

下吸式生物质气化炉气化性能研究

金 亮, 周劲松, 吴远谋, 骆仲泐

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 生物质固定床气化技术具有运行稳定、可提供清洁能源等优点,但也存在气化效率差,燃气热值低的问题。以采用炉膛集中供风技术和还原区热量包裹技术的下吸式气化炉为研究对象,研究炉膛温度、空气当量比(ER)对燃气成分、燃气热值、气化效率等气化性能的影响,并与以往研究结果进行对比分析。实验表明,该气化炉能保证在较低 ER 内(0.1~0.35),获得较高的炉膛温度和还原区温度,产出的燃气热值在 6.5 MJ/m^3 以上,气化效率达到 65%,平均气化效率在 55% 以上,气化性能较为理想。

关 键 词: 生物质气化; 下吸式气化炉; 还原区温度; 空气当量比

中图分类号: TK6

文献标识码: A

引 言

在生物质热化学转化技术中,生物质气化技术具有能量转换效率高、操作简便、气化合成气可进一步液化等特点,成为生物质能利用的可行途径。生物质气化技术按炉型可分为固定床、气流床及流化床等几种。下吸式气化炉属于固定床中的一种,该气化炉具有结构简单、工作稳定性好、出口燃气焦油浓度少等优点^[1],在农村集中供气及小型生物质发电技术中得到了广泛的应用,但该炉型也存在气化效率及燃气热值偏低等问题。

本研究以具有炉膛集中供风技术和还原区热量包裹技术特点的下吸式气化炉为研究对象,采用木屑为原料,通过实验分析反应温度、空气当量比(ER)对燃气热值、燃气成分和气化效率的影响,从而得到该气化炉的气化性能。

1 实验装置及测量

1.1 实验装置

实验以空气为气化剂,由鼓风机鼓入,引风机带动提供动力。气化炉结构及实验系统如图 1 和图 2 所示。实验系统包括气化炉、燃气净化系统、温度测量系统及燃气采样检测系统。

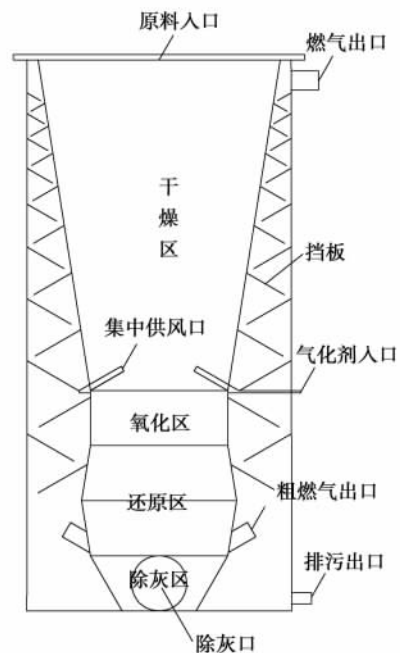


图 1 下吸式气化炉结构

气化炉有效高度 1 000 mm,喉部截面直径 250 mm。原料从气化炉顶供入,空气通过外接鼓风机由集中供风口进入氧化区与原料发生氧化反应,粗燃气经过挡板初级过滤,从气化炉燃气出口排出。高温燃气经过挡板的阻隔,一方面利于热量传递至干

收稿日期: 2010-02-25; 修订日期: 2010-04-07

基金项目: 浙江省科技计划基金资助项目(2008C01001-2)

