

上吸式秸秆气化炉中当量比对气化特性的影响

赵京¹, 魏小林², 李森², 康润宁³

(1. 中国科学院大学工程科学学院, 北京市石景山区 100049; 2. 高温气体动力学国家重点实验室(中国科学院力学研究所), 北京市海淀区 100190; 3. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北省唐山市 063009)

Effect of Equivalence Ratio on Gasification Characteristics in a Straw Updraft Gasifier

ZHAO Jing¹, WEI Xiaolin², LI Sen¹, KANG Running³

(1. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Science, Shijingshan District, Beijing 100049, China;

2. State Key Laboratory of High-temperature Gas Dynamics(Institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences),

Haidian District, Beijing 100190, China; 3. College of Metallurgy and Energy, University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei Province, China)

ABSTRACT: China produces abundant biomass waste during agriculture process, and biomass gasification technology is a clean and high efficient way to use biomass energy. Using a self-developed updraft gasifier as carrier, the effect of equivalence ratio ϕ on gasification characteristics was studied through experimental methods in an updraft gasifier. The results obtained show that the optimal value of ϕ is between 0.25 and 0.3 under the experimental condition, the mean temperature in gasification reaction zone can reach 950°C, heating value of 5.98MJ/m³, gasification intensity of 137.7kg/(m²·h), gas production rate of 1.68m³/kg, carbon conversion rate of 86.4%, and 73.3% for the overall gasification efficiency. The tar content in gas increase slowly with increasing equivalence ratio when ϕ is below 0.3, but the tar content increase rapidly when ϕ is above 0.3.

KEY WORDS: biomass gasification; straw updraft gasifier; equivalence ratio; gasification efficiency; tar

摘要: 我国拥有丰富的农作物废弃物生物质资源, 生物质气化技术是洁净高效利用生物质能的有效途径。以自行研制的上吸式秸秆气化炉为研究对象, 通过实验研究的方法, 研究了当量比 ϕ 对该气化炉气化特性的影响。结果表明: 在实验工况下, 最佳气化当量比 ϕ 为0.25~0.3, 此时气化区平均温度在950°C, 秸秆气化煤气低位热值平均可达5.98MJ/m³(标准立方米), 气化强度达到137.7kg/(m²·h), 产气率为1.68m³/kg, 碳转化率为86.4%, 气化效率为73.3%。当 $\phi < 0.3$ 时, 气化煤气焦油含量随 ϕ 增加较缓慢, 但当 $\phi > 0.3$ 后, 煤气焦油含量迅速提升。

关键词: 生物质气化; 上吸式秸秆气化炉; 当量比; 气化效率; 焦油

0 引言

随着社会经济的快速发展, 大量开采和使用化石能源会污染环境和破坏生态平衡, 开发和利用清洁的可再生能源已经迫在眉睫^[1-2]。生物质作为一种可再生能源一直被广泛关注, 生物质固体成型燃料燃烧使用是生物质能利用的一种有效途径^[3]。目前, 国外对生物质的利用侧重转化为优质燃料^[4-5]; 美国在生物质气化合成乙醇方面获得了突出的成果; 欧盟国家在生物质气化合成柴油方面取得了很大的成就。我国农业生物质资源丰富, 但分布分散导致收集、运输成本较高而难于推广, 因此开发推广小型秸秆气化炉是解决农村生物质资源再利用的可行方式^[6]。

上吸式秸秆气化炉具有结构设计简单, 操作方便等优点, 并且对原料尺寸要求不高, 可以使用较湿的物料^[7-8]。气化煤气在上升过程中较大颗粒的灰会被热解区及干燥区过滤掉, 一般获得煤气中灰含量较少。目前市面上存在的上吸式气化炉存在问题是气化煤气热值低, 同时热解区生成的焦油部分会混入煤气当中, 导致煤气中焦油含量一般较高^[9-10]。为解决上述问题, 本文利用自行研制的高径比为5, 功率为4kW的上吸式生物质秸秆气化炉, 研究了当量比对秸秆气化特性的影响, 为上吸式气化炉设计提供合理的当量比参考, 并采取吹泡法对气化煤气中焦油含量进行初步采集测量^[7,11]。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0601501)。
National Key R&D Program of China(2016YFB0601501)。

