

基于 Aspen Plus 的热等离子体气化含油污泥的模拟研究

金兆荣, 侯峰, 徐宏*

(华东理工大学化学工程联合国家重点实验室, 上海 200237)

摘要: 基于 Aspen Plus 平台对含油污泥气化反应进行数值模拟和研究, 使用吉布斯自由能最小的原理, 建立气化模型并验证模型的可靠性。模拟以含油污泥为原料, 空气作为气化剂, 分析了进料含水率、气化温度、当量比对热等离子体气化特性的影响, 确定了气化反应最佳操作参数: 含水率在 14%~17%, 气化温度为保证充分反应的最低温度, 当量比为 0.15。

关键词: Aspen Plus; 含油污泥; 热等离子体; 气化

中图分类号: X741

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)09-0224-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.09.051

Aspen Plus simulation on gasification of oily sludge by thermal plasma

JIN Zhao-rong, HOU Feng, XU Hong*

(State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Based on Aspen Plus software platform, the gasification process of oily sludge is simulated and analyzed. The gasification model is established based on the Gibbs free energy minimization method and its reliability is verified. In the simulation, the oily sludge is used as raw material and air is used as the gasification gas, the influences of feed moisture content, gasification temperature and equivalence ratio on the characteristics of thermal plasma are analyzed. The optimal operation parameters for gasification process are determined as follows: the moisture content is between 14%~17%, the temperature is the lowest temperature that ensures full reaction and the equivalence ratio is around 0.15.

Key words: Aspen Plus; oily sludge; thermal plasma; gasification

随着环保要求的提高,石化含油污泥处理的标准也在相应提高,这对处理含油污泥设备与技术提出了新的挑战。热等离子体技术可以对含油污泥无害化与资源化处理,一方面含油污泥中固体颗粒物多为无机物 SiO_2 , 等离子焰流可瞬间将其转化为玻璃态熔渣后安全填埋;另一方面,含油污泥中污染有机物和烃类有机物较多,可利用热值较大,热等离子体技术可以在极短的时间内将其热解为可燃的小分子气体(H_2 、 CO 等)后回收加以利用,后者产生的合成气是本文中主要研究的内容。

Aspen Plus 在文献中经常用于模拟各种气化反应过程。国外 Mazzoni 等^[1] 使用 Aspen Plus 模拟了城市固体废物和塑料固体废物等离子气化过程,研究了不同气化剂和 2 种废物不同比例混合对气化结果的影响;Kunze 等^[2] 用 Aspen Plus 模拟以硬煤为原料的不同气流气化过程,研究干基和含水分的 3 种不同原料在不同气流下气化的结果;刘联胜等^[3] 基于 Aspen Plus 软件模拟生物质在烟气气氛下对气化产物的影响。针对气化热解,国内外已有很多研究,

Aspen Plus 也能准确模拟出气化过程中的变化规律。

目前,气化的研究对象多集中在煤、生物质、城市固体废物^[4] 等,而将含油污泥作为气化对象却寥寥无几,为此本文中基于热等离子体技术和 Aspen Plus 软件,模拟含油污泥气化过程,为后续实验提供参考。

1 模型的建立与验证

1.1 模型的建立

使用 Aspen Plus 模拟含油污泥气化反应过程需要基于以下假设^[5-6]: 反应过程中所有设备保持稳态运行,各参数不随时间改变而改变;压力保持不变,不考虑压降;热等离子体热解温度高,反应时间短,假设有机物质在瞬间完成并充分反应;气化过程中,有机物中 O、H、S、N 元素全部转化为气相, C 受反应条件影响不完全转化,灰分不参与反应也对反应过程和结果不产生影响。图 1 为应用 Aspen Plus 建立的热等离子体热解含油污泥的模型流程,即等离子体气化模型^[7] (EPJ 模型)。

收稿日期:2018-03-05;修回日期:2018-07-03

作者简介:金兆荣(1992-),男,硕士生;徐宏(1962-),男,博士,教授,主要研究方向为能源高效利用与节能,通讯联系人,021-64253810, hxu@ecust.edu.cn。

