

# 纯燃生物质循环流化床锅炉设计与运行

张建春<sup>1</sup>, 顾君苹<sup>2</sup>, 张缦<sup>2</sup>, 刘青<sup>2</sup>, 杨海瑞<sup>2</sup>, 吕俊复<sup>2</sup>

(1. 太原锅炉集团有限公司, 山西太原030000; 2. 清华大学热能工程系, 热能动力工程与热科学教育部重点实验室, 北京100084)

**摘要:**充分利用循环流化床(简称“CFB”)炉膛中的受热面受到循环物料不断冲刷的特点,将壁温较高的受热面布置在炉膛,可以缓解高温受热面的结垢腐蚀问题,据此开发了130t/h纯燃玉米秸秆的高温高压CFB锅炉,其特征是炉膛中布置中级和末级过热器;对流受热面顺列大间距布置,以低烟速缓解沾污,并密集布置吹灰器。炉前燃料系统中分开设置卸料器和输料器;输送到炉前的生物质伴随二次风入炉,并控制给料口附近为负压。这些设计思想得到实践验证,机组投运后,运行稳定,炉前燃料输运系统可靠,年运行达到7600h,连续运行时间超过128天。运行2年后炉内过热器未见腐蚀,对流受热面沾污可控。测试表明,锅炉热效率可达91%以上。 $SO_2$ 和 $NO_x$ 排放浓度受燃料影响,但原始排放很低,接近于超低排放。采用高效旋风分离器,当玉米秸秆携带泥土超过8%时,无须外加床料就能够实现循环系统的良好性能。

## 0 前言

化石能源的过量利用,对地球生态系统产生了潜在的威胁。地球上的生物质能资源非常丰富,每年通过光合作用产生的生物质约1700亿吨。据统计,我国可开发的生物质能资源总量约为7亿吨标准煤,由于没有得到合理利用,出现了无组织野外焚烧、污染严重的现象,而广泛利用生物质资源可以减少化石能源的利用。因此,国家大力支持生物质的资源化利用。目前,生物质能的主要利用方式包括热解、液化、气化以及直接燃烧等,其中直燃发电具有显著的可行性和经济性,实现生物质资源的大规模减量化、无害化、资源化。

我国的生物质与欧洲的生物质有根本性的区别:欧洲的生物质主要是林业废弃物,以木质生物质为主;而中国是以农业废弃物,以秸秆为主。秸秆的性质不同于木质生物质:热值低,能量密度小;挥发分极高,挥发分析出温度低且析出迅速;水分含量高,最高可达60%~70%,变化大,春秋少,夏冬受雨雪影响;自身灰分少,但受收购条件影响,含土、石子等杂质较多;灰熔点较低,易出现结渣;含有一定量低沸点盐分,燃烧过程中形成盐蒸气,在烟气冷却过程中在对流受热面表面凝结,引发受热面沾污甚至烟道堵塞;受当地土壤和水质条件影响,含有一定量氯,氯燃烧后转化为氯化氢,导致受热面存在腐蚀的潜在可能。这些特点要求设计中需要特别的技术应对。当采用掺烧时,由于生物质资源的区域性,掺少比例一般较低,这些问题能够通过与煤的混合稀释,得到有效控制。

生物质直燃技术中,掺烧无疑具有更大的优势,能够缓解生物质燃料存在的主要问题,但技术处理不当也会有结渣、积灰和腐蚀。由于大容量火电机组分布有限,实现所有生物质均掺烧是不可能的,必然要建设一部分以消耗生物质为目的的生物质发电机组。目前生物质直接燃烧包括层燃和流化床燃烧。层燃以水冷振动炉排为主,操作方便,运行费用低。但由于生物质的燃烧特点,导致层燃实际上以悬浮燃烧为主,从而炉膛出口烟温较高,碱金属盐在尾部受热面粘污,进一步引起腐蚀问题;生物质的密度小,燃烧组织困难,化学不完全燃烧热损失不可忽略。

鼓泡流化床直接燃烧生物质燃料具有技术、环保和经济上的优势:鼓泡床有着大热容量的床层,因而对燃料种类、热值和粒度等有很强的适应性。但是,鼓泡流化床的热负荷小、燃烧效率偏低、埋管磨损严重等问题要高度关注。