1 实验

1.1 实验原料

本实验选取杭州华源前线能源设备有限公司提供的由玉米秸秆等加工成型的棒状料(见图 1),其空气干燥基工业分析及元素分析如表 1 所示。



图 1 玉米秸秆原料

Fig. 1 Feedstock: maize straw

表 1 生物质样品工业分析与元素分析

Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of biomass samples

工业分析/%				元素分析/%						低位热值/
M	V	FC	A	C	H	O	N	S	(MJ/kg)	
8.9	70.62	16.22	4.26	38.97	5.7	42.02	0.14	0.01	15.12	

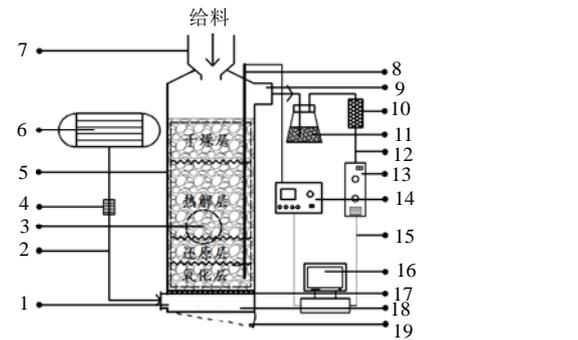
从表 1 可以看出玉米秸秆具有较高的挥发分和较低的硫分,是环境友好可再生的能源。生物质中固定碳含量较低,远远低于煤中固定碳含量;生物质原料中氧含量比较高,在气化过程中能够与 C 元素结合生成 CO_2 及 CO 等;并且生物质具有较低的灰含量,属于洁净能源^[12]。

1.2 实验装置及方法

实验装置采用自行研制的上吸式秸秆气化炉($H=600\text{mm}$, $D=120\text{mm}$),如图 2 所示,辅助设备由空气压缩机,气化煤气焦油脱除装置,数据测量和采集系统组成。气化炉根据反应温度主要分为气化、热解和干燥 3 个区域,其中气化区包括氧化区及还原区,是生物质气化反应的主要区域^[7,13]。

实验启动阶段:首先在气化炉膛内加入 (3 ± 0.1) kg 棒状秸秆料,将空气口与大气直接连通后点燃物料,通过燃烧快速预热炉体,待炉膛底部温度达到 900°C 后,将空气口连接空气泵进行实验。

实验阶段:打开空气泵调节入炉空气量,通过料斗以一定速度添加物料,维持物料高度与炉膛内标线平齐,可认为此时物料气化消耗速度=物料添加速度,计算出空气当量比 ϕ (气化实际空气量/理论



1—空气入口; 2—空气管; 3—秸秆棒状料; 4—转子流量计;
5—炉壁; 6—空气压缩机; 7—料斗; 8—K-型热电偶; 9—气化煤气出口;
10—滤嘴; 11.玻璃容器; 12—气化煤气管; 13—烟气分析仪;
14—示波器; 15—数据线; 16—计算机; 17—炉篦; 18—风室;
19—排灰口。

图 2 上吸式气化炉实验系统

Fig. 2 Experiment system of updraft gasifier

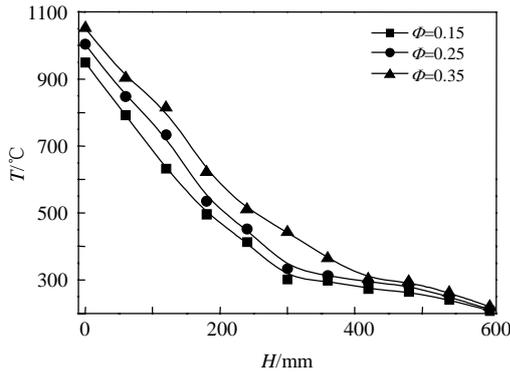
气化燃料完全燃烧空气量),通过空气泵调节入炉空气量并同步改变送料速度,控制当量比分别为 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 误差为 ± 0.1 , 并在此工况下进行实验。每隔 60mm 设置一个测温点,炉膛每个测温点温度由计算机每隔 5s 自动采集一次,待炉膛内各点温度保持稳定后,将气化煤气从顶部引出进入装有 10% NaHCO_3 溶液的玻璃容器除掉焦油,再通过导管进入烟气分析仪(DX4000)检测后排入大气。烟气分析仪煤气要求比较洁净,在煤气进入之前需要增加滤嘴过滤掉残余杂质。实验采用 K-型热电偶($-200\sim 1300^\circ\text{C}$)测量炉膛温度分布,通过示波器 Agilent 34972A 将温度信号转化为电信号,利用软件 BenchLink Data Logger 3 进行接收处理。每组实验进行 3 次,结果取平均值,消除随机误差。

