

# 稻壳在循环流化床内的燃烧试验研究

伊晓路, 张卫杰, 郭东彦, 徐 健, 许 敏, 孙 立

(山东省科学院能源研究所, 济南 250014)

**摘 要:** 为了了解风量对稻壳在循环流化床内燃烧温度的影响, 在循环流化床试验装置上测量了炉膛内燃烧温度并分析其变化规律以确定稻壳燃烧参数。当风料比为  $4.2 \text{ m}^3/\text{kg}$  时, 二次风与一次风量比  $1 \sim 1.2$  时燃烧工况较好, 炉膛内温度控制在  $800 \sim 850^\circ\text{C}$ ; 在燃烧过程中有焦炭回料时, 炉膛内温度分布均匀, 波动范围较小; 否则炉膛内温度分布不均匀。稻壳灰熔点为  $1230^\circ\text{C}$ , 但温度  $1000^\circ\text{C}$  时就出现结焦; 在温度  $700 \sim 800^\circ\text{C}$  时出现结团, 采取炉膛内温度升高后和流化风速较大时加入石英砂以及点火之初选择  $1 \text{ m/s}$  左右的流化风速, 将可以大大减少结团现象。

**关键词:** 稻壳; 循环流化床; 热解曲线; 结焦; 结团

**中图分类号:** TK6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)4-0212-05

伊晓路, 张卫杰, 郭东彦, 等. 稻壳在循环流化床内的燃烧试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 212-216.

Yi Xiaolu, Zhang Weijie, Guo Dongyan, et al. Experimental study on rice hull combustion in circulating fluidized bed[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 212-216. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

据世界粮农组织预测, 以生物质能源为主的可再生能源将提供全世界 60% 的电力和 40% 的燃料, 生物质燃料的开发利用已经成为世界的共识<sup>[1-3]</sup>。现在生物质能利用方式很多。直接燃烧技术则是一种相对简单并切实可行的应用技术。循环流化床 CFB 燃烧技术的发展促进了生物质能的利用转换。在 20 世纪 80 年代末开始, 国外在生物质循环流化床燃烧技术方面已经有了一定规模和运行经验<sup>[4]</sup>, 而在中国的应用刚刚起步<sup>[5,6]</sup>。至今还没有直接单独燃烧稻壳的循环流化床锅炉。稻壳流化特性不好, 陈冠益等<sup>[7]</sup>研究发现, 稻壳和石英砂混合流化特性要好于稻壳和煤混合流化特性。但是国内外对生物质燃料与高热值燃料混烧的研究还不够系统<sup>[8]</sup>, 所以燃烧技术也就受到了限制。文献[9]中侧重分析了循环流化床中生物质原料粒度对燃烧特性影响。在实验中还发现生物质在循环流化床燃烧时一、二次风量配比、焦炭循环对炉膛内燃烧温度影响很大, 同时总结出了解决炉内结团结焦的解决办法。

## 1 稻壳燃烧试验

### 1.1 稻壳着火特性

对于稻壳热解特性研究很多, 这里主要分析稻壳的

着火性能, 引入文献[10]挥发分释放特性指数  $D$ , 其表达式如下

$$D = \frac{(dW/dt)_{\max}}{T_{\max} \cdot \Delta T_{1/3}} \quad (1)$$

式中  $D$ ——挥发分释放特性指数;  $(dW/dt)_{\max}$ ——失重速率的最大值,  $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $T_{\max}$ ——对应最大失重速率时的温度, K;  $\Delta T_{1/3}$ ——对应  $D = \frac{(dW/dt)}{(dW/dt)_{\max}} = \frac{1}{3}$  时的温度区间, K。

挥发分释放特性指数是综合了挥发分释放特性曲线上的挥发分最大释放速度峰值  $(dW/dt)_{\max}$ , 对应于  $(dW/dt)_{\max}$  的  $T_{\max}$ , 以及  $D = \frac{(dW/dt)}{(dW/dt)_{\max}} = \frac{1}{3}$  对应的温度区间  $\Delta T_{1/3}$ 。一般来讲  $D$  值越小, 对应的着火温度越高; 反之着火温度就低。在 DTG 曲线<sup>[9]</sup>上取值计算得出稻壳的挥发分释放特性指数  $D$  在  $5 \times 10^{-5}$  左右, 在文献[10]中列出的着火温度低于  $360^\circ\text{C}$  的烟煤、褐煤的  $D$  值在  $5 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$  之间, 所以稻壳着火温度肯定低于  $360^\circ\text{C}$ 。

