

两段式秸秆气化炉中当量比对气化特性的影响

陈亮, 苏毅, 陈祎, 罗永浩, 陆方, 吴文广

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市 闵行区 200240)

Effect of Equivalence Ratio on Gasification Characteristics in a Rice Straw Two-stage Gasifier

CHEN Liang, SU Yi, CHEN Yi, LUO Yong-hao, LU Fang, WU Wen-guang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: China produces large amount of biomass waste during agriculture process, hence, the prospect of developing biomass energy conversion system based on one village self-sufficient concept is very attractive in China. The innovative structures of the two-stage rice straw gasifier developed by Shanghai Jiaotong University was introduced, and the influence of equivalence ratio (ϵ_{ER}) on gasification performance was researched. The tests show that under the experimental condition, the best value of ϵ_{ER} was between 0.3 and 0.35, the even heating value of product gas could reach 6 009.7 kJ/m³, gas production rate of 1.84 m³/kg, carbon conversion rate of 91.3%, 84.6% for the overall gasification efficiency. When ϵ_{ER} was 0.25~0.3, the tar content in gas decreased with increasing equivalence ratio, but when ϵ_{ER} was above 0.3, the tar content increased again.

KEY WORDS: biomass gasification; two-stage gasifier; equivalence ratio; rice straw; tar

摘要: 中国拥有大量的农林废弃物生物资源, 因此开发以村为单位的生物质能量转化系统前景广阔。该文介绍上海交通大学研制的两段式秸秆气化炉的创新结构, 并通过该两段式气化炉研究了当量比 ϵ_{ER} 对气化炉主要性能参数的影响。结果表明: 在实验工况下, 最佳当量比为0.3~0.35, 此时秸秆气化气平均热值可达6 009.7 kJ/m³, 产气率为1.84 m³/kg, 碳转化率为91.3%, 气化效率为84.6%。当0.25< ϵ_{ER} <0.3时, 焦油含量随 ϵ_{ER} 的增大而减少, 但 ϵ_{ER} >0.3时, 焦油含量又呈上升趋势。

关键词: 生物质气化; 两段式气化炉; 最佳当量比; 秸秆; 焦油

0 引言

世界范围内, 生物质能仅次于煤炭、石油和天

然气居于能源总量第4位。目前, 国外对生物质的利用侧重于转化为电力和优质运输燃料^[1-3]。我国农业生物质资源丰富, 但分布分散, 由于收集、运输和储存的成本过高而难于推广。另一方面, 随着农村电力需求的增加, 农村与城市电力矛盾将会变得突出^[4]。所以, 利用农村当地的生物质资源, 开发以村为单位的小型秸秆气化发电技术具有现实意义。

为克服传统气化炉的缺点^[5-7], Iversen^[8]及Brandt^[9]描述了热解和气化段独立的两段式气化炉, 并以木片为原料研究了两段式气化炉的气化特点。指出两段式气化炉系统简单灵活, 可在气化炉内实现高温裂解、部分氧化和脱除焦油的目的。但该气化炉的原料适应性较差, 仅适用于木片或成型燃料, 并且需要对原料进行干燥, 增加了原料预处理的成本。

上海交通大学热能工程研究所在此基础上开发了全新的60 kW两段式秸秆气化炉, 该气化炉仅需对原料进行简单的晾晒和切割, 广泛地适用于秸秆、玉米秆、树枝等农业废弃物, 大幅度降低了气化炉的运行成本, 既保留了两段式气化炉的原有的焦油含量低的优点, 又增强了该气化炉的原料适应性。该文以两段式秸秆气化炉为实验装置, 主要考察当量比 ϵ_{ER} 对气化炉主要性能参数的影响。

1 实验部分

1.1 实验装置和原理

试验装置两段式气化炉结构如图1所示, 辅助装置由进料装置, 气化气净化装置, 测量和数据采集系统等组成。实验采用的气化反应器是全新开发的常压两段式气化炉。分为热解筒热解区, 喉口部分氧化区, 碳床气化区3个部分。