循环流化床(CFB)燃烧继承了鼓泡流化床的燃料适应性强的优势,并具有低成本污染控制的特点。本文介绍了130t/h纯燃玉米秸秆高温高压CFB锅炉的设计与运行情况。

## 1 燃烧玉米秸秆的CFB锅炉设计思想

秸秆灰分的特殊性是纯燃秸秆CFB锅炉设计需要特殊考虑的问题。秸秆燃烧挥发出来的盐蒸气在500℃以上的烟气中存在,但烟气通过对流受热面的冷却时,由于受热面的温度比较低,盐蒸汽会逐渐冷凝在受热面表面,成为飞灰沉积后颗粒之间的黏结剂,形成类似于结焦的沾污,影响到受热面的传热。附着在受热面表面的灰层,诱发了垢下腐蚀,见图1。因此,控制受热面腐蚀的有效措施是充分利用CFB炉膛中存在高浓度物料的特点,处于炉膛中的受热面始终受到循环物料的不断冲刷,能够有效抑制了炉内粘污问题。因而将壁温较高的受热面布置在炉膛,可以有效缓解高温受热面的结垢腐蚀问题,这是CFB燃烧生物质所具有的独特优势。

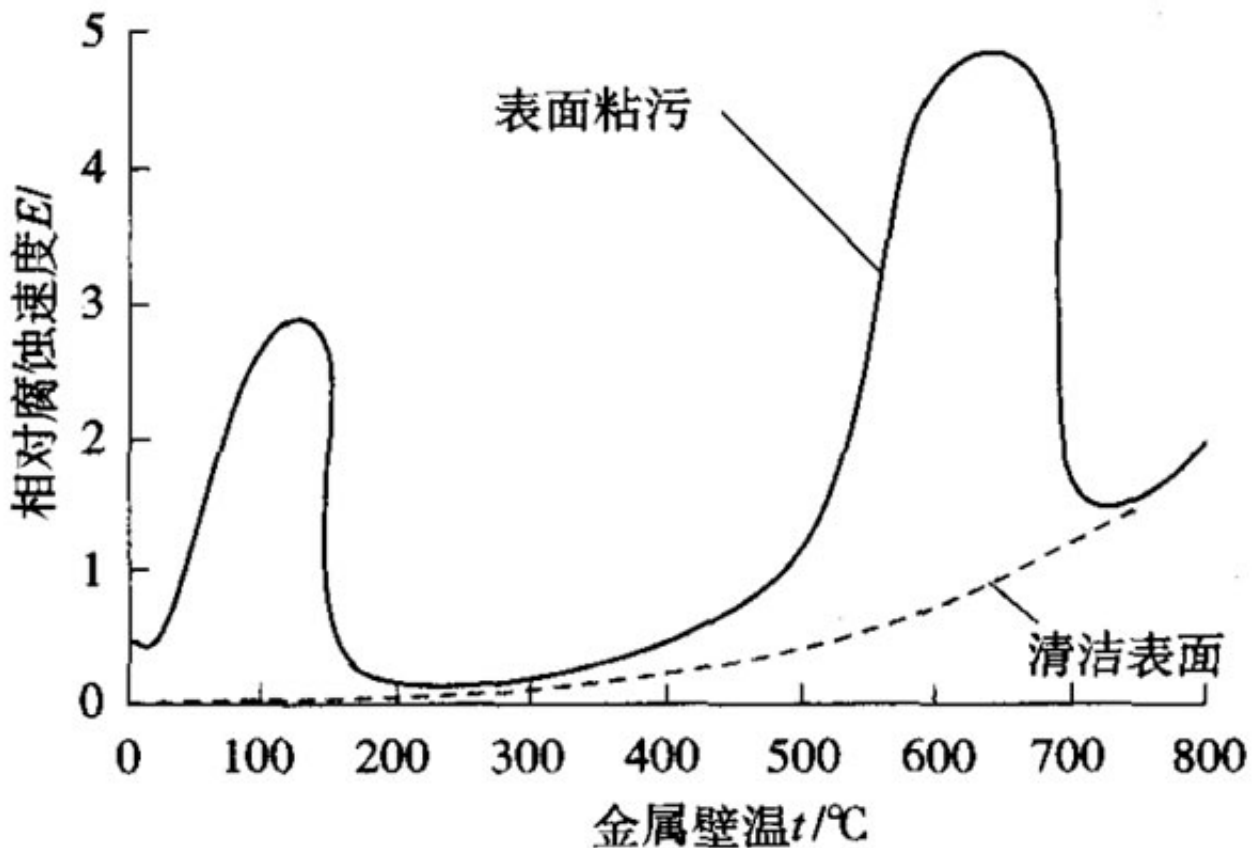


图 1 粘污和金属壁温对腐蚀速度的影响

由于生物质的灰熔点较低，为了避免结焦、影响正常流化，纯燃秸秆的CFB锅炉床温不宜偏高，应严格控制在850以下。

生物质的硫含量一般较低，即使不进行控制原始排放也能达到标准要求。但是生物质中的氯的含量较高，燃烧生成的HCl不仅影响到受热面的腐蚀，而且影响到酸性气体的排放。因此设计中，应采取控制措施，如添加石灰石，对其进行控制。

鉴于CFB锅炉需要稳定的物料来源以满足物料循环的要求，石灰石的添加对生物质CFB锅炉的物料平衡是有益的。而玉米秸秆不可避免地夹带大量的泥土砂石，这一方面降低了生物质燃料的热值；另一方面对于主循环回路的循环性能及结焦、沾污的改善也有积极意义。