### 1.2 试验装置与方法

稻壳燃烧特性试验是在生物质循环流化床系统上进行的。图 1 为该试验台简图。系统主要由下列设备构成: 流化床, 循环床, 烟尘分离器, 风机、给料装置以及测试操作系统等。流化床外径 800 mm, 高度 8000 mm; 炉膛由耐高温材料浇注而成; 给料装置为螺旋给料机。

试验稻壳由给料装置送入炉内, 在底部给风作用下流化燃烧。为了更好的反映炉内燃烧状况, 沿炉膛轴向

收稿日期: 2006-07-16 修订日期: 2007-03-15

基金项目: 国家 863 资助项目(2003AA514030)

作者简介: 伊晓路(1973-), 男, 山东蒙阴人, 工程师, 主要从事生物质能的研究与开发工作。济南 山东省科学院能源研究所, 250014。

Email: yiw ei306@126.com

均布了4个温度采集点。在温度 $T_3$ 测点下300 mm处增设二次风进口。二次风主要作用是挥发分燃烧提供足够空气量及增强扰动。试验过程中,用浮子流量计计量一次风量 $Q_1$ 和二次风量 $Q_2$ ,令 $i = Q_2/Q_1$ 。分别取 $i$ 值为0.5、0.8、1、1.2和1.5。在调整风量比时,稻壳燃烧总空气量不变。计算得稻壳燃烧理论空气量为 $3.5 \text{ m}^3/\text{kg}$ (标准状态),在试验时取空气过剩系数1.2即正常燃烧时风料比 $N$ 为 $4.2 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。所谓风料比 $N$ 是指试验中选择的稻壳燃烧时加入稻壳量和总配风量的比例。通过取不同 $i$ 值,观察炉内温度变化情况。稻壳燃烧

可分两个阶段即挥发分析出燃烧和焦炭燃烧,前者约占燃烧时间的10%,后者则占90%<sup>[11]</sup>;而Borghini等人则发现煤焦炭的燃尽时间比挥发分的燃烧时间大两个数量级<sup>[12]</sup>。这样大量挥发分析出后迅速燃烧,需二次风提供足够空气量,因此 $i$ 值选择至关重要。固体焦炭燃烧相对气体燃烧缓慢的多,但循环回料的焦炭直接影响炉膛内燃烧温度的均匀性,通过循环床回料是否正常来观察炉膛内温度变化,从而得到回料对燃烧的影响。另外试验中观察到稻壳灰结团现象。

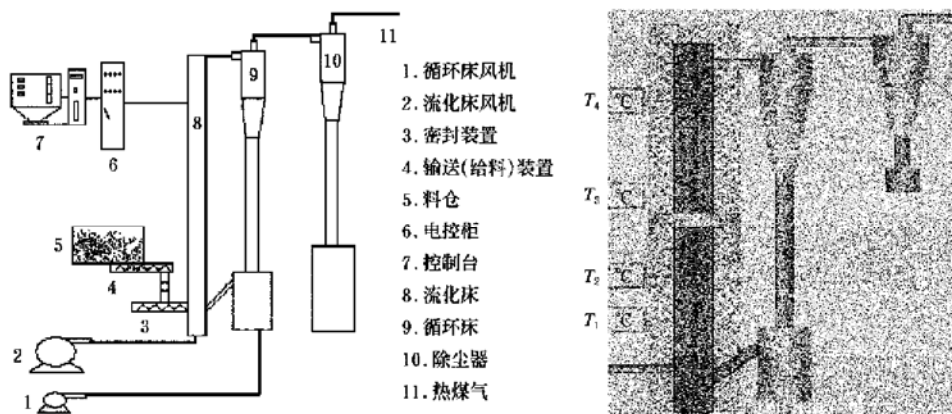


图1 循环流化床燃烧炉系统

Fig. 1 Schematic diagram of Circulating Fluidized Bed(CFB) combustion stove

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 风量比值 $i$ 对炉膛温度的影响

稻壳在流化床炉膛内上升过程中温度迅速升高,挥发分在短小时内大量析出,其燃烧需要足够空气。文献[13]认为气体燃烧速率基本上取决于扩散速度(挥发物与氧的混合速度)。稻壳密度小,与气流间相对运动弱,在炉膛内对气流扰动性不强,为了加强扰动,提高气流间的扩散速度同时保证挥发分燃烧时有足够空气量,二次风量选择就直接影响燃烧过程。二次风量控制在多少合适,目前对这方面研究很少,图2所示是在相同风料比 $4.2 \text{ m}^3/\text{kg}$ 而不同的一、二次配风量比例下,炉膛内稻壳正常燃烧时的温度分布曲线。