实验停止:停止加料,增大入口空气流量,燃尽残余生物质,并将炉膛温度降低至 200°C 以下。

2 实验结果与讨论

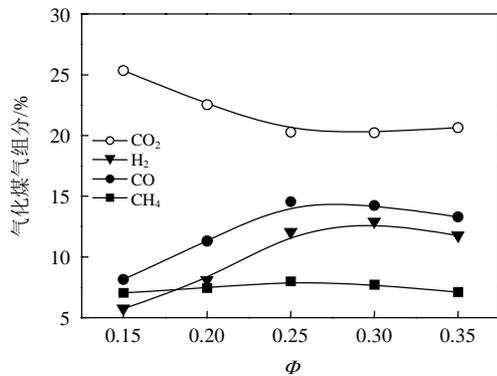
2.1 ϕ 对炉膛温度梯度的影响

图 3 表明上吸式气化炉温度分布随着床高度增加逐渐降低^[9,10,13]。气化区与热解区($0\sim 400\text{mm}$)温度梯度较大,主要原因为: 1) 气化区存在强烈的化学反应,该区域形成局部高温; 2) 热解区发生的热解反应需要大量的热量,进而从下而上形成较大的温度梯度。干燥区($400\sim 600\text{mm}$)则温度梯度较小,该区域仅发生生物质中水分气化蒸发,所需热量较少。随着当量比 ϕ 增加,气化区及热解区随着空气量增加化学反应剧烈程度提升,温度有明显的提升,干燥区不发生化学反应,温度增加受当量比影响不明显。

图3 Φ 对炉膛温度分布梯度的影响Fig. 3 Influence of Φ on temperature of furnace

2.2 Φ 对气化煤气组分及热值的影响

气化煤气组分是评价气化煤气品质的主要依据之一。当量比 Φ 对气化煤气组分的影响如图4所示。 Φ 从0.15增加至0.25后,CO含量由8.15%增加到14.55%, H_2 含量由5.75%提升至12.05%, CO_2 含量由25.35%降低至20.3%。 Φ 超过0.25后增加至0.35, H_2 含量继续少量增加,CO含量减小, CO_2 平均含量稳定20.4%左右,并在 $\Phi > 0.3$ 后出现略微上升趋势。 CH_4 含量随着 Φ 在0.15~0.35范围内变化基本维持在 $7.5 \pm 0.5\%$ 左右,涨幅范围在1%以内,当量比变化对其影响较小。

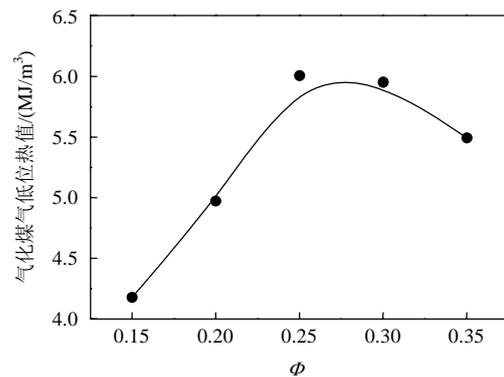
图4 Φ 对气化煤气组分的影响Fig. 4 Influence of Φ on gas composition

实验研究分析发现,CO与 CO_2 生成与转化过程中受到氧气量以及燃烧温度共同影响^[14]。研究已经发现气化区温度会随着 Φ 的增加而增加,当 $\Phi < 0.25$ 时,温度与氧气量起协同作用,增加 Φ 会提高气化区温度并增大氧浓度,会促进C与 O_2 反应生成大量的 CO_2 及CO,还原区温度的提升,会增强C对 CO_2 及 H_2O 的还原效应,CO生成量逐渐增加, CO_2 所占体积比急剧降低;当量比 $\Phi > 0.25$ 后, CO_2 含量变化趋于稳定并存在略微升高的趋势,CO开始含量降低,可能存在两个原因:1)生成的CO通过其他反应部分被氧化消耗掉;2)随着 Φ 增加, N_2 所占比例逐渐增加,稀释作用明显。