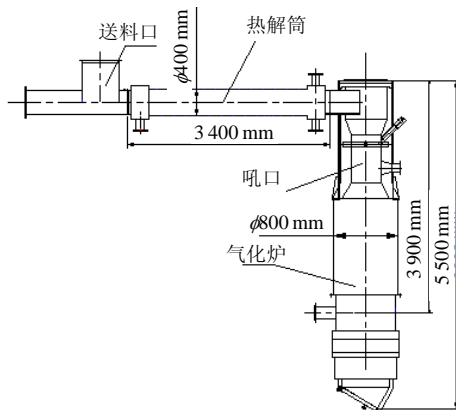


图 1 两段式气化炉结构图

Fig. 1 Structure of the 60 kW two stage gasifier

实验原理如下：整个气化炉由罗茨风机抽气形成 200~400 Pa 的负压。处理后的秸秆经传送带传送到送料口，由活塞将秸秆直接送入热解筒内。秸秆经过活塞的压缩后密度比较高，可以达到 164 kg/m³，在送料口部对热解筒起到很好的密封作用。秸秆在热解筒内充分热解后，被活塞推挤进入气化炉部分并在气化炉内堆积形成碳床。喉口部分通入预热后的空气，产生的热解气在经过喉口时被部分引燃，以提高喉口的温度，焦油在这个高温区内大量裂解。在喉口高温区的辐射下碳床发生气化反应。产生的气化气经净化装置净化后进入气罐储存。

实验启动阶段使用外部燃烧器加热热解筒。待系统稳定运行后，采用内燃机燃烧后排气加热热解筒。系统稳定运行后，不需要附加外部热量供给。

本实验装置在传统两段式气化炉的基础上针对稻草秸秆用料进行了一系列改进和创新。一方面由于秸秆的长度和韧性，采用一般的螺旋进料方式秸秆很容易在螺杆上绕死，使进料不畅。本实验装置采用活塞推进进料，既保证了进料的连续性也加强了热解筒的密封效果。另外，为解决秸秆气化炉容易产生的搭桥造成除灰不畅的问题，本装置采用了活动炉篦，如图 2 所示，并在其上焊接摇臂，通过电动电磁阀控制炉篦摇摆、晃动，有效地提高了除灰的效率。同样，基于秸秆的物理性质，本装置的排灰门采用新的设计，排灰门只需打开一次即可迅

速将炉篦下的所有灰渣排出。同时为了防止排灰，打开排灰门时空气进入引起气化气品质波动，在炉篦和排灰门中间设计了对开密封闸板门，如图 3 所示。闸板门在开启排灰门前短时关闭，完成排灰后再打开，可有效防止空气从排灰门进入。为了改善喉口部位的流场分布，加强效果，喉口空气采用旋流喷入方式。

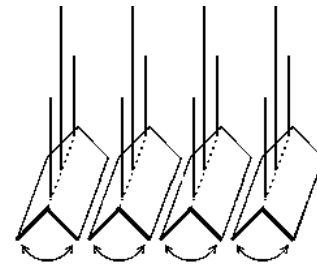


图 2 炉篦
Fig. 2 Grate

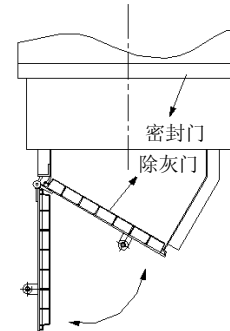


图 3 排灰门及密封门
Fig. 3 Ash removal gate and seal gate

1.2 实验原料

本实验以上海金山区的稻秆为生物质原料(图 4)。经过晾晒后，用铡草机铡至 2~4 cm。工业分析和元素分析结果如表 1 所示。



图 4 生物质秸秆原料(长度为 2~4 cm)

Fig. 4 Feedstock: rice straw(length of 2~4 cm)

表 1 稻秆的工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate and elemental analyzes of rice straw

工业分析/%				元素分析/%					高位热值/(MJ/kg)
M	V	FC	A	C	H	O	N	S	
13.45	62.79	15.92	7.84	35.58	4.63	37.36	0.94	0.20	15.62