从图2中各个曲线可以看出,在不同 $i$ 值下,循环流化床正常循环燃烧时,温度分布均匀,波动较小;所不同的是各自温度高低不同。图a、b中温度分布主要在 $650\sim 730^\circ\text{C}$ 左右;图c、d温度大多分布在 $800\sim 850^\circ\text{C}$ 之间;图e温度主要分布在 $700\sim 730^\circ\text{C}$ 左右,而且有下降趋势。稻壳进入炉膛内,随着气流上升过程中不断释放挥发分。为了保证充分燃烧并增强气流间扰动,增设二次风装置。二次风布置位置靠近温度测点 $T_3$ 下,从

图c、d看出,炉膛内温度以 $T_3$ 为最高,这就是二次配风促使了稻壳挥发分燃烧,提高了温度;而图a、b中 $T_3$ 高得不明显。二次风量较小时,一方面扰动减弱,减缓了燃烧速率;另一方面空气量不足以满足短小时内释放的大量挥发分燃烧,所以 $T_3$ 温度不高。图e中 $T_3$ 不是最高,二次风量较大时,扰动增强了,燃烧也充分了,但是大量剩余空气吸收了燃烧释放的热量,从而也降低了温度。通过实验结果看出,在给定风料比 $N$ 前提下,风量比 $i$ 不同,炉膛内温度不同。风量比在1~1.2时,炉内运行工况良好,温度均匀分布,炉膛内燃烧温度大多在 $800\sim 850^\circ\text{C}$ 之间,这正好体现了循环流化床低温燃烧的独特优势。

### 2.2 焦炭回料燃烧对温度影响

稻壳挥发分析出后剩余焦炭的燃烧过程非常复杂。流化床燃烧条件下,挥发分析出燃烧与焦炭燃烧过程存在重叠,即初期以挥发分析出与燃烧为主,后期以焦炭燃烧为主<sup>[14]</sup>。循环焦炭对炉膛内燃烧影响很大,在循环流化床正常燃烧时,关闭回料系统,观察炉膛内温度变化。表1和表2中列举了相同风料比 $N$ 为 $4.2 \text{ m}^3/\text{kg}$ 时的多次试验结果。可以看出,风量多少与风量比 $i$ 对炉膛内温度的影响较小,而循环焦炭是否正常回到炉膛

却对温度影响很大。表 1 中可以看出,  $T_1$  点温度偏低, 和  $T_2$  间温差也大, 在  $100^{\circ}\text{C}$  左右; 其他测点间温差较小, 基本上控制在  $50^{\circ}\text{C}$  以内。新加入炉内的稻壳及底部给风使空气温度较低,  $T_1$  低, 与其他点温度差较大。回料焦炭本身温度较高, 燃烧速度相对缓慢, 所以回料焦炭削弱了由于稻壳挥发分析出时剧烈燃烧造成的局部高温和新料加入炉膛造成的温度降低。因此正常回料时炉膛内温度数值相对均匀, 各点间温差较小, 波动较小。表 2

中数据变化较大, 毫无规律。同一点温度在不同工况下温差及同一工况下不同测温点间温差波动大。最小温差  $20.4^{\circ}\text{C}$ , 而最大温差  $283.8^{\circ}\text{C}$ 。没有回料焦炭, 炉内稻壳挥发分在局部剧烈燃烧造成高温, 同时新加入的常温稻壳和空气造成了温度下降, 从而使得炉内各点间温差大。因此, 存在循环回料时温度分布较均匀, 波动范围较小; 没有循环回料时, 温度分布不均匀, 波动范围较大。

