

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.024

加压串行流化床制取生物质合成气的模拟^{*}

冯飞^{1,2} 宋国辉¹ 沈来宏¹ 肖军¹ 张蕾²

(1. 东南大学能源与环境学院, 南京 210096; 2. 南京化工职业技术学院机械技术系, 南京 210048)

摘要: 利用 Aspen Plus 软件建立了加压串行流化床生物质气化过程的模型, 并将模拟数值与试验结果相比较, 验证了模拟研究的可行性。分别研究了气化温度 T_g 、气化压力 p_g 以及水蒸气与生物质的质量比 (S/B) 对生物质合成气的成分、氢碳比、气化份额、生物质合成气产率和生物质碳转化率等的影响。结果表明气化温度、气化压力和 S/B 对生物质气化过程有很重要的影响, 适当地提高气化温度和气化压力对制取生物质合成气有利 (T_g 在 800 °C 左右, p_g 在 0.4 MPa 左右), 合适的 S/B 在 0.4 左右。

关键词: 串行流化床 加压 生物质合成气 模拟

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0129-08

Simulation of Bio-syngas Production from Biomass Gasification via Pressurized Interconnected Fluidized Beds

Feng Fei^{1,2} Song Guohui¹ Shen Laihong¹ Xiao Jun¹ Zhang Lei²

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China

2. Department of Mechanical Technology, Nanjing College of Chemical Technology, Nanjing 210048, China)

Abstract: With Aspen Plus software, the simulation of the whole process of bio-syngas production from gasification via pressurized interconnected fluidized beds was carried out, and the model was validated by the comparison of simulation results and experimental results. The effects of gasification temperature (T_g), gasification pressure (p_g) and steam to biomass ratio (S/B) on bio-syngas composition, H_2/CO ratio, gasification proportion, bio-syngas yield, and carbon conversion were studied. The results showed that gasification temperature, gasification pressure and S/B had great influences on the biomass gasification process and the suitable gasification temperature and pressure was around 800°C and 0.4 MPa.

Key words: Interconnected fluidized beds Pressurization Bio-syngas Simulation

引言

生物质经过气化, 可以获得富含生物质合成气 (CO 与 H_2 的混合气体) 的产品气, 而合成气经过适当的调整处理, 再经合成反应可以进一步获得甲烷、甲醇、二甲醚等化学燃料^[1-3]。因此, 国内外学者对生物质气化制取合成气进行了大量的研究, 研究的内容涉及到气化剂、催化剂、气化设备、产品气的后续处理等一系列问题, 并取得很多研究成果^[4-7]。

本文从另一角度来研究生物质气化过程, 即通过 Aspen Plus 软件研究生物质在加压串行流化床反应器中生成合成气的规律, 从而为生物质高效制取合成气的技术提供必要的理论参考数据。

1 串行流化床制取生物质合成气技术

串行流化床制取生物质合成气技术的示意图如图 1 所示^[8-9]。该系统包括两个主要的反应器, 即气化反应器和燃烧反应器。其中气化反应器采用的

收稿日期: 2012-08-31 修回日期: 2012-10-13

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2010CB732206)

作者简介: 冯飞, 博士生, 南京化工职业技术学院讲师, 主要从事生物质能高效清洁利用研究, E-mail: fnfa1997@tom.com

通讯作者: 沈来宏, 教授, 博士生导师, 主要从事生物质能高效清洁利用研究, E-mail: lhshen@seu.edu.cn

是鼓泡流化床,流化介质为水蒸气;燃烧反应器采用的是循环流化床,流化介质为空气,两个反应器之间依靠床料进行热量传递^[9-10]。

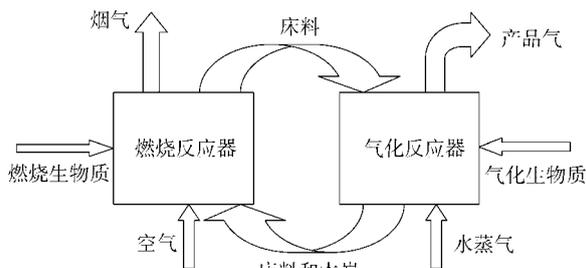
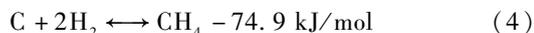
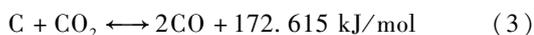
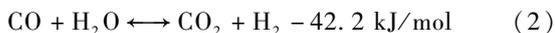
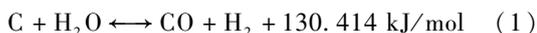


图 1 串行流化床生物质气化制取合成气的示意图

Fig.1 Bio-syngas production from biomass gasification in interconnected fluidized beds

进入整个系统的生物质原料分为两部分:气化生物质进入到气化反应器,与水蒸气以及在循环流化床内蓄热后的床料颗粒剧烈混合,发生强烈的热量和质量交换。气化生物质在高温下发生热解,挥发分析出,同时热解气体产物和剩余的固态物质还与水蒸气发生化学反应生成 H₂、CO 等气体。未反应的木炭和放热后的床料则返回到燃烧反应器中,木炭在燃烧反应器中燃烧放出热量,提供一部分生物质气化所需的热量。在气化反应器中发生的主要反应有^[11]



