

# 稻壳空气/水蒸气气化再燃特性实验研究

李洪涛<sup>1</sup>, 李炳熙<sup>1</sup>, 张亚宁<sup>1</sup>, 徐有宁<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001;  
2. 沈阳工程学院沈阳市循环流化床燃烧技术重点实验室, 辽宁省 沈阳市 110136)

## Experimental Study on Characteristics of Combustion After Gasification Used Air-steam to Rice Husk

LI Hongtao<sup>1</sup>, LI Bingxi<sup>1</sup>, ZHANG Yaning<sup>1</sup>, XU Youning<sup>2</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;  
2. Shenyang City Key Laboratory on Circulating Fluidized Bed (CFB) Combustion Technology, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** To solve the slagging and tar in biomass thermochemical utilization, the method of the crude syngas combustion after low-temperature gasification was proposed. Experiments of combustion after gasification to rice husk were taken by changing equivalence ratio of agent ( $\alpha_{ag}$ ) and the ratio of steam to air ( $S/A$ ) on the self-designed experiment bench. Temperatures of the point which was 500 mm over the vibration grate in the gasifier and the flame front in furnace were measured by thermocouples respectively; the volume percentage of syngas was also measured under different conditions by an off-line gas chromatograph (SP-3420A) which was set at 1000 mm over the vibration grate. The results of the experiments show: The gasification temperature increases when increases and  $S/A$  declines, while the temperature of the flame front decreases with and  $S/A$  increases. The volume percentage of  $H_2$  reaches maximum value when  $\alpha_{ag}$  is 0.35 and  $S/A$  is 0.10. The volume percentage of CO increases as  $\alpha_{ag}$  increases, while the increasing trend gradually decreases. The volume percentage of  $CH_4$  decreases when ER-ag increases and  $S/A$  decreases, respectively. The results of this paper provide basis and reference for the design and running of combustion after gasification system to biomass.

**KEY WORDS:** biomass; rice husk; air; steam; combustion after gasification

**摘要:** 为解决生物质燃料热化学转化过程中, 生物质灰易结

基金项目: 辽宁省教育厅科研项目(2008486); 辽宁省自然科学基金项目(20082136)。

Liaoning Provincial Department of Education Research Project (2008486); Natural Science Foundation of Liaoning Province (20082136).

渣和气化气含量焦油高的2个难题, 提出生物质低温气化后再燃的实验方案, 并在自行设计的生物质气化再燃实验台上, 通过改变稻壳气化介质的过量空气系数( $\alpha_{ag}$ )和雾化水与气化空气质量比  $S/A$ , 利用高温热电偶测量了距震动炉排 500 mm 处气化室的温度, 以及炉膛内火焰锋面温度; 并利用 SP-3420A 气相色谱仪离线分析了不同工况下, 震动炉排上方 1000mm 处气化室的气体的体积百分含量。实验结果表明: 随着  $\alpha_{ag}$  的增大和  $S/A$  的降低, 气化炉内的温度升高; 而粗合成气燃烧形成的火焰锋面温度随  $\alpha_{ag}$  和  $S/A$  的增大而降低; 在  $\alpha_{ag}=0.35$ ,  $S/A=0.10$  时, 气化炉内  $H_2$  的体积百分含量最大; CO 的体积百分含量随着  $\alpha_{ag}$  的增大而增大, 但增大的趋势逐渐减小;  $CH_4$  的体积百分含量随着  $\alpha_{ag}$  的增大而减小, 随  $S/A$  的增大有缓慢增大趋势。该文试验和分析结果为生物质气化再燃锅炉的设计和运行提供了依据。

**关键词:** 生物质; 稻壳; 空气; 水蒸气; 气化燃烧

## 0 引言

生物质是指植物通过光合作用生成的有机物, 它的能量最初来源于太阳能, 所以生物质能是太阳能的一种<sup>[1]</sup>。它是唯一的碳基可再生能源, 在其完整的生命周期内,  $CO_2$  排放为零, 有利于减轻温室效应<sup>[2]</sup>; 且生物质的 N、S 和灰分的含量低, 可以减少  $NO_x$ 、 $SO_x$  及颗粒物排放<sup>[3-7]</sup>。因此, 生物质能是解决化石能源短缺和污染问题的主要可再生能源之一。