而 H_2 的生成主要发生在还原区,该区域主要受到反应温度的影响,高温更加利于C以及CO与 H_2O 反应生成 H_2 ,但 Φ 超过0.3后, H_2 含量开始下降,主要受到CO含量降低及 N_2 稀释作用的影响。

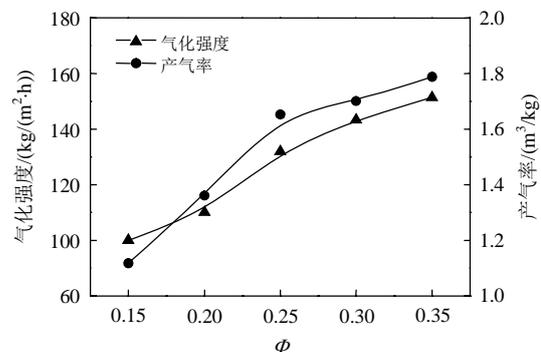
在上吸式气化炉中 CH_4 主要生成区域主要为热解区,由于热解温度相对较低且范围较宽,受当量比 Φ 影响不明显,因此生物质裂解产物 CH_4 随 Φ 变化只有微量变化。

气化煤气低位热值是由气化煤气组分决定,其中C2和C3等气体体积分数为0.1%~0.2%,在热值计算中可忽略。其随当量比 Φ 变化如图5所示:当 Φ 从0.15增加至0.25,当量比的提升促进了CO与 H_2 的大量生成,进而气化煤气低位热值持续增加;当 Φ 从0.25增加至0.3,煤气低位热值有略微降低,此阶段气化煤气品质高; $\Phi > 0.3$ 后,此时CO含量及 H_2 含量均开始下降, N_2 在煤气组分中所占比例增加,对煤气稀释作用明显,导致热值开始降低。

图5 Φ 对气化煤气低位热值的影响Fig. 5 Influence of Φ on LHV

2.3 Φ 对气化强度及产气率的影响

气化强度是指单位面积单位时间内生物质料消耗量,主要氧化还原反应发生在气化区,在实验当中,送料速度决定气化强度大小;产气率则指原料气化后煤气在标准状态下的体积。图6表明:增

图6 Φ 对气化强度及产气率的影响Fig. 6 Influence of Φ on gasification intensity and gas yield

加当量比 ϕ 会显著增加气化区的气化强度,使得燃烧温度提升,促进生物质秸秆更加快速的燃烧^[12]。并且产气率随着 ϕ 增加呈上升趋势, ϕ 越大,产气率越高,这与一般气化理论相符。 $\phi < 0.25$ 时,产气率增加较快, $\phi > 0.25$ 后,产气率增加变缓,此时主要受到炉膛反应环境的限制。

2.4 ϕ 对碳转化率及气化效率的影响

气化过程碳转化率指生物质料中的碳转化为气体燃料中的碳的份额;气化效率是生物质气化后生成煤气热值与气化原料总热值的比,二者是衡量气化效果的重要指标^[6]。图7表明:碳转化率随着 ϕ 的增加逐渐增加,说明增大 ϕ 能够提升气化强度,促进生物质更充分的气化,但 $\phi > 0.25$ 后,碳转化率随 ϕ 增加逐渐变缓慢;气化效率随 ϕ 增加呈现先增加后减小的趋势,当 $\phi < 0.25$ 时,气化效率随 ϕ 增加有较大的提升, ϕ 在0.25~0.3范围内气化效率最高,当 $\phi > 0.3$ 后开始出现下降趋势,主要原因为气化煤气热值开始随当量比 ϕ 增加而降低。