除了生物质气化后的木炭燃烧放出热量之外,生物质气化所需的额外热量由另一部分生物质补燃

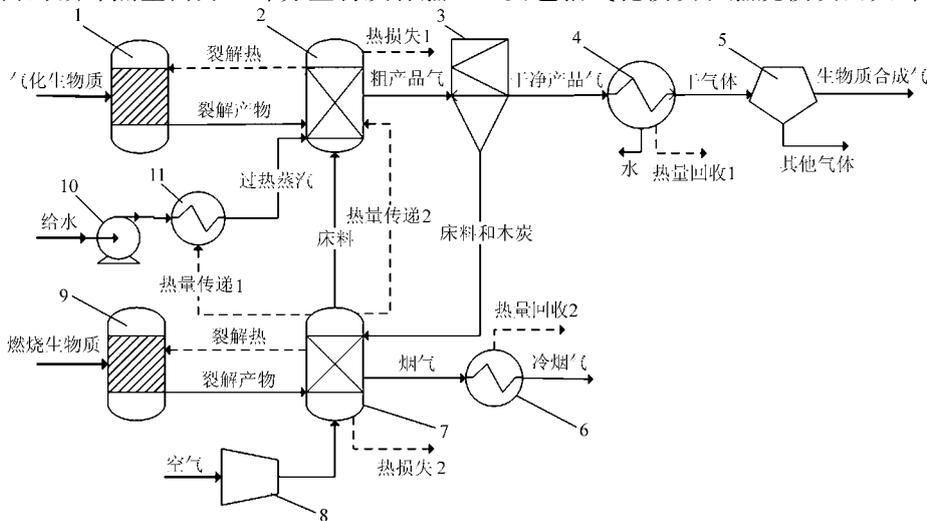


图 2 加压串行流化床制取生物质合成气的模拟流程图

Fig.2 Simulation flow chart of bio-syngas production from biomass gasification in pressurized interconnected fluidized beds

1. 热解器 2. 气化器 3. 分离器 4. 冷凝器 5. 气体分离器 6. 烟气冷却器 7. 燃烧器 8. 空压机 9. 裂解器 10. 泵 11. 给水加热器

提供。用于补燃的燃烧生物质进入到燃烧反应器中燃烧,使床料积蓄大量的热量。燃烧产生的烟气载着高温的床料进入到一个旋风分离器中,床料经分离后进入到气化反应器中,用于提供生物质气化反应所需的热量。

2 加压串行流化床制取生物质合成气的模型

2.1 气化模型

根据 Aspen Plus 软件模拟处理过程的应用特点,并为了准确模拟生物质气化过程和简化模拟流程,对所建模型做 4 点假设^[12]:气化反应器和燃烧反应器均稳定运行且所有发生的化学反应都能达到平衡状态;不考虑气化反应器和燃烧反应器的压力损失;气化产物中气体成分主要考虑 CO、H₂、CO₂、CH₄、H₂O、N₂、H₂S、NH₃、COS 和 SO₂ 等 10 种,固体为灰分和未燃尽炭,不考虑焦油;生物质原料中的灰分和床料为惰性组分,不参与气化过程的反应。

在上述基础上,建立了加压串行流化床制取生物质合成气的质量平衡、化学平衡和能量平衡模型。其中质量平衡体现为在气化过程中的元素平衡,即系统进出口物流中各元素质量流率守恒。化学平衡是指气化反应的动平衡状态,是由反应物料、生成物的浓度与反应温度、反应压力决定的,同时通过 Rgibbs 模块的限制平衡法^[13]来限制平衡,从而弥补模拟与现实之间存在的差异。能量平衡指系统进口和出口的总能量保持不变,在本模型中表现为热量平衡。

利用 Aspen Plus 软件建立的加压串行流化床制取生物质合成气模拟流程如图 2 所示。整个系统主要包括气化模块和燃烧模块两大部分。其中气化模

块包括6个单元模块、11个物流股(如实线箭头所示)和5个热流股(如虚线箭头所示)。热解器模块是一个计算收率的反应器,其模块来自 Aspen Plus 中的 RYield 反应模块,主要功能是将生物质分解转化成简单的组分和灰分。气化器是基于 Gibbs 自由能最小化原理的反应器,来自 Aspen Plus 中的 RGibbs 反应模块^[14]。分离器模块用于将木炭和床料从气化产物中分离出来,送回到燃烧器中。冷凝器模块将气化产物中的水蒸气冷却后分离出来,而气体分离器模块则将产品气中的其他气体分离出,留下的是生物质合成气。给水经水泵加压后送到给水加热器模块,该模块来自 Aspen Plus 中的 Heater 模块,用于加热给水,使其汽化得到所需的水蒸气作为气化剂,并借此调整水蒸气与进入到气化器中的生物质的质量比(S/B)。

燃烧模块主要包括裂解器模块、燃烧器模块、烟气冷却器模块以及5个物流股和3个热流股。其中裂解器与热解器相似,同样来自 Aspen Plus 中的 RYield 反应模块,而燃烧器也是基于 Gibbs 自由能最小化原理的反应器,来自 Aspen Plus 中的 RGibbs 反应模块。烟气冷却器则用于将热烟气冷却并回收热量。