生物质的热化学利用技术可以分为热解、气化和燃烧 3 种<sup>[8]</sup>, 其中生物质燃烧技术是生物质大规

模高效洁净利用途径中最成熟、最简便可行的方式之一<sup>[9]</sup>。与煤相比,生物质具有以下特点:能量密度低,挥发分含量高,固定碳和灰分含量低,且生物质灰成分随生物质的种类、产地的不同而不同,灰熔点变化范围也较大<sup>[10]</sup>。一般生物质燃烧过程中,因生物质含有较多的水分和碱性金属物质(尤其是农作物秸秆),燃烧时易引起积灰结渣损坏燃烧床,还可能发生烧结现象<sup>[11]</sup>。

生物质气化是生物质能利用的另外一种途径<sup>[12]</sup>,目前生物质气化产品气焦油含量过高是制约生物质气化技术发展的难题之一。关于生物质气化焦油的去除可以分为物理方法和化学法,物理法虽能有效除焦,但焦油只是经历了相变,并没有真正除去,含焦油的废水若不经处理而排出,容易造成环境二次污染,并且焦油所含能量不能利用,降低了气化效率。化学法又可分为催化裂解和高温裂解,Cartin Myren, Christina Hornell 等国外学者在焦油催化裂解方面做了大量的工作,主要采用的催化剂是白云石、硅石、以及镍基等催化剂<sup>[13]</sup>。在国内,广州能源所的吕鹏梅、常杰、吴创之,浙江大学的周劲松、骆仲决,清华大学的侯斌,吕子安、李定凯等在生物质焦油催化裂解中都做了大量的研究<sup>[14-16]</sup>。高温裂解方面,Y.G. Pan, X. Roca 等认为在流化床生物质气化实验中,在温度为 830~850 °C 的运行条件下注入一定量的二次风,有利于消除产品气中的焦油<sup>[17]</sup>。

对于生物质结渣和焦油含量高的问题,国内的学者大多致力于某一方面的研究。在生物质气化燃烧集成系统方面的研究较少,目前,在中试实验方面,天津大学刘明、陈冠益等进行了生物质燃气燃烧试验研究<sup>[18]</sup>,河南省科学院李在峰、刘军伟等对生物质沸腾气化燃烧系统的优化设计<sup>[19]</sup>,但均未明确指出生物质燃料气化再燃的方法,而浙江大学王俊琪等研究煤的分级转化利用中,提出煤的部分气化及半焦燃烧系统<sup>[20]</sup>。本文基于生物质燃料特性,明确了低温气化后粗合成气高温燃烧的思路,其目的是利用气化反应温度低,当炉内温度低于灰的软化温度 ST,不存在密实的结渣问题,合理控制一次风速,可减少高温燃烧区域的飞灰含量,从而减缓高温受热面结渣趋势;而利用高温燃烧区可使得形成的气化气中焦油彻底燃烧,减少了燃气净化系统,避免了焦油处理问题。

实验原料采用稻壳,稻壳灰与其他生物质燃料相比,二氧化硅的含量非常高,按照 GB/T 219—2008 灰熔点测试中变形温度 DT 高于 1 500 °C<sup>[21]</sup>,一般不存在受热面结渣问题,但稻壳的灰渣中碳含量高,笔者在马弗炉实验中表明:低于 700 °C 稻壳燃烧实验中,稻壳灰颜色明显为浅色,而高于 750 °C 稻壳灰颜色发黑,Krishnarao<sup>[22]</sup>等提出稻壳灰中黑色颗粒的存在是由于在温度达到 620 K 时 K<sub>2</sub>O 分解释放出的 K 会造成 SiO<sub>2</sub> 颗粒表面的熔化,碳就会被包裹起来,由于失去和空气直接接触的机会而无法氧化去除。本文对稻壳进行了低温气化后粗合成气高温燃烧实验,研究了空气-水蒸气份额发生变化对稻壳气化气成分及火焰锋面温度的影响,从而为生物质气化再燃锅炉设计提供参考依据。

## 1 实验装置及方法

### 1.1 实验原料

采用沈阳郊区稻米加工厂的稻壳粉作为试验原料,稻壳粉的堆积密度为 247 kg/m<sup>3</sup>,平均粒径为 1.36 mm。试验前将试验原料放置在 35 °C 的干燥箱内 2 h,选取粒径小于 100 目的样品,放入物料袋中备用,采用常州产 ALT-1200 型马弗炉参照国家标准 GB 212—1991 对原料进行工业分析,使用美国产 PARR-6200 全自动氧弹量热仪参照 GB 213—1996 对原料的发热量进行了测定,元素分析数据采用德国产 Vario EL II 元素分析仪,其成分分析结果见表 1。