## 2 130t/h纯燃玉米秸秆CFB锅炉的设计

130t/h纯燃玉米秸秆的CFB锅炉为高温高压，配30Mw机组。设计燃料成分见表1，锅炉基本尺寸见表2。

**表 1 燃料成分分析结果**

项目	设计燃料	运行燃料
$w(C_{ar})/\%$	30.22	27.82
$w(H_{ar})/\%$	4.29	3.32
$w(O_{ar})/\%$	28.80	29.17
$w(N_{ar})/\%$	0.64	0.53
$w(S_{ar})/\%$	0.05	0.03
$w(A_{ar})/\%$	7.36	16.64
$w(W_{ar})/\%$	28.69	22.52
$w(V_{daf})/\%$	68.95	66.39
$Q_{net}/(kJ \cdot kg^{-1})$	10 692	9 250

**表 2 锅炉基本尺寸**

项目	数值
炉膛宽度/mm	8 770
炉膛深度/mm	4 050
汽包中心线标高/mm	39 500
高温过热器出口集箱标高/mm	44350
锅炉顶板标高/mm	44 000
运转层标高/mm	8 000
操作层标高/mm	5 200
锅炉宽度(两侧柱中心距)/mm	10 600
锅炉深度(Z1-Z4 柱中心距)/mm	19 700

CFB是一种高效低污染燃烧技术，其主要特点是炉膛内含有大量的物料，在燃烧过程中大量的物料被烟气携带到炉膛上部，经过布置在炉膛出口的分离器，将物料与烟气分开，并经过非机械式回送阀将物料回送至床内，以此有限延长燃料的停留时间。由于物料浓度高，对炉膛内受热面的冲刷保证了受热面表面的清洁；大量的高温床料为燃料的着火提供了稳定的热源；传热依赖于气固两相流动，因此对燃料的适应性强。能够适应生物质燃料的多变性和复杂性。

