

# 生物质链条蒸汽锅炉炉膛的设计与研究

管泽运<sup>1,2</sup>, 刘圣勇<sup>1,2</sup>, 翟万里<sup>1,2</sup>, 王鹏晓<sup>1,2</sup>, 夏许宁<sup>1,2</sup>, 刘洪福<sup>1,2</sup>, 刘霞<sup>3</sup>

(1.河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室, 河南郑州450002; 2.生物质能源河南省协同创新中心, 河南郑州450002; 3.滑县环境保护局, 河南滑县456400)

摘要: 设计了一种适合生物质燃烧的新型炉膛, 将该炉膛结构应用于额定蒸发量 $1\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$

、额定蒸汽压力 $0.7\text{MPa}$ 的链条蒸汽锅炉上, 进行炉膛热性能试验以及炉膛温度场、气体浓度场的分布规律试验。实际性能测试结果表明, 燃用生物质成型燃料的蒸汽锅炉采用该新型炉膛结构后燃烧效率为 $96.67\% \sim 97.91\%$ , 炉膛出口烟气温度在 $799 \sim 835$  之间; 沿炉膛高度方向与横向截面方向上温度分布合理; 炉内 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 与 $\text{O}_2$ 混合良好, 气体浓度场分布合理;  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、烟尘等污染物排放远低于国家标准。证实该炉膛结构的设计能实现生物质燃料稳定、持续、高效清洁地燃烧。

生物质能源具有总量丰富、来源广泛、污染性低的特点, 是一种理想的可再生能源。中国发展生物质能源具有维护国家能源安全、减少环境污染、促进农村建设等重要战略意义。生物质能源既能满足缓解能源危机的需求, 又符合保护环境、实现可持续发展的要求, 是中国进行可再生能源开发利用的必然选择。因此, 减少煤炭的使用, 研发高效清洁的生物质锅炉备受关注。目前国外生物质锅炉主要研究应用在循环流化床锅炉上。

如美国CE公司研制的大型燃废木循环流化床发电锅炉, 丹麦奥斯龙公司研制的高倍率循环流化床锅炉等, 设备技术成熟, 配套设施完善。

中国目前生物质锅炉的应用主要集中在层燃锅炉上,  $6\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$

以下的中小型工业锅炉占领的市场份额最大, 应用也最为广泛。其中生物质链条蒸汽锅炉是目前运用的较为理想的动力设备, 具有成本低、操作简单、运行可靠、高效低排放等优点, 可在食品、化工、纺织、金属加工、发电、供暖等各类行业与工艺中应用。炉膛是生物质锅炉重要的组成部分, 其结构应与生物质燃料的燃烧特性相适应, 使燃料尽可能的充分燃烧, 提高燃烧效率。目前生产应用的大部分生物质锅炉, 其炉膛结构盲目模仿燃煤锅炉设计, 没有合理的形状和尺寸, 导致积灰结渣问题严重, 燃烧效率低。近年来对生物质蒸汽锅炉炉膛结构的研究甚少, 现以额定蒸发量 $1\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$

、额定蒸汽压力 $0.7\text{MPa}$ 的链条蒸汽锅炉为例, 介绍炉膛新型结构的设计与试验研究, 为生物质锅炉的设计提供参考依据。

## 1 生物质燃料的选取与燃烧特点分析

在中国目前发行的环保标准中, 直接燃用秸秆等生物质属于高污染燃料, 只能在农村大灶中使用, 不允许在城市锅炉领域内使用, 生物质燃料的利用实际主要是以生物质成型燃料的形式。生物质成型燃料具有体积小、密度大、储运方便、燃烧稳定、燃烧效率高、灰渣及烟气中污染物含量小等优点, 是锅炉燃料的良好替代品。试验选取玉米秆(块状)、甘蔗渣(棒状)、杂木末(颗粒)3种具有代表性的成型原料作为锅炉燃料。

块状玉

米秆成型截面尺寸

为 $32\text{mm} \times 32\text{mm}$ , 长 $50\text{mm}$ , 收到基含

水率为 $6.95\%$ , 低位发热量为 $15658\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

; 棒状甘蔗渣成型

直径为 $32\text{mm}$ , 长度为 $40\text{mm}$ , 收到基

含水率为 $10.3\%$ , 低位发热量为 $13740\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

; 杂木末是由桦木、杨木锯末加工成型的小圆柱颗粒状成型燃料, 粒径为 $8\text{mm}$ , 长度为 $15\text{mm}$ 收到基含水率为 $4.5\%$ , 低位发热量为 $15933\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

