

# 秸秆成型燃料双层炉排锅炉炉膛温度分布试验与分析

刘圣勇<sup>1</sup>, 马 骏<sup>2</sup>, 李 荫<sup>1</sup>, 谢海江<sup>1</sup>, 郭前辉<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室, 郑州 450002; 2. 开封晋开化工责任有限公司, 开封 475002)

**摘要:** 在 4 种工况下: 1. 最小风门  $\alpha_{py}$  为 1.6、2. 较小风门  $\alpha_{py}$  为 2.2、3. 较大风门  $\alpha_{py}$  为 3.2、4. 最大风门  $\alpha_{py}$  为 4.4, 分别对作者设计的双层炉排秸秆成型燃料锅炉炉膛温度分布进行试验, 结果表明: 在 4 种工况下, 炉膛垂直方向、深度方向、宽度方向温度分布出现不同特点, 在工况 2、3 之间锅炉炉膛的温度分布较合理, 燃料燃烧状况较好, 实现了锅炉安全、稳定、经济运行, 从而为锅炉燃烧设备优化设计及运行调整提供依据。

**关键词:** 生物质能; 秸秆成型燃料; 双层炉排锅炉; 温度分布

**中图分类号:** TK223.21; TK16

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2006)07-0101-04

刘圣勇, 马 骏, 李 荫, 等. 秸秆成型燃料双层炉排锅炉炉膛温度分布试验与分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 101-104.  
Liu Shengyong, Ma Jun, Li Yin, et al. Experiment and analysis of temperature distribution of straw double-grate briquette boiler furnace-tank[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 101-104. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

秸秆成型燃料是高效洁净能源<sup>[1,2]</sup>, 具有便于贮存、运输、使用方便和燃烧效率高等特点<sup>[3,4]</sup>。

目前中国对秸秆成型燃料燃烧方面的理论研究和应用研究很少, 还没有性能优良的秸秆成型燃料专用锅炉<sup>[5,6]</sup>。为了燃烧大量的秸秆成型燃料, 一些单位必须把原有的燃煤锅炉加以改造, 但改造后的锅炉仍存在着炉膛内温度分布不合理, 致使锅炉燃烧效率及热效率较低, 出力及工质参数下降, 污染物排放超标<sup>[7,8]</sup>。作者根据秸秆成型燃烧理论已研制出秸秆成型燃料专用锅炉<sup>[9]</sup>。根据燃烧反应动力学理论, 温度对燃烧反应速度的影响极大, 反应速度一般随温度的升高而增大。试验证明, 常温下温度每升高 10℃, 反应速度将增加到原来的 2~4 倍。假设温度升高 100℃, 化学反应速度大约增加  $3^{10} = 59000$  倍<sup>[10]</sup>。因此炉膛温度是影响燃料燃烧的一个重要条件, 直接影响炉膛均匀燃烧程度及经济燃烧性, 同时也是锅炉合理布置受热面的一个重要依据, 因此了解生物质成型燃料锅炉温度分布是至关重要的。

## 1 试验方法及使用仪器

秸秆成型燃料的挥发分远高于煤, 灰分和含碳量远小于煤, 其热值小于煤, 秸秆成型燃料这种特点就决定了它的燃烧具有一定的特征<sup>[11]</sup>。

根据秸秆成型燃料特性笔者设计了秸秆成型燃料双层炉排, 该锅炉由上炉门、中炉门、下炉门、上炉排、辐射受热面、下炉排、风室、炉膛、燃烬室、对流受热面、炉墙、排气管、烟道、烟囱等部分组成<sup>[9,12]</sup>。

收稿日期: 2005-02-14 修订日期: 2006-04-17

基金项目: 河南省自然科学基金(0411052000); 郑州市科技局科技攻关项目(052SGYC34150)

作者简介: 刘圣勇(1964-), 男, 河南柘城人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事可再生能源方面研究工作。郑州 河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室, 450002。Email: Liushy@vip.sina.com

## 1.1 试验方法

### 1) 测点布置

以炉膛的高度为坐标  $Z$ , 以炉膛宽度为  $X$  坐标, 以炉膛的深度为  $Y$  坐标, 建立直角坐标系。根据有限元分割方法, 将炉膛分为若干个截面, 把每个截面分为若干个方格, 每个方格的对角线的交叉点即为某个截面内某个测点的位置<sup>[13]</sup>。这样燃烧设备侧墙上将留有较多的侧孔, 考虑加工方便, 只在上下炉膛对称线上留 38 个测孔。测点布置如图 1 所示。