1.3 实验方法

1) 启动: 先在热解筒内加入稻秆 20 kg, 开启燃烧器加热热解筒至加热烟气出口温度为 300 °C。此时开启气化炉预热燃烧器, 以 100 kg/h 的进料速度均匀进料。待热解草热电偶显示温度大于 400 °C, 开启喉口进风风机, 逐渐增大进风风量至喉口温度提高至 900 °C, 炉膛其他各点温度升高至 500 °C 左右时, 关闭气化炉预热燃烧器。

2) 实验: 固定进料速度, 改变进风量, 提高喉口温度。进行气化实验。不断观察碳层高度, 适时开启炉蓖打灰及排灰门排灰。炉膛各点温度由电脑每隔 20 s 自动采集并存储。待炉膛温度基本保持不变时进行气化气成分分析采集, 采集频率为 30 s/次。每组实验进行 3 次, 以消除随机误差。

3) 停止: 停止进料, 关闭热解筒加热燃烧器, 开启热解筒烟气风量至最大以冷却热解筒, 继续开启系统引风机至气化炉炉膛温度及热解筒温度降至 200 °C 以下。

采用热电偶进行气化炉系统的数据测量和采集, 使用计算机实时监控。在热解筒末端安装 1 个热电偶, 观测热解草的温度。喉口处安装 2 个热电偶, 观测喉口温度。碳床温度分别由安装在距离炉蓖为 10、50、90、105、125、135、145 cm 的 7 个热电偶确定。气化气出口和喉口处预热空气入口也各自安装了 1 个热电偶测定温度。空气量由量程为 0~60 m³/min 的浮子流量计控制。

烟气检测设备选用武汉四方光电公司的 Gasboard-3AS 型红外煤气成分在线气体分析仪, 分析 CO、CH₄、H₂、CO₂ 在气化气中的含量。

2 实验结果与讨论

2.1 ε_{ER} 对气化效果的影响

当量比 ε_{ER} 是气化炉运行中非常重要的参数。不同的 ε_{ER} 值决定着气化炉温度、产气率、产气成分, 产气热值等主要性能参数。本文中当量比 ε_{ER} 是指自供热气化系统中, 单位生物质在气化过程所消耗的空气(氧气)量与完全燃烧所需要的理论空气(氧气)量之比。

本实验固定进料量为 100 kg/h, 碳床高度 h 为 100 cm 左右, 调节喉口空气流量, 控制 ε_{ER} 值变化范围为 0.1~0.4。

由热电偶采集到的数据, ε_{ER} 对气化炉内床层温度的影响变化如图 5 所示, 图中显示碳层温度随 ε_{ER} 值的增大而增大, 分析认为这是由 2 个原因造

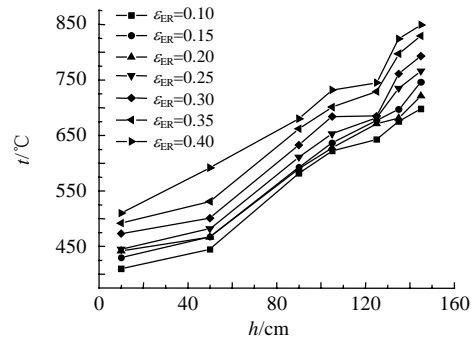


图 5 ε_{ER} 对床层温度的影响

Fig. 5 Influence of ε_{ER} on temperature of char bed

成的: 1) ε_{ER} 值增大, 使更多热解气燃烧, 喉口部分的温度升高, 增强了对碳床的热辐射, 导致碳床整体温度提高。2) 过量空气喷入后在引风机的抽吸作用下下行与高温的碳床接触, 发生氧化放热反应, 导致碳床整体温度提高。