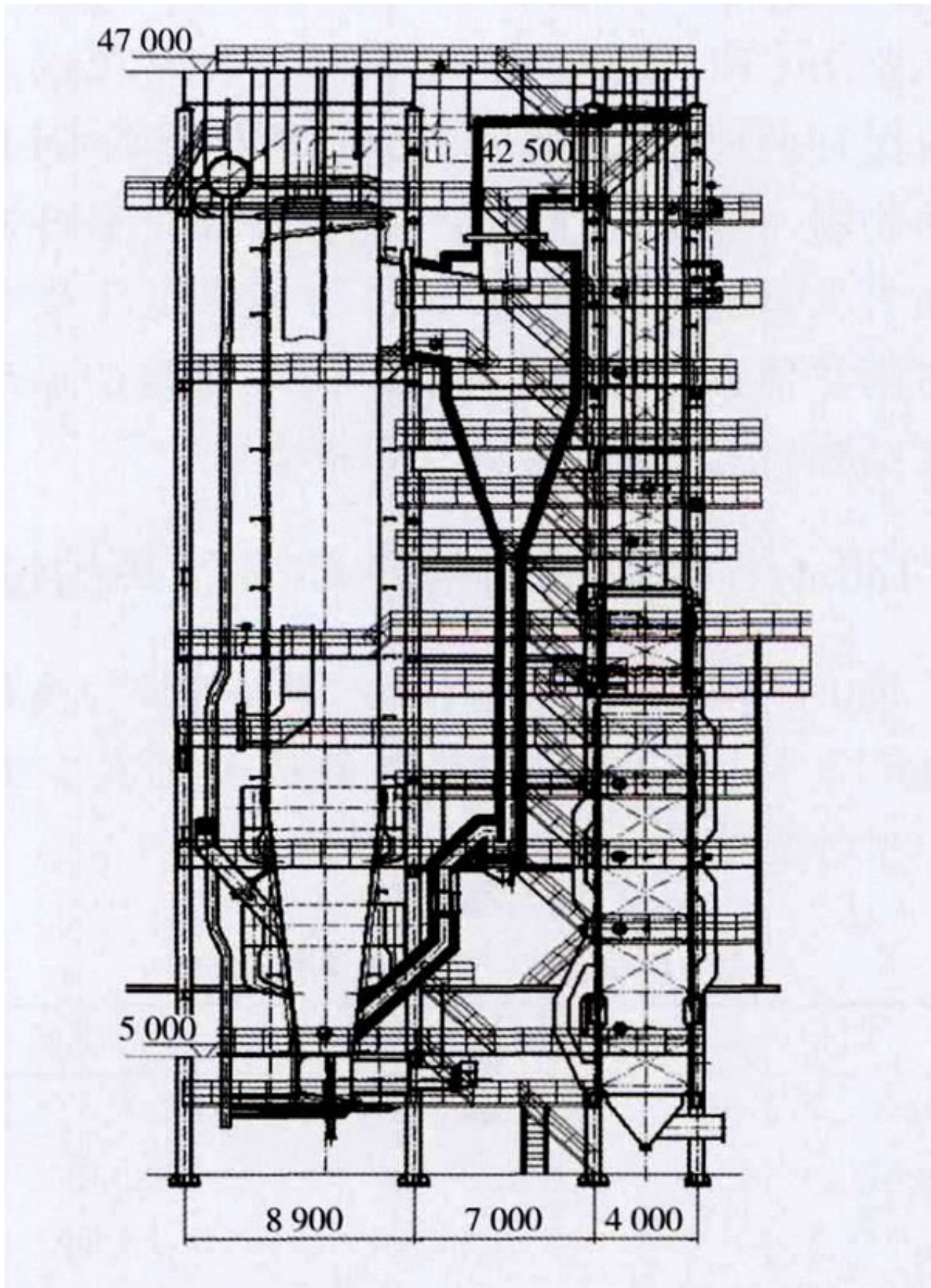


图 2 130 t/h 循环流化床生物质锅炉结构简图

锅炉为高温高压、单锅筒横置式、单炉膛、自然循环、全悬吊结构、全钢架兀型布置。锅炉采用紧身封闭布置，运转层设置在8m标高。锅炉主要由炉膛、绝热旋风分离器、自平衡回料阀和尾部对流烟道组成。炉膛采用膜式水冷壁，锅炉中部是绝热旋风分离器。给料机将燃料送入落料管进入炉膛，燃烧所需空气分别由一、二次风机提供。一次风经一次风空气预热器预热后引入水冷风室。通过水冷布风板上的风帽进入燃烧室；二次风经二次风空气预热器预热后，通过布风板之上3.2m高的二次风喷口喷入炉膛。下部密相区燃烧产生的烟气向上流动，携带床料和燃料在炉膛上部进一步放热。夹带大量物料的烟气流出炉膛进入旋风分离器之后，绝大部分物料被分离出来，经返料器返回炉膛，进入下一个循环。分离后的烟气流入分离器进入尾部烟道。尾部烟道自上而下分别为转向室、低温过热器、三组光管省煤器及一、二次风各五级的空气预热器。为防止低温腐蚀，空气预热器冷端采用搪瓷管。

为了解决高温受热面沾污以及垢下腐蚀问题，设计中将温度最高的高温过热器和中温过热器以翼形墙的形式布置在炉膛中，确保其表面清洁。管子采用耐腐蚀的FP347H。低温过热器、省煤器顺列大间距布置，以降低烟气流速，缓解沾污；空气预热器卧式顺列小管箱布置；对流受热面密集布置吹灰器，强化吹灰。