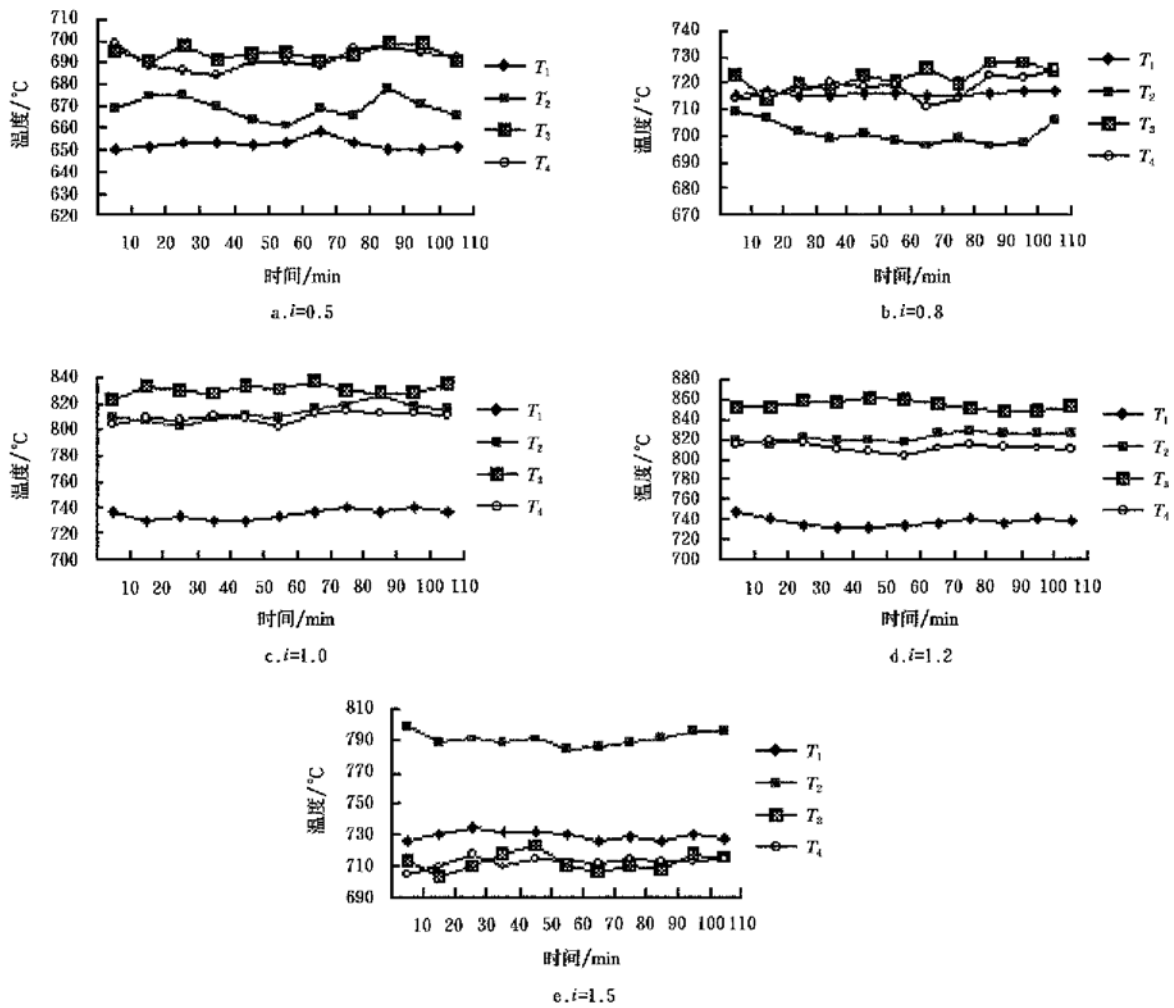


图 2  $N$  为  $4.2 \text{ m}^3/\text{kg}$  时不同  $i$  值对炉膛温度的影响

Fig. 2 Effects of different rates of "i" with  $N = 4.2 \text{ m}^3/\text{kg}$  on temperature in the hearth of firebox

表 1 一小时内存在循环焦炭时炉膛内平均温度的变化

Table 1 Variations of average temperature in hearth for one hour on normal circulation  $^{\circ}\text{C}$

配风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$i$ 值	$\bar{T}_1$	$\bar{T}_2$	$\bar{T}_3$	$\bar{T}_4$	$\Delta \bar{T}_{1,2}$	$\Delta \bar{T}_{2,3}$	$\Delta \bar{T}_{2,4}$	$\Delta \bar{T}_{3,4}$
100	1.0	722.5	835.4	849.6	791.8	112.9	14.2	43.6	57.8
100	1.2	715.4	821.5	856.2	818.3	106.1	34.7	3.2	37.9
150	1.0	710.5	812.1	830.5	805.4	101.6	18.3	6.7	25.1
150	1.2	718.5	828.3	860.8	813.7	109.8	32.5	14.6	47.1