ε_{ER} 对气化气成分的影响如图 6 所示。 ε_{ER} 为 0.1~0.35 时, 随 ε_{ER} 值的增大, H₂ 和 CO 含量升高很快。H₂ 含量从 2.5% 提高到 11%, 这可能是由于 ε_{ER} 值增加, 喉口及碳床的温度升高, 加速了大分子碳氢化合物裂解为小分子 H₂ 的过程。而 CO 含量从 6.7% 提高到 10.5%, 这可能是高温的碳层与不足量的氧气接触发生了部分氧化反应, 即 $2C+O_2=2CO$; 同时 ε_{ER} 值的增加使氧化区 CO₂ 浓度增加, 从而与碳层发生反应, 即 $CO_2+C=2CO$ 。但是当 ε_{ER} 大于 0.35 时, 2 种气体含量均有所下降。

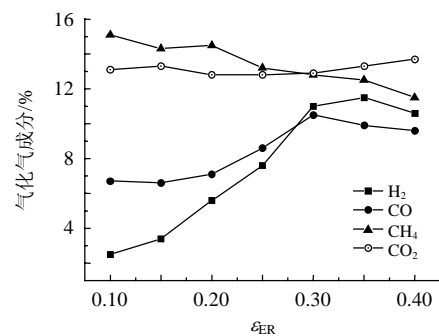


图 6 ε_{ER} 对气化气成分的影响

Fig. 6 Influence of ε_{ER} on gas composition

CO₂ 的含量受 ε_{ER} 值影响不大, 始终保持在 12%~13%, 仅在 $\varepsilon_{ER}>0.3$ 时有不明显的伴随增高趋势。此时其与 CO 的含量变化负相关, 即 CO 含量减少时, CO₂ 含量增大。

CH₄ 随 ε_{ER} 的增大有明显下降趋势。生物质气化反应过程十分复杂, 主要发生的反应有碳的氧化反应 $C+O_2=2CO_2$, CO₂ 的还原反应 $C+CO_2=2CO$, 水蒸气分解反应 $C+H_2O=CO+H_2$, 甲烷的生

成反应 $C+2H_2=CH_4$ 。其中甲烷的生成反应为放热反应， CH_4 含量的下降可能是由于随着 ϵ_{ER} 的增大碳层整体温度提高，导致反应平衡向反方向移动， CH_4 含量减少^[10]。

产气率以及气化气低位热值与 ϵ_{ER} 之间的关系如图 7 所示。从图中可以看出，在 $0.1 < \epsilon_{ER} < 0.4$ 的范围内，随 ϵ_{ER} 值的不断增大，产气率呈上升趋势， ϵ_{ER} 值越大，产气率越高。这与一般的气化理论相符。由于空气量的增大使得气化反应向正方向进行，气化气的产量随即增加。 ϵ_{ER} 值从 0.1 到 0.15 间，低位热值有一个明显的降低趋势，这可能是由于 ϵ_{ER} 为 0.1 时喉口温度较低，气化反应未完全进行。此时的热值可能是热解气被从喉口喷入的空气稀释后的热值，其值有所降低。 ϵ_{ER} 增大至 0.15 时，温度提高，部分热解气与喷入的空气接触后即燃烧，气体产率增加。当 $\epsilon_{ER} > 0.2$ 时，气化反应开始充分进行，并且随着 ϵ_{ER} 的不断增大，产气率和热值均有所增加。至 $\epsilon_{ER} = 0.3$ 时气化气热值达到最大值， ϵ_{ER} 值继续增大，随空气进入的 N_2 含量增加， CO 含量减少， CO_2 含量增加(图 6)，故气化气热值明显下降。

