

生物质下吸式气化炉热解气化试验研究

李瑞容¹, 朱德文¹, 张连发², 陈永生¹

(1. 农业部南京农业机械化研究所, 江苏 南京 210014; 2. 南京连驰生物能源有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 以生物质下吸式气化炉为研究对象, 采用水稻秸秆颗粒为原料, 通过试验研究分析气化炉内温度分布变化, 氧化区温度对产物燃气组分、燃气热值、产气量和产气效率的影响。结果表明: 随着氧化区温度由 500 °C 上升到 800 °C, H₂ 含量上升了 12.23%, CH₄ 含量上升了 98%, 可燃气体总含量由 15% 上升至 34%。燃气热值随温度升高呈线性规律, 升高 800 °C 时气体热值达到最大值 6.76 MJ/Nm³ 之后略有下降, 热值的高低主要受 CH₄ 含量高低的影响。气化炉工作稳定后, 气化效率为 71.64% - 76.64%, 对生物质颗粒这种密度大、热值高的燃料具有良好的适应性, 气化性能较为理想。

关键词: 生物质下吸式气化炉; 热解气化技术; 热值; 气体组分; 产气效率

中图分类号: TK6 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.028

引言

生物质气化技术是合理利用生物质的一种有效方法^[1]。在一定的热力学条件下, 借助气化剂, 使生物质纤维素和木质素发生热解、氧化、还原、重整, 获得含 CO、H₂、CH₄ 和 C_mH_n 等碳氢化合物燃气^[2]。气化炉是整个系统中的核心设备, 根据气化反应器的不同, 气化可以分为流化床气化、固定床气化、移动床气化等^[3-5]。其中, 固定床气化炉根据炉内气化剂的流动方向, 可分为 4 类^[6-7]: 上吸式、下吸式、横吸式和开心式。下吸式气化炉内的物料自上而下分为干燥层、热分解层、氧化层、还原层。其优点是结构简单, 工作稳定性好, 可随时进料, 焦油含量少^[8], 但该炉型也存在气化效率及燃气热值偏低等问题有待解决^[9]。

生物质气化领域处于领先的瑞典和丹麦实行利用生物质进行热电联产, 使生物质能在转换为高品位电能的同时满足供热的需求, 大幅度提高其转换效率^[10]。本研究以生物质下吸式气化炉为研究对

象, 采用秸秆颗粒为原料, 通过试验分析气化炉内温度分布变化, 氧化区温度对产物燃气组分、燃气热值、产气量和产气效率的影响, 揭示其气化机理, 得到该气化炉的气化性能, 为生物质下吸式固定床气化炉的设计和运行提供参考。

1 材料与试验方法

1.1 原料

水稻秸秆颗粒取自南京连驰能源有限公司溧水基地, 直径为 10 mm。水稻秸秆颗粒的总固体含量为 90.62%, 挥发性固体含量为 79.45%, 灰份含量为 17.54%, 固定碳含量为 16.94%, 低位热值为 14.31 MJ/kg。稻谷壳取自安徽省滁州市乌衣第一米厂, 经过晾晒后备用, 总固体含量为 89.27%, 挥发性固体含量为 68.60%, 灰份含量为 18.14%, 固定碳含量为 17.63%。

1.2 试验装置

试验装置采用自行设计的生物质气炭电联产系统, 该系统分为下吸式固定床气化炉、燃气净化系统、发电机组和仪表管路等 4 大部分。热解气化炉外表覆有保温层, 炉顶为进料口, 炉底是出灰口, 炉底的灰室外外部有冷水夹套包裹。保温层由耐火泥和一层固定钢板构成, 炉排采用高温耐热钢浇铸, 具有较强的抗烧损、抗热变形能力。原料通过进料提升机从顶部进入 $\Phi 3\ 000\ \text{mm} \times 8\ \text{mm}$ 、高 5 000 mm 的热解气化炉, 氧化炭和干馏炭在气化炉下部灰室中冷却后采用炉排振动筛排出并收集, 产生的初级燃气直接从安装在底部的收集管道进入灰室底部, 冷却后进入后续净化系统。

气化炉出口的初级燃气随后进行二级旋风除尘, 避免焦油和粉尘凝结在一起堵塞管路。木醋酸

收稿日期: 2014-09-24; 修订日期: 2014-11-17

基金项目: 江苏省科技支撑计划项目(BE2012430)