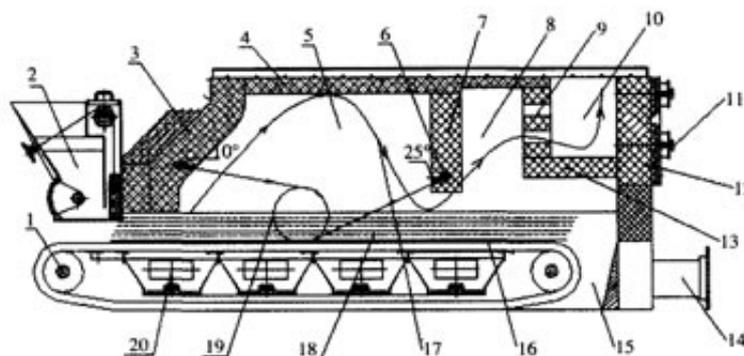
。生物质成型燃料的燃烧特性与化石燃料有较大差别, 其燃烧过程的特点主要体现在以下方面: (1)水分含量大, 产生的烟气体积大、流速快, 若炉膛结构不合理, 则排烟损失将会很高。(2)燃料密度小, 燃烧时结构松散, 迎风面积

增大,易吹起,炉膛结构不合理将导致炉膛内严重的积灰堵灰问题。(3)生物质发热量低,灰熔点低,没有合理的炉膛结构,组织稳定的燃烧比较困难。(4)挥发份高,着火温度低,焦炭颗粒燃尽困难,炉膛内需要合理的温度场与气体浓度场才能减小热损失。

## 2 生物质链条蒸汽锅炉炉膛的设计

针对上述生物质燃料燃烧特点,设计的新型炉膛结构如图1所示。炉膛采用全炉拱设计,链条炉排的上方从前到后依次设有前拱、中拱和后拱,中拱由竖向的折焰墙构成,后拱由竖向的花墙和一道横向墙构成,前拱和中拱以及后拱的花墙由拱顶连接;前拱和中拱围成第1燃烧室,中拱和后拱的花墙围成第2燃烧室,后拱与炉膛后墙围成燃尽室;前拱与中拱上均设有2次风口,炉膛后墙上设有清灰门。生物质燃料随着链条炉排的运动进入炉膛第1燃烧室。第1燃烧室为主要燃烧区,在1次风和2次风系统作用下,燃料大量燃烧,产生的高温烟气绕过折焰墙进入第2燃烧室。第2燃烧室为2次燃烧区,高温烟气含有的甲烷、一氧化碳等可燃气体以及固体可燃颗粒继续燃烧传热,2次燃烧后的烟气由花墙进入燃尽室。烟气在燃尽室内进一步降尘和燃烧,再通过出烟气口在引风系统作用下进入烟道。炉膛内积累的烟尘颗粒和灰渣可由清灰门清除。

设计的生物质锅炉炉膛结构具有如下技术特点:(1)设计了新型2次风系统。2排2次风管相向设置,位于前拱的2次风口向下倾斜约 $10^{\circ}$ ,位于中拱的2次风口向下倾斜约 $25^{\circ}$ ,可在链条炉排的燃料层上方区域形成近似圆形气流扰动。该设计延长了高温烟气在第1燃烧室的停留时间,强化烟气传热,降低排烟温度,减少排烟热损失,同时优化了炉内热力场,提高锅炉稳定燃烧能力和入炉燃料的燃尽程度。(2)设计了新型炉拱结构。炉膛使用全炉拱设计,中间增加了1道折焰墙作为中拱,后拱由1道横向墙和1道花墙组成。炉拱将炉膛分为3个区域:第1燃烧室、第2燃烧室和燃尽室,延长了高温烟气在炉膛内的行程。烟气在第2燃烧室内进行1次降尘和2次燃烧,在燃尽室内进行2次降尘,提高燃尽率,减少烟尘排放。(3)在炉膛尾部的后炉墙上设置清灰门。生物质燃料燃烧时,少量灰分由于质量轻会随着高温烟气一起运动,最终沉积在后拱的横向墙上,沉积的灰渣和烟尘可由清灰门定期清除。



1. 链条炉排;2. 进料斗;3. 前拱;4. 拱顶;5. 第1燃烧室;6. 2次风口;7. 中拱(折焰墙);8. 第2燃烧室;9. 花墙;  
10. 燃尽室;11. 清灰门;12. 炉膛后墙;13. 横向墙;14. 鼓风机接口;15. 落渣口;16. 布风板;17. 烟气流动方向;18. 燃料层;  
19. 气流扰动方向;20. 1次风口。

1. Endless grate;2. Fuel hopper;3. Front arch;4. Vault;5. First combustion chamber;6. Secondary air outlet;  
7. Mid-arch(Furnace setting);8. Second combustion chamber;9. Perforated wall;10. Burning chamber;  
11. Soot door;12. Furnace rear wall;13. Lateral wall;14. Blower interface;15. Slag outlet;16. Air distribution plate;  
17. Gas flow direction;18. Bed of fuel;19. Airflow disturbance direction;20. Primary air outlet.