注: 表中温度数值为平均值。

表2 一小时内无循环焦炭时炉膛内平均温度的变化

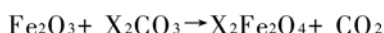
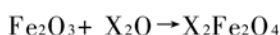
配风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$i$ 值	$\bar{T}_1$	$\bar{T}_2$	$\bar{T}_3$	$\bar{T}_4$	$\Delta\bar{T}_{1,2}$	$\Delta\bar{T}_{2,3}$	$\Delta\bar{T}_{2,4}$	$\Delta\bar{T}_{3,4}$
100	1.0	622.4	725.6	849.4	751.7	103.2	123.8	26.1	97.7
100	1.2	615.9	791.4	596.4	718.7	175.5	195	72.7	122.3
150	1.0	610.2	512.5	795.8	725.4	97.7	283.8	212.9	70.4
150	1.2	575.6	818.1	690.4	760.8	242.5	128.4	57.3	20.4

### 2.3 结焦与结团

稻壳燃烧时容易出现结焦与结团现象。循环流化床的最佳运行温度偏低,也主要是为了避免结焦。如果在循环流化床内出现结焦或结团,将无法实现流化,这是循环流化床有别于其他燃烧设备之处。稻壳在流化床内是一种流化状态,相对来讲结焦性差。稻壳灰本身熔点并不低,据山东煤炭质量检测中心((2000)量认(鲁)字(T01200)号)的检测结果,灰熔点为1230°C。但在试验中观察到,温度达到1000°C时,就出现结焦,这可能是由于所选稻壳内杂质含量多的原因。最容易出现结焦的位置是配置二次风位置与底部密相区。在二次风位置挥发分燃烧充分剧烈,极易出现高温,因此对于挥发分含量高的稻壳燃烧,要选择好合理的二次风,以减少局部高温结焦;当风速较低时,稻壳主要停留在密相区,燃烧集中,这时很容易出现高温结焦,因此适当提高流化风速可避免高温结焦。

稻壳在实际运行当中容易出现另一种现象——结团。结团不同于结焦,在多次试验中发现温度大约在700~800°C左右时,稻壳半焦和灰会出现一些蜂窝状的结团,硬度很低,空隙率也很大,与真正的熔化灰渣相差很大。结团一般发生在炉膛底部,尤其在点火之初,如果在炉内加入循环床料石英砂后,更容易出现结团。稻壳中SiO<sub>2</sub>含量很高,在700~800°C时,由体结构向面结构转化,在此过程中,碳原子成为填充原子,形成牢固的碳硅结构,即使在1200°C时,也无法将其中的碳氧化,这种碳硅结合,使稻壳灰连接在一起,形成蓬松的烧结团,破坏正常流化。试验中采取了先点火升温后再加入石英砂和点火之初就把提高流化风速的方法来避免结团。石英砂后加入是由于石英砂的主要成分是SiO<sub>2</sub>,从上面介绍可知SiO<sub>2</sub>会加剧结团发生;另外石英砂不是燃料,对初始点火有阻碍。当点火完成后,炉内风速较大,物料处于高速流化状态,这时再加入石英砂就不容易出现结团。一般来说,点火之初炉内蓄热较少,风量不宜太大,否则大量冷风将把引火床料吹灭;风速太小,稻壳及灰堆积在一起,容易出现结团。通过试验,在点火之初风速选择在1 m/s左右,这样大大避免了结团。根据许卫国等<sup>[15,16]</sup>对于结团现象研究,提出为了防止结团

现象可以适当添加一些添加剂,如Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,添加剂与碱金属氧化物反应,反应方程式如下:



其中,X为碱金属元素钾或钠。用Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作添加剂时,当灰中钾、钠含量超过20%,床温在900°C以上时,只有很小的结块。

### 3 结论

1) 稻壳密度偏小,加入密度较大的石英砂作为辅助循环床料来帮助稻壳焦炭顺利循环;挥发分含量高,挥发分特性指数为 $5 \times 10^{-5}$ 左右,着火性能好,在较低温度下就可以着火燃烧。