作者简介: 李瑞容(1984-), 女, 江苏南京人, 农业部南京农业机械化研究所助理研究员。

收集塔冷却燃气后将燃气中的木醋酸收集利用。然后进入除焦系统,焦油收集塔内部设计成固定床多层滤网结构,采用干式热解法联合脱除焦油,克服了湿式净化因水洗喷淋而导致燃气携带更多水分的缺陷。充分净化后的燃气通过罗茨风机打入 650 kW 发电机组发电。这样系统就达到“一进七出”的功效,即投入秸秆作为原料,收获了干馏炭、氧化炭、焦

油、干醋酸、热水(75-80 °C)、电能和管道燃气。

这套系统主要由热解气化炉、除尘塔、旋风除尘塔、木醋酸收集塔、焦油收集塔、防爆塔、缓冲罐、发电机、罗茨风机、管路系统和电机启动系统等组成,如图 1 所示。试验地点在安徽省滁州市乌衣镇第一米厂内,试验装置结构示意图如图 2 所示。

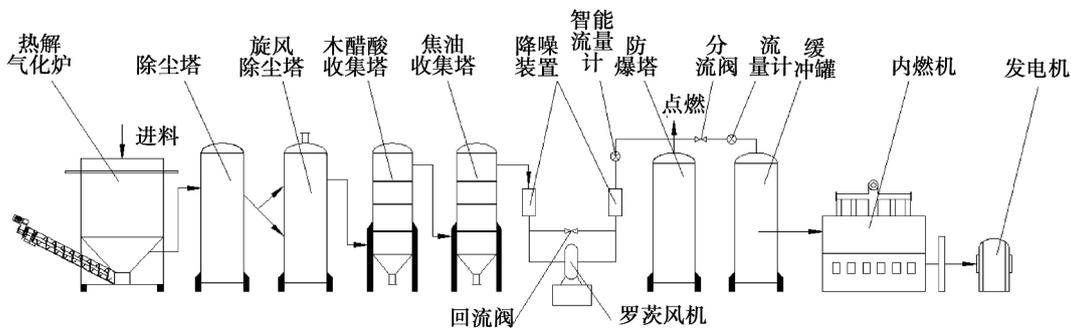


图 1 生物质气炭电联产系统工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of gas-carbon-electricity cogeneration system of biomass

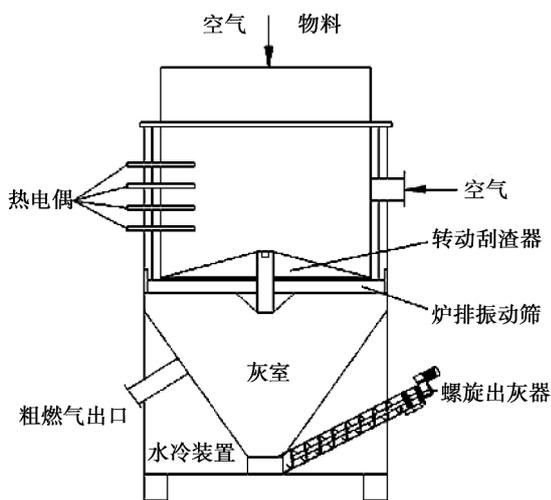


图 2 试验装置结构示意图

Fig. 2 The structure sketch of testing equipment

1.3 实验方法

开启罗茨风机后,将回流阀调至最大开度。开启循环水泵,对气化炉、净化设备进行冷却。在炉排上铺 29 袋稻草秸秆颗粒(约 580 kg),厚 130-135 cm,然后在原料上层铺一层 13 袋稻谷壳(约 390 kg)作为引燃物,厚度约 15-20 cm,铺平。采用间歇式进料,每小时进稻草秸秆颗粒 20 袋(约 400

kg)用钎子拨平物料,以减少料层分布不均。点火后,启动罗茨风机,并适当减小回流阀开度。罗茨风机开启后,放散旁路有燃气产出,将其点燃。待点火 30 min 后燃气产出逐渐稳定,开始加料。开启发动机主路阀门,启动发动机,调节发动机转速,直至输出电压稳定。燃气经过多级净化装置将焦油、木醋酸和水分冷凝下来过滤后,通过智能气体涡轮流量计计量燃气的瞬时和累计流量。