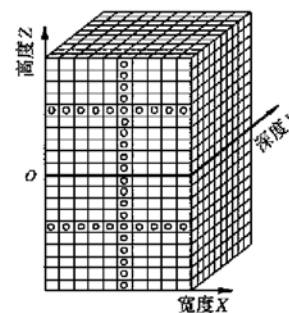


图 1 锅炉炉膛温度测点布置

Fig. 1 Measured point disposal of the temperature of straw briquette boiler furnace-tank

### 2) 试验条件

试验分 4 种工况运行, 工况 1 小风门燃烧  $\alpha_{py} = 1.6$  (风门控制, 使用 KM9106 燃烧气体分析仪测定), 能够保持锅炉炉膛内燃烧持续进行, 燃烧状况较差, 锅炉热效率为 96.98%; 工况 2 最佳风门燃烧  $\alpha_{py} = 2.2$ , 燃烧效率最高, 燃烧状况最好, 能够保持锅炉最经济运行, 锅炉热效率为 98.20%; 工况 3 较佳风门燃烧  $\alpha_{py} = 3.2$ , 锅炉供热量最大, 燃烧效率较高, 燃烧状况良好, 锅炉热效率为 97.81%; 工况 4 最大风门燃烧  $\alpha_{py} = 4.4$ , 能够保持锅炉持续燃烧, 燃烧状况较差<sup>[9]</sup>, 锅炉热效率为 96.38%。试验燃料为液压成型玉米秸秆, 粒度为  $\Phi 130$  mm 圆柱, 密度为  $0.919 \text{ t/m}^3$ , 收到基净发热量为  $15658 \text{ kJ/kg}$ , 含水率为 15%, 环境温度为 11℃, 大气压

力为 980 hpa。试验分 3 个周期进行, 每个周期分别对上述 4 种工况进行试验, 每种工况加入燃料燃烧调整到正常状态后, 测试持续 4 h, 求算术平均值。

## 1.2 试验仪器

1) SWJ-IIIk 精密数字温度计及铂铑-铂热电偶, 测量范围 0~1200℃, 分辨率 1℃, 稳定度为 ±1℃, 线性误差 ±2℃, 传感器 K.S 铠装, 响应时间 10 s, 环境温度 -10~50℃, 湿度 ≤85%。

2) Raynger3iLTDL2 便携式红外温度测量仪。测温范围 -30~1200℃, 光学分辨率 75:1, 光谱范围 8~14 μm, 瞄准方式: 双激光。

3) KM9106 燃烧气体分析仪, 其各指标的测量精度分别为: O<sub>2</sub> 浓度 -0.1% 和 +0.2%、CO 浓度 ±20×10<sup>-6</sup>、CO<sub>2</sub> 浓度 ±0.5%、效率 ±1%、排烟温度 ±0.3%。

4) 秒表, 米尺。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 垂直方向温度分布

#### 1) 上炉膛垂直方向温度分布

双层炉排燃烧方式, 4 种工况上炉膛测得的温度随 Z 轴变化规律如图 2 所示。

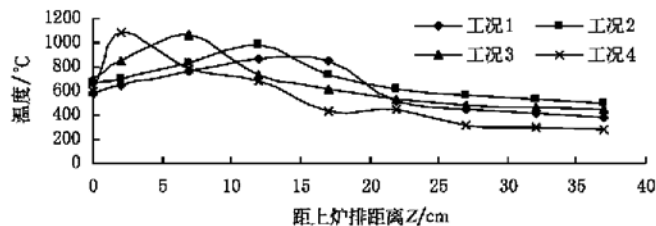


图 2 双层炉排上炉膛垂直方向温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of up-furnace-tank in height Z axis direction using double-grate