进入到系统的生物质原料共有2股,一股气化生物质送入生物质气化反应器进行气化反应,另一股燃烧生物质送入生物质燃烧反应器燃烧,燃烧产生的热量补充整个系统完成生物质热解、气化以及给水汽化所需的额外热量,另一部分热量则由气化反应产物中的木炭燃烧所获得。

图2中与8个热流股相对应的为热解模块所需裂解反应热(2股)、气化模块所需气化反应热、给水汽化所需的热量、热损失(2股)和热量回收(2股)。

2.2 计算工况与参数

本文计算的生物质原料为江苏省某地区的松木锯末,主要成分为:含水率7.89%,固定碳质量分数14.77%,挥发分质量分数75.78%,灰分质量分数1.56%。模拟中的主要操作条件和参数如表1所示。

表1 模拟的输入值

Tab.1 Input data for process simulation

参数	数值
环境温度/°C	25
进入到气化反应器的生物质质量流量/kg·h ⁻¹	3
进入燃烧反应器的空气进口温度/°C	25
进入燃烧反应器的空气体积流量/m ³ ·h ⁻¹	7
燃烧反应器的温度范围/°C	750 ~ 1050
气化反应器的温度范围/°C	650 ~ 950
给水进口温度/°C	25

3 计算结果与分析

3.1 气化模型的验证

为验证所建模型的正确性,将生物质在反应器中气化过程的模拟结果与试验结果进行比较。当气化压力 p_g 为 0.1 MPa, S/B 为 1.2 时,不同气化温度 T_g 下气化产物体积分数的模拟结果与试验结果^[10] 如图3所示。

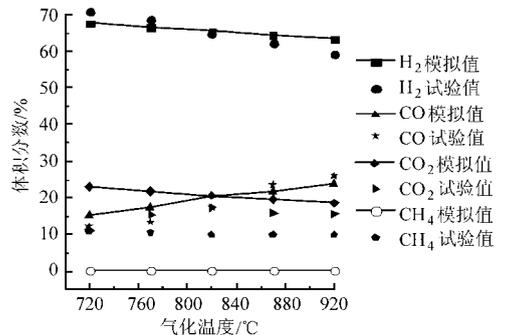
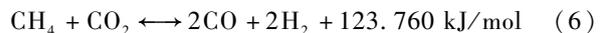


图3 产品气体积分数的模拟值与试验值的比较

Fig.3 Comparison of simulated and experimental results of product gas composition

由图可见,模拟结果与试验结果基本吻合,其中 H₂、CO 和 CO₂ 吻合得很好,各组成气体的变化趋势也与试验结果基本相符。而 CH₄ 的模拟值与试验值误差相对较大,这主要因为模拟计算是基于气化反应达到完全平衡的理想结果,而实际 CH₄ 与水蒸气的重整反应由于受反应时间的限制,并没有达到完全的平衡,这就造成模拟中的 CH₄ 浓度较试验中浓度偏低的情况^[12,15],同时实际也未能充分考虑到甲烷重整反应在反应时间内亦没有达到平衡^[11],综合起来,试验中 CH₄ 的浓度偏高。但 CH₄ 浓度变化的总体趋势是一致的。甲烷重整反应表示为



综上,模拟结果能正确地反映气化过程气体产物的变化趋势,因此本文采用该方法来预测加压串行流化床生物质气化生成合成气的规律。

3.2 气化结果分析与讨论

3.2.1 合成气成分

生物质气化得到的粗产品气经旋风分离器除去灰尘,并由冷凝器除去水分,得到了以合成气(H₂ + CO)为主以及少量 CO₂ 和 CH₄ 的混合气体。图4~6分别给出了气化温度 T_g 、气化压力 p_g 和 S/B 对产品气组分的影响规律。

当气化压力 p_g 为 0.4 MPa, S/B 为 0.4 时,气化温度 T_g 对产品气主要成分的影响如图4所示。由图可见, H₂ 的体积分数随着温度的升高而增大,并在较高温度时 ($T_g > 800^\circ\text{C}$) 变化缓慢; CO 的体积分

数随着温度的上升明显增加,而 CO_2 和 CH_4 的体积分数则随之减少,但到最后减小缓慢。综合起来,合成气 ($\text{H}_2 + \text{CO}$) 的体积分数在 60% ~ 95% 之间变化,且随着温度的升高而明显增大,但在高温时变化较为缓慢。

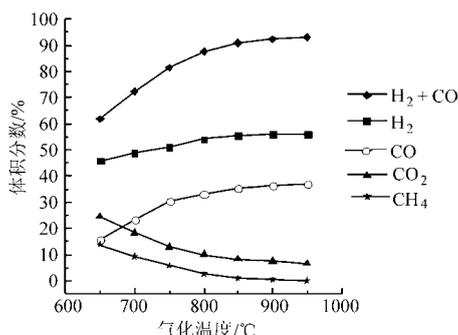


图4 气化温度对合成气体积分数的影响曲线

Fig.4 Effect of gasification temperature on bio-syngas content

生物质气化反应是一系列复杂竞争反应综合作用的结果^[16],这些反应包括前面的反应式(1)~(5),其中反应式(1)、(3)和(5)是吸热反应,而反应式(2)和(4)则是放热反应。因此,提高气化温度有利于反应式(1)、(3)和(5)的进行,尤其有利于反应式(3),即 CO 的生成,所以合成气的体积分数随着温度的提高而增大。而反应式(2)和(4)是放热反应,提高温度不利于反应的进行,所以在进一步提高温度后,其体积分数反而下降。综上,提高气化温度有助于增加合成气的浓度,但是在温度较高时,这种提高已不太明显。