为了监控生物质气化炉运行过程中炉膛的温度分布,在气化炉中垂直放置 4 层 WRR-130 高温热电偶 A-D,从距炉顶 550 mm 处开始沿轴向每个相隔 250 mm 安放 1 根,直至距炉排 300 mm 处,并在气化炉灰室和底部燃气出口布置一个温度测点,用于监测系统的热效率。并在旋风除尘塔出口、焦油收集塔出口和缓冲罐出口各放置一个热电偶,监控各级净化设备出口处的燃气温度。试验过程中,温度由数据采集仪连接微机进行实时采集,采集时间间隔为 1 min。

可燃气体产物从氧化区温度 500 °C 开始用气袋收集直到试验结束,在同一试验工况中取 3-4 次样,以防止操作或运行过程中出现的误差,备用供后续分析。本研究中采用 Varian 公司的双通道微型气相色谱仪 Micro-GC(CP-4900, TCD, 双色谱柱),

以确定燃气中 H₂、CH₄、CO、CO₂、N₂、C_nH_m 等组分的体积百分含量。

2 结果与分析

2.1 热解气化炉内温度变化规律

试验中 将水稻秸秆颗粒作为原料 稻谷壳作为引燃物 间歇式进料 采用顶部点火内加热方式冷启动热解气化炉 图3 为气化炉内温度变化情况图 从A层 - D层依次为干燥区、热解层、氧化层和还原层。

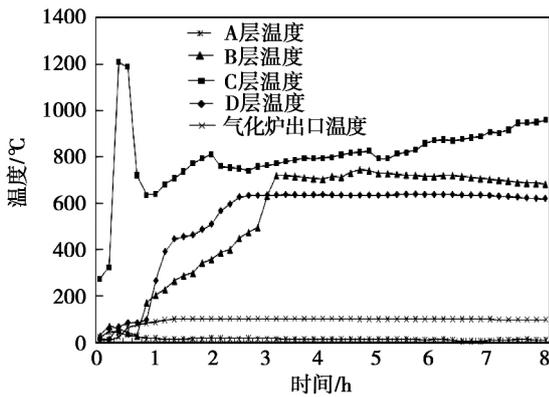


图3 热解气化炉内温度变化曲线图

ig. 3 The curve of temperature changes in the gasifier

物料在干燥区中 水分被蒸发 热解速度非常缓慢 温度维持在 100 °C 以下。气化开始阶段 空气含量大 氧气充分 氧化区的温度急速上升 局部迅速燃烧 在第 20 min 出现最高温度 1 220 °C 为干燥过程、热解反应和还原反应提供足够的热量 之后温度回落至 700 °C 整体呈缓慢上升趋势。热解区随着反应的进行 一方面吸收了下面氧化层的热量 一方面由于灰渣层加厚 氧化层和还原层上移 温度明显逐步攀升 但是由于采用的是间歇式进料 直到 3 h 后 该层温度才稳定在 700 - 750 °C 之间。同时 还原层受到氧化层热辐射的影响 还原层缓慢升高 反应 2.5 h 后稳定在 640 °C 左右。随后温度略有下降 因为二氧化碳与碳层发生了还原反应 可燃气的加热作用带走了很多热量。

气化炉出口初级燃气温度在 1 h 内 由 12 °C 上升到 102 °C 后 一直保持稳定到实验结束。

2.2 氧化区温度对燃气组分的影响

氧化区温度对水稻秸秆颗粒燃气组分的影响如图 4 所示 从图中可见 产生的燃气中 H₂ 组分占燃气总体积的 1.01% - 13.28% ,CH₄ 占 5.02% - 9.80% ,CO 占 10.35% - 12.69% ,C₂H₄ 与 C₂H₆ 占 0.16% - 0.67% ,可燃气体总含量占 35% 左右。在 500 °C 左右的时候 主要气体产物是 N₂ (69.56%) 、O₂ (12.14%) 、CO (12.69%) ,几乎没有 CH₄ 和 H₂ (1.01%) ,燃气中主要是不可燃气体 达到 85% 。这可能由于反应初期气化炉密封不佳进入了大量空气 或是由于温度较低 秸秆颗粒热裂解反应缓慢。随着温度由 500 °C 升高到 800 °C ,H₂ 和 CH₄ 快速升高 ,CO 保持一个相对稳定的状态 ,C₂H₆ 和 C₂H₄ 的产量较低 对温度的影响不大 其中可燃气体总含量由 15% 上升至 34% 。到 900 °C 时 ,H₂ 和 CO 略有上升 ,CH₄ 含量开始下降 可燃气体总含量变化不大。