图1 新型炉膛结构

Fig.1 Structure of new furnace

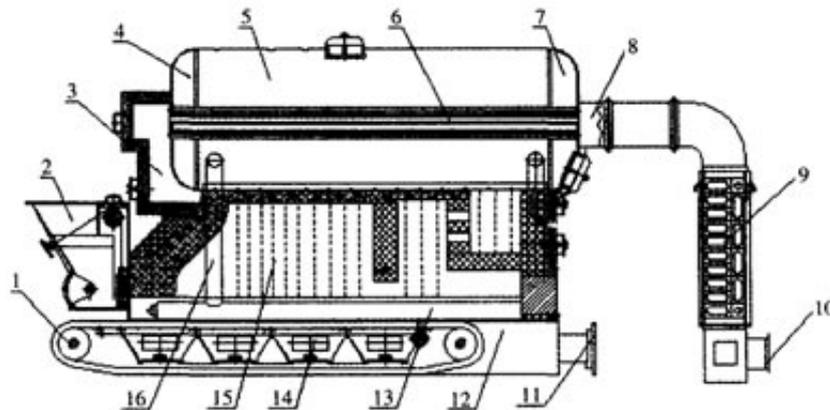
## 3 炉膛燃烧性能试验

### 3.1 试验锅炉结构及工作原理

为判断设计的实际运行水平,将该炉膛结构应用在单锅筒纵置式水火管壳式蒸汽锅炉上进行试验,燃烧设备为链条炉排,额定蒸发量为 $1\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$ ,额定蒸汽压力为 $0.7\text{MPa}$ ,结构如图2所示。

工作过程为燃料由进料斗落入链条炉排上,随着炉排的运动进入炉膛燃烧,燃料层厚度可由闸门调节,燃烧所需要的风量由1次和2次风送入;水冷壁受热后形成汽水化合物,蒸汽向上进入锅筒,下降管中的水由于密度大压迫下集箱填充水冷壁管束,形成水循环;燃烧产生的烟气在炉膛内呈扰动状流动,沿锅筒底部经出口烟窗进入两翼对流管束,

通过前烟箱进入螺纹烟管，经过省煤器、除尘器，由引风机抽引通过烟囱排入大气。



1. 链条炉排;2. 进料斗;3. 前烟箱;4. 前拱形管板;5. 锅筒;6. 螺纹烟管;7. 后拱形管板;8. 后烟箱;9. 省煤器;  
10. 引风机接口;11. 鼓风机接口;12. 落渣口;13. 下集箱;14. 一次风口;15. 锅炉管束;16. 下降管。  
1. Endless grate;2. Fuel hopper;3. Front gas chamber;4. Front arched tube plate;5. Drum;6. Threaded flue tube;  
7. Rear arched tube plate;8. Rear gas chamber;9. Economizer;10. Induced draft fan interface;11. Blower interface;  
12. Slag outlet;13. Lower header;14. Primary air outlet;15. Tube bundle of boiler;16. Down - stream tube.

图2 生物质链条蒸汽锅炉结构

Fig.2 Structure of biomass steam boiler

以上述锅炉为基础，进行了炉膛热性能、温度场、气体浓度场3种试验研究。试验仪器主要包括：(1)MRUDELT65烟气分析仪(北京两林子科技发展有限公司)，其各指标的测量精度分别为： $O_2$  体积浓度精度为 $\pm 0.1\%$ 、 $CO$  体积浓度精度为 $\pm 10 \times 10^{-6}$ 、 $CO_2$  体积浓度精度为 $\pm 0.1\%$ 、效率精度为 $\pm 1\%$ 、排烟温度精度为 $\pm 0.5\%$ ；(2)TN435高温型红外测温仪(北京宝安康电子有限公司)，测量精度为读数值 $1\% \pm 1$ ；(3)DH—WRN 级数字热电偶温度计(江苏兆龙电气有限公司)，精度为 $0.3\% \pm 2.5$ ；(4)testo350型自动烟尘(气)测试仪(河北润联集团公司)，精度为 $\pm 0.2\%$ ；(5)C型压力表，精度为1.0级。