当气化温度 T_g 为 800°C 且 S/B 为 0.4 时,气化压力 p_g 对产品气成分的影响如图 5 所示。其中 H_2 和 CO 的体积分数随着压力的增大而下降,而 CO_2 和 CH_4 则随之增加。这主要因为气化压力的增大有利于体积缩小反应的进行,这意味着增大气化压力,有助于反应式(4)向正向进行,而反应式(3)和(5)则向反方向进行,结果导致 H_2 和 CO 体积分数的下降。综合起来,合成气的体积分数随气化压力的增大而下降。

当气化温度为 800°C , 气化压力为 0.4 MPa 时,

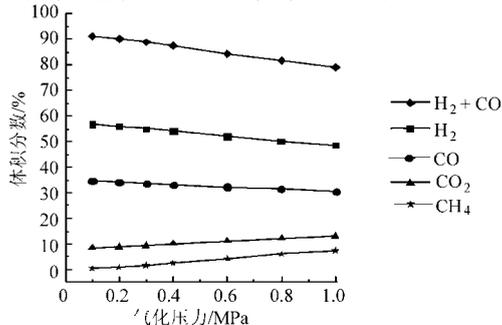


图5 气化压力对合成气体积分数的影响曲线

Fig.5 Effect of gasification pressure on bio-syngas content

S/B 对产品气各主要成分的影响如图 6 所示。由图可见,随着 S/B 的增大, H_2 和 CO_2 的体积分数不断上升,且在 S/B 为较大值时变化缓慢,而 CO 和 CH_4 的体积分数则不断下降。这主要因为 S/B 的增加意味着进入到整个系统的水蒸气量增多,则水蒸气参与的反应式(1)、(2)和(5)向正方向移动。同时, CO 下降的幅度稍大于 H_2 增加的幅度,因此综合的结果是合成气的体积分数随 S/B 的增大而减小,但总体来说下降得比较缓慢。

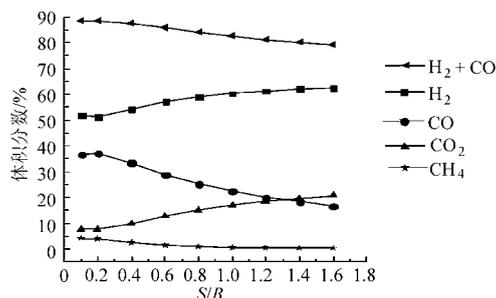


图6 S/B 对合成气体积分数的影响曲线

Fig.6 Effect of S/B on bio-syngas content

3.2.2 氢碳比

氢碳比(即 H_2 与 CO 体积分数的比值)是衡量合成气品质的重要指标。图 7~9 给出了氢碳比随气化温度 T_g 、气化压力 p_g 和 S/B 的变化规律。

当 S/B 为 0.4 时,不同气化压力下,气化温度 T_g 对氢碳比的影响如图 7 所示。由图可见,在不同的气化压力下,氢碳比均随着气化温度的上升而下降,且在温度大于一定数值时,变化趋势变缓。如前所述,这主要是因为提高气化温度有利于反应式(1)、(3)和(5)的进行,尤其是反应式(3)的进行,从而导致合成气中 CO 的体积分数上升较快,而 H_2 的体积分数上升较慢,进而导致氢碳比随之下降。而当气化温度较高时,温度的提高对 H_2 和 CO 的体积分数的影响已趋于平缓,所以氢碳比的下降也随之趋缓。

图 8 给出了当 S/B 为 0.4 时,不同气化温度 T_g

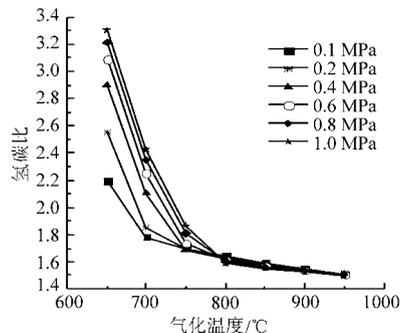


图7 气化温度对氢碳比的影响曲线

Fig.7 Effect of gasification temperature on ratio of hydrogen to carbon monoxide

下,气化压力 p_g 对氢碳比的影响规律。当气化温度 $T_g \leq 750^\circ\text{C}$ 时,随着气化压力的增大,氢碳比也随之增大,且随着气化温度的提高,这种增大的趋势趋缓,甚至当气化温度 $T_g \geq 800^\circ\text{C}$ 时,氢碳比开始略有下降。这主要因为当气化温度不太高时, H_2 体积分数较高, CO 体积分数较小,导致总体氢碳比上升,当气化压力较高时, H_2 和 CO 的浓度变化趋于缓慢,氢碳比上升趋缓;当气化温度较高时,随着气化压力的提高, H_2 和 CO 的体积分数都随之下降,而 CO 体积分数下降比较缓慢,从而导致氢碳比略有下降。