作者简介: 金 亮(1985-),男,浙江嘉兴人,浙江大学硕士研究生。

燥区加强原料干燥,另一方面部分水气、灰分等杂质经阻隔从燃气中分离,达到初级过滤作用。运行时

排污口以闷盖封闭,停炉时打开,清除积聚的污水。

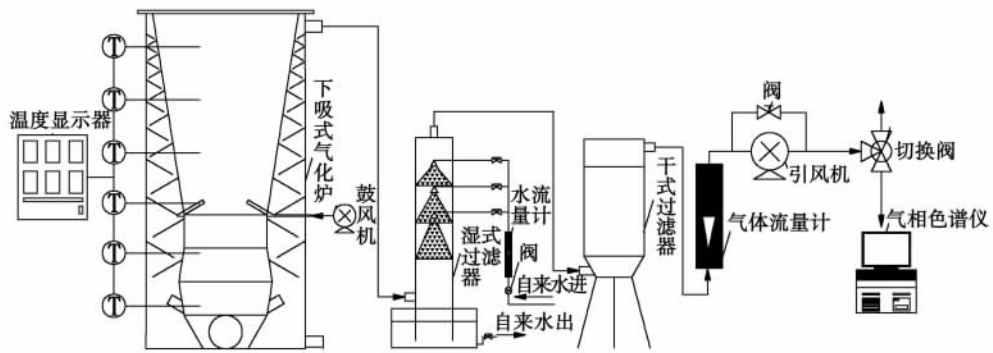


图2 下吸式气化炉气化系统流程

气化炉型设计有3个特点:(1)从干燥区至氧化区采用口径渐缩的锥形设计。由于倾角在7~10°之间适合原料自动下料^[2],故此气化炉倾角为9°;(2)还原区为“两头小、中间大”构型,利于将热量“包裹”于还原区中部,防止出现“还原死角”,以提高气化效率及焦油二次裂解效率;(3)氧化区采用集中供风技术,物料在氧化区能集中燃烧,创造还原区高温、缺氧环境,利于气化。

气化炉产出的燃气通常含有灰分、水分、焦油等杂质,系统采用湿式喷淋和干式净化两级过滤装置过滤燃气,过滤后绝大部分杂质被除去,净化后的燃气能满足实验要求。

1.2 温度测量

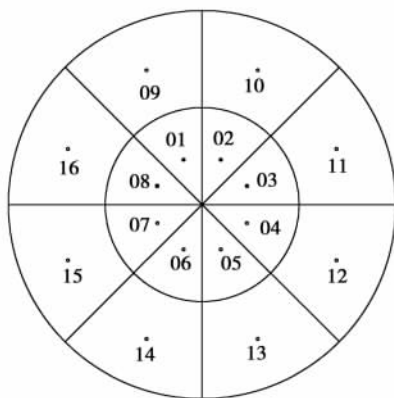


图3 温度测点截面示意图

炉内布有6根长度可调热电偶,测量炉膛不同高度及同一截面不同径向的温度。另取一根热电偶从炉口插入,用以测量燃烧区及下部还原区同一截面不同点温度,经面积平均后的测量结果作为截面

的平均温度,同一截面采集16个测点,如图3所示,各点处于各截面的中点,每15 min记录1次热电偶温度值。

1.3 燃气成分分析

燃气成分采用北分瑞利分析仪器有限公司产的SP3420A型气相色谱仪分析。根据已知可燃气体的热值及相应的浓度,得到燃气热值。为保证结果可靠性,每20 min测量一次,一个工况下的燃气热值为各采样的平均值。

1.4 气化效率计算

气化效率 η 定义为生物质燃气输出热量 Q_1 和生物质原料输入热量 Q_0 之比,计算式为:

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_0} \times 100\% = \frac{V_1 \times Q_{dw}}{G_0 \times Q_{ar,net}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η —气化效率,%; Q_1 —燃气的输出能量, kJ; Q_0 —原料输入能量, kJ; Q_{dw} —燃气低位发热量, kJ/m³; G_0 —原料重量, kg; $Q_{ar,net}$ —原料低位发热量, kJ/m³; V_1 —燃气产量,是产气时间 t 与燃气流量 q 的乘积, m³。

2 实验方案

由于炉内反应温度与空气当量比(ER)对气化炉气化性能有重要影响,所以实验主要研究还原区温度及ER变化对燃气热值、气化效率的影响。实验在1个标准大气压、20℃环境下进行。

2.1 实验原料

实验以木材加工厂的废料木屑为原料,木屑平均长度小于5 mm,工业分析和元素分析如表1所示。

表1 木屑工业分析与元素分析

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{ar,net}$ /kJ·kg ⁻¹
M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	N _{ad}	St _{ad}	O _{ad}	
11.95	0.85	67.84	14.36	43.69	6.42	0.07	-	32.02	14987