表 1 稻壳的工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate analyses and ultimate analyses of rice husk

样品	工业分析/%			元素分析/%					低位发热量 $Q_{ad,net}/(MJ/kg)$
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$C_{ad}$	$H_{ad}$	$O_{ad}$	$N_{ad}$	$S_{ad}$	
稻壳	6.8	16.9	63.7	37.6	4.9	33.2	0.5	0.1	14.348

注: ad 为空气干燥基。

### 1.2 实验台结构

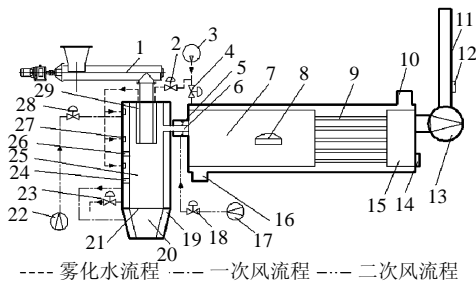
整个实验设备如图 1 所示,由送风系统、燃料系统、雾化水系统、气化燃烧系统及其他辅助系统构成。

#### 1) 送风系统。

燃料完全燃烧所需的空气分两路进入实验装置中,一路称之为一次风,一次风主要目的是进行生物质的气化,由一次风机经一次风管道进入气化室外夹层的上部,通过气化室内壁的加热,由气化室外加层的下部引出,引至内壁开孔的一次风室,



(a) 实验系统照片



(b) 实验系统简图

- 1—变频给料装置；2—雾化水控制阀；3—给水泵；4—溢流阀；  
5—二次风喷口；6—粗合成气喷口；7—炉膛；8—人孔门；9—烟管；  
10—冷水入口；11—烟囱；12—烟气测点；13—引风机；14—除灰口；  
15—落灰室；16—热水出口；17—二次风机；18—二次风阀；19—内壁  
开孔一次风室；20—底部水封的落灰室；21—震动炉排；22—一次风机；  
23—疏水口；24—测点开口 1；25—气化室；26—测点开口 2；  
27—雾化喷头；28—二次风阀；29—雾化水预热夹套。

图1 生物质空气-水蒸气气化再燃实验台

Fig. 1 Experimental bench on combustion after rice husk gasification used air and steam to biomass

再通过内孔进入震动炉排下部，对生物质燃料进行气化，一次风量通过一次风阀后安装的风速测点监测；另一路称之为二次风，主要目的是对生物质气化后的粗合成气进行燃烧，二次风由二次风机引入，二次风阀控制进风量，同样二次风阀后设置了风速测点，为了增强火焰的稳定性，二次风进入炉膛的喷口采用角度为 $45^\circ$ 的蜗旋导叶。

## 2) 给料系统。

进料系统采用带有变频器的螺旋绞龙输送。给料范围 $50\sim 150\text{kg/h}$ ，绞龙的出料口设有雾化水预热夹套，主要目的是防止燃料的直接吹入炉膛，增强燃料停留时间；同时对雾化水预热，减少气化室外夹层内过冷水气化的吸热量，提高空气和水蒸气比例的可控性。

## 3) 雾化水系统。

水蒸气对生物质热解气化具有活化作用<sup>[21]</sup>。为提高生物质燃料的气化率，使用水温为 $12^\circ\text{C}$ 的给水

作为雾化水，采用气化室内套加热直接雾化技术，即含有一定温度的水通过雾化喷头，直接喷淋在管套内壁使水变为蒸汽，产生的蒸汽和一次风混合后进入气化室。投入系统的水量根据进口流量与疏水口的流量的差值测得。

## 4) 气化燃烧系统。

生物质燃料的气化燃烧系统由3部分组成：

① 气化室。气化介质为含有水蒸气的湿空气，气化合成气成分用北京产 SP-3420A 气相色谱仪测量；

② 燃烧室。燃烧室为水套结构，外径为 $1000\text{mm}$ ，内径为 $600\text{mm}$ ，总长为 $2500\text{mm}$ ，在燃烧室中部 $1000\text{mm}$ 处，设置观察孔，用于火焰测温；