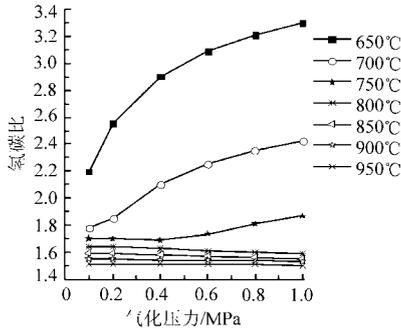


图8 气化压力对氢碳比的影响曲线

Fig. 8 Effect of gasification pressure on ratio of hydrogen to carbon monoxide

当气化温度 T_g 为 800°C 时,不同压力下, S/B 对氢碳比的影响如图9所示。可以看出,在不同气化压力下,随着 S/B 的增大,氢碳比起初变化平缓,后来随之呈线性增大的趋势。这是因为从化学平衡的角度来看,水蒸气量的增多意味着反应物的增加,有利于水蒸气还原反应(即反应式(1)和(2))和水蒸气重整反应(即反应式(5))向正方向移动,即反应程度加深。图中还可以看出,当 $S/B > 0.4$ 以后,压力对氢碳比的影响已经很小,即不同压力下的氢碳比几乎只与 S/B 有关,与压力大小无关。

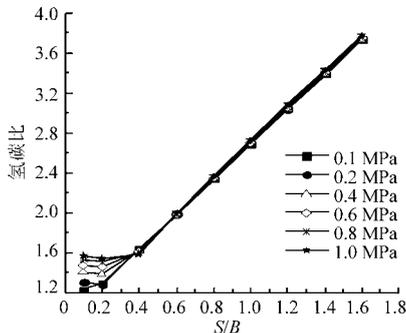


图9 S/B 对氢碳比的影响曲线

Fig. 9 Effect of S/B on ratio of hydrogen to carbon monoxide

3.2.3 生物质气化份额

气化份额是衡量生物质气化过程的重要指标之一。所谓气化份额是指系统在完成自供热的前提下进入气化反应器的生物质占送入到整个系统中总生物质的质量分数。与气化份额相对的是“燃烧份

额”,即进入到燃烧反应器的生物质占进入到整个系统的生物质的质量分数。气化份额越高,表明有更多的生物质参与到气化反应中来,此时,燃烧份额越低。

图10给出了当 S/B 为0.4时,不同气化压力下气化份额随气化温度 T_g 的变化情况。如图所示,随着气化温度 T_g 的上升,气化份额均减小。这主要因为气化温度的提高需要以燃烧更多的生物质为代价,所以进入到燃烧反应器的生物质增加,燃烧份额增大,气化份额则减小。

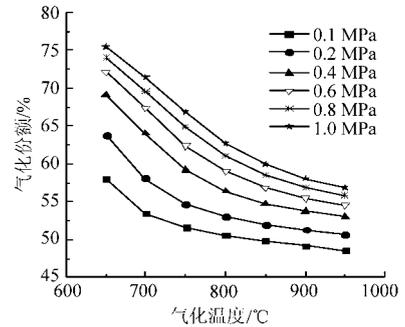


图10 气化温度对气化份额的影响曲线

Fig. 10 Effect of gasification temperature on gasification proportion

不同气化温度下,气化压力对气化份额的影响如图11所示。当 $S/B = 0.4$ 时,气化压力 p_g 对气化份额的影响呈现相同的趋势,即气化份额随着气化压力的提高而上升。这主要因为压力的提高,更有利于生物质燃烧的进行,相应的燃烧份额减小,气化份额则提高。

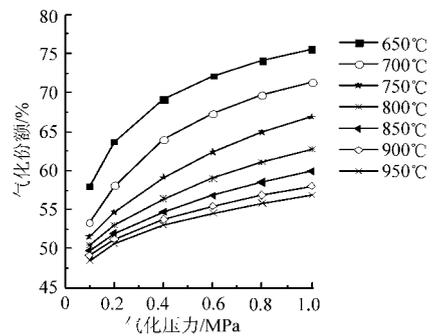


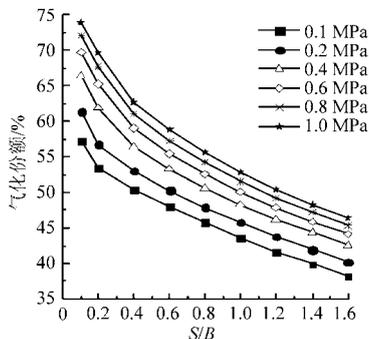
图11 气化压力对气化份额的影响曲线

Fig. 11 Effect of gasification pressure on gasification proportion

图12给出了 S/B 对气化份额的影响。当气化温度 T_g 为 800°C 时,在不同的气化压力下,随着 S/B 的增大,气化份额均逐渐减小。这主要因为 S/B 的增大意味着进入系统的水量增加,要使增加的水量提高到气化温度,所需的热量必须通过燃烧更多的生物质来获得,因此,此时燃烧份额增大,气化份额则相应地减小。