2.2 反应温度影响的实验设计

反应温度是影响气化反应的重要因素之一,气化随反应温度的升高呈现4个阶段^[3-4]:(1) 150℃左右为生物质原料中水分的挥发阶段;(2) 170~370℃为来自于纤维素及半纤维素轻质挥发分析出阶段;(3) 400~700℃为重质挥发分从生物质表面析出、木质素开始气化阶段;(4) 800℃以上为半焦发生分解反应阶段。

温度变化由热电偶监测,实验中将ER维持在0.17左右。待燃气产出后,通过测量不同还原区温度的燃气热值及燃气成分,得到燃气特性的变化。一个工况需连续稳定运行6h以上,并重复3次。

2.3 ER影响的实验设计

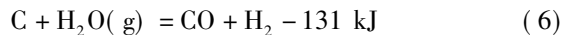
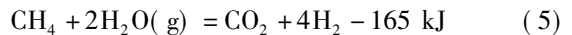
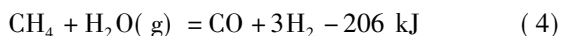
ER为生物质气化实际供给的空气量与生物质完全燃烧理论所需的空气量之比^[5]。通过元素分析可计算出木屑完全燃烧需要的空气量。调节气化炉运行待工况稳定后,还原区温度基本不变,通过控制一段时间内气化剂流量及原料加入量,保证气化炉在一定ER下运行,在该时间段内每15min测量一次燃气热值和燃气成分,并记录燃气产量,测量时间一般在1.5h以上,同一工况重复稳定运行3次,取平均数据作为测量结果。

3 实验结果及讨论

3.1 反应温度对气化特性的影响

图4为燃气体积浓度随还原区温度的变化曲线,在310~870℃范围内,随着温度的升高,N₂和CO₂在燃气中的浓度降低,分别从59%和14.5%降为47%和8.1%;CO和H₂浓度升高,尤其在650℃以后上升明显,分别从初始浓度的16.1%和8.4%上升为21.7%和18.9%;CH₄浓度先上升后降低,C_nH_m(包括C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆、C₃H₈)在较低浓度下浓度随着温度的上升而降低。

生物质气化主要发生6步反应^[6]:



式(2)和式(3)属于放热反应,式(4)~式(7)属于吸热反应。

Le chatelier的升温原理表明^[7],当温度升高时,反应会朝着吸热增强的方向进行。在生物质气化过程中,随温度上升,反应式(4)~式(7)会加强,反应式(2)和式(3)会减弱,故气化产氢会随着温度上升而加强。Turn等人认为^[8],随着反应进入高温区,焦炭的热力分解和水蒸气的重整变得更为容易,更多的C和H₂O以反应式(6)的形式进行,H₂浓度升高。同时,虽然温度升高反应式(2)受到抑制,但由于反应式(4)、式(6)和式(7)的增强以及多碳气体的高温分解,故CO浓度在650℃后依然有较明显的上升。

较低温度(<600℃),燃气中CH₄和C_nH_m主要来自于挥发分的析出,高温(>650℃)下CH₄和C_nH_m会发生裂解反应生成小分子燃气。CH₄的浓度在600~700℃之间达到最大,为4.68%;700℃以后,气化温度达到较高水平,CH₄分解,浓度逐步下降。C_nH_m浓度在310℃达到最大浓度1.31%,随着温度上升,C_nH_m发生热分解,C_nH_m浓度逐步降低。

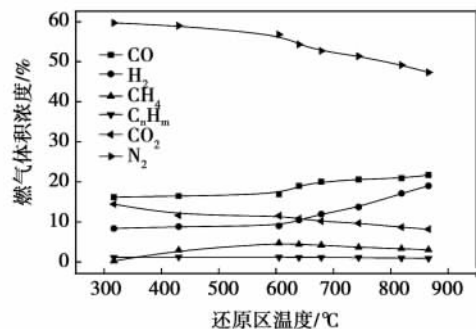


图4 燃气体积浓度随还原区温度的变化

由于实验采用空气作为气化剂,所以燃气属于低热值气体^[9]。图5为燃气热值随还原区温度的变化曲线,随着温度上升,燃气热值呈上升趋势。由于在650℃之前,CH₄、C_nH_m比高温(>650℃)时多,虽然浓度不高,但由于热值较高,所以总体热值升高;650℃后,由于高温气化条件使CO和H₂的浓度升高,燃气热值继续升高。