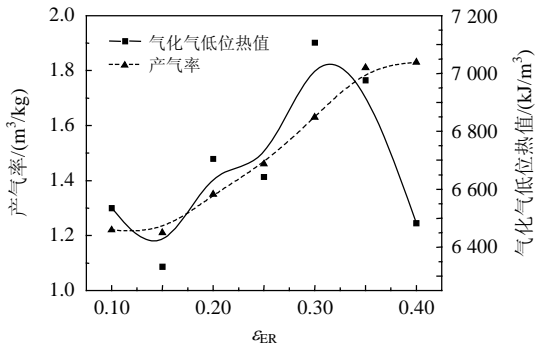


图 7 ϵ_{ER} 对产气率和气化气低位热值的影响

Fig. 7 Influence of ϵ_{ER} on gas yield rate and LHV

本装置中 ϵ_{ER} 对碳转化率和气化效率的影响如图 8 所示。本文中碳转换率指生物质原料中的碳转换为气化气中的碳的效率，即气体中含碳量与原料中的含碳量之比。气体产率 $\eta_e = \{ [12(V_{CO_2} + V_{CO} + V_{CH_4})] / [22.4 \times (300/273)] \} G_y$ ，式中： η_e 为碳转换率，%； G_y 为气体产率； V_{CO_2} 、 V_{CO} 、 V_{CH_4} 分别为 CO_2 、 CO 、 CH_4 在产气中的体积百分比含量。气化效率是指单位生物质气化后生成气体的热值与单位生物质原料的热值之比。气化效率 $= [(\text{气化气热值} \times \text{产气率}) / \text{原料热值}] \times 100\%$ ，其中，气化气热值及产气率均需在室温下测得。

从图中可以看出， ϵ_{ER} 对碳转化率和气化效率

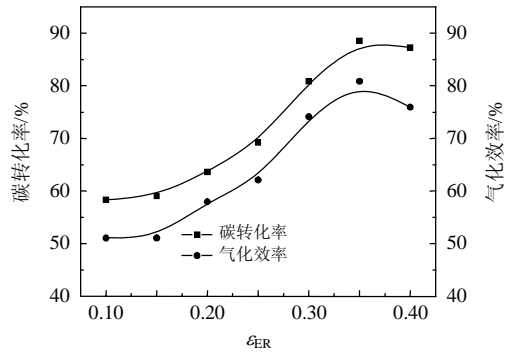


图 8 ϵ_{ER} 对碳转化率和气化效率的影响

Fig. 8 Influence of ϵ_{ER} on carbon conversion efficiency and gasification efficiency

的影响大体相似。

$0.1 < \epsilon_{ER} < 0.35$ 的范围内随 ϵ_{ER} 增大，2 项指标均成线性增加。当 ϵ_{ER} 继续增加至 0.4 时，2 项指标均开始下降。而图 6、7 显示此时气化气中 CO 、 CH_4 含量下降，气化气热值明显下降。

2.2 ϵ_{ER} 对焦油含量的影响

当量比 ϵ_{ER} 不仅决定着气化炉温度、气化气成分、产气热值、产气率等主要气化炉性能参数，而且对焦油的脱除有重要影响^[11-15]。

焦油对生物质气化系统危害很大，重焦油组分凝结在冷表面上，形成气溶胶，气相中焦油聚合形成炭黑并与其他污染物反应吸附在精细颗粒上，导致颗粒过滤器、燃料管道和内燃机喷口的堵塞^[16-18]。

测量焦油的方法主要有 3 种：气相色谱在线分析方法、固相吸收方法、冷态捕捉方法^[19-21]。本文采用冷态捕捉法，焦油取样系统如图 9 所示。

实验方法如下：抽气泵从气化炉抽取的气体经加热带加热，保持在 $350^\circ C$ 以上，然后进入置于冰浴中的盛有有机溶剂的烧瓶中，有机溶剂为甲醇和三氯甲烷，按 1:4 配比。焦油在低温下冷凝于有机溶剂中，气体经转子流量计排空。实验完成后，所

