标是新的关注点,如果锅炉的烟气污染物排放不达标,锅炉的高效燃烧也就失去了意义。CFB 锅炉的科研工作者必须根据市场需

收稿日期:2013-05-06

基金项目:中国科学院战略先导科技专项资助(XDA07030100)

求的改变开发新型节能环保型 CFB 锅炉。

为保证 CFB 锅炉的烟气排放满足国家环保标准,为市场提供更好的 CFB 锅炉产品,2012 年始,无锡华光锅炉股份有限公司积极联合中国科学院工程热物理研究所,合作开发更节能环保的 CFB 锅炉产品。新开发的 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉不仅要达到新的国家环保标准,而且在节能降耗上也要提高到新的水平。

本文将详细阐述新型 220 t/h 节能环保型 CFB

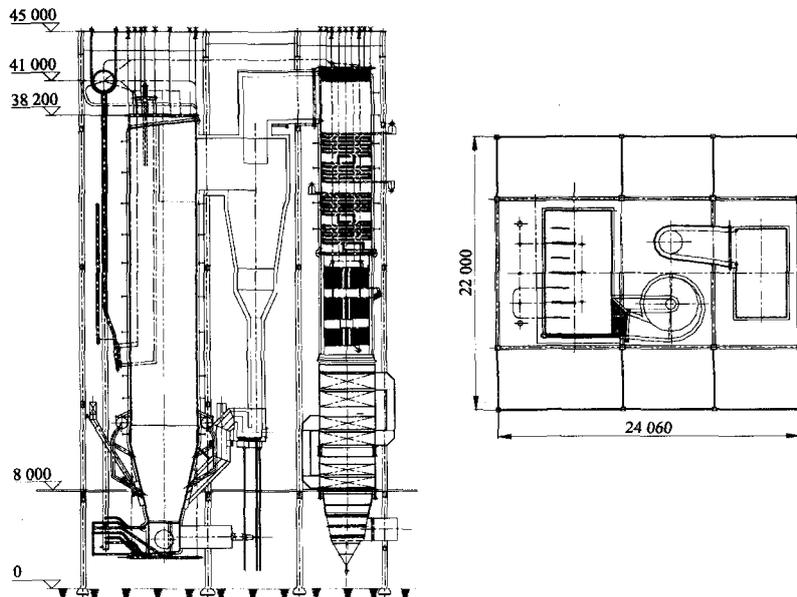


图1 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉布置图

两只蜗壳烟气进口型式的高温汽冷旋风分离器布置在炉膛和尾部烟道之间。旋风分离器下部各有一个返料器,将分离下来的循环物料送回炉膛。高温过热器、低温过热器、省煤器和空气预热器依次布置在尾部烟道中,转向室到低温过热器的尾部烟道部分采用了过热器包覆墙设计,省煤器采用3级光管错排布置。

### 3 炉膛燃烧温度设计基点

保证 CFB 锅炉高的燃烧效率是以往锅炉设计中要着重考虑的重点,用户要求锅炉厂明确论述降低飞灰含碳量的措施。炉膛燃烧温度越高飞灰含碳量越低,以往的 CFB 锅炉炉膛燃烧温度往往设计在 920 ~ 950 °C。我们对已投运的多台 220 t/h CFB 锅炉反复做了设计运行校核,现在已经能够根据用户提供的煤种,准确地预测 CFB 锅炉在额定负荷下的炉膛燃烧温度。

CFB 锅炉燃烧区域温度通常为 850 ~ 980 °C,低于 850 °C,则锅炉燃烧效率会下降,高于 980 °C,则有结焦的风险。CFB 试验台试验结果和实际 CFB

锅炉针对脱硫脱硝、节能和提高燃烧效率等方面的设计原则,这些设计原则也适合其它容量如 130 t/h、410 t/h 节能环保型 CFB 锅炉的开发。

## 2 总体布置

220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉炉膛采用了单汽包自然循环、全悬吊膜式水冷壁的封闭炉膛结构,炉膛内布置 4 片过热蒸汽屏和 3 片水冷蒸发屏,布置见图 1。