### 3.2 炉膛燃烧效率与污染物排放试验

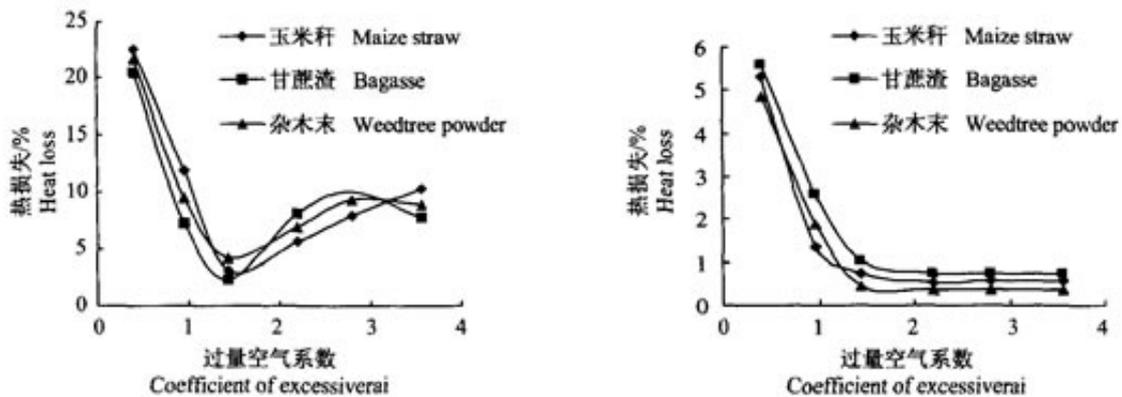
根据GB/T10180-2003《工业锅炉热工性能试验规程》及GB13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》进行锅炉试验。另选取1台市场上流通的生物质锅炉作为对比试验，该锅炉由锅炉生产厂家提供，除炉膛结构外，其余结构布置与上述提出的生物质锅炉基本一致，二者对比试验结果如表1所示。

表 1 2 种不同炉膛结构对比试验结果  
 Table 1 Comparison test results of two different furnace structures

项目 Item	选取的对比锅炉 Contrast boiler			设计的新型锅炉 New type boiler		
	玉米秆 Maize straw	甘蔗渣 Bagasse	杂木末 Weedtree powder	玉米秆 Maize straw	甘蔗渣 Bagasse	杂木末 Weedtree powder
	炉渣中可燃物含量/% Combustible content in slag	17.29	16.50	17.11	9.30	9.86
飞灰中可燃物含量/% Combustible content in flying ash	22.25	26.30	24.62	13.78	14.50	12.28
固体不完全燃烧热损失/% Heat loss from solid incomplete combustion	9.04	10.03	9.22	1.94	2.55	1.60
炉膛出口处 RO <sub>2</sub> 比例/% RO <sub>2</sub> percentage at furnace outlet	14.47	15.89	13.13	26.60	28.01	26.19
炉膛出口处 O <sub>2</sub> 比例/% O <sub>2</sub> percentage at furnace outlet	11.02	11.62	10.90	5.85	6.75	5.90
炉膛出口处 CO 比例/% CO percentage at furnace outlet	1.08	1.36	1.10	0.15	0.33	0.18
气体不完全燃烧热损失/% Heat loss from gas incomplete combustion	2.34	2.75	2.51	0.49	0.78	0.49
炉膛出口过量空气系数 Coefficient of excessive air at furnace outlet	2.12	2.25	2.00	1.33	1.41	1.33
燃烧效率/% Combustion efficiency	88.62	87.22	88.27	97.57	96.67	97.91
炉膛出口烟气温度/℃ Gas temperature at furnace outlet	958	995	1 006	817	799	835
受热面结渣情况 Slag formation in boiler heating surfaces	严重结渣	严重结渣	中等结渣	轻微结渣	轻微结渣	轻微结渣
NO <sub>x</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> ) Concentration of NO <sub>x</sub>	25	26	22	12	12	8
SO <sub>2</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> ) Concentration of SO <sub>2</sub>	72	72	75	17	16	12
烟尘质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> ) Smoke concentration	62	67	60	19	23	11

从表1可以看出，设计的新型炉膛燃烧效率为96.67%—97.91%，对比锅炉提高8%左右；设计的新型炉膛出口烟气温度在799—835 之间，对比锅炉炉膛出口烟气温度降低150 左右，排烟热损失将大幅度减少；设计的新型炉膛污染物排放大幅度降低，远低于国家标准。从燃烧过程来看，对比锅炉炉膛内火焰大幅度剧烈波动，火焰及飞灰在炉膛未密封处冒出，烟气黑度大，燃烧不稳定；设计的新型炉膛内火焰不贴壁、不冲墙、充满度高，壁面热负荷均匀。燃烧结束后对比锅炉炉膛内各段受热面积灰、堵灰问题严重，且不易清理；设计的新型炉膛内积灰问题较轻，且沉积的飞灰可由清灰门清除。

影响炉膛燃烧效率的主要热损失是气体不完全燃烧热损失  $q_3$  与固体不完全燃烧热损失  $q_4$  [8]。通过调节鼓风机与引风机的风门大小,对设计炉膛出口处过量空气系数  $\alpha_{py}$  与  $q_3, q_4$  的关系进行了试验研究,结果如图 3 所示。