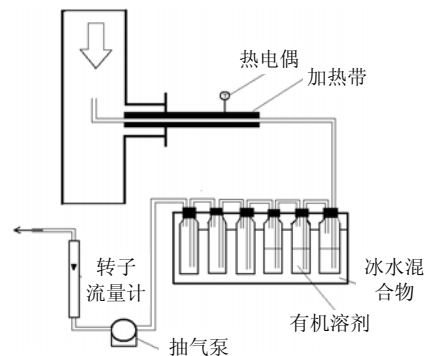


图 9 焦油取样系统图

Fig. 9 Schematic diagram layout of tar sampling

有的橡胶管与烧瓶均经过有机溶液清洗, 连同冷凝下来的焦油经过过滤除去粉尘, 然后在真空干燥箱 40 °C 环境下放置 100 h, 取出后称取重量。

焦油含量随 ε_{ER} 的变化曲线如图 10 所示。0.25 < ε_{ER} < 0.3 时, 焦油含量随 ε_{ER} 的增大而减少。基于高温对焦油的裂解具有促进作用的事实^[22], 焦油含量的下降可以解释为 ε_{ER} 的增加使热解气燃烧放热促进喉口温度的增加, 焦油在高温环境下大量裂解, 导致焦油量减少。但是当 ε_{ER} 继续增大时, 焦油含量出现上升趋势, 这可能是因为 ε_{ER} 增大使大量的 H_2 被消耗, 而 H_2 对焦油的裂解具有促进作用^[23], 从而导致焦油被裂解的量减少。

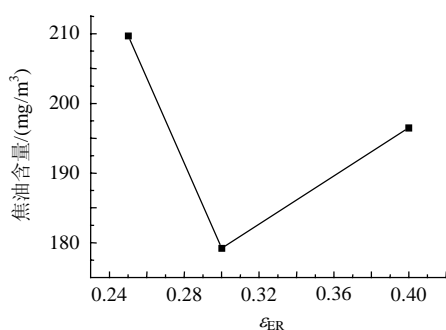


图 10 焦油含量随 ε_{ER} 变化图

Fig. 10 Influence of ε_{ER} on tar content

3 结论

本文以上海交通大学热能研究所研制的两段式秸秆气化炉为实验装置, 研究了当量比 ε_{ER} 对该气化炉的主要参数气化炉温度、气化气成分、热值、产气率、碳转化率、气化效率和焦油量的影响。结果表明: 当量比 ε_{ER} 对气化效果有很大影响。 ε_{ER} 增大, 碳层温度相应提高; 气化气中 H_2 和 CO 体积分数在 $0.1 < \varepsilon_{ER} < 0.35$ 时随 ε_{ER} 值的增大而提高。在 $\varepsilon_{ER} = 0.35$ 时分别达到最大值 11.5% 和 10.5%。但在 $\varepsilon_{ER} > 0.35$ 时, 2 种气体含量均有所下降。 CH_4 体积分数随 ε_{ER} 增大而逐渐减小。 CO_2 受 ε_{ER} 影响较小; 产气率随 ε_{ER} 值增大而提高, ε_{ER} 值为 0.3 时气化气热值达到最大值; 碳转化率和气化率在 ε_{ER} 值为 0.35 时达到最大值。同时当 $0.25 < \varepsilon_{ER} < 0.3$ 时焦油含量随 ε_{ER} 的增大而减少, 但是当 ε_{ER} 继续增大时, 焦油含量又出现上升趋势。

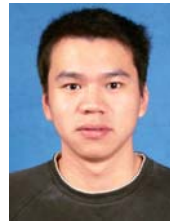
实验表明, 该两段式秸秆气化炉最佳当量比为 0.3~0.35, 在实验工况下, 最佳当量比为 0.3~0.35, 此时秸秆气化气平均热值可达到 6 009.7 kJ/m³, 产气率为 1.84 m³/kg, 碳转化率为 91.3%, 气化效率为 84.6%。