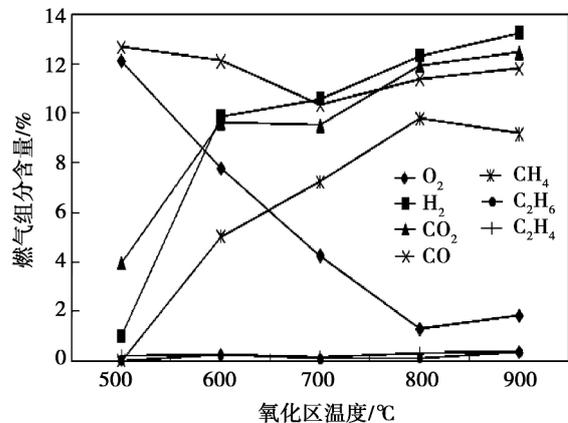


图4 氧化区温度对水稻秸秆颗粒燃气组分的影响

Fig. 4 Impact on rice straw particle gas composition by the oxidation zone temperatures

2.3 氧化区温度对燃气热值的影响

图 5 为燃气热值随氧化区温度的变化曲线 在 500 - 800 °C 之间 热值随温度升高而升高 在 800 °C 之后 低位热值达到最大值 6.76 MJ/m³ 后呈下降趋势。

燃气热值主要受燃气中 H₂、CO 和 CH₄ 的含量影响 其中 CH₄ 最为重要。从燃气组分分布图中可以看出 在 800 °C 之后 ,H₂ 和 CO 的含量随温度上

升, CH₄的含量却开始下降。这一方面由于温度的升高促进秸秆中的含碳化合物与水的产氢反应, 从而增加 H₂的产率; 一方面由于随着温度增加到 800 °C 后, 焦油的二次反应减弱, CH₄和一些轻质碳氢化合物的分解反应加强, 虽然 CO、H₂等继续增加, 但占主导地位的 CH₄含量开始下降; 另一方面气化炉温度的升高需要更多的空气加入, 造成了燃气中 N₂的比重增加, 这些都直接导致燃气热值的降低。

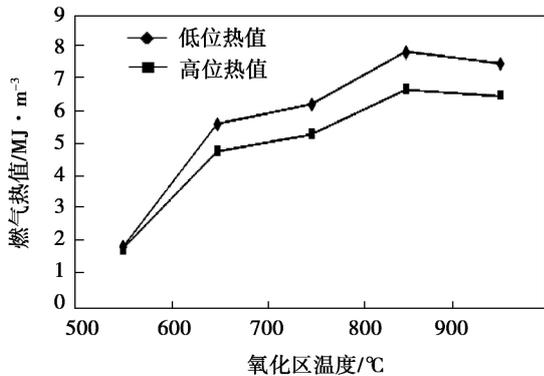


图 5 氧化区温度对燃气热值的影响
Fig. 5 Impact on gas calorific values by the oxidation zone temperatures

2.4 物料消耗量对燃气产气量和低位热值的影响

图 6 为秸秆颗粒的消耗量对燃气产气量和低位热值的影响。从图中可知, 燃气产气量在开始阶段快速上升, 这是由于大量物料进入高温反应区, 挥发分的迅速析出, 大量纤维素的迅速分解; 稍后, 产气量稍有回落。运行 1 h 后, 进料累计 880 kg 时, 产气量稳定在 450 m³/h 左右。这是由于挥发分析出开始减弱, 且由于炉直径较大, 内部传热慢, 中心位置物料温度较低, 所以气体产量减少并逐渐趋于稳定。当运行 4 h 后, 进料累计 1 780 kg, 产气量略有上升, 稳定在 500 m³/h 左右。这主要是此时热解层温度攀升到 700 °C 以上, 物料充分燃烧, 燃气产量也随之略有增长。