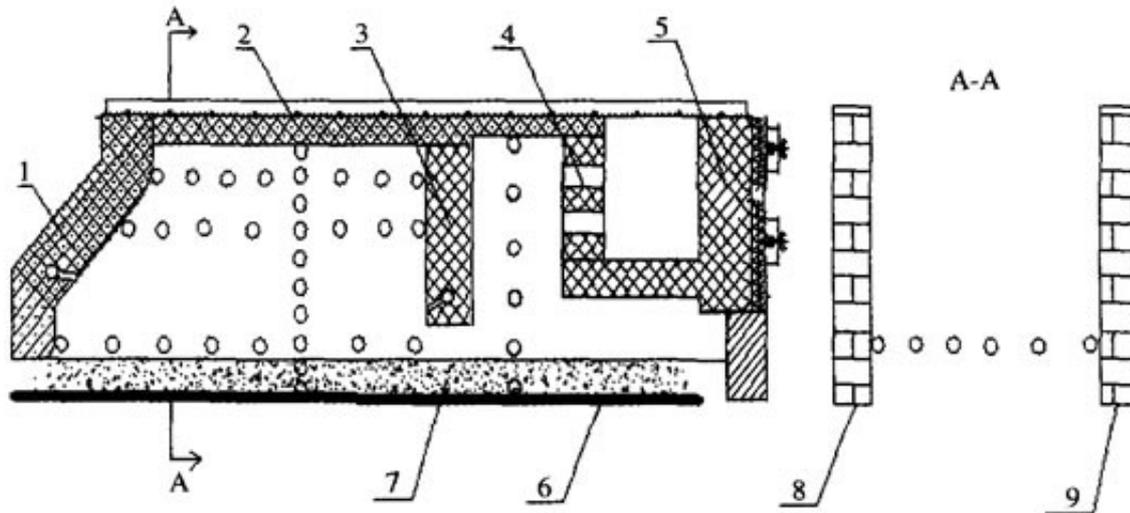
a. 炉膛出口处过量空气系数  $\alpha_{py}$  与  $q_4$  的关系  
b. 炉膛出口处过量空气系数  $\alpha_{py}$  与  $q_3$  的关系  
a. The relationship of excess air factor ( $\alpha_{py}$ ) at the furnace exit and  $q_4$     b. The relationship of excess air factor ( $\alpha_{py}$ ) at the furnace exit and  $q_3$

图 3 炉膛出口处过量空气系数  $\alpha_{py}$  与  $q_3, q_4$  的关系  
Fig.3 The relationship of excess air factor ( $\alpha_{py}$ ) at the furnace exit and  $q_3, q_4$

从图 3 可知,3 种燃料试验结果呈相似规律,过量空气系数过小,则  $q_3$ 、 $q_4$  会很大, $\alpha_{py} = 0.41$  时, $q_3$  在 5% 以上, $q_4$  高达 20%,这是由于该工况下部分燃料没有燃烧而被直接排除炉外,燃烧产生的 CO、CH<sub>4</sub> 等可燃气体也没有再次燃烧;随着过量空气系数的增大, $q_3$  会逐渐减小,稳定在 1% 以下;过量空气系数过大,则  $q_4$  会增大, $\alpha_{py}$  在 2.2 到 3.5 之间时, $q_4$  会接近 10%,这是由于该工况下排烟温度和排烟容积都过大,带走的热量过高,少部分燃料燃烧不充分; $\alpha_{py}$  在 1.3 ~ 1.5 之间时,该炉膛燃烧效率会取得较高数值。

### 3.3 炉膛温度场测试

温度场是生物质链条锅炉重要的运行参数。试验在炉膛内的测点布置情况如图4所示,圆圈代表测点位置,测点高度为布风板以上炉膛净高度,工况条件为80%负荷,原料选取块状玉米杆成型燃料,燃料层高度为30cm。



1. 前墙;2. 拱顶;3. 折焰墙;4. 花墙;5. 后墙;6. 布风板;7. 燃料层;8. 左墙;9. 右墙。

1. Front wall;2. Vault;3. Furnace wall;4. Perforated wall;5. Rear wall;

6. Air distribution plate;7. bed of fuel;8. Left wall;9. Right wall.

图 4 测点布置图

Fig. 4 Arrangement of measuring points

试验测定了炉膛第1、2燃烧室沿高度方向的温度场分布，测量结果如图5所示。从图5可以看出，高度在0.4m处，炉膛温度最高，第1燃烧室为1080

，第2燃烧室为1024。这是由于此处燃料浓度大， $O_2$ 充分，燃料迅速燃烧放热，温度可达最高值。第1燃烧室内，在0.6m到0.8m高度范围内，由于2次风吹入，烟气中的可燃物继续燃烧，温度出现小范围的升高，随后随着高度的增加，炉温逐渐降低，由于2次风的圆形气流扰动作用，使高温烟气停留时间延长，温差梯度小，降温平缓；第2燃烧室内，随着高度的继续增加，炉温逐渐降低至776，温差梯度大，降温明显。这是由于此区域内没有2次风的吹入，高温烟气会经花墙直接进入燃尽室，停留时间短。