参考文献

- [1] Chen G, Andries J, Spliethoff H, et al. Biomass gasification integrated with pyrolysis in a circulating fluidised bed[J]. *Solar Energy*, 2004, 76(1-3): 345-349.
- [2] Asadullah M, Miyazawa T, Ito S, et al. Demonstration of real biomass gasification drastically promoted by effective catalyst [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2003, 246(1): 103-116.
- [3] 徐华清. 中国能源环境发展报告[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 56-92.
- [4] 中国生物能开发利用与战略思考[R]. 北京: 中国农村能源行业协会, 2000: 22-41.
- [5] Bui T, Loof R, Bhattacharya S C. Multi-stage reactor for thermal gasification of wood[J]. *Energy*, 1994, 19(4): 397-404.
- [6] Karellas I S, Karl J, Kakaras E. An innovative biomass gasification process and its coupling with microturbine and fuel cell systems [J]. *Energy*, 2008, 33(2): 284-291.
- [7] Robert Kramreiter, Michael Url, Jan Kotik, et al. Experimental investigation of a 125 kW twin-fire fixed bed gasification pilot plant and comparison to the results of a 2 MW combined heat and power plant[J]. *Fuel Processing Technology*, 2008, 89(1): 90-102.
- [8] Jan F, Jesper A, Ulrik H, et al. Formation, decomposition and cracking of biomass tars in gasification[R]. Denmark: Department of Mechanical Engineering, Kgs. Lyngby, 2005.
- [9] Peder Brandt, Elfinn Larsen, Ulrik Henriksen. High tar reduction in a two-stage gasifier[J]. *Energy & Fuels*, 2000, 14(4): 816-819.
- [10] 许世森. 大规模煤气化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 78-115.
- [11] 吴创之. 生物质气化发电技术讲座(3)生物质焦油裂解技术[J]. 可再生能源, 2003(3): 53-72.
Wu Chuangzhi. Biomass gasification electricity generation technique (III) Biomass tar splitting technique[J]. *Renewable Energy*, 2003(3): 53-72(in Chinese).
- [12] 魏敦崧, 李芳芹, 李连民. 生物质固定床气化试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 254-259.
Wei Dunsong, Li Fangqin, Li Lianmin. Test study on biomass gasification in fixed beds[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science Edition*, 2006, 34(2): 254-259(in Chinese).
- [13] Jan Fjellerup, Ulrik Henriksen. Heat transfer in a fixed bed of straw char[J]. *Energy & Fuels*, 2003, 17(5): 1251-1258.
- [14] Behdad Moghtaderi. Effects of controlling parameters on production of hydrogen by catalytic steam gasification of biomass at low temperature[J]. *Fuel*, 2007, 86(15): 2422-2430.
- [15] Dayton D. A review of the literature on catalytic biomass tar destruction[C]. USA: National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [16] Sutton D, Kelleher B, Ross J R H. Review of literature on catalysts for biomass gasification[J]. *Fuel Process Technology*, 2001, 73(3): 155-173.
- [17] Hepola J, McCarty J, Krishnan G, et al. Elucidation of behavior of sulfur on nickel-based hot gas cleaning catalysts[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1999, 20(3): 191-203.
- [18] Zhang R, Brown R C, Suby A, et al. Catalytic destruction of tar in

- biomass derived producer gas[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(7-8): 995-1014.
- [19] Coll R, Salvado J, Farriol X, et al. Steam reforming model compounds of biomass gasification tars: conversion at different operating conditions and tendency towards coke formation[J]. Fuel Process Technology, 2001, 74(1): 19-31.
- [20] Iwaki H, Ye Shufeng. Wastepaper gasification with CO₂ or steam using catalysts of molten carbonates[J]. Applied Catalysis A: Gen, 2004, 27(1-2): 237-243.
- [21] Jin G, Iwaki H, Arai N, et al. Study on the gasification of wastepaper/carbon dioxide catalyzed by molten carbonate salts[J]. Energy, 2005, 30(17): 1192-1203.
- [22] Peder Brandt, Elfinn Larsen, Ulrik Henriksen. High tar reduction in a two-stage gasifier[J]. Energy & Fuel, 2000, 14(4): 816-819.
- [23] Houben M P, de Lange H C, van Steenhoven A A. Tar reduction

through partial combustion of fuel gas[J]. Fuel, 2005, 84(7-8): 817-824.



陈亮

收稿日期: 2009-02-23。

作者简介:

陈亮(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生物质气化发电技术, hitbornwin@sjtu.edu.cn;

苏毅(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为生物质气化发电技术;

陈祎(1980—), 男, 博士, 研究方向为生物质气化发电技术;

罗永浩(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为锅炉, 生物质。

(编辑 张媛媛)