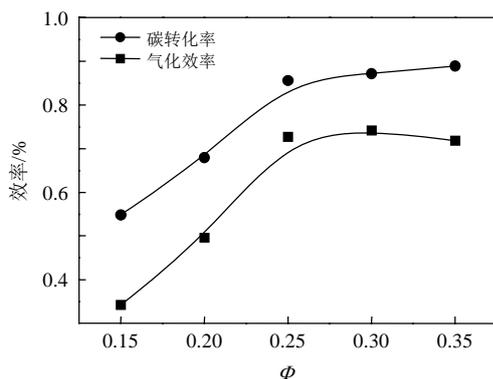


图7 ϕ 对碳转化率及气化效率的影响

Fig. 7 Influence of ϕ on carbon conversion efficiency and gasification efficiency

2.5 ϕ 对气化煤气焦油含量的影响

焦油冷凝后是黏稠的液体,容易沉积在气化设备、管道、阀门以及燃气设备等部位,影响系统运行,并且大大降低了气化效率和气化煤气利用价值^[15-16]。当量比不仅影响气化炉温度、气化煤气组分、煤气热值、气化强度、产气率及气化效率等气化炉性能参数,而且对焦油的生成也有重要的影响^[17-18]。本实验采用水洗法中吹泡法脱除焦油。

实验前将装有 NaHCO_3 的碱性溶液(浓度为10%)的玻璃容器放到精密电子秤(精度 0.1g)上称量,在实验工况稳定条件下,对气化煤气中焦油进行 15min 取样后放到计量计上称量,实际过程有少量固体小颗粒产生,其含量远低于焦油,在计算过程可忽略,因此上述方法可对气化煤气焦油含量进

行初步称量。

煤气焦油含量随当量比 ϕ 变化曲线如图8所示。随着 ϕ 增加,焦油在煤气中含量逐渐增加,表明热解区温度的提升能够促进生物质热解生成更多的焦油^[19]。当 $\phi < 0.3$ 时,随着当量比增加,气化煤气焦油含量增加较为缓慢,此时热解高温区宽度相对较窄,焦油生成量较少;当 $\phi > 0.3$ 后,热解高温区宽度随当量比增加范围有较大提升,促进秸秆大量热解生成较多的焦油,并且随着上升气流增强,更多的焦油被气流携带出去,进而导致煤气中焦油含量大量提升。

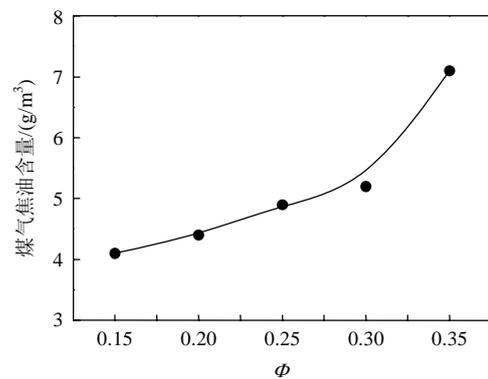


图8 ϕ 对气化煤气焦油含量的影响

Fig. 8 Influence of ϕ on tar content

3 结论

本文以自行研制的上吸式秸秆气化炉为实验装置,研究了当量比 ϕ 对该气化炉温度分布、气化煤气组分、煤气热值、气化强度、产气率、碳转化率、气化效率及焦油量的影响规律。结果表明:

1) 炉膛气化区与热解区温度随着当量比 ϕ 增加而增大,干燥区对 ϕ 变化不敏感;

2) 气化煤气 CO_2 体积分数随当量比 ϕ 增加逐渐减少,当 $\phi < 0.25$ 时急剧减少,但 $\phi > 0.25$ 后变化较缓慢并在 $\phi > 0.3$ 后出现增加趋势;煤气中 CO 体积分数在小于 0.25 时随着 ϕ 增加而提高,在 $\phi = 0.25$ 时达到最大值 14.55%,但 $\phi > 0.25$ 后含量开始下降; H_2 体积分数变化与 CO 类似,在 $\phi = 0.3$ 时达到最大值 12.9%; CH_4 体积分数随 ϕ 变化只有微量变化;

3) 气化煤气热值随 ϕ 增加先增加后减小, ϕ 在 0.25~0.3 范围内能够获得较高热值的煤气;气化强度与产气率随 ϕ 增加均逐渐增加,但产气率在 $\phi > 0.25$ 后变化逐渐变缓; ϕ 在 0.25~0.3 范围内气化效率最高;