① 从图 2 可看出, 双层炉排燃烧时上炉膛内各工况下垂直方向温度变化呈现相似规律, 双层炉排燃烧时, 燃烧属于下吸式燃烧方式, 燃料的上层为干燥层向下依次为干馏层、氧化层、还原层、灰渣层、冷空气从炉门进入依次经过上炉膛干燥层、干馏层、氧化层、还原层、灰渣层经过下炉膛而排向后部<sup>[14, 15]</sup>。从炉膛最高处到燃料层上部, 炉温由低逐渐增高: 工况 1 由 380℃ 升至 450℃, 工况 2 由 500℃ 升至 570℃, 工况 3 由 450℃ 升至 490℃, 工况 4 由 286℃ 升至 316℃; 在燃料层内, 炉温由低逐渐增高, 增加到一定程度炉温突然增高, 且达到最高值: 工况 1 由 520℃ 升至最大到 870℃, 工况 2 由 620℃ 升至最大到 984℃, 工况 3 由 540℃ 升至最大到 1059℃, 工况 4 由 449℃ 升至最大到 1086℃; 随着高度减小, 炉温逐渐降低: 工况 1 降至 588℃, 工况 2 降至 667℃, 工况 3 降至 708℃, 工况 4 降至 601℃。

② 从图 2 可看出, 随着风门由小变大由工况 1 到工况 4, 温度的峰值逐渐由高处落向低处, 表明氧化层高度逐渐增加, 而还原层的高度逐渐减小。其温度的峰值还随着风门的增加即工况 1 到工况 4 逐渐增高。工况

1 温度峰值最小为 900℃ 左右, 工况 4 温度峰值最大为 1100℃ 左右, 工况 2、工况 3 为 900~1100℃ 左右。燃料层上方炉膛温度随着风门逐渐增大, 取决于空气吸热与燃料放热量综合因素影响而逐渐变低。

#### 2) 下炉膛垂直方向温度分布

由工况 1 到工况 4 下炉膛在垂直方向上测得温度结果如图 3 所示。

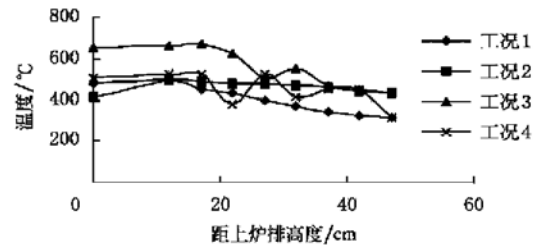


图 3 双层炉排下炉膛垂直方向温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of the down-furnace-tank in vertical direction (Z axis) using double-grate

① 从图 3 可知, 双层炉排燃烧各种工况下炉膛垂直方向温度分布呈现相似规律, 高温烟气从上炉膛经水冷壁进入下炉膛, 温度降低, 随着烟气向下方向移动, 热量进一步散发, 温度逐渐降低: 工况 1 由 500℃ 降至 314℃, 工况 2 由 498℃ 降至 431℃, 工况 3 由 667℃ 降至 434℃, 工况 4 由 527℃ 降至 313℃。这是因为, 随着距上炉排距离增大, 烟气向水冷壁及周围传热与其获得热量之差逐渐增大, 烟气温度逐渐降低。

② 从图 3 可知, 双层炉排燃烧 4 种工况下, 炉膛垂直方向温度分布特性不同。工况 3, 燃料燃烧速度快燃料放出热量多, 炉温较高, 随着离上炉排距离增大, 温降 (233℃) 大; 工况 2, 燃料燃烧速度适中, 燃料放热量与水冷壁吸收热量匹配较好, 温度适中, 随着离上炉排距离增大, 温降 (67℃) 小, 下炉膛炉温在垂直方向上分布均匀; 工况 4, 风门最大, 过剩空气量最大, 燃料燃烧速度并不高, 炉温较低, 燃料放热与水冷壁吸热不匹配, 随着离上炉排距离增大, 温降 (214℃) 大, 且减幅不稳定, 下炉膛温度分布不均匀。工况 1, 风门最小, 空气量不足, 燃料燃烧速度不高, 且火焰下吸幅度小, 下炉膛温度低, 随着离上炉排距离增大, 温降 (186℃) 较小。

### 2.2 炉膛深度方向温度分布

#### 1) 上炉膛深度方向温度分布

双层炉排燃烧时, 各种工况上炉膛深度方向温度测试结果如图 4 所示。

① 从图 4 可知, 双层炉排燃烧时, 上炉膛深度方向温度分布不均匀, 在上炉膛炉口处, 冷空气吸收了烟气热量而炉温变得较低, 随着冷空气向里流动, 空气温度逐渐升高, 温度高; 当距炉口 7 cm 时, 热的空气与下面燃料充分混合形成了燃烧有利条件, 燃料燃烧速度大, 炉温急剧上升; 在炉膛深度 12 cm 处, 空气流速降低, 燃料层燃烧状况较差, 温度降低; 随着炉膛深度的增大, 炉膛深度方向空气流速均匀, 空气温度较高, 形成了良好的燃烧条件, 燃料燃烧速度加大, 炉温逐渐升高, 在距炉