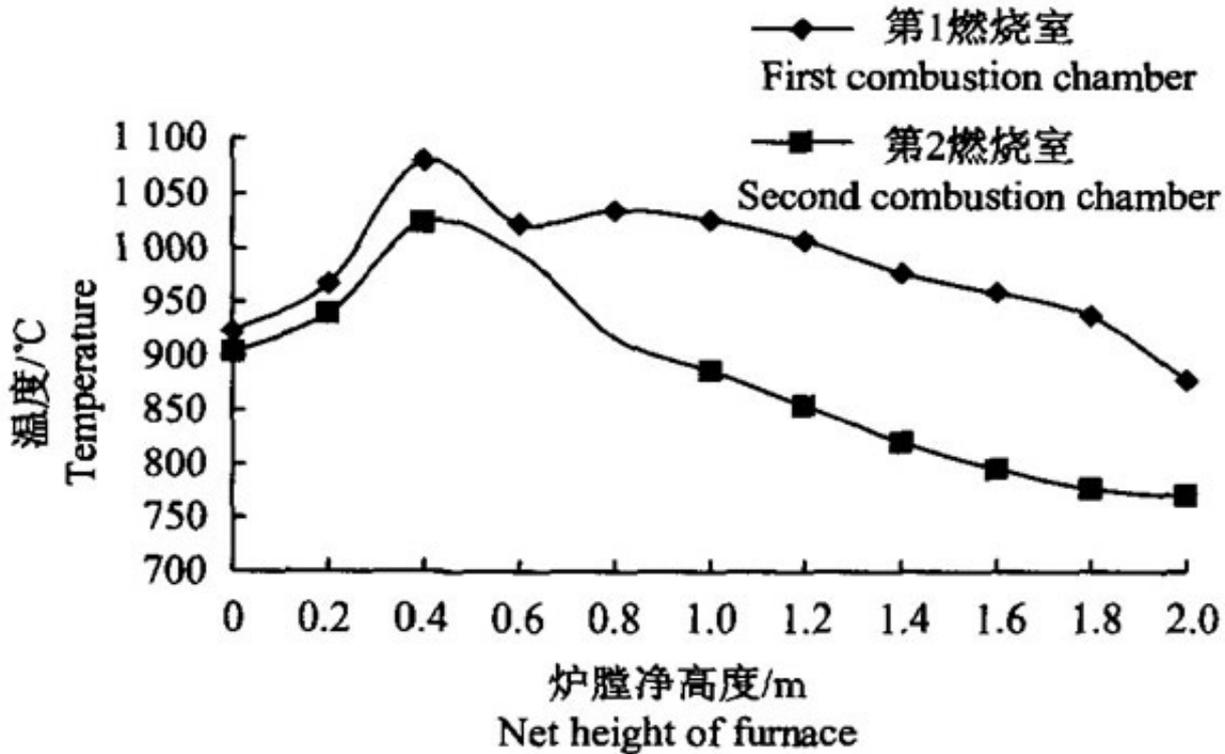


图5 沿炉膛高度方向温度分布

Fig. 5 Temperature distribution in the furnace height direction

试验期间，还在第1燃烧室布分板以上高度0.4、1.2、1.6 m<sup>3</sup>

处炉膛横向截面积内测定了炉膛温度场分布，测试结果如图6所示。从图6可以看出，在0.4m高度处，由于2次风的中间风量，使炉膛中心区域温度高于前墙与折焰墙附近温度，随着炉膛高度的增加，截面温度变化很小，1.2m高度处截面温度在950~1000 之间，1.6m高度处截面温度在903—935 之间。从整体上看，第1燃烧室为主要燃烧区，其横向截面温度分布均匀，说明炉内布风合理，入炉燃料燃尽程度高，炉膛内运行稳定，传热平衡。