4) 焦油含量随当量比 ϕ 增加逐渐增加,当 $\phi < 0.3$ 时,增加比较缓慢,当 $\phi > 0.3$ 后,煤气中焦油含量

急剧增加。

5) 在实验工况下, 该上吸式秸秆气化炉最佳气化当量比为 0.25~0.3, 此时气化区平均温度达到 950℃, 气化煤气低位热值平均可达 5.98MJ/m³, 气化强度达到 151.4 kg/(m²·h), 产气率为 1.68m³/kg, 碳转化率平均为 86.4%, 气化效率能够达到 73.3%。

参考文献

- [1] Umeki K, Namioka T, Yoshikawa K. Analysis of an updraft biomass gasifier with high temperature steam using a numerical model[J]. *Applied Energy*, 2012, 90(1): 38-45.
- [2] McKendry P. Energy production from biomass(part 2): conversion technologies[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 83(1): 47-54.
- [3] 袁艳文, 林聪, 赵立欣, 等. 生物质固体成型燃料抗结渣研究进展[J]. *可再生能源*, 2009, 27(5): 48-51.
Yuan Yanwen, Lin Cong, Zhao Lixin, et al. The research process of anti-slagging for biomass pellet fuel[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, 27(5): 48-51(in Chinese).
- [4] Rapagná S, Provendier H, Petit C, et al. Development of catalysts suitable for hydrogen or syn-gas production from biomass gasification[J]. 2002, 22(5): 377-388.
- [5] 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.
- [6] 陈亮, 苏毅, 陈祎, 等. 两段式秸秆气化炉中当量比对气化特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(29): 102-107.
Chen Liang, Su Yi, Chen Hui, et al. Effect of equivalence ratio on gasification characteristics in a rice straw two-stage gasifier[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(29): 102-107(in Chinese).
- [7] 马隆龙, 吴创之, 孙立. 生物质气化技术及应用[M]. 北京: 化工工业出版社, 2003: 78-95.
Ma Longlong, Wu Chuangzhi, Sun Li. *Technology and application of biomass gasification*[M]. 2003: 78-95(in Chinese).
- [8] Seggiani M, Vitolo S, Puccini M, et al. Cogasification of sewage sludge in an updraft gasifier[J]. *Fuel*, 2012, 93(1): 486-491.
- [9] 李斌, 陈汉平, 杨海平, 等. 上吸式生物质气化炉的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 270-273.
Li Bin, Chen Hanping, Yang Haiping, et al. Design and experiment on updraft biomass gasifier[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 270-273(in Chinese).
- [10] 杨少鹏, 薛勇, 牛广路. 上吸式生物质秸秆气化炉的设计与试验研究[J]. *节能*, 2009, 28(9): 6-9.
Yang Shaopeng, Xue Yong, Niu Guanglu. Design and test study of up suck biomass[J]. *Energy Conservation*, 2009, 28(9): 6-9(in Chinese).
- [11] 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.
- [12] McKendry P. Energy production from biomass(part 1): overview of biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 83(1): 37-46.
- [13] Gao N, Li A, Quan C, et al. Hydrogen-rich gas production from biomass steam gasification in an updraft fixed-bed gasifier combined with a porous ceramic reformer [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(20): 5430-5438.
- [14] Bang-Møller C, Rokni M, Elmegaard B. Exergy analysis and optimization of a biomass gasification, solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system[J]. *Energy*, 2011, 36(8): 4740-4752.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Moghtaderi B. Effects of controlling parameters on production of hydrogen by catalytic steam gasification of biomass at low temperature[J]. *Fuel*, 2007, 86(15): 2422-2430.
- [18] Fjellerup J, Henriksen U. Heat transfer in a fixed bed of straw char[J]. *Energy & Fuels*, 2003, 17(5): 1251-1258.
- [19] Chen W, Annamalai K, Ansley R. J. Updraft fixed bed gasification of mesquite and juniper wood samples [J]. *Energy*, 2012, 41(1): 454-461.



赵京

收稿日期: 2017-05-18。

作者简介:

赵京(1992), 男, 博士研究生, 研究方向为煤与生物质燃料燃烧及污染物控制, zhaojing@imech.ac.cn;

魏小林(1967), 男, 研究员, 研究方向为固体燃料燃烧, 先进发动机燃烧, 本文通讯作者, xlwei@imech.ac.cn。

(责任编辑 车德竞)