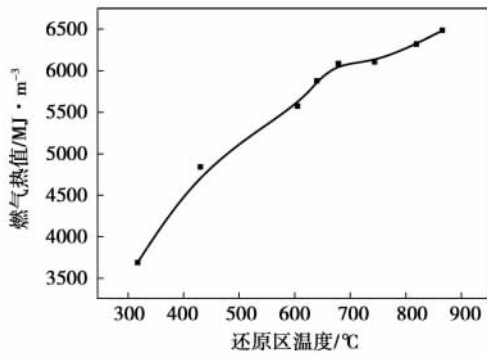


图 5 热值随还原区温度的变化

3.2 ER 对气化特性的影响

图 6 中,在 0.1 ~ 0.5 范围内,随着 ER 的提高,可燃气体的体积浓度呈下降趋势,N₂、CO₂ 浓度明显提高,尤其是 N₂ 从 46% 上升为 59%,ER 在 0.1 ~ 0.16 的范围内时,H₂ 浓度明显上升。

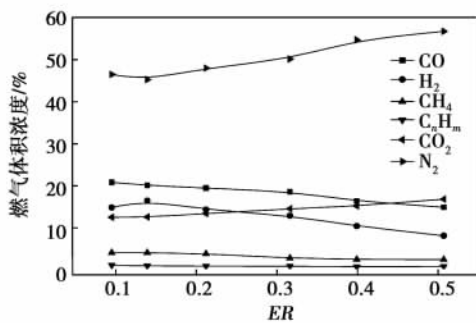


图 6 燃气体积浓度随 ER 的变化

可燃气体浓度随 ER 增大而降低,有两方面的原因:第一,ER 增大,鼓入炉中的空气增多,在维持燃气流量不变的情况下,N₂ 在燃气中比重增加,同时,更多的 O₂ 通过燃烧以 CO₂ 的形式存在于燃气中,使可燃气体的浓度进一步降低;第二,ER 增加扩大了炉中氧化燃烧区域,还原区域变小,单位时间内的气化强度降低,可燃气体产出变弱。

ER 在 0.1 ~ 0.16 范围内,H₂ 浓度出现了明显的上升,原因在于较低 ER(一般认为小于 0.4)^[10] 下,不完全燃烧的气化反应占据着主导地位,此时 ER 的提高有利于炉内氧化区温度的上升,对气化反应的深度进行是有利的,尤其在温度达到 700 °C 以上时,反应式(6)占主导地位,水蒸气气化促进了 H₂ 浓度的升高。

已有研究认为空气气化中,控制 ER 在 0.2 ~

0.4 范围内(通常为 0.25),能获得较为理想的气化效果^[11~13]。但本实验中,ER 在 0.16 左右时,燃气成分较理想(17.0% H₂、4.1% CH₄、20.1% CO、1.0% C_nH_m、12.6% CO₂、45.2% N₂),这是由于实验中气化炉采用了利于气化的特殊构造:一方面,采用了氧化区集中供风技术,可以保证进入炉内的氧气能在氧化区充分燃烧,对提高氧化区温度有积极作用;另一方面,还原区采用“包裹”型设计,能有效减少从氧化区传递至还原区的热损失,提高还原区气化强度。因此,虽然处于较低的空气当量比,但依然能保证较高的反应温度及气化强度,从而保证了气化反应的深度。

ER 对燃气热值的影响如图 7 所示。由图可知,ER 在 0.1 ~ 0.17 范围内时,热值变化不大,约为 6.5 MJ/m³;在 ER 大于 0.17 时,热值随 ER 的提高明显下降;ER 为 0.5 时,热值降低至 4 MJ/m³。当 ER 较小的时候,炉内是缺氧环境,物料层(尤其是还原区)甚至是无氧的,此时主要是挥发分的析出,析出的多碳类物质对热值提升有重要贡献。同时,燃气中氮浓度较少,可燃气体成分较多,热值较高。ER 较大时,炉中的物料多半发生燃烧反应,N₂ 浓度升高的同时,产生了过多的 CO₂,破坏了气化氛围,影响了燃气品质。