③ 烟管管束。燃烧室后部布置烟管，烟管长 $500\text{mm}$ ，用于制取热水。

## 1.3 实验方法

本文主要研究改变稻壳气化剂的过量空气系数 $(\alpha_{\text{ag}})$ 和水蒸气与空气质量比 $(S/A)$ 对气化炉内气体氛围及炉膛内火焰锋面温度的影响。试验过程采用人工点火方式，当反应系统达到一定温度后，开始给料，燃料的进料量为 $100\text{kg/h}$ ，进风量和喷水量分别满足以下条件：气化介质过量空气系数 $\alpha_{\text{ag}}$ 分别为 $0.20$ 、 $0.25$ 、 $0.30$ 、 $0.35$ 和 $0.40$ ，并使得燃料总过量空气系数为 $1.2$ ；雾化水与气化空气质量比 $S/A$ 为 $0$ 、 $0.05$ 、 $0.10$ 、 $0.15$ 和 $0.20$ 。当反应系统逐渐稳定，达到测试工况之后，开始测定气体的组分及气化炉内温度和炉膛火焰锋面温度。气化直燃实验中，各参数的计算方法见公式(1)~(4)：

$$\alpha_{\text{ag}} = V_{\text{ag}} / V^0 \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{t}} = V_{\text{ag}} + V_{\text{s}} / V^0 \quad (2)$$

$$V^0 = \frac{1}{0.21} (1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100} + 0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100} + 5.55 \frac{H_{\text{ar}}}{100} - 0.7 \frac{O_{\text{ar}}}{100}) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{m_{\text{w}}}{\rho_{\text{a}} V_{\text{ag}} B} \quad (4)$$

式中： $V_{\text{ag}}$ 为每公斤稻壳气化介质的标准体积， $\text{m}^3/\text{kg}$ ； $V^0$ 为每公斤稻壳完全燃烧所需空气的标准体积， $\text{m}^3/\text{kg}$ ； $\alpha_{\text{t}}$ 为一、二次风总的过量空气系数； $V_{\text{s}}$ 为每公斤稻壳二次风空气的标准体积， $\text{m}^3/\text{kg}$ ； $C_{\text{ar}}$ 、 $S_{\text{ar}}$ 、 $H_{\text{ar}}$ 、 $O_{\text{ar}}$ 、 $M_{\text{ar}}$ 分别为燃料收到基碳、硫、氢、氧和水分的百分含量，%； $\beta$ 为雾化水与气化空气质量比 $S/A$ ； $\rho_{\text{a}}$ 为空气的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $m_{\text{w}}$ 为每

小时雾化水的质量, kg/h;  $B$  为每小时燃料消耗量, kg/h;  $m^3$  为标准体积, 假设包括水蒸气在内均为理想气体, 1 kmol 体积等于  $22.4 m^3$ 。

## 2 实验结果分析

根据式(3), 求得实验稻壳的理论空气量为进制  $3.535 m^3/kg$ 。实验过程中, 一次风量的气化空气过量空气系数  $\alpha_{ag}$  分别为 0.20、0.25、0.30、0.35 和 0.40, 并保证一二次风总量的过量空气系数  $\alpha_t$  为 1.2; 并在相同的  $\alpha_{ag}$  情形下, 进行了雾化水与气化空气质量比  $S/A$  分别为 0、0.05、0.10、0.15 和 0.20 的 5 组实验, 对每一组工况的样品利用 SP-3420A 气相色谱仪, 进行了 3 次测量, 各种组分的浓度的相对不确定度由公式(5)<sup>[23]</sup>确定:

$$U_{rel} = \sqrt{U_{rel1}^2 + U_{rel2}^2 + U_{rel3}^2} \quad (5)$$

式中:  $U_{rel}$  为合成相对标准不确定度;  $U_{rel1}$  为重复测量的相对不确定度;  $U_{rel2}$  为测量仪器的计量性能引起的相对不确定度;  $U_{rel3}$  为标定仪器所用气体引入的相对不确定度。