燃气低位热值随物料消耗量的增加而近似以线性规律升高, 在累计进料 1 780 kg 的时候, 热值达到最大, 呈稳中略降趋势。主要由于此时的氧化区温度达到 800 °C, 燃气中 CH₄含量开始下降, 而消耗空气量增加, 进入炉中的 N₂量增多。

气化效率是气化炉性能反映的一个重要指标,

利用公式计算气化炉的气化效率:

$$\eta = \frac{Q_o}{Q_i} \times 100\% = \frac{V_s \times Q_{Dw1}}{G \times Q_{Dw2}} \times 100\%$$

式中: η —气化炉的气化效率, %; Q_o —生物质燃气的输出能量, MJ; Q_i —农业废弃物输入能量, MJ; V_s —产气量, m³/h; G —原料消耗量, kg; Q_{Dw1} —生物质燃气的低位热值, MJ/m³; Q_{Dw2} —原料的低位热值, MJ/kg。

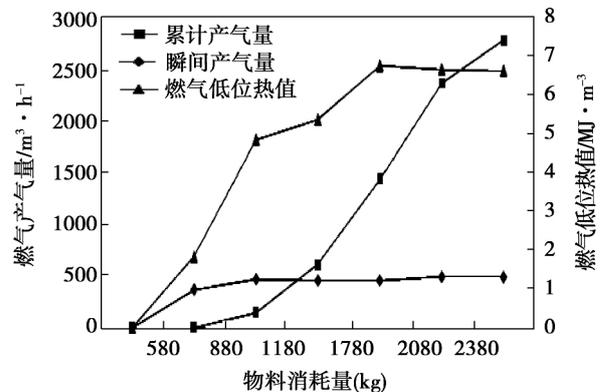


图 6 物料消耗量对燃气产气量和热值的影响
Fig. 6 Impact on gas production and calorific values by the feeding quantities

表 1 气化效率的测定参数

Tab. 1 The measured parameters of gasification efficiency

物料累计消耗/kg	产气量 /m ³ ·h ⁻¹	燃气低位热值/MJ·m ⁻³	气化效率/%
1 780	454.96	6.76	71.64
2 080	492.55	6.68	76.64
2 380	488.41	6.65	75.66

试验进行 4 h, 物料累计消耗量 1 780 kg 时, 该气化炉运行各项数值达到稳定。根据气化效率公式可得, 该气化炉的气化效率在 71.64% - 76.64%, 表明对于生物质颗粒这种密度大、热值高的燃料具有良好的适应性, 相比同类产品中的低气化效率 (<70%) 具有一定的优势。

3 结 论

(1) 随着氧化区温度由 500 °C 升高到 800 °C, H₂和 CH₄快速升高, H₂含量上升了约 12.23%, CH₄

含量上升了约 98% ,可燃气体总含量由 15% 上升至 34% 。 900 ℃ 时 ,H₂ 和 CO 略有上升 ,CH₄ 含量开始下降 ,可燃气体总含量变化不大。温度在 500 ℃ 左右的时候 ,主要气体产物是 N₂、O₂ 和 CO ,CH₄ 和 H₂ 几乎没有 ,燃气热值偏低 ,不利于燃烧。

(2) 当氧化区温度在 500 - 800 ℃ 之间时 ,燃气热值随温度升高而近似以线性规律升高 ,在 800 ℃ 气体热值达到最大值 6.76 MJ/m³ ,之后热值呈略降趋势。燃值的高低主要受到 N₂、H₂、CO 和 CH₄ 的含量影响 ,受 CH₄ 的含量影响最大。

(3) 气化炉工作运行稳定后 ,气化效率在 71.64% - 76.64% ,对于生物质颗粒这种密度大、热值高的燃料具有良好的适应性 ,相比同类产品中的低气化效率(< 70%) 具有一定的优势。

参考文献:

[1] 王立群 ,陈兆生. 生物质气化制备燃气过程的焓分析[J]. 农业机械学报 2013 44: 143 - 148.
WANG Li-qun ,CHEN Zhao-sheng. Exergy analysis on gas production from biomass gasification[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2013 44: 143 - 148.