3.2.4 生物质合成气产率

生物质合成气产率是描述生物质气化过程另一

图 12 S/B 对气化份额的影响曲线Fig. 12 Effect of S/B on gasification proportion

个重要的参数。生物质合成气产率是指单位质量生物质(干燥无灰基)所能产生合成气的物质的量,单位为 mol/kg 。

图 13 给出了不同气化压力下气化温度 T_g 对生物质合成气产率的影响。如图所示,当 S/B 为 0.4 时,当气化压力在 0.1 ~ 0.4 MPa 之间时,随着气化温度的提高,生物质合成气产率先是增加后略有下降,即出现一个最佳值;而当气化压力 $p_g \geq 0.4$ MPa 时,合成气产率随着气化温度的上升而增大。这主要是因为当气化压力不太高时,气化温度的提高有利于合成气的生成,然而当气化温度过高时,由于气化份额的减小,燃烧份额的增大,反而导致合成气产率有所下降。

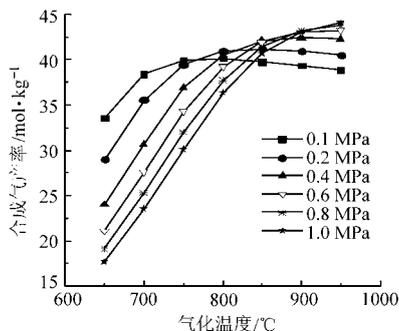


图 13 气化温度对合成气产率的影响曲线

Fig. 13 Effect of gasification temperature on

bio-syngas yield at different gasification pressures

图 14 给出了不同气化温度下气化压力对合成气产率的影响。当气化温度 $T_g < 900^\circ\text{C}$ 时,随着气化压力 p_g 的增大,合成气产率下降;而当气化温度 $T_g \geq 900^\circ\text{C}$ 时,合成气产率随着气化压力的增大而提高。这主要是因为当气化温度不太高时,气化压力的提高不利于合成气生成反应的进行;而当气化温度较高时,燃烧份额较大,气化份额较小,气化压力对生成合成气的反应已经影响很小。

图 15 给出了不同气化压力下 S/B 对气化反应器中的合成气产率的影响。当气化温度 T_g 为 800°C 时,随着 S/B 的增加,合成气产率先提高后下

降,即存在一最佳的 S/B 值,且随着气化压力的提高,这个最大值向右移。这主要因为 S/B 的增大意味着水蒸气量的增多,会促进水蒸气变换反应的进行,因此合成气的产量会提高;但是进一步提高 S/B ,会使气化份额减小,则合成气产量不增反降,综合作用的结果是,合成气产率出现一个最大值。同时,如前所述,从气化压力的角度来看,提高气化压力,会导致气化份额增大而燃烧份额减小,而随着 S/B 的提高,会导致气化份额减小,这两方面综合影响使得 S/B 的最佳值随压力的升高而增大,即最佳 S/B 增大。

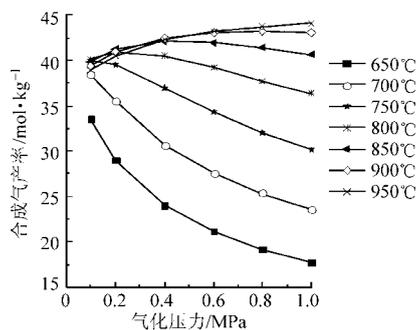
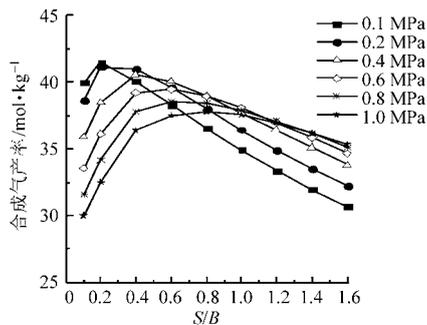


图 14 气化压力对合成气产率的影响曲线

Fig. 14 Effect of gasification pressure on bio-syngas yield

图 15 S/B 对合成气产率的影响曲线Fig. 15 Effect of S/B on bio-syngas yield

综上所述,为获得较高的合成气产率,气化压力温度和压力均不宜太高, S/B 也不宜太大。

3.2.5 生物质碳转化率

生物质碳转化率是指合成气中的含碳质量与进入到整个系统中生物质的含碳质量的比值。

生物质碳转化率越高,则证明有更多的生物质转化成合成气。图 16 和 17 分别给出了气化温度和 S/B 对生物质碳转化率的影响。

图 16 给出了不同气化压力下,气化温度 T_g 对碳转化率的影响。当 S/B 为 0.4 时,随着气化温度的增加,碳转化率先增大后减小,出现一最大值。同时,在相同的气化温度下,气化压力越大,碳转化率越高。出现这一情形的主要原因与合成气产率的原因相似。气化温度的提高有利于合成气中 CO 的生成,以致碳转化率随之提高,而气化温度过高会导致