秸秆的输运和给人炉膛是生物质CFB锅炉良好运行的必要条件。玉米秸秆在含湿量较高时，破碎后缠绕性很强，必须实现有效破碎。为了避免炉前燃料仓中的物料全部压在底部卸料器上，分开设置卸料器和输料器，把料仓下部生物质不断送出料仓和送出料仓后的生物质的水平送出这两个过程分离开来，卸料器采用无轴蛟龙，见图3，它承担料仓内的物料重力，输料器仅仅负责水平输送。卸料器密布于料仓下部截面，在播料器不转动的情况下能稳定承载上部物料，没有物料自流下落情况；对于生物质燃料常见的纠结缠绕以及在料层重力作用下呈挤压状态的物料，通过播料器旋转可实现有效剥离并将其拔下；能够适应燃料中的石块、绳索等杂质。

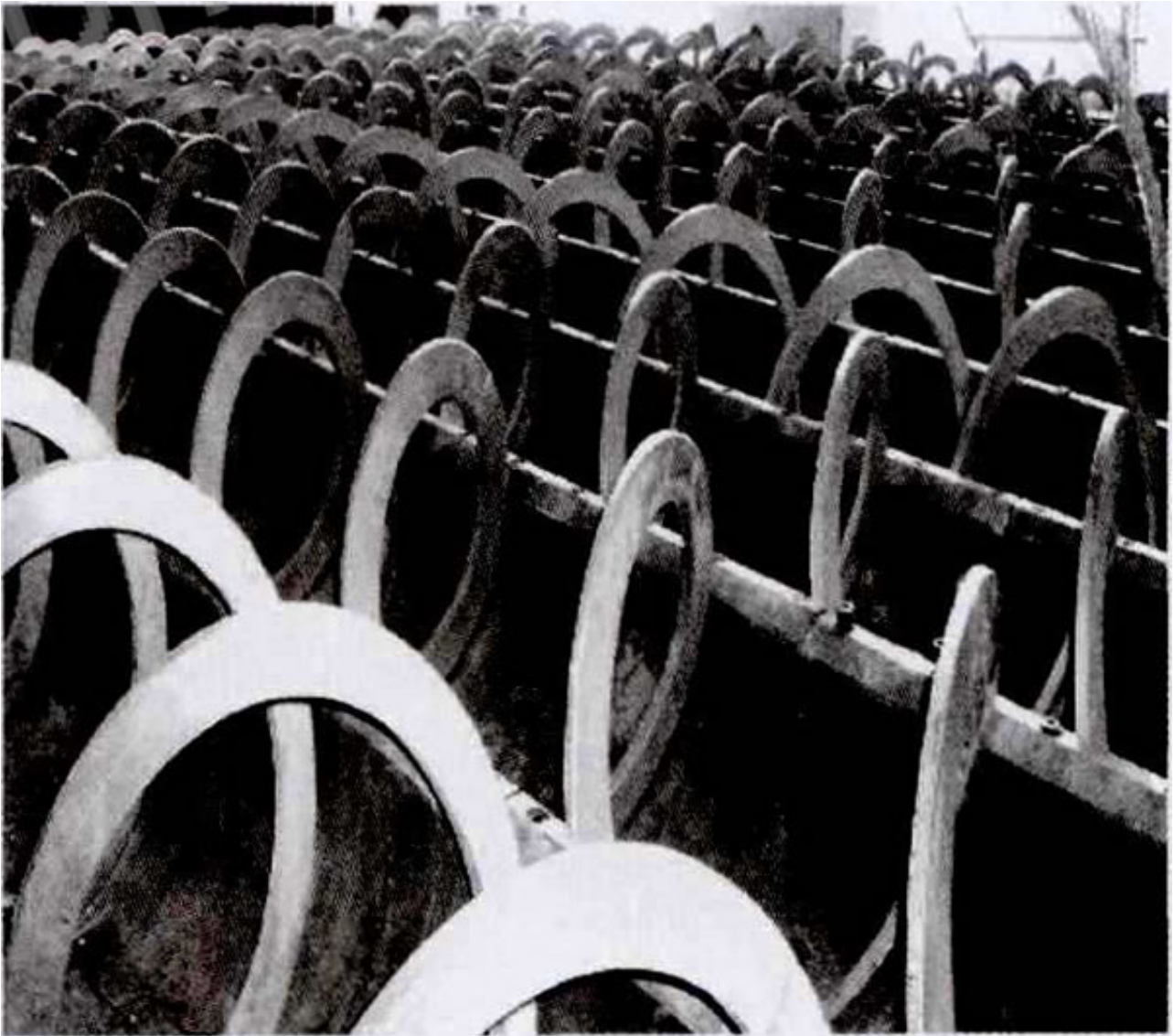


图 3 无轴蛟龙

输送到炉前的生物质伴随着二次风进入炉内。为了有效防止给料不畅，下料管采用文丘里的配风方式。降低炉内负压点的控制位置，基本上在给料口的标高附近，以利生物质在炉内的流动。引风机的压头相对较高。生物质的一次风份额与二次风相当。风机配置见表3。