锅炉运行已表明,CFB 锅炉的炉膛燃烧温度在 850 ~ 880 °C 是  $\text{NO}_x$  最低的生成反应区间,同时也是最佳的 CaO 吸收  $\text{SO}_2$  生成  $\text{CaSO}_4$  温度区间,超过 880 °C 之后, $\text{NO}_x$  的排放会升高,脱硫效率也会降低。因此,我们将 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉的炉膛燃烧温度设计在 860 ~ 880 °C,炉内受热面的布置、尾部烟道中过热器、省煤器和空气预热器的设计也将随着炉膛燃烧温度的确定进行相应调整。重新设计的 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉的炉膛燃烧温度完全可以在额定负荷下控制在 860 ~ 880 °C,以保证最低的  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  的排放浓度。

## 4 脱氮方面采取的措施

过去,国家环保标准中对  $\text{NO}_x$  的排放限制比较宽松[ >200  $\text{mg}/\text{m}^3$  (标态)],只要实行空气分级燃烧,CFB 锅炉  $\text{NO}_x$  的排放基本都能达标,而新的国家环保标准中对新建锅炉  $\text{NO}_x$  的排放限制已经与  $\text{SO}_2$  一样严格,均小于 100  $\text{mg}/\text{m}^3$  (标态)。220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉设计中首先要考虑的是要降低  $\text{NO}_x$  的排放,找到  $\text{NO}_x$  生成的原因,从而采取有

效的措施抑制  $\text{NO}_x$  的生成。下面简要介绍  $\text{NO}_x$  的生成机理。

锅炉燃烧中产生的  $\text{NO}_x$  主要有燃料型  $\text{NO}_x$  和热力型  $\text{NO}_x$ ，燃料型  $\text{NO}_x$  由燃料中的氮成分在燃烧中产生，热力型  $\text{NO}_x$  是由于空气中的  $\text{N}_2$  高温氧化产生。由于 CFB 锅炉的燃烧温度一般在  $850 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ，空气中  $\text{N}_2$  氧化形成的热力型  $\text{NO}_x$  很少，可忽略不计。燃料型  $\text{NO}_x$  在 CFB 锅炉里的生成过程比较复杂，与煤种、燃烧温度、过量空气系数、空气分级供入等因素有关。

煤种不同，挥发分和氮含量不同，CFB 锅炉燃烧中  $\text{NO}_x$  的排放也不同。燃料中的氮含量高，燃烧中产生的  $\text{NO}_x$  就高；挥发分高的煤种，如褐煤， $\text{NO}_x$  的排放较高，挥发分低的煤种，如无烟煤和贫煤， $\text{NO}_x$  的排放较低。

研究已经确认，炉膛燃烧温度在  $850 \sim 880 \text{ }^\circ\text{C}$  是最低  $\text{NO}_x$  的生成反应区间，高于这个温度， $\text{NO}_x$  将大幅度升高，低于这个温度，煤将不能得到很好的燃尽。

炉膛内供入的氧气越少，生成的  $\text{NO}_x$  就越少，但进一步减少氧气的供应，会增加飞灰含碳量，CO 排放也会增加，锅炉燃烧效率会明显下降。经验表明，炉膛出口的烟气氧含量控制在  $2\% \sim 3\%$ ， $\text{NO}_x$  生成比较小，燃烧效率也能够得到保证。

CFB 锅炉采取空气分级供入技术，大约 50% 的空气从炉膛下部进入炉膛，使炉膛下部基本上处于还原性气氛中，生成的  $\text{NO}_x$  被还原，抑制了  $\text{NO}_x$  的生成。另外 50% 的燃烧空气从炉膛的中下部给入，此时燃料中的 N 成分燃烧生成的  $\text{NO}_x$  就少很多。

根据以上研究成果，220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉将通过合理设置炉膛受热面，控制炉膛燃烧温度设计点 ( $860 \sim 880 \text{ }^\circ\text{C}$ )；严格进行空气分级供入，低于 50% 总风量作为一次风从炉膛布风板下送入，另外高于 50% 的空气作为二次风从炉膛布风板上给入。根据尾部烟气中的氧含量为  $2\% \sim 3\%$  决定总风量的加入量。通过采取以上措施，220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉的  $\text{NO}_x$  排放可控制在  $100 \text{ mg/m}^3$  (标态) 以下。对于含氮较高的煤种， $\text{NO}_x$  的排放浓度可能会超过  $100 \text{ mg/m}^3$  (标态)，但不会超过  $200 \text{ mg/m}^3$  (标态)，可通过在旋风分离器的进口采取简单的选择性非催化还原 (selective non-catalytic reduction, SNCR) 技术，将尾部烟气的  $\text{NO}_x$  排放控制在  $100 \text{ mg/m}^3$  (标态) 以下。