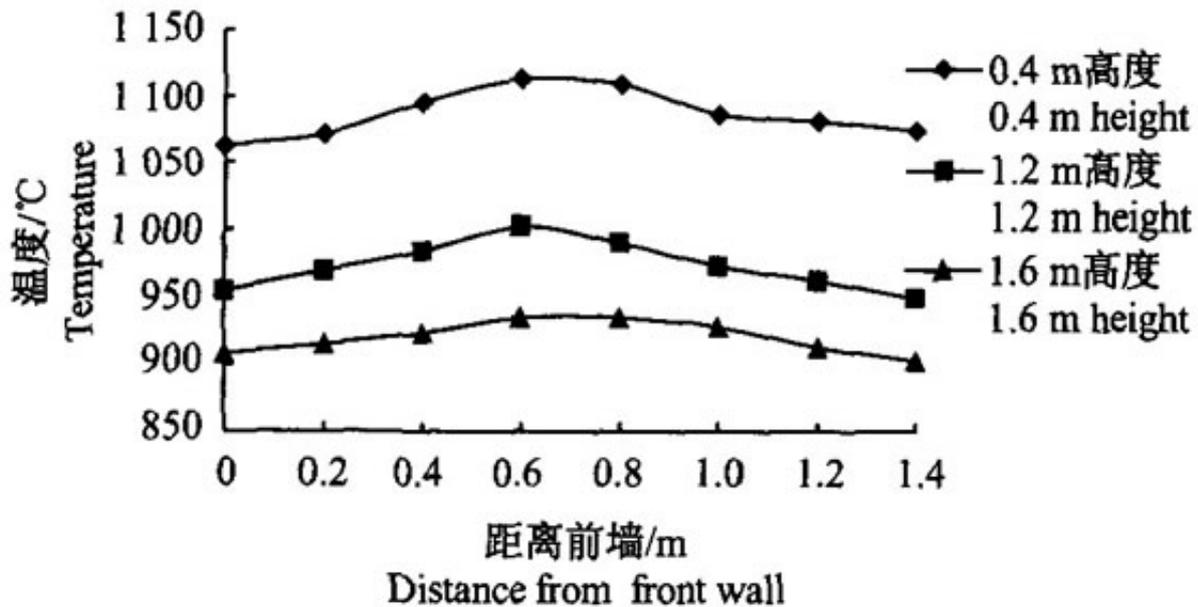
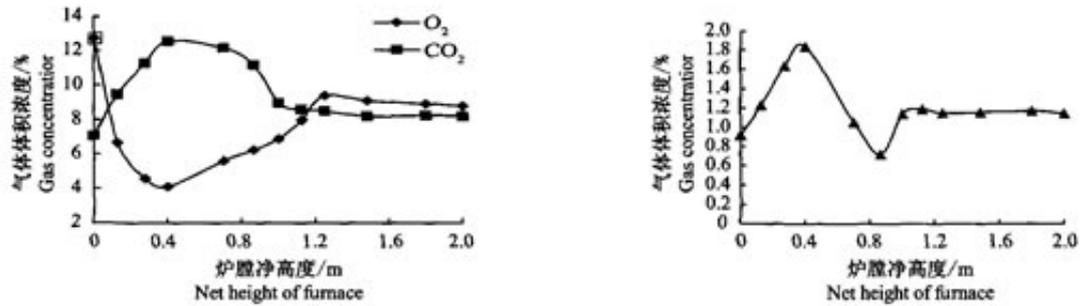


图6 炉膛第1燃烧室横向截面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of transverse section in the first combustion chamber

### 3.4 炉膛气体体积浓度场测试

气体体积浓度分布是判断炉膛内燃烧是否合理的重要依据。作者对炉膛中 $O_2$ 、 $CO$ 与 $CO_2$ 沿炉膛高度、深度方向上的分布情况进行了试验。沿炉膛高度方向气体体积浓度分布试验结果如图7所示。从图7可以看出,在0~0.4m高度范围内, $O_2$ 体积浓度迅速降低,由12.74%降至4.11%, $CO_2$ 体积浓度由7.09%提升至12.60%,说明炉内供风充足,入炉燃料燃烧充分;随着高度的增加,燃烧减弱, $O_2$ 体积浓度逐渐升高, $CO_2$ 体积浓度逐渐降低,1.2m到拱顶范围内趋于恒定, $O_2$ 体积浓度稳定在9.00%左右, $CO_2$ 体积浓度稳定在8.20%左右。在0.4~0.8m高度范围内, $CO_2$ 体积浓度下降不显著, $CO$ 体积浓度由1.84%降至0.72%,这是由于2次风的气流扰动作用, $CO$ 继续燃烧向 $CO_2$ 转化,说明2次风的布置合理,实现可燃气体的再次燃烧。