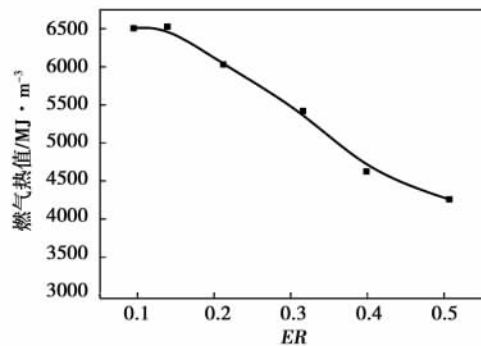


图 7 燃气热值随 ER 的变化

在原料给入量一定的情况下,气化效率主要受燃气产量和燃气热值的影响。一般而言,燃气产量随着 ER 的增加而增大。而热值与 ER 基本呈负相关特性,因此,气化效率随 ER 的变化存在一个峰值。

气化效率随空气当量比的变化曲线如图 8 所示,气化效率随着 ER 的提高先增大后降低,当 ER 在 0.3 时,气化效率达到最大,为 65%。ER 在 0.1 ~ 0.3 时,燃气量的增加及较高的燃气热值,使气化

效率升高; ER 大于 0.3 时,虽然燃气量很大,但炉内气化氛围被破坏,燃气中存在大量 N_2 和 CO_2 ,所以气化效率开始下降。总体而言, ER 在 0.1~0.35 之间时,气化效率均在 55% 以上,表明该气化炉对不同工况具有良好的适应性,气化特性处于较高水平。

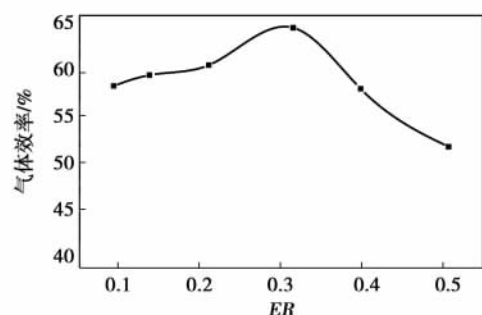


图8 气化效率随 ER 的变化

4 结论

对采用集中供风技术和还原区热量包裹技术的下吸式生物质气化炉气化性能进行了实验研究,表明该气化炉的气化效率与产气热值均较高,同时,相比以往气化炉,在气化性能上又有所不同,具体表现为:

(1) 还原区温度在 300~700 °C 之间时,生物质原料主要发生挥发分析出,析出的燃气主要为 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_nH_m 等物质; 700 °C 以上时,半焦与水蒸气发生气化反应, H_2 浓度明显上升,从 11% 变为 18%; 由于高温裂解 C_nH_m 的浓度从 1.3% 降低到 0.9%; CO 浓度随温度变化不大,稳定在 20% 左右。

(2) 高温为炉内提供气化所需要的热量和温度环境,产生的 H_2 和 CO 成为热值贡献的最主要因素,还原区温度在 900 °C 以上时,热值在 $6.5 MJ/m^3$ 以上。

(3) ER 是影响气化特性的最重要的因素。随着 ER 的提高,除了 H_2 浓度在初始阶段有上升外,其余可燃气体浓度均呈现下降趋势; ER 超过 0.16 后,燃气热值下降; 由于受到燃气热值和燃气产量的双重影响,气化效率先上升后降低,当 ER 为 0.3 时,气化效率达到最高,为 65%。

(4) 以往研究表明, ER 在 0.2~0.4 之间,气化

性能呈现最佳状态。实验中气化炉采用集中供风技术和还原区热量包裹技术后,使氧化区获得较高温度,还原区热损失降低,从而能在较低空气量供入的情况下提高气化效率及燃气热值。 ER 在 0.1~0.35 范围内,燃气热值在 $5.0 MJ/m^3$ 以上,最高达到 $6.5 MJ/m^3$,气化效率在 55% 以上,均达到了较高水平。