在气体浓度测量中, 氢气、一氧化碳、甲烷的合成相对标准不确定度分别为: 0.05、0.06、0.08。

图 2 为不同  $\alpha_{ag}$  及  $S/A$  工况下, 气化炉内温度的变化趋势。实际运行过程中, 气化炉内温度在炉体轴向和径向都存在差异, 本文在震动炉排上部高度为 500 mm 处, 四周均匀分布 4 个温度测点, 料层厚度维持在 200 mm, 气化炉内温度为 4 个测点的平均值。实验结果表明在相同的  $S/A$  时, 随着  $\alpha_{ag}$  的增大, 气化炉内的温度增大, 而在相同的  $\alpha_{ag}$  时, 随着  $S/A$  的增大, 炉内温度降低。因此, 为了避免碱金属的逸出, 又能保持一定的反应速度, 控制气化炉内温度在  $600\text{ }^\circ\text{C}$  左右, 可通过改变  $\alpha_{ag}$  及  $S/A$  来

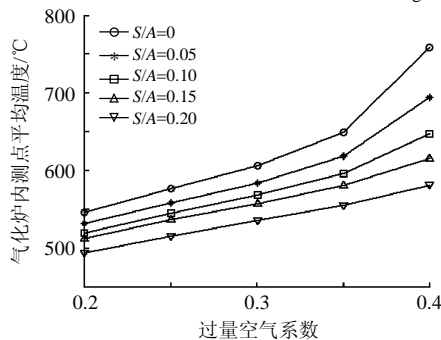


图 2 不同  $\alpha_{ag}$  及  $S/A$  工况下气化炉内的温度  
Fig. 2 Temperature of the gasifier in different  $\alpha_{ag}$  and  $S/A$

实现。从实验结果可以得到 6 种工况比较适合, 分别为  $\alpha_{ag}=0.3, S/A=0$ ;  $\alpha_{ag}=0.35, S/A=0.05、0.10、0.15$ ;  $\alpha_{ag}=0.4, S/A=0.15、0.20$  可选。

图 3 为不同  $\alpha_{ag}$  及  $S/A$  工况下, 粗合成气燃烧火焰锋面温度的变化趋势, 在实际实验过程中, 火炬的长度不仅随着一二次风量的变化而变化, 而且在二次风量不变的前提下, 火炬的长度也难以稳定, 固定温度测点的测量难以满足测量要求, 本文火焰锋面温度指测点温度与火焰温度相差不大时, 实时改变传感器位置, 使其处于肉眼可见的发光区域的顶点位置采集 2 min 所得到的温度, 其测点位置如图 4 中 A 点所示。实验结果表明, 在系统总过量空气系数保持不变的情况下, 在  $S/A=0$  时, 火焰锋面温度几乎保持不变; 在相同的  $\alpha_{ag}$  时, 随着  $S/A$  的增大, 火焰锋面温度降低, 这表明  $S/A$  的增大, 雾化水的投入量变大, 而雾化水的温度远低于烟气温度, 使得火焰锋面温度降低; 在相同的  $S/A$  时, 随着  $\alpha_{ag}$  的增大, 火焰锋面温度降低, 其原因可能为气化介质中空气质量发生变化, 使得在相同的  $S/A$  时, 雾化水的投入量增大, 从而火焰锋面温度降低。值得注意的是火焰稳定性并不是随着喷水量的增加而恶化, 可能与粗合成气的成分和二次风形

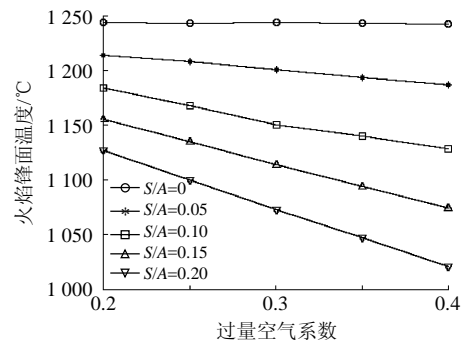


图 3 不同  $\alpha_{ag}$  及  $S/A$  工况下火焰锋面的温度  
Fig. 3 Temperature of the flame front in different  $\alpha_{ag}$  and  $S/A$