口 42 cm 处出现温度较高点。4 种工况, 炉温随炉膛深度方向变化呈现相似规律。进炉口处炉温较低: 工况 1 为 500℃, 工况 2 为 572℃, 工况 3 为 656℃, 工况 4 为 433℃, 距炉口 7 cm 左右达到最高, 出现第一次峰值: 工况 1 达到 536℃, 工况 2 达到 690℃, 工况 3 达到 788℃, 工况 4 达到 496℃; 距炉口 12 cm 处炉温有所降低, 再向里温度慢慢升高; 在 42 cm 时工况 1、2、3 炉温出现第二个峰值: 工况 1 达到 688℃, 工况 2 达到 734℃, 工况 3 达到 727℃, 在 32 cm 时工况 4 炉温出现第二个峰值达到 372℃。

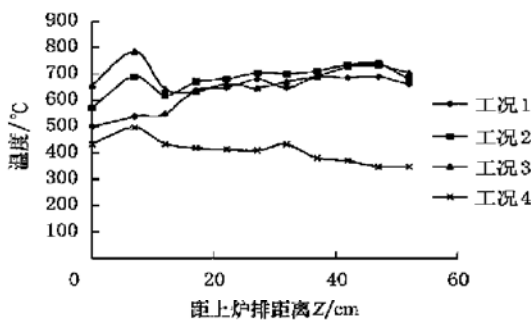


图 4 双层炉排燃烧上炉膛深度方向温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of the up-furnace-tank in depth Y axis direction using double-grate

② 从图 4 可知, 炉温工况 2 > 工况 3 > 工况 1 > 工况 4, 工况 2、工况 3 炉膛空气与燃料混合良好, 燃料燃烧速度高, 燃料放热与水冷壁吸热匹配好, 炉温较高, 且随炉膛深度增高, 炉温变化幅度小; 工况 1 即风门最小, 从表面看, 炉温高, 炉温分布相对均匀, 其实这时燃烧方式已成为上吸式燃烧, 失去了双层炉排燃烧的意义, 这时对相应的下炉膛炉温相当低; 工况 4 即风门最大时, 上面热量被较高风速的冷空气带走, 经下炉膛排向对流受热面, 此时, 上下炉膛炉温过低, 且随炉膛深度方向温度分布不均匀, 不利于燃料的充分燃烧。

#### 2) 下炉膛深度方向温度分布

双层炉排燃烧时, 各工况, 下炉膛深度方向温度测试结果如图 5 所示。

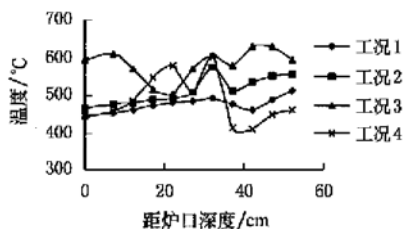


图 5 双层炉排燃烧下炉膛深度方向温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of the down-furnace-tank in depth Y axis direction using double-grate

① 从图 5 可知, 在双层炉排燃烧条件下炉膛深度方向 4 种工况温度分布与上炉膛有所区别, 工况 1、工况 2、工况 4 下炉膛最高温度出现在炉膛中心距炉口为 32 cm, 温度分别为 491℃, 575℃, 605℃, 而工况 3 下炉膛最高温度出现在炉膛中心距炉口为 42 cm, 温度为

631℃。前后两段温度稳定, 变化幅度不大。因为在炉膛深度中间, 空气与燃烧产物混合均匀, 燃烧速度快, 放热量增大所致; 而前后两段, 空气与可燃产物混合得较好, 燃烧速度适中, 相对应炉膛传热也增强, 因此, 前后两段温度低, 随深度方向分布较均匀;