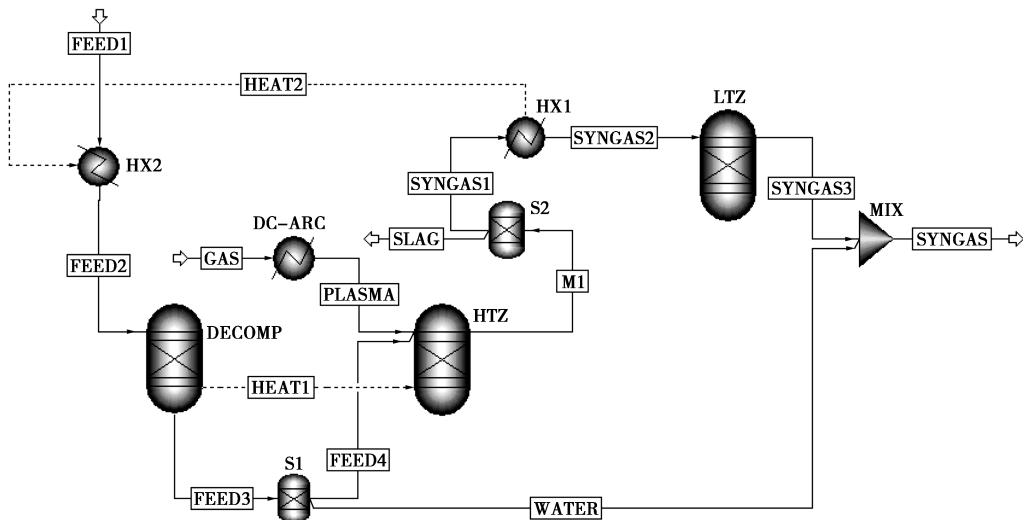


图 1 热等离子体热解含油污泥的模型流程

根据等离子气化炉的反应温度曲线变化,模型将气化炉拆分为 2 个反应区,HTZ(高温反应器)和 LTZ(低温反应器),通过吉布斯自由能最小来确定平衡方法。RYIELD 反应器根据设定和最终的元素分析指定生成物的分布,有机物被热解为其组成元素。考虑了气化反应中能量的平衡和有机物分解的反应热,设置连接 HTZ 反应器和 DECOMP 反应器的热流 HEAT1。气化反应炉的高温由等离子体射流保持,在 EPJ 模型中引入产生足够热量的换热器 DC-ARC,通过转移到气体 GAS 的热功率计算等离子体炬的功率。

1.2 模型的验证

为了验证 EPJ 模型,使用 Aspen Plus 软件计算得到的模拟结果与 Agon 等^[8]提供的实验数据进行对比。文献中垃圾衍生燃料(RDF)的工业分析和元素分析见表 1,参照文献[8]设定参数:进料速率为 29 kg/h,热等离子体炬以 120 kW 的功率运行,反应温度为 1 536 K,气体 Ar、CO₂、O₂ 的流速分别为在标准状况下 87、177、93 L/min。

表 1 RDF 的工业分析和元素分析

工业分析/%				元素分析/%						低位热值/(MJ·kg ⁻¹)
水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	N	Cl	S	O	
4.6	22.1	69.3	8.6	46.80	5.70	1.25	1.60	0.26	22.30	22.37

进一步,本文中将由 EPJ 模型模拟计算出的气化参数值与实验结果进行了总结和对比,见表 2。值得注意的是,除了 CH₄ 因为模拟中只有重整反应导致体积分数偏小,其他模拟值与实验数据误差在