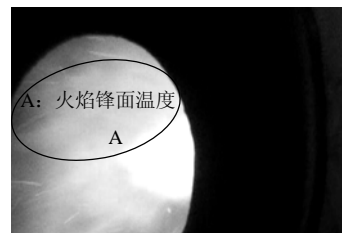


图 4 火焰锋面温度测点位置示意图  
Fig. 4 Diagram to measuring point of flame front temperature

成的旋流强度有关。

图5—7分别为不同 $\alpha_{ag}$ 及 $S/A$ 工况下,气化炉内 $H_2$ 、 $CO$ 和 $CH_4$ 的体积百分含量变化规律。从图4中看出,在相同 $\alpha_{ag}$ 时, $H_2$ 的体积百分含量的随着 $S/A$ 的变化为先增大,后减小的趋势。对于相同的 $\alpha_{ag}$ 时,在 $S/A=0.10\sim 0.15$ 时, $H_2$ 的体积百分含量达到最大值。而在相同的 $S/A$ 时, $H_2$ 的体积百分含量的变化与 $\alpha_{ag}$ 之间没有简单的对应关系,实验结果表明在 $\alpha_{ag}=0.35$ , $S/A=0.10$ 时, $H_2$ 的体积百分含量最大。从图6中看出,在相同的 $S/A$ 时,随着 $\alpha_{ag}$ 的增大, $CO$ 的体积百分含量逐渐变大,

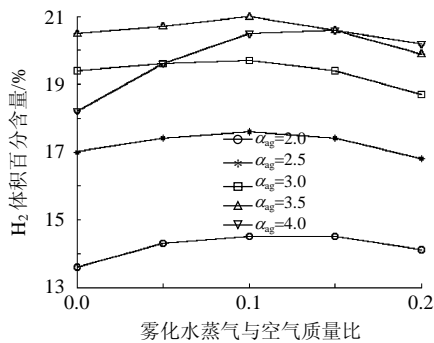


图5 不同 $\alpha_{ag}$ 及 $S/A$ 工况下 $H_2$ 体积百分含量

Fig. 5 Volume fraction of  $H_2$  in different  $\alpha_{ag}$  and  $S/A$

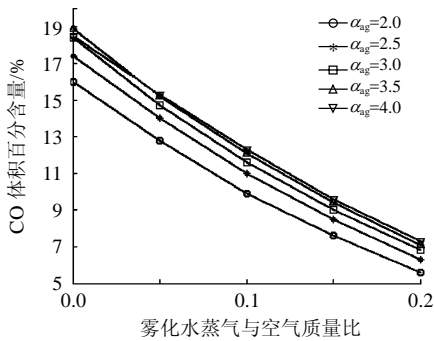


图6 不同 $\alpha_{ag}$ 及 $S/A$ 工况下 $CO$ 体积百分含量

Fig. 6 Volume fraction of  $CO$  in different  $\alpha_{ag}$  and  $S/A$

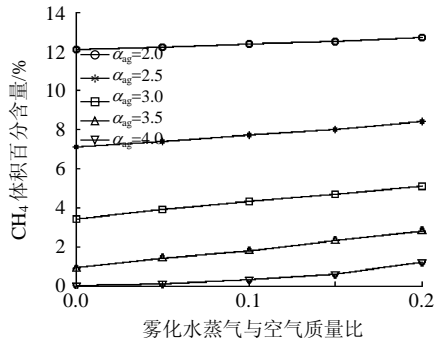


图7 不同 $\alpha_{ag}$ 及 $S/A$ 工况下 $CH_4$ 体积百分含量

Fig. 7 Volume fraction of  $CH_4$  in different  $\alpha_{ag}$  and  $S/A$

但变化趋势随着 $\alpha_{ag}$ 的增大逐渐变小。从图7中看出,在相同 $\alpha_{ag}$ 时, $CH_4$ 的体积百分含量随着 $S/A$ 的变化为增大的趋势,但增加的幅度不是很大;而过量空气系数 $\alpha_{ag}$ 的增大,对 $CH_4$ 降低的幅度很大,分析原因是随过量空气系数 $\alpha_{ag}$ 的增大,由于气化炉内温度升高,使得 $CH_4$ 的浓度明显降低。通过稻壳气化燃烧实验,可以初步认为对于气化燃烧锅炉的工况,选取 $\alpha_{ag}=0.35$ , $S/A=0.10$ 是合理的。此时的气化炉内测点的平均温度维持在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ ,炉膛内火焰锋面的温度大约维持在 $1150\text{ }^\circ\text{C}$ ,可能由于粗合成气中氢的含量有所提高,使得火焰稳定性有所强化。

### 3 结论

在生物质气化再燃锅炉工业设计中, $\alpha_{ag}$ 及 $S/A$ 的最佳工况与燃料种类和燃料水分有关。本文在生物质气化再燃实验台上,针对稻壳研究了在不同 $\alpha_{ag}$ 及 $S/A$ 工况下,气化炉内温度及气氛的变化规律;并在保证系统总过量空气系数 $\alpha_t$ 维持在1.2时,测量了气化再燃火焰锋面温度。从实验数据分析得到以下几个结论:

1) 在相同的 $S/A$ 时,随着 $\alpha_{ag}$ 的增大,气化炉内的温度增大,而在相同的 $\alpha_{ag}$ 时,随着 $S/A$ 的增大,炉内温度降低。

2) 在保证系统总过量空气系数 $\alpha_t$ 维持在1.2时,气化再燃火焰锋面温度,随着 $\alpha_{ag}$ 和 $S/A$ 的增大而降低,火焰锋面温度降低的原因与低温的雾化水的投入量有关;但形成的连续火焰稳定性并不是随着喷水量的增加而恶化,气化再燃锅炉的工况,选取 $\alpha_{ag}=0.35$ , $S/A=0.10$ 是合理的。

3) 在相同 $\alpha_{ag}$ 时, $H_2$ 的体积百分含量的随着 $S/A$ 的变化为先增大,后减小的趋势。对于相同的 $\alpha_{ag}$ 时,在 $S/A=0.10\sim 0.15$ 时, $H_2$ 的体积百分含量达到最大值;而在相同的 $S/A$ 时, $H_2$ 的体积百分含量的变化与 $\alpha_{ag}$ 之间没有简单的对应关系,在 $\alpha_{ag}=0.35$ , $S/A=0.10$ 时, $H_2$ 的体积百分含量最大。

4) 在相同的 $S/A$ 时,随着 $\alpha_{ag}$ 的增大, $CO$ 的体积百分含量逐渐变大,但变化趋势随着 $\alpha_{ag}$ 的增大逐渐变小。

5) 在相同的 $S/A$ 时,随着 $\alpha_{ag}$ 的增大, $CH_4$ 的体积百分含量逐渐变小;在相同 $\alpha_{ag}$ 时, $CH_4$ 的体积百分含量的随着 $S/A$ 的变化为增大的趋势,但增加的幅度不是很大。