参考文献:

- [1] 陈冠益,高文学,颜蓓蓓,等. 生物质气化技术研究现状与发展[J]. 煤气与热力,2006,26(7):20-26.
- [2] 段玉燕. 户用型生物质气化炉的开发与试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [3] IOANNIDOU O, ZABANIOTOU A. Investigating the potential for energy, fuel, materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2009,13(4):750-762.
- [4] FANG M X, SHEN D K, LI Y X, et al. Kinetic study on pyrolysis and combustion of wood under different oxygen concentrations by using TG-FTIR analysis [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2006,77(1):22-27.
- [5] 朱锡锋. 生物质热解原理与技术[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2006.
- [6] LV P M, XIONG Z H. An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed [J]. Bioresource Technology,2004,95(1):95-101.
- [7] KREBS E, SILVI B, RAYBAUD P. Mixed sites and promoter segregation: a DFT study of the manifestation of Le Chatelier's principle for the Co (Ni) MoS active phase in reaction conditions [J]. Catalysis Today,2008,130(1):160-169.
- [8] TURN S, KINOSHITA C. An experimental investigation of hydrogen production from biomass gasification [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1998, 23(8):641-648.
- [9] 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,2004.
- [10] ERGUDENLER E, GHALY A E. Quality of gas produced from wheat straw in a dual-distributor type fluidized bed gasifier [J]. Biomass Bioenergy,1992,3(2):419-430.
- [11] JIANG H, MOREY R V. Air-gasification of corncobs at fluidization [J]. Biomass Bioenergy,1992,3(2):87-92.
- [12] KURKELA E, STAHLBERG P. Air gasification of peat, wood and brown coal in pressurised fluidized bed reactor [J]. Fuel Process Technology,1992,31(1):1-21.
- [13] RENSFELT E, EKSTROM C. Fuel gas from municipal waste in an integrated circulating fluidized bed /gas cleaning processes [J]. Energy Biomass Wastes,1989,12(4):811-906.

nition temperature of coal, the least square supportive vector machine method was used to establish a model for predicting the ignition temperature of the coal and compare it with the prediction models established by using the PLS (partial least square) and BP (back propagation) neural network method etc. The research results show that the least square supportive vector machine can overcome the problems such as weak generalization ability of the BP neural network and nonlinearity that the PLS method has no way to solve. The model under discussion enjoys a very high prediction precision. **Key words:** pulverized coal, ignition temperature, least square supportive vector machine, BP (back propagation) neural network, partial least square (PLS)

煤拔头烟煤焦的物质组成及碳结构 = **Substance Composition and Carbon Structure of Coal-topping Bituminous-coal Coke** [刊,汉] SHEN Chun-mei, WU Shao-hua (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LIN Wei-gang, SONG Wen-li (Process Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1). - 100 ~ 104

With Da-tong originated bituminous coal in three particle diameters (DT60, DT80 and DT100) serving as the raw material, the coal-topping semi-cokes at four pyrolysis temperatures (550, 650, 750 and 850 °C) were prepared respectively on a spouted-entrained bed. The industrial analytic, infrared spectrum analytic and X-ray diffraction analytic methods were used to test the substance composition and carbon structure of the coal-topping semi-cokes. It has been found that the substance composition and carbon structure of the coal-topping semi-cokes are related to its raw coal hypolysis degree (D_V), which will increase with an increase of the hypolysis temperature, temperature rise speed and residence time. The order of D_V magnitudes of raw coal in different particle diameters at a same pyrolysis temperature is basically as follows: $D_{V,DT60} > D_{V,DT100} > D_{V,DT80}$. The volatile content of the coal-topping semi-coke decreases and the fuel ratio increases with an increase of D_V . For Da-tong originated coal, when D_V is greater than 0.55, the fragrant structure features a conspicuous condensation polymerization reaction and the semi-coke structure also exhibits an obvious sequence phenomenon. **Key words:** raw coal pyrolysis degree, coal-topping semi-coke, substance composition, semi-coke structure