[2] 常 轩 ,齐永锋 ,张冬冬 等. 生物质气化技术研究现状及其发展[J]. 现代化工 2013 33(6) : 36 - 40.
CHANG Xuan ,QI Yong-feng ,ZHANG Dong-dong ,et al. Current status and development of biomass gasification technology [J]. Modern Chemical Industry 2013 33(6) : 36 - 40.

[3] Alauddin Z A B Z ,Lahijani P ,Mohammadi M ,et al. Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Re-

views 2010 14(9) : 2852 - 2862.

[4] Hobbs M L ,Radulovic P T ,Smoot L D. Combustion and gasification of coals in fixed-beds [J]. Progress in Energy and Combustion Science 1993 19(6) : 505 - 586.

[5] Anjaneyulu T S R ,Prasad K B S ,Seshagiri Rao K ,et al. Gasification characteristics of coal in a moving bed pressure gasifier [J]. Fuel Processing Technology 1993 35(3) : 259 - 274.

[6] 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.
YUAN Zhen-hong ,WU Chuang-zhi ,MA Long-long ,et al. Biomass energy utilization principle and technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press 2005.

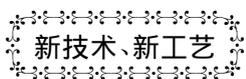
[7] 刘作龙 ,孙培勤 ,孙绍晖 等. 生物质气化技术和气化炉研究进展[J]. 河南化工 2011 28(1) : 21 - 24.
LIU Zuo-long ,SUN Pei-qin ,SUN Shao-hui ,et al. Present research status and development of biomass gasification technologies and gasifiers [J]. HENAN CHEMICAL INDUSTRY 2011 28(1) : 21 - 24.

[8] 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.
CHEN Guan-yi ,GAO Wen-xue ,YAN Bei-bei ,et al. Present research status and development of biomass gasification technologies [J]. Gas and heat 2006 26(7) : 20 - 26.

[9] 金 亮 ,周劲松 ,吴远谋 等. 下吸式生物质气化炉气化性能研究[J]. 热能动力工程 2011 26(1) : 105 - 109.
JIN Liang ,ZHOU Jin-song ,WU Yuan-mou ,et al. Study of the gasification performance of a downdraft type biomass gasifier [J]. JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER 2011 26(1) : 105 - 109.

[10] 吴创之 ,刘华财 ,阴秀丽. 生物质气化技术发展分析[J]. 燃料化学学报 2013 41(7) : 798 - 804.
WU Chuang-zhi ,LIU Hua-cai ,YIN Xiu-li. Status and prospects for biomass gasification [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology 2013 41(7) : 798 - 804.

(姜雪梅 编辑)



DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.029

LMS100PB 燃气轮机将用于天然气液化工厂

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2015 年 1 - 2 月刊报道 ,GE 公司将供应加拿大液化天然气开发公司干式低排放 LMS100PB 航改型燃气轮机 ,用于加拿大不列颠哥伦比亚省基蒂马特的天然气液化工厂。

在 LMS100PB 中 ,结合了国定式燃气轮机和航空发动机的技术。为了使装置在简单循环中工作的效率提高到创纪录的 45% ,应用了循环空气具有中间冷却的方案 ,该方案允许减少压气机用于压缩的耗功 ,并保持进入炎热天气的被废弃能量的水准。

LM100PB 简单循环的技术规范和额定性能:

推出年份	ISO 基本负荷额 定输出功率/kW	热耗率 kJ/kWh	效率 %	压比	流量 kg/s	涡轮转速 r/min	排气温度 ℃	大约的重 量/kg	大约的尺寸 L × W × H(长 × 宽 × 高) /m	说明
2010	99 400	8 118	45.0	40.0	215.5	3 600	421	TBD	26.5 × 4.6 × 183.9	干式低排放 燃烧室

(吉桂明 摘译)

Ltd. ,Shenzhen ,China ,Post Code: 518057) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 ,30 (6) . - 932 - 935