**表 3 风机配置**

项目	引风机	一次风机	二次风机	罗茨风机
额定出力 ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	338 231	96 418	94 618	1 285.2
全压头/Pa	8 270	14 700	11 735	21 000
电机电压/V	10 000	10 000	10 000	380
电机电流/A	80.5	39.9	32.6	42.9
电机额定 功率/kW	1 120	560	450	22

3 130t/h纯然玉米秸秆CFB锅炉的运行

130t/h纯然玉米秸秆CFB锅炉安装于吉林省乾安生物质热电厂，2015年10月投入运行，现已稳定运行两年。锅炉燃料是玉米秸秆为主要燃料，其粒度为0~30mm。其形态见图4。随季节变化，也适当掺烧稻壳、树根、花生壳和芦苇秸秆等，热值平均月8000~11000KJ/kg，其中的沙土含量比较高。2016年，运行达到7600h，期间连续运行时间超过128天。设计采用的无轴蛟龙输料系统比较可靠，交过良好。能效测试，锅炉热效率在秸秆受到基低位发热量达到10692KJ/kg时可达91.1%~91.6%。





**图 4 实际燃用的生物质燃料形态**

锅炉设计床温为850℃，实际运行温度基本与设计相同。由于生物质的挥发分含量较高，而且易于被上升气流带起，因此上部稀相区的温度普遍高于下部床温，见图5.排烟温度也在设计范围内。