在众多的烟气脱硝技术中，SNCR 是应用较为

广泛的技术，特别适合 CFB 锅炉。SNCR 的还原温度窗口在  $800 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ，正好落在最佳的脱硫脱硝温度  $860 \sim 880 \text{ }^\circ\text{C}$  以内，是比较适合 CFB 锅炉应用的，它不需要催化剂，运行费用较低，尿素通常可用作  $\text{NO}_x$  的还原剂；氨水也是较好的还原剂，但由于环境及安全因素，使用不多。大量的工业应用实践表明，CFB 锅炉的高温旋风分离器是很好的脱  $\text{NO}_x$  场所，还原剂和烟气在这里能够进行最好的掺混，采用 SNCR 技术可以获得  $60\% \sim 85\%$  的脱  $\text{NO}_x$  效率。

现在，新开发的 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉均在高温旋风分离器的进口烟道上设置了用于 SNCR 脱硝的加入口，大多在进口烟道的外侧垂直方向布置 2~5 个喷入口，也有布置在进口烟道的内侧，外面用盲板封住，用户可自己选择专业的环保公司进行 SNCR 系统的设计和现场安装。可以设计一套系统同时对应几台 CFB 锅炉。

## 5 脱硫方面采取的措施<sup>[2]</sup>

CFB 锅炉燃烧技术最突出的优势是，能够通过向炉膛内加入石灰石粉的简廉方法实现烟气  $\text{SO}_2$  排放浓度达标，这也是 CFB 锅炉能够在中国得到大规模应用的重要原因。石灰石加入炉膛的位置以及方式对脱硫效果的影响很大，因此 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉有必要根据国内脱硫科研成果进行优化设计。

国内科研机构在脱硫方面的多年研究得出的主要结论是，对于大多数含硫量小于 1% 的煤种，采取有效的脱硫措施后， $\text{SO}_2$  排放浓度能够达到  $100 \text{ mg/m}^3$  (标态) 以下；对于含硫量大于 1% 的煤种， $\text{SO}_2$  排放能够达到  $200 \text{ mg/m}^3$  (标态) 以下，但达到  $100 \text{ mg/m}^3$  (标态) 以下有难度，解决办法是采用炉内石灰石加入系统之后，尾部再增加一级湿法脱硫系统，这样就完全能够达到  $100 \text{ mg/m}^3$  (标态) 以下的国家排放标准。

石灰石加入炉膛的工艺有两种，一是通过二次风管将石灰石粉送进炉膛，这是国内较普遍采用的方法；第二个是通过返料器送进炉膛，石灰石粉先与高温循环灰混合、被分解，再吸收烟气中的  $\text{SO}_2$ 。工业实践证明第二个方法更为有效，可大幅度减少石灰石粉的用量。

为保证 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉的烟气达到新的国家环保标准，在建设发电厂的时候都需在尾部设计一套湿法脱硫系统。现在尾部湿法脱硫系统的设备造价已经很低，大多数发电厂能接受。在

锅炉运行时,当烟气中的  $\text{SO}_2$  排放浓度超过  $100 \text{ mg/m}^3$  (标态)时,启动尾部湿法脱硫系统,将  $\text{SO}_2$  排放浓度控制在  $100 \text{ mg/m}^3$  (标态)以下。锅炉运行经验表明,在脱硫塔中喷少量水就能够大幅度降低烟气中  $\text{SO}_2$  浓度,原因是烟气中含有大量多余未反应的石灰粉,这些石灰粉和水形成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,其脱硫反应活性极佳。

现在,新开发的 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉上石灰石均从返料器加入,尾部还安装了一套湿法脱硫系统,可依据脱硫工况随时投入使用。与煤粉炉尾部脱硫系统相比,CFB 锅炉的湿法脱硫系统喷入的石灰石浆明显减少,CFB 锅炉又能够以清洁环保的新面貌出现。