In combination with the operation features of nuclear power generation units and the mechanism governing the presence of dissolved oxygen , a systematic analysis and experimental study were performed of the problem that the dissolved oxygen content of condensate water in a nuclear power unit exceeded the standard. The analysis begun from the following three aspects: inspection of the leakage flow rate ,verification of the performance of the condenser and the air extraction capacity of the vacuum pump. It has been found that the air leakage flow rate shall comply with the requirements as stipulated in ASME PTC 12.2 and the influence of the supercooling degree of the condensate water in the condenser of a nuclear power generation unit on its dissolved oxygen content is about 1/5 to 1/3 of the value theoretically calculated. When the vacuum degree in the condenser decreases by 4 kPa through increasing the gas extraction capacity of the vacuum pump ,the dissolved oxygen content can decrease by about 5 ppb accordingly. Finally ,through reducing the leakage flow rate and increasing the gas extraction capacity of the vacuum pump ,the dissolved oxygen content was controlled within the value of 3 ppb as expected ,thus the problem that the dissolved oxygen content of condensate water in the nuclear power unit exceeds the standard can be dealt with effectively and the serious consequence of water corrosion products in the pressurized water reactor nuclear power units due to the dissolved oxygen content exceeding the standard can be avoided ,thus offering reference for subsequent treatment of similar problems and formulation of a strict condensate water dissolved oxygen content control standard in the industry. **Key words:** dissolved oxygen ,vacuum tightness ,condensate water ,vacuum pump

生物质下吸式气化炉热解气化试验研究 = **Experimental Study of the Pyrolytic Gasification of a Biomass Downdraft Type Gasifier** [刊 汉] LI Rui-rong ,ZHU De-wen ,CHEN Yong-sheng (Nanjing Agricultural Mechanization Research Institute ,Agricultural Ministry ,Nanjing ,China ,Post Code: 210014) ,ZHANG Lian-fa (Nanjing Li-anchi Biology and Energy Source Co. Ltd. ,Nanjing ,China ,Post Code: 211100) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 ,30(6) . - 936 - 940

With a biomass downdraft type gasifier serving as the object of study and the rice stalk particles as the raw material , through an experimental study ,analyzed were changes in the temperature distribution inside the gasifier and the influence of the gasification temperature on the fuel gas constituents of the products ,fuel gas heating value ,gas pro-

duction capacity and efficiency. It has been found that the temperature in the oxidation zone increases from 500 °C to 800 °C ,the hydrogen content increases by 12.23% ,the CH₄ content increases by 98% and the total fuel gas content increases from 15% to 34% . The heating value of the fuel gas will increase according to a linear law with an increase of the temperature. When the temperature is 800 °C ,the heating value of the fuel gas will slightly decrease after attaining its maximum value of 6.76 MJ/Nm³ . The magnitude of the heating value is mainly influenced by the magnitude of the CH₄ content. After the operation of the gasifier has been stable ,the gasification efficiency will be in a range from 71.64% to 76.64% ,thus enjoying a good adaptability to the fuels having big densities and high heating values such as biomass particles and attaining relatively ideal gasification performance. **Key words:** biomass downdraft type gasifier ,pyrolytic gasification technology ,heating value ,gas constituent ,gas production efficiency

核电站蒸发塔分离效率试验研究 = Experimental Study of the Separation Efficiency of a Vaporization Tower in a Nuclear Power Station [刊 汉] ZHENG Wei ,LU Yong-hong ,BAI Bing ,YANG Ming-hui ,LU Jie (China Kehua Nuclear Power Technology Research Institute Co. Ltd. ,Shenzhen ,China ,Post Code: 518124) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(6) . -941 -945

Through a theoretical analysis of the separation efficiency of a vaporization tower in a boric acid recovery system in a nuclear power station ,a vaporization and separation test rig was designed for performing a vaporization test of the liquid simulated. It has been found that the return flow ratio has a relatively big influence on the vaporization efficiency and the operating pressure has no remarkable influence on the vaporization efficiency. The distillation and separation efficiency when the return flow ratio of the vaporization tower is 20% and 30% respectively is superior to that when the return flow ratio of the vaporization tower is 10% . Under the condition of the steam flow speed in the vaporization tower exceeding the rated flow speed by 25.9% ,the boron content of the distillate remains less than 5 mg/kg. The radiation alternative test results show that the decontamination factor of the vaporization tower to the radionuclides difficult to be volatile attains 1 150. It has been found that under the condition of the gas phase flow speed and liquid phase flow speed in the test tower keeping identical to those in the in-service equipment items ,the boron content of the distillate can meet the requirements for operation of nuclear power stations. **Key words:** nuclear power station ,boric acid recovery system ,vaporization tower ,return flow ratio ,decontamination factor