② 从图 5 可知, 双层炉排燃烧时, 4 种工况下炉膛深度方向上温度工况 3 > 工况 2 > 工况 4 > 工况 1。对于工况 3, 空气与燃料能够充分混合, 燃料燃烧速度与效率都较高, 而出现深度方向炉温最高, 但随深度增加炉温变化幅度较大, 这主要是通风量不均匀造成; 对于工况 2, 下炉膛温度深度方向上较高, 空气量适中, 燃料燃烧速度快, 燃烧充分, 炉温随深度分布也比较均匀; 对于工况 4 风门最大, 过量空气系数大, 空气量过剩, 燃烧强度会增大, 但空气带出热量相对也多, 炉温并不太高, 且在深度方向空气分布不均匀造成炉温分布也不均匀; 对于工况 1, 风量最小, 燃烧速度小, 吸热与放热不协调, 上炉膛温度高而下炉膛温度变低。

### 2.3 炉膛宽度方向温度分布

#### 1) 上炉膛宽度方向温度分布

双层炉排燃烧时, 4 种不同工况所得炉温在炉膛宽度上的分布如图 6 所示。

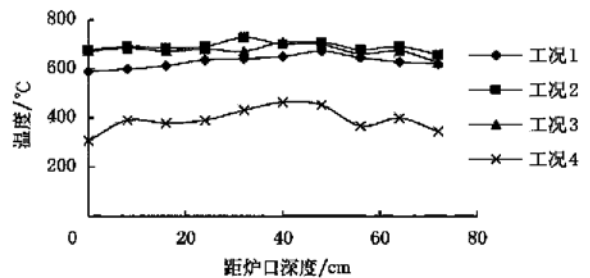


图 6 双层炉排燃烧上炉膛宽度方向温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of the up-furnace-tank in width X axis direction using double-grate

① 从图 6 可看出, 双层炉排燃烧上炉膛在宽度方向上的温度分布较均匀, 因为炉膛通风好, 布风均匀。由于由工况 1 到工况 4 布风量依次增加, 平均炉温依次降低。

② 从图 6 可看出, 4 种不同工况上炉温在炉膛宽度上分布有所不同。对于工况 2 与工况 3 风门开启适当, 炉膛空气过剩系数合理, 在炉膛宽度方向风速分布均匀, 燃料燃烧速度适中, 在炉膛宽度方向温度分布均匀; 对于工况 1, 风门最小, 从表面看, 炉温高, 炉温分布相对均匀, 其实这时燃烧方式已成为上吸式燃烧, 失去了双层炉排燃烧的意义, 这时下炉膛炉温相当低; 对于工况 4, 风门最大, 炉膛中过剩空气系数最大, 空气吸收炉膛内的热量, 使炉温降低很多, 又由于炉膛内风速分布不均匀, 因此造成在炉膛宽度方向燃烧速度及放热量忽高忽低, 炉温变化幅度增大, 但总体中间温度高, 两侧较低。炉温工况 2 > 工况 3 > 工况 1 > 工况 4。

#### 2) 下炉膛宽度方向温度分布

双层炉排燃烧时, 4 种不同工况在炉膛宽度上所测

得炉膛温度分布如图7所示。

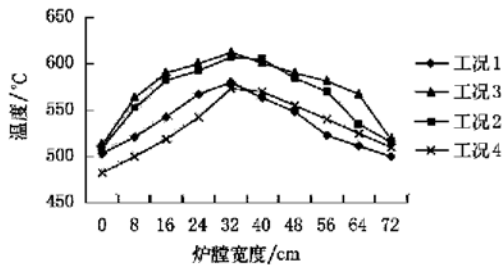


图7 双层炉排燃烧下炉膛宽度方向温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of the down-furnace-tank in width X axis direction using double-grate

① 从图7可看出, 双层炉排燃烧时, 在炉膛宽度方向4种工况平均炉温分布是中间高, 两侧低, 符合燃烧一般规律。这是因为炉膛中间段通风量大, 燃料燃烧条件好, 燃料燃烧速度快放热量多, 炉温高; 而炉膛两侧通风量受到限制, 燃烧条件差, 燃料燃烧速度变小, 放热量少, 加之有热量会通过炉壁向两侧散热, 两侧炉温更低。

② 从图7可看出, 双层炉排燃烧时, 4种不同工况, 下炉温在宽度方向变化规律相似, 即炉膛中间温度高, 两侧温度低。但由于工况不同, 每种工况的炉温又有所差异。对于工况2、工况3风门开启适当, 炉膛中过剩空气系数适中燃料与空气混合适当, 燃料燃烧速度快, 单位时间内放热量多, 炉温高; 对于工况1风门开度小, 空气量不足, 燃烧速度小, 单位时间内放出热量少, 炉温最低; 对于工况4风门最大, 炉膛中过剩空气系数最大, 通过炉膛时吸收炉膛中的热量使炉温降低, 使燃烧工况变差, 炉温变得较低。