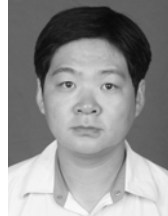
### 致 谢

本文中实验数据的测量记录工作是在沈阳亚太伟业生物质再生能源研究所等工作人员的大力支持下完成的, 在此向他(她)们表示衷心的感谢。

### 参考文献

- [1] 吴创之, 马隆龙. 生物质能现代化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 8-10.  
Wu Chuangzhi, Ma Longlong. Modernized technologies of biomass energy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 8-10 (in Chinese).
- [2] Chen G, Andries J, Spliethoff H, et al. Biomass gasification integrated with pyrolysis in a circulating fluidised bed[J]. Solar Energy, 2004, 76(123): 345-349.
- [3] Vladimir I K, Rachadaporn K, Songpol C. Effects of operating conditions and fuel properties on emission performance and combustion efficiency of a swirling fluidized-bed combustor fired with a biomass fuel [J]. Energy, 2011(36): 2038-2048.
- [4] 林伟刚, 宋文立. 丹麦生物质发电的现状和研究发展趋势[J]. 燃料化学学报, 2005, 33(6): 650-655.  
Lin Weigang, Song Wenli. Power production from biomass in Denmark[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(6): 650-655(in Chinese).
- [5] 阎维平, 陈吟颖. 生物质混合物与煤共热解的协同作用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 79-86.  
Yan Weiping, Chen Yinying. Interaction performance of copyrolysis of biomass mixture and coal of different rank[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 79-86(in Chinese).
- [6] Asadullah M, Miyazawa T, et al. Demonstration of real biomass gasification drastically promoted by effective catalyst[J]. Appl Catal A, 2003, 246(1): 103-116.
- [7] 汪俊峰, 常杰, 阴秀丽, 等. 生物质气催化合成甲醇的研究[J]. 燃料化学学报, 2005, 33(1): 58-61.  
Wang Junfeng, Chang Jie, Yin Xiuli, et al. Catalytic synthesis of methanol from biomass derived syngas [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(1): 58-61(in Chinese).
- [8] 苏毅, 王芸. 水分对稻秆热解特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(26): 107-112.  
Su Yi, Wang Yun. Effect of moisture content on rice straw pyrolysis behavior[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(26): 107-112(in Chinese).
- [9] 陈汉平, 李斌. 生物质燃烧技术现状与展望[J]. 工业锅炉, 2009 (5): 1-6.  
Chen Hanping, Li Bin. Status and prospect of biomass combustion technology[J]. Industrial Boiler, 2009(5): 1-6 (in Chinese).
- [10] Blander M, Pelton A D. The inorganic chemistry of the combustion of wheat straw[J]. Biomass and Bioenergy, 1997, 12(4): 295-298.
- [11] Heinzel T, Siegle V, Spliethoff H, et al. Investigation of slagging in pulverized fuel co-combustion of biomass and coal at pilot-scale test facility[J]. Fuel Processing Technology, 1998(54): 109-125.
- [12] 肖军, 沈来宏, 邓霞, 等. 秸秆类生物质加压气化特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 103-108.  
Xiao Jun, Shen Laihong, Deng Xia, et al. Study on characteristics of pressurized biomass gasification [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 29(5): 103-108(in Chinese).
- [13] Myren C, Hornell C. Catalytic tar decomposition of biomass pyrolysis gas with a combination of dolomite and silica[J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 23(3): 217-227.
- [14] 吕鹏梅, 常杰, 吴创之. 生物质快速催化裂解的反应动力学[J]. 太阳能学报, 2005, 26(5): 647-653.  
Lü Pengmei, Chang Jie, Wu Chuangzhi. An investigation on the kinetics of biomass fast catalytic pyrolysis[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2005, 26(5): 647-653(in Chinese).
- [15] 周劲松, 刘亚军, 骆仲泱, 等. 酸性、碱性催化剂对生物质焦油催化裂解影响分析[J]. 浙江大学学报, 2005, 39(7): 1047-1051.  
Zhou Jingsong, Liu Yajun, Luo Zhongyang, et al. Effects of solid acid and alkali catalysts on catalytic cracking of biomass tar[J]. Journal of Zhejiang University, 2005, 39(7): 1047-1051(in Chinese).
- [16] 侯斌, 吕子安, 李晓辉, 等. 生物质热解产物中焦油的催化裂解[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(1): 70-75.  
Hou Bin, Lü Zian, Li Xiaohui, et al. Catalytic cracking of tar derived from biomass pyrolysis[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2001, 29(1): 70-75(in Chinese).
- [17] Pan Y G, Roca X. Removal of tar by secondary air in fluidised bed gasification of residual biomass and coal[J]. Fuel, 1999, 78(14): 1703-1709.
- [18] 刘明. 生物质气化及其燃气燃烧试验研究与分析[D]. 天津: 天津大学, 2008.  
Liu Ming. Experimental research and analyse on biomass gasification and biogas combustion[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008(in Chinese).
- [19] 李在峰, 刘军伟, 杨树华, 等. 生物质沸腾气化燃烧系统的优化设计及试验研究[J]. 河南科学, 2009, 27(10): 1247-1250.

- Li Zaifeng, Liu Junwei, Yang Shuhua, et al. Optimization design and experimental study on the biomass fluidized-bed gasification and combustion system[J]. Henan Science, 2009, 27(10): 1247-1250(in Chinese).
- [20] 王俊琪. 煤的部分气化及半焦燃烧系统集成研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- Wang Junqi. System integration research on coal partial gasification and semicoke combustion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008(in Chinese).
- [21] 宋旭. 生物质与煤共气化机理试验研究[D]. 苏州: 江苏大学, 2008.
- Song Xu. Experimental study on mechanism of co-gasification of biomass and coal[D]. Suzhou: Jiangsu University, 2008(in Chinese).
- [22] Krishnarao R V, Subrahmanyam J. Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(1): 99-104.
- [23] 徐乐, 范慧群, 张辉. 气相色谱法测定气体中甲烷的不确定度评定[J]. 今日科苑, 2009(9): 118.
- Xu Le, Fan Huiqun, Zhang Hui. Evaluation of measurement uncertainty of methane concentration in by gas chromatography[J]. Modern Science, 2009(9): 118 (in Chinese).



李洪涛

收稿日期: 2011-04-01。

作者简介:

李洪涛(1975), 男, 博士研究生, 研究方向为生物质能热化学转化技术以及两相流传热传质研究, lht9542@163.com;

李炳熙(1962), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事红外线辐射传输、能源的有效利用, libx@hit.edu.cn。

(责任编辑 车德竞)