气化份额减小、燃烧份额增大,这样又导致碳转化率的下降。而当气化温度相同时,气化压力越高则气化份额越大,故进入到气化反应器中的生物质量增大,其结果是碳转化率增大。

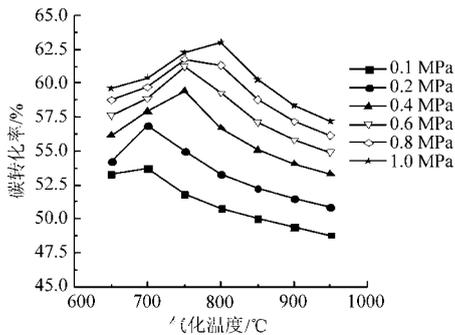


图 16 气化温度对气化反应器中的碳转化率的影响曲线

Fig. 16 Effect of gasification temperature on carbon conversion in gasifier

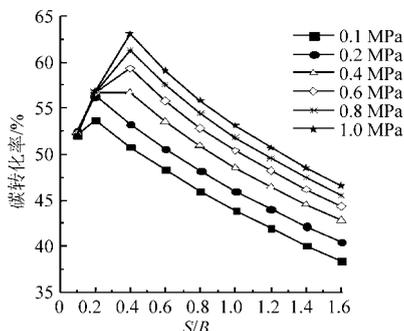


图 17 S/B 对气化反应器中的碳转化率的影响曲线

Fig. 17 Effect of S/B on carbon conversion in gasifier

图 17 表明当气化温度 T_g 为 800°C 时,随着 S/B 的增加,碳转化率先上升后下降,而在相同的 S/B 下,气化压力越大,碳转化率也越高。这主要因为 S/B 的提高意味着进入到气化反应器中的反应物增加,会促进气化反应的进行,而 S/B 过高,则气化份额会减小,综合作用的结果是碳转化率随着 S/B 的增大而先增后减,即每个气化压力都对应一个最佳的 S/B 。同样,在相同的 S/B 下,气化压力越高则气化份额越大,这意味着进入到气化反应器中的生物质量越多,从而导致碳转化率增大。

综上所述,要获得较高的碳转化率,气化压力可适当提高,而气化温度则不能太高, S/B 也不宜太大。

4 结论

(1) 利用 Aspen Plus 软件可以很好地预测加压串行流化床生物质气化制取合成气的规律。

(2) 气化温度、气化压力和 S/B 对产品气的组成有很大的影响。随气化温度的升高,合成气的体积分数增大,而 CO_2 和 CH_4 的体积分数则降低;随着气化压力的增大,合成气的体积分数下降,而 CO_2 和 CH_4 的体积分数则随之上升;随着 S/B 的增大,合成气的体积分数略有下降,而 CO_2 的体积分数上升, CH_4 的体积分数则不断下降。

(3) 当 S/B 为 0.4 时,氢碳比随着气化温度的上升而下降,且当气化温度大于一定数值时,这种变化的趋势变缓;当气化温度 $T_g \leq 750^\circ\text{C}$ 时,氢碳比随着气化压力的增大而增大,且随着气化温度的提高,增大的趋势趋缓,甚至当气化温度 $T_g \geq 800^\circ\text{C}$ 时,氢碳比开始略有下降。在不同气化压力下,随着 S/B 的增大,氢碳比一开始变化平缓,后呈线性增大的趋势。

(4) 当 S/B 为 0.4 时,气化份额随着气化温度的上升而减小,随着气化压力的提高而上升;随着 S/B 的增加,气化份额逐渐减小。

(5) 当 S/B 为 0.4 时,当气化压力在 0.1 ~ 0.4 MPa 之间时,生物质合成气产率存在一个最大值;而当气化压力 $p_g \geq 0.4$ MPa 时,合成气产率随着气化温度的上升而增大。当气化温度 $T_g < 900^\circ\text{C}$ 时,随着气化压力的增加,合成气产率下降;而当气化温度 $T_g \geq 900^\circ\text{C}$ 时,合成气产率随着气化压力的增大而提高。就 S/B 对合成气产率的影响而言,存在一最佳的 S/B 值。

(6) 当 S/B 为 0.4 时,随着气化温度的增加,碳转化率先增大后减小,出现一最大值;在相同的气化温度下,气化压力越大,碳转化率越高。随着 S/B 的增大,碳转化率也存在一最大值;在相同的 S/B 下,气化压力越大,碳转化率越高。

(7) 要想获得较高品质的合成气以及较高的气化份额、合成气产率和碳转化率,可适当提高气化温度 T_g 和 气化压力 p_g , 但不宜太高, S/B 也不宜太大。

参 考 文 献

- 1 Lv Pengmei, Yuan Zhenhong, Wu Chuangzhi, et al. Bio-syngas production from biomass catalytic gasification [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(4): 1132 ~ 1139.
- 2 Jan Kopyscinski, Tilman J Schildhauer, Serge M A Biollaz. Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass—a technology review from 1950 to 2009 [J]. Fuel, 2010, 89(8): 1763 ~ 1783.
- 3 宋法恩, 谭猗生, 解红娟, 等. 生物质合成气合成二甲醚的研究 [J]. 现代化工, 2009, 29(1): 306 ~ 308.
Song Faen, Tan Yisheng, Xie Hongjuan, et al. Study on preparation of dimethyl ether from biomass-derived syngas [J]. Modern Chemical Industry, 2009, 29(1): 306 ~ 308. (in Chinese)