2) 二次风量配比多少直接影响稻壳燃烧工况。合理的二次配风量与一次配风量之比为 $i = 1 \sim 1.2$ ,正常燃烧时炉膛内温度控制在800~850°C,炉膛内各测点间温差较小。

3) 循环回料直接影响到炉内燃烧工况。循环正常,则温度分布均匀,波动范围较小;无循环回料,炉膛内温度分布不均匀,波动范围较大。

4) 稻壳燃烧过程中,容易出现结团结焦现象。测得稻壳灰熔点为1230°C,但本文试验中在温度1000°C时,出现结焦,这可能主要是由于稻壳中杂质含量多的原因;在二次风位置和炉膛底部容易出现局部高温结焦,选择合理二次风配比和适当提高流化风速,可避免高温结焦。炉膛底部温度700~800°C时,稻壳灰与焦炭或石英砂容易出现蜂窝状结团现象,在炉膛内温度升高后和流化风速较大时再加入石英砂以及点火之初选择1 m/s左右的流化风速,可大大减少了结团现象。

#### [参考文献]

- [1] Klass D L. Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals[M]. USA: Academic Press, 1998.
- [2] Cook J, Beyea J. Bioenergy in the United States: progress and possibilities[J]. Biomass and Bio-energy, 2000, 18(6): 441-445.
- [3] 孙振均. 中国生物质产业及发展取向[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 1-5.

- [4] 张明, 袁益超, 刘聿拯. 生物质直接燃烧技术的发展研究[J]. 能源研究与信息, 2005, 21(1): 15-21.
- [5] Connell M G R. Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK [J]. Biomass and Bio-energy, 2003, 24(2): 97-116.
- [6] Kaygusuz K, Toker M F. Biomass energy potential in Turkey[J]. Renewable Energy, 2002, (26): 661-678.
- [7] 陈冠益, 方梦祥, 骆仲泐, 等. 燃用稻壳流化床锅炉试验研究及 35t/h 锅炉的设计[J]. 动力工程, 1997, 17(6): 47-54.
- [8] 陈继辉, 卢啸风. 循环流化床锅炉焚烧生物质燃料的研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 267-270.
- [9] 伊晓路, 刘贞先, 郭东彦, 等. 生物质颗粒度对燃烧特性影响[J]. 现代化工, 2006, 26(22): 230-235.
- [10] 孙学信. 燃煤锅炉燃烧试验技术与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 548.
- [11] 袁振宏, 吴创之, 马隆龙, 等. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 392.
- [12] 岑可法, 倪明江, 骆仲泐, 等. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 754.
- [13] 岑可法, 姚强, 骆仲泐, 等. 高等燃烧学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 770.
- [14] Zhang M H, Zhen Q, Hao Y. The solid flow structure in a circulation fluidized bed riser/dower of 0.42m diameter [J]. Powder Technology, 2003, 129(1): 46-52.
- [15] 许卫国, 王学全, 吴履琛. 燃烧稻壳流化床的技术特点[J]. 锅炉制造, 2001, (4): 22-24.
- [16] 别如山, 李炳熙, 陆慧林, 等. 燃生物废料流化床锅炉[J]. 2000, 15(88): 344-347.

## Experimental study on rice hull combustion in circulating fluidized bed

Yi Xiaolu, Zhang Weijie, Guo Dongyan, Xu Jian, Xu Min, Sun Li

(Energy Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

**Abstract:** Rice hull was chosen as feedstock to conduct experiments, and the thermogravimetric analyzer was used to analyze its pyrolysis characteristics. The combustion process research was carried out in circulating fluid bed (CFB) in order to find important combustion parameters. When the ratio of secondary air output and first air output lies in the range of 1.0~1.2, and the ratio of air to material is  $4.2 \text{ m}^3/\text{kg}$ , the temperature in firebox can be controlled in the range of 800~850°C. Temperature was relatively uniform with little fluctuant range only when normal coke circulating appeared. The ash melting point of rice hull is 1230°C, but it are easy to sinter at 1000°C and agglomerate within 700~800°C. Two methods can be helpful to avoid the agglomeration in straw combustion process in CFB. The first is to input quartzite sand when the temperature in firebox was high with high circulating wind rate. The second is to choose 1 m/s as fluidized rate when ignition starts.

**Key words:** rice hull; circulating fluidized bed; curves of rice hull pyrolysis; sinter; agglomeration