#### 4 结论与讨论

1) 秸秆成型燃料锅炉双层炉排燃烧, 在 $\alpha_{py} = 2.2$ 炉膛温度在炉膛垂直方向、深度方向、宽度方向分布均匀, 燃料燃烧速度快, 燃料燃烧完全, 燃烧效率高。

2) 对双层炉排燃烧方式进行试验得出炉膛中温度分布规律, 为新燃烧设备炉膛设计及旧燃烧设备炉膛的改造, 合理组织经济燃烧提供一定指导。

3) 从试验看双层炉排燃烧靠近四边壁炉温低, 而炉膛四角的温度更低, 燃烧有死角存在, 炉膛四角形状应加以改造, 炉膛的形状应尽量使气流充满, 以保证炉膛容积得到充分利用。

#### [参考文献]

- [1] Mann M K, Spath P L 著, 戴林, 王年华, 占增安译, 贡光禹校. 生物质气化联合电站系统的碳循环评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [2] 田宜水, 张鉴铭, 陈晓夫, 等. 秸秆直燃热水锅炉供热系统的研究设计[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 87- 89.
- [3] Liu Shengyong, Li Yin, Yue Jianzhi. Experimental study of thermal performance of straw briquette boiler[A]. The Second China International Renewable Energy Equipment & Technology Exhibition and Conference [C]. Beijing China, 2005: 172- 179.
- [4] 马孝琴. 生物质(秸秆)成型燃料燃烧动力学特性及液压秸秆成型机改进设计研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2002.
- [5] 马孝琴, 李刚. 小型燃煤锅炉改造成秸秆成型燃料锅炉的前景分析[J]. 农村能源, 2001, (5): 20- 22.
- [6] 林维纪, 张大雷. 生物质固化成型技术的几个问题[J]. 农村能源, 1998, (6): 16- 17.
- [7] 刘雅琴. 大力开发工业锅炉生物质燃烧技术前景分析[J]. 工业锅炉, 1999, (3): 2- 3.
- [8] 刘圣勇, 陈开砚, 张百良. 国内外生物质成型燃料设备研究与开发现状[J]. 可再生能源, 2002, (4): 14- 15.
- [9] 刘圣勇, 张百良, 杨群发. 双层炉排生物质燃料锅炉设计与研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 20- 22.
- [10] 张全国, 刘圣勇. 燃烧理论及其应用[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1993.
- [11] 刘圣勇, 李荫, 徐桂转, 等. 秸秆成型燃料锅炉炉膛气体浓度分布规律的试验与分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 133- 136.
- [12] 林宗虎, 徐通模. 实用锅炉手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [13] 陈焕生. 温度测试技术及仪表[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [14] 常弘哲, 张永康, 沈际群. 燃料与燃烧[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1993.
- [15] 刘圣勇, 赵迎芳, 张百良. 生物质成型燃料燃烧理论分析[J]. 能源研究与利用, 2002, (6): 26- 28.

## Experiment and analysis of temperature distribution of straw double-grate briquette boiler furnace-tank

Liu Shengyong<sup>1</sup>, Ma Jun<sup>2</sup>, Li Yin<sup>1</sup>, Xie Haijiang<sup>1</sup>, Guo Qianhui<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Renewable Energy of Ministry of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Jinkai Chemical Industry Co. Ltd., Kaifeng 475002, China)

**Abstract:** Under four different working conditions (the smallest air valve  $\alpha_{py} = 1.6$ , the smaller air valve  $\alpha_{py} = 2.2$ , the larger air valve  $\alpha_{py} = 3.2$  and the largest air valve  $\alpha_{py} = 4.4$ ), the double fire grate boiler designed by the author was tested. The corresponding result is that the temperature distribution appears similar law in height, depth and width direction. Secure, stable and economical operation of the boiler can be realized on the better work state (between state 2 and state 3). It could be an important type of straw briquette boiler. It lays foundation for optimization design of burning equipment and running adjustment.

**Key words:** biomass energy; straw briquette; double-grate boiler; temperature distribution