- 4 Rapagnà S, Provendier H, Petit C, et al. Development of catalysts suitable for hydrogen or syngas production from biomass gasification [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2002, 22(3): 377 ~ 388.
- 5 Yohan Richardson, Joël Blin, Ghislaine Volle, et al. In situ generation of Ni metal nanoparticles as catalyst for H₂-rich syngas production from biomass gasification [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2010, 382(2): 220 ~ 230.
- 6 Keiichi Tomishige, Mohammad Asadullah, Kimio Kunimori. Syngas production by biomass gasification using Rh/CeO₂/SiO₂ catalysts and fluidized bed reactor [J]. *Catalysis Today*, 2004, 89(4): 389 ~ 403.
- 7 苏德仁,周肇秋,谢建军,等. 生物质流化床富氧-水蒸气气化制备合成气研究[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(3): 100 ~ 104.
Su Deren, Zhou Zhaoqiu, Xie Jianjun, et al. Biomass oxygen enriched-steam gasification in an atmospheric fluidized bed for syngas production [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(3): 100 ~ 104. (in Chinese)
- 8 José Corella, José M Toledo, Gregorio Molina. A review on dual fluidized-bed biomass gasifiers [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(21): 6 831 ~ 6 839.
- 9 Christoph Pfeifer, Reinhard Rauch, Hermann Hofbauer. In-bed catalytic tar reduction in a dual fluidized bed biomass steam gasifier [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, 43(7): 1 634 ~ 1 640.
- 10 吴家桦,沈来宏,肖军,等. 串行流化床生物质气化制取合成气试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(11): 111 ~ 118.
Wu Jiahua, Shen Laihong, Xiao Jun, et al. Experimental study on syngas production from biomass gasification in interconnected fluidized beds [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(11): 111 ~ 118. (in Chinese)
- 11 Hugo de Lasa, Enrique Salaices, Jahirul Mazumder, et al. Catalytic steam gasification of biomass: catalysts, thermodynamics and kinetics [J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(9): 5 404 ~ 5 433.
- 12 高杨,肖军,沈来宏. 串行流化床生物质气化制取富氢气体模拟研究[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(7): 894 ~ 899.
Gao Yang, Xiao Jun, Shen Laihong. Hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2008, 29(7): 894 ~ 899. (in Chinese)
- 13 陈汉平,赵向富,米铁,等. 基于 ASPEN PLUS 平台的生物质气化模拟[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2007, 35(9): 49 ~ 52.
Chen Hanping, Zhao Xiangfu, Mi Tie, et al. Simulation of biomass gasification by ASPEN PLUS [J]. *Journal of Huazhong University of Sci. & Tech.: Nature Science Edition*, 2007, 35(9): 49 ~ 52. (in Chinese)
- 14 屈一新. 化工过程数值模拟及软件[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- 15 张亚男,肖军,沈来宏. 串行流化床稻秸气化合成甲醇的模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(32): 103 ~ 111.
Zhang Yanan, Xiao Jun, Shen Laihong. Simulation of methanol production via rice straw gasification in interconnected fluidized beds [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(32): 103 ~ 111. (in Chinese)
- 16 Shen Laihong, Gao Yang, Xiao Jun. Simulation of hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32(2): 120 ~ 127.

(上接第 91 页)

- 9 Centner V, Massart D L. Elimination of uninformative variables for multivariate calibration [J]. *Analytical Chemistry*, 1996, 68(21): 3 851 ~ 3 858.
- 10 Chen D, Shao X G, Hu B, et al. A background and noise elimination method for quantitative calibration of near infrared spectra [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 511(1): 37 ~ 45.
- 11 Put R, Daszykowski M, Baczek T, et al. Retention prediction of peptides based on uninformative variable elimination by partial least squares [J]. *Journal of Proteome Research*, 2006, 5(7): 1 618 ~ 1 625.
- 12 Polanski J, Gieleciak R. The comparative molecular surface analysis (CoMSA) with modified uninformative variable elimination PLS (UVE-PLS) method: application to the steroids binding the aromatase enzyme [J]. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 2003, 43(2): 656 ~ 666.
- 13 Cai W S, Li Y K, Shao X G. A variable selection method based on uninformative variable elimination for multivariate calibration of near-infrared spectra [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2008, 90(2): 188 ~ 194.
- 14 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30 ~ 34.
- 15 Mouazen A M, Kuang B, Baerdemaeker J D, et al. Comparison among principal component, partial least squares and back propagation neural network analyses for accuracy of measurement of selected soil properties with visible and near infrared spectroscopy [J]. *Geoderma*, 2010, 158(1 ~ 2): 23 ~ 31.
- 16 宋海燕,秦刚,韩小平,等. 基于可见光谱的不同质地土壤有机质快速测定[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(7): 69 ~ 72.
Song Haiyan, Qin Gang, Han Xiaoping, et al. Rapid prediction of soil organic matter by using visible infrared spectral technology [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(7): 69 ~ 72. (in Chinese)
- 17 张淼,盛明雅,张丽楠,等. 基于电极阵列的土壤速效养分快速检测系统[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊): 277 ~ 282.
Zhang Miao, Sheng Mingya, Zhang Li'nan, et al. Development of soil available macronutrients detection system based on ion-selective electrodes array [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Supp.): 277 ~ 282. (in Chinese)