下吸式生物质气化炉气化性能研究 = **Study of the Gasification Performance of a Downdraft Type Biomass Gasifier** [刊,汉] JIN Liang, ZHOU Jin-song, WU Yuan-mou, et al (National Key Laboratory on Clean Utilization of Energy Source, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1). - 105 ~ 109

Biomass fixed bed gasification technology features such merits as a stable operation and capability to serve as a clean energy source, however, there exist also problems, namely, a low gasification efficiency and a low fuel gas heating value. With a downdraft type gasifier serving as an object of study, which adopts the centralized air feeding technology in the furnace and heat packaging technology in the reduction zone, the influence of the furnace temperature and equivalent ratio (ER) of air on the fuel gas composition, fuel gas heating value and gasification efficiency etc. was studied and a comparison and analysis was made with the research results achieved in the past. The test results show that the gasifier under discussion can guarantee to obtain a relatively high temperature both in the fur-

nance and the reduction zone at a relatively low equivalent ratio (ranging from 0.1 ~ 0.35) of air. The heating value produced by the fuel gas can be over 6.5 MJ/m³, the gasification efficiency can reach 65% and the average gasification efficiency is over 55%, thus the gasification performance is regarded as relatively perfect. **Key words:** biomass gasification, downdraft type gasifier, temperature in the reduction zone, equivalent ratio of air

生物质熔融碳酸盐燃料电池排气催化燃烧实验研究 = **Experimental Study of Catalytic Combustion of Exhaust Gas From a Biomass Melted Carbonate Fuel Cell** [刊, 汉] DAI Li-ming, WENG Yi-wu, LIU Ai-guo (Education Ministry Key Laboratory on Power Machinery and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1) . - 110 ~ 113

On a self-developed catalytic combustion test stand, studied were the catalytic combustion characteristics of the exhaust gas from a biomass melted carbonate fuel cell using four different catalysts. The research results show that as viewed from the overall tendency, the reaction efficiency of the catalytic combustion will increase with an increase of the catalytic combustor inlet temperature. The volumetric concentration of hydrogen in the exhaust gas from the biomass gas high temperature fuel cell has a very big influence on the catalytic reaction characteristics. When the hydrogen concentration is below 3%, the catalytic reaction efficiency will conspicuously increase with an increase of the hydrogen concentration. Different exhaust component concentrations and catalysts will have different catalytic reaction characteristics, thus different catalyst should be chosen, depending on the composition of the exhaust gas released from the melted carbonate fuel cell. **Key words:** melted carbonate fuel cell, catalytic combustion, catalyst, combustor inlet temperature, hydrogen volumetric concentration, combustion reaction efficiency

生活污水与煤混烧的热重试验研究 = **Thermogravimetric Experimental Study of Mixed Combustion of Sewage Sludge and Coal** [刊, 汉] LOU Bo, WANG Xiao-cong (Guangdong Provincial Key Laboratory on Green Energy Technology, College of Electric Power, South China University of Science and Technology, Guangzhou, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1) . - 114 ~ 116

A thermogravimetric analysis and experiment was performed of coal mixture in different proportions by choosing a sewage water treatment factory in Guangzhou City. It has been found that the temperatures at which a relatively conspicuous weight loss occurs range from 200 ~ 700 °C. When the coal proportion is relatively small (< 30%), DTG (derivative thermogravimetric) peaks have a large span in the low temperature section. When the coal proportion is relatively big (> 70%), DTG (derivative thermogravimetric) peaks are large in both width and value, approximating to the coal combustion characteristics. With an increase of the proportion of coal mixed in the sewage sludge, the ignition temperature will rise. An analysis of the burn-out temperature and characteristic index induces one to conclude that under the present test conditions, the optimum burning-out dilution and mixing proportion is around 40%. The chemical kinetics research results show that with a decrease of the sewage sludge proportion and an increase of the coal proportion, the activation energy will increase and the reaction speed will slow down. **Key words:** sewage sludge, combustion of coal mixture, thermogravimetric test, ignition temperature, burn-out characteristic index