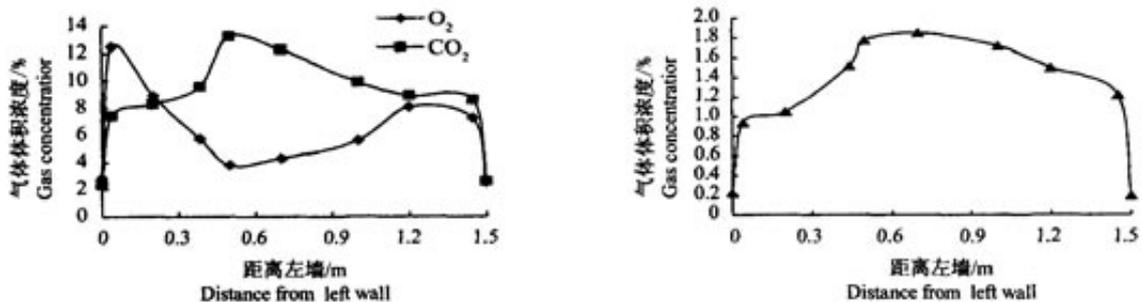


a. 炉膛沿高度方向O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>体积浓度分布 b. 炉膛沿高度方向CO体积浓度分布  
a. Concentration distribution of O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> along height direction in the furnace b. Concentration distribution of CO along height direction in the furnace

图7 炉膛沿高度方向气体体积浓度分布

Fig.7 Gas concentration distribution along height direction in the furnace

在试验中，测定了炉膛0.4m高度处沿深度方向气体体积浓度分布，测试结果如图8所示。从图8可以看出，左、右两侧壁面处气体体积浓度很低，左墙O<sub>2</sub>体积浓度为2.84%，CO<sub>2</sub>体积浓度为2.36%，CO体积浓度为0.22%；右墙O<sub>2</sub>体积浓度为2.51%，CO<sub>2</sub>体积浓度为2.62%，CO体积浓度为0.19%。这是由于水冷壁温度偏低，壁面处存在高浓度的气体下降流，使得气体体积浓度出现急剧变化。炉膛中心处O<sub>2</sub>体积浓度低，为3.80%—5.61%；CO<sub>2</sub>体积浓度高，为9.60%~13.27%；CO体积浓度高，为1.77%~1.85%。这是由于炉膛中心区域燃烧强烈，氧量消耗大，大量的CO<sub>2</sub>与CO产出。气体浓度分布曲线平滑，没有出现剧烈的上下波动，说明炉内气体与燃料混合良好，燃烧合理。



a. 炉膛沿深度方向O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>体积浓度分布 b. 炉膛沿深度方向CO体积浓度分布  
a. Concentration distribution of O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> along depth direction in the furnace b. Concentration distribution of CO along depth direction in the furnace

图8 炉膛沿深度方向气体体积浓度分布

Fig.8 Gas concentration distribution along depth direction in the furnace

#### 4结论

1)由热性能对比试验结果可以看出，在设计新型炉膛内燃用玉米秆、甘蔗渣、杂木末3种生物质成型燃料，热性能明显优于对比锅炉，其燃烧效率分别提高至97.57%、96.67%和97.91%；炉膛出口烟温分别降低至817、799、835；受热面结渣以及积灰堵灰情况明显减轻；烟气中污染物NO<sub>x</sub>质量浓度分别降低至12、12、8mg·m<sup>-3</sup>，SO<sub>2</sub>质量浓度分别降低至17、16、12mg·m<sup>-3</sup>，烟尘质量浓度分别降低至19、23、11mg·m<sup>-3</sup>，均低于国家标准。说明该炉膛结构适应性强，达到了设计要求，该设计为适合生物质燃料燃烧的炉膛结构。

2)试验得出新型炉膛内温度分布规律。沿炉膛高度方向上，第1、2燃烧室温度均呈现先增大后减小的趋势，0.4m高度处温度达到峰值，分别为1080 和1024 ；第1燃烧室在0.6~0.8m高度范围内由于2次风作用，温度出现回升。沿炉膛横向截面方向上，第1燃烧室在0.4、1.2、1.6m高度处温度分布均匀。炉膛温度分布符合生物质燃料燃烧特性，证实炉膛设计的合理性，能组织生物质成型燃料稳定、高效的燃烧。

3)试验得出新型炉膛内气体体积浓度分布

规律。沿炉膛高度方向上， $O_2$  体积浓度先减小后增大，在0.4m高度时最低为4.11%，到1.2m高度时稳定在9.00%左右； $CO_2$  体积浓度先升高后降低，在0.4m高度时最高为12.60%，到1.2m高度时稳定在8.20%左右；CO体积浓度呈现先增加后减小再趋于恒定的趋势，在0.4m到0.8m高度范围内向 $CO_2$  转化，体积浓度下降。炉膛中心区域燃烧强烈， $CO_2$ 与CO体积浓度高， $O_2$  体积浓度低。炉膛内气体体积浓度分布符合生物质燃料燃烧规律，说明炉膛设计合理，能有效地组织炉内空气动力场，提高燃烧效率，缓解生物质燃烧过程中积灰结渣问题。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/125674.html>