## 6 节能方面的措施

洛阳华润热电有限公司的 240 t/h CFB 锅炉的

表 1 220 t/h CFB 锅炉实际运行中风机出口压力数据汇总

锅炉用户	负荷	一次风机出口	二次风机出口
河南洛阳华润热电有限公司(2004 年性能测试数据)	50%	9.29	1.19
	75%	10.74	3.36
	100%	9.85	5.38
	110%	10.47	5.74
南京协鑫热电有限公司(2005 年运行数据)	100%	10.54	4.27
陕西渭南洁能有限公司(2008 年运行数据)	100%	11.11	8.04
江苏索普(集团)有限公司热电厂(2010 年运行数据)	100%	9.36	7.35
浙江嘉化工业园投资发展有限公司(2011 年运行数据)	100%	10.74	6.77
浙江嘉兴平湖热电厂(2012 年运行数据)	100%	11.58	9.26

## 7 保证排烟温度达到设计值的措施

中国科学院工程热物理研究所一直致力于提高旋风分离器分离效率的工作,研制出了 CFB 锅炉用的高效蜗壳式进口旋风分离器,分离效率高,流经尾部受热面的飞灰粒径很细,尾部受热面一直积灰较为严重。220 t/h 系列 CFB 锅炉运行结果证明,过热器的进口烟气流速可以在以前基础上进一步提高,有效实现受热面管子的自吹灰能力,保证额定的过热汽温。如果是褐煤,烟气流速还可进一步提高。提高烟气流速还可以减少受热面的钢耗,降低成本。

但控制锅炉排烟温度到  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  以下则比较困难,主要是省煤器管子的积灰问题长期没有很好解决。基于旋风分离器提高分离效率后飞灰粒度变细的实际情况,2011 年,浙江嘉化工业园投资发展有限公司的 240 t/h CFB 锅炉省煤器首次全部采用了错排布置,锅炉运行两年后没有发现省煤器有磨损痕迹,且积灰明显减轻,排烟温度可一直控制在  $120 \sim 130 \text{ }^\circ\text{C}$ ,经校核,错排省煤器的传热系数可比顺排

一次风机和二次风机的压头选型分别是  $21.6 \text{ kPa}$  和  $14.7 \text{ kPa}$ ,而实际运行表明,CFB 锅炉通常不需要这样高的压力储备系数(见表 1)。发电厂操作人员都将一次风机出口压力控制在  $12 \text{ kPa}$  以内,由于采取了变频技术,能够很好地解决风机风压出力问题,降低厂用电,后续的其它用户在进行 220 t/h 锅炉风机选型也就一直延续这个参数。

从表 1 可知,220 t/h CFB 锅炉的一次风机和二次风机完全可以选择更低的压头参数。综合实际的运行情况,220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉的一次风机和二次风机的压头选型参数分别是  $15 \sim 17 \text{ kPa}$  和  $10 \sim 12 \text{ kPa}$ 。这样的压头选型参数已经有很大的富裕量,再配合变频技术,可进一步降低厂用电,实现节能降耗。

大 1 倍左右,既节省了钢材,又提高了锅炉效率。

基于省煤器烟气流速的运行实践,220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉采用了较高的过热器烟气流速,省煤器采用错排布置,锅炉设计排烟温度为  $120 \sim 140 \text{ }^\circ\text{C}$ ,锅炉的额定汽温和排烟温度不再依靠吹灰器的频繁操作来保证。

## 8 进一步提高旋风分离器分离效率的措施

煤的燃烧温度高,飞灰含碳量肯定低。220 t/h CFB 炉膛燃烧温度由  $920 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$  降低到  $860 \sim 880 \text{ }^\circ\text{C}$  之后,飞灰含碳量会增加。为保证  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  低排放又不降低燃烧效率,就只能进一步优化旋风分离器,进一步提高旋风分离器的分离效率。旋风分离器的分离效率越高,飞灰含碳量就越低,但进一步提高旋风分离器分离效率的实验难度也越来越大。采用工程热物理研究所 220 t/h CFB 锅炉技术的锅炉尾部飞灰临界粒度  $d_{50}$ ,视煤种不同一般在  $10 \sim 25 \text{ } \mu\text{m}$ 。