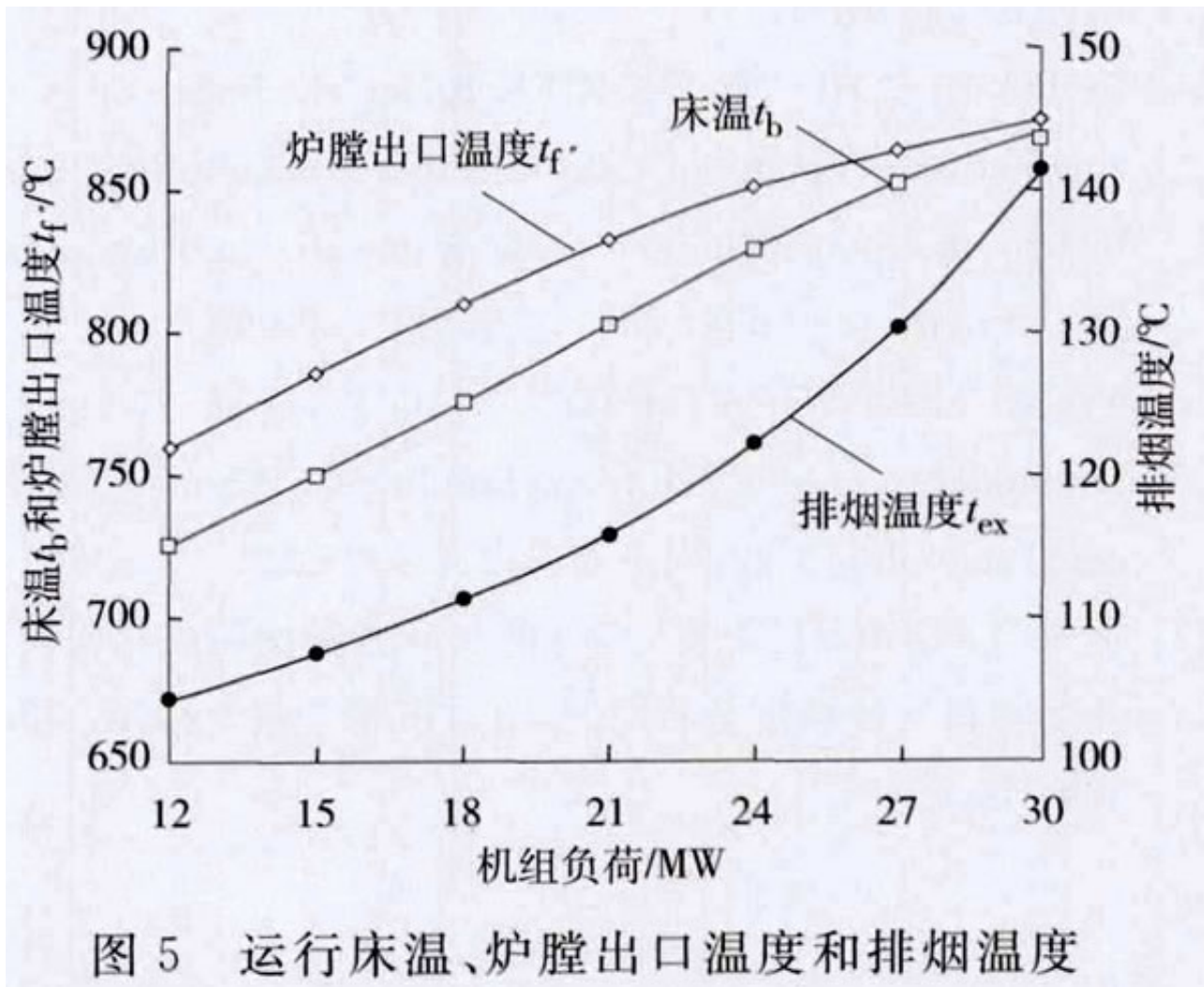


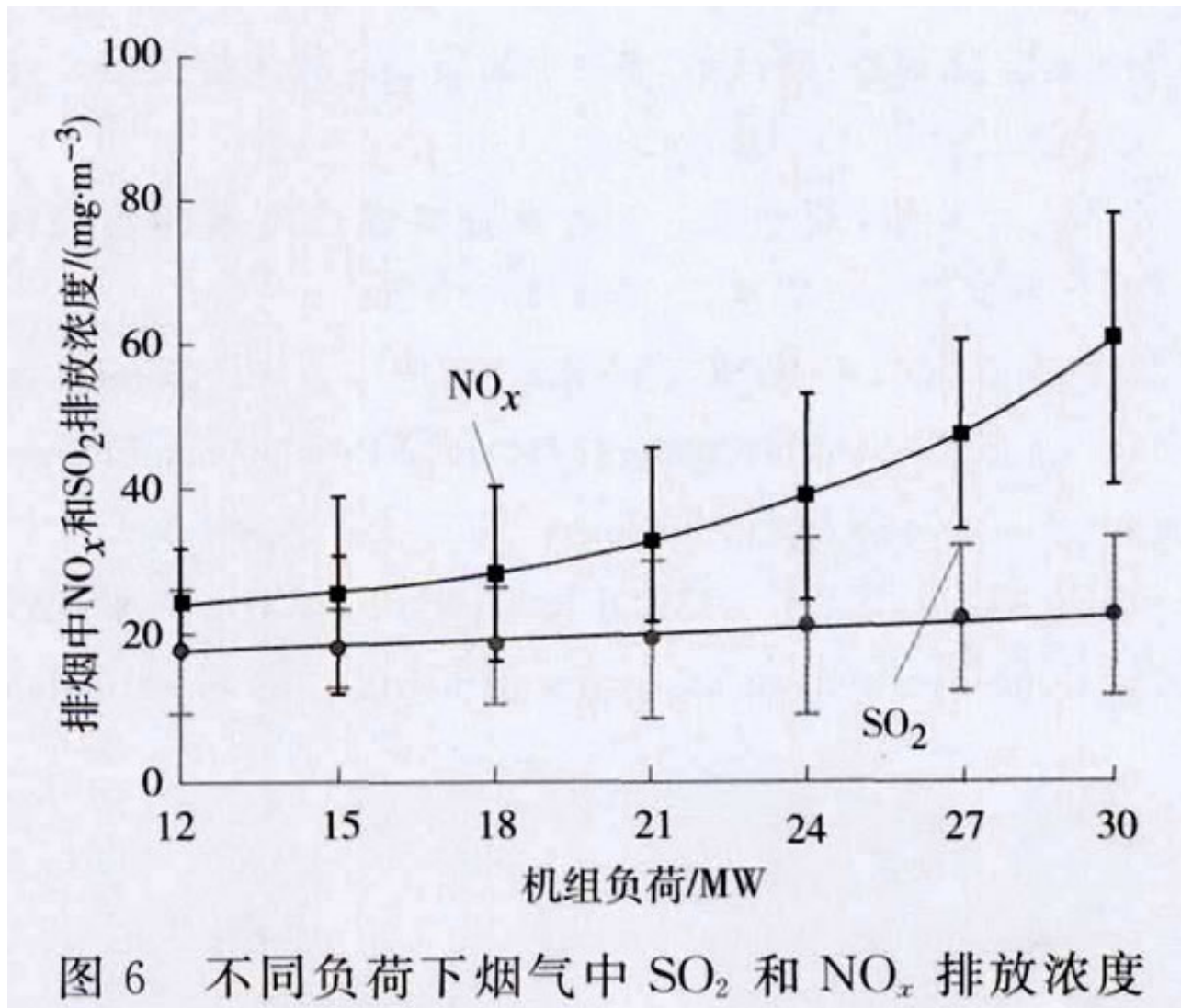
图 5 运行床温、炉膛出口温度和排烟温度

生物质的灰分含量较低，其燃烧形成的灰分无法形成粒度合适的循环灰，因此需要外加床料。实践发现，秸秆的收集过程中不可避免的夹带一些沙土，有时夹带的沙土量还比较大，可以利用秸秆携带的沙土作为循环物料的补充来源。借助于高效旋风分离器，解决了生物质灰分低、产生的灰不能形成循环灰的问题。经过计算和实践，发现当玉米秸秆携带的泥土超过8%的时候，无须外加床料，物料循环即可达到理想的状态。

两年来的运行实践表明，通过受热面的位置优化，将金属壁温最高的中温过热器和高温过热器以翼形墙的形式布置在炉膛中，借助循环流化床燃烧的物料流动有效冲刷受热面表面，确保受热面表面清洁，进而解决了高温受热面由于沾污引起的腐蚀问题。500 ~ 800 烟气区，对流受热面的沾污，可以通过减低烟速得到改善。主要积灰位置在空气预热器，空气预热器处的积灰基本呈现疏松的状态。

实践中也发现了一些问题。生物质灰熔点低，容易沾污受热面，因此，尾部受热面强化吹灰是非常重要的，尽管在锅炉设计中考虑了吹灰问题，但是由于吹灰设备可靠性不佳，实际投运率不高，影响了吹灰效果，停炉后需要及时清理受热面上的积灰。

污染物随着燃料情况波动，但SO<sub>2</sub>原始排放就很低，并且与负荷关系很小，见图6。而NO<sub>x</sub>的排放浓度与机组负荷正相关，即使没有干预，NO<sub>x</sub>的排放浓度也不高，原始排放接近于超低排放。SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的排放浓度与燃料关系比较大，由于燃料波动，SO<sub>2</sub>的排放浓度在20mg/m<sup>3</sup>范围波动，NO<sub>x</sub>的排放浓度的波动范围更大，波动范围40mg/m<sup>3</sup>。



#### 4结语

充分利用CFB炉膛中的受热面受到循环物料不断冲刷的特点，将壁温较高的受热面布置在炉膛，可以缓解高温受热面的结垢腐蚀问题，据此开发了130t/h纯燃玉米秸秆的高温高压CFB锅炉，其典型特征是炉膛中布置中温和高温过热器。对流受热面顺列大间距布置，以低烟速缓解沾污，并密集布置吹灰器，强化吹灰。炉前燃料系统中分开设卸料器和输料器，改善输运条件。输送到炉前的生物质伴随二次风入炉。下料管采用文丘里配风，并控制给料口附近为负压。这些设计思想得到实践验证，机组投运后，运行稳定，炉前燃料输运系统可靠，机组年运行达到7600h，连续运行时间超过128天。运行2年后，炉内过热器未见腐蚀，对流受热面沾污可控。锅炉热效率可达91%以上。锅炉设计床温为850℃，实际运行基本与此相同，稀相区温度普遍高于床温。SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放浓度受燃料影响，但原始排放很低，接近于超低排放；SO<sub>2</sub>排放浓度与负荷关系很小，NO<sub>x</sub>排放浓度与负荷正相关。借助于高效旋风分离器，当玉米秸秆携带的泥土超过8%时，无须外加床料就能够实现循环系统的良好性能。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/135104.html>