采用数值模拟是切实有效的办法,可替代一些难于开展的实验,通过对不同结构尺寸的旋风分离

器结构进行流场计算,可以找到提高分离效率的方向。根据数值模拟的研究结果,我们得到了优化旋风分离器措施:

(1)旋风分离器的中心筒烟气出口管位置进行了重新布置,使得中心筒的位置与主旋流中心相适应,和进口烟气主流保持合适的距离。

(2)中心筒的插入深度进行了优化。研究和实践均表明,过深的插入深度不一定有高的分离效率,反而会出现中心筒变形、脱落等影响锅炉安全的故障。我们重新设计了 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉的旋风分离器中心筒的插入深度,并采用了增强型防变形结构。

(3)在合适的烟气阻力参数保证下,进一步优化旋风分离器的烟气进出口速度。

在旋风分离器的结构优化之后,下一步优化的方向是旋风分离器进口烟道。图 2 中左侧是洛阳华润 240 t/h CFB 锅炉炉膛与旋风分离器之间的位置关系,右侧是优化后的 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉炉膛与旋风分离器之间的位置关系。数值模拟计算表明右侧的烟气流场要明显优于左侧的流场,烟气进入旋风分离器的流线更加平顺,烟气在旋风分离器内的主旋流中心和中心筒几何中心完全重合。数值计算下来的结论如下:旋风分离器的进口侧边和炉膛侧墙的夹角越小,流场越平稳,如果是 0 角度则最好;在烟道的入口处增加一个 45° 过渡折角,烟气在进口附近形成的涡流明显减少。

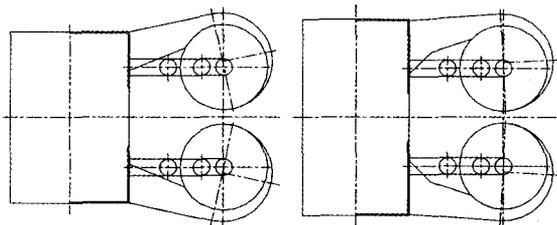


图 2 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉旋风分离器进口优化布置图

## 9 结语

中国科学院工程热物理研究所与无锡华光锅炉股份有限公司合作,参考了过去已经投运的 200 多台 220 t/h CFB 锅炉的运行经验,以控制  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的低排放为首选因素,兼顾降低厂用电和锅炉成本,并继续保持原有锅炉高的炉效;采取数值计算方法研究旋风分离器流场,找到了提高旋风分离器效率的途径,开发了 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉产品,该产品对炉膛、旋风分离器和尾部受热面等都进行了全新优化设计。新一代 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉将更加环保高效。

首台 220 t/h 节能环保型 CFB 锅炉用户为山东青岛新源热电有限公司,锅炉热力计算汇总见表 2、表 3,预计 2014 年锅炉将投入运行,届时将分析报道实际运行效果。

表 2 220 t/h CFB 锅炉热力计算汇总

项目名称	单位	结果
额定蒸发量	t/h	220
额定蒸汽压力	MPa	9.81
额定蒸汽温度	℃	540
给水温度	℃	215
收到基碳	-	57.62%
收到基氢	-	3.04%
收到基氧	-	3.68%
收到基氮	-	0.77%
收到基硫	-	1.27%
收到基水分	-	4.80%
收到基灰分	-	28.82%
干燥无灰基挥发分	-	12.49%
收到基低位发热量	MJ/kg	21.83
排烟温度	℃	134
锅炉热效率	-	91.57%

表 3 220 t/h CFB 锅炉结构热力计算汇总

名称	单位	炉膛	汽冷筒	转向室	高过	屏过	低过	省煤器	空预器
管子外径	mm	60	38	51	38	42	38	32	40
管子壁厚	mm	5	6	5	5	6	5	4	1.5
横向节距	mm	80	-	100	100	60	100	90	65
纵向节距	mm	-	-	-	96	-	96	45	65
烟气出口温度	℃	875	868	809	640	875	506	267	134
工质进口温度	℃	317	317	336	455	386	349	215	30
工质出口温度	℃	317	336	349	540	465	397	282	180

## 参考文献

[1]包绍麟,等. 220 t/h 循环流化床锅炉热力性能分析[J].

锅炉技术, 2006 (5):32-34.