6.0%以下,在误差允许的范围内,所以本文中建立的 EPJ 模型计算的结果是值得信赖的。

表 2 EPJ 模型计算数据与实验数据对比

	EPJ 模型	实验数据 ^[8]	误差/%
体积分数/%			
H ₂	29.3	30.0	2.3
CO	49.0	46.1	5.9
CO ₂	10.4	11.0	5.5
Ar	10.2	10.4	1.9
CH ₄	0.8	2.5	68.0
合成气 LHV/(MJ·kg ⁻¹)	9.3	9.9	6.0
气化产率/(m ³ ·kg ⁻¹)	1.68	1.75	4.0

2 模拟条件的设定

以上海某石化厂含油污泥为原料应用 EPJ 模型计算,工业分析和元素分析见表 3。分析并研究含油污泥在热等离子体气化炉内的合成气的组成、热值、气体产率、碳转化率、等离子效率等参数的变化规律。

表 3 含油污泥工业分析和元素分析

工业分析/%				元素分析/%						LHV/(MJ·kg ⁻¹)
水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	N	Cl	S	O	
20	50.23	46.81	2.96	35.41	4.68	0.46	0	0.80	7.21	23.50

下面对当量比、气体产率、碳转化率、等离子效率等参数进一步解释。

(1) 当量比:空气的实际通入量与理论上进料完全燃烧需要的空气的比值。

(2)碳转化率:单位质量的含油污泥气化后产生的可燃气体的含碳量与含油污泥中含碳量之比^[6]。

(3)气体产率:单位质量下含油污泥气化后生成的可燃气体在标准状态下的体积,体现气化产气的能力。

(4)等离子气化效率:生成的合成气热值与原料热值和消耗热能的比值,反映了能量的利用情况^[7]。

$$\eta_{PG} = (\dot{m}_{\text{syngas}} \cdot LHV_{\text{syngas}}) / (\dot{m}_{\text{feed}} \cdot LHV_{\text{feed}} + W_{\text{torch}} / \eta_{el}) \quad (1)$$

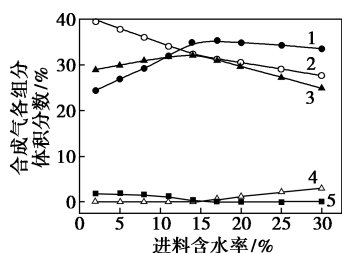
式中, η_{PG} 为等离子气化效率,%; \dot{m}_{syngas} 为合成气质量流量,kg/s; LHV_{syngas} 为合成气低位热值,MJ/kg; \dot{m}_{feed} 为含油污泥的进料速率,kg/s; LHV_{feed} 为含油污泥的低位热值,MJ/kg; W_{torch} 为等离子体炬功率,MW; η_{el} 为火力发电厂的平均效率,取 34.5%。

3 结果与讨论

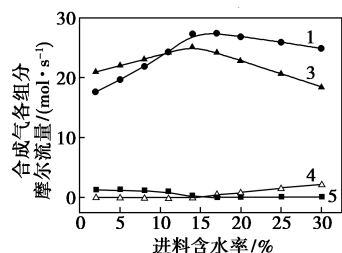
3.1 进料含水率对气化反应的影响

含油污泥的含水率对生成的合成气影响较大,为了模拟进料含水率的影响,设定模拟的条件:进料速率为 1 kg/s,温度 25℃,压力 101.3 kPa,含水率变化范围 2%~30%;空气当量比 $ER=0.2$,温度 25℃,压力 101.5 kPa。

图 2 为进料含水率对合成气组的影响,从图 2 (a)、(b)发现 14%~17%的含水率是重要的变化区间。 CO_2 和 CH_4 的产量较低,受含水率变化的影响较小,含水率小于 14%时基本不生成 CO_2 ,大于 14%



(a)



(b)

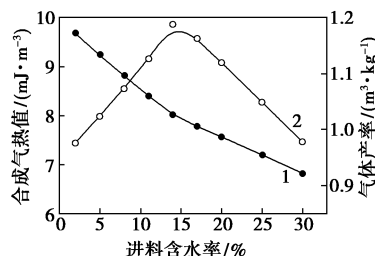
1— H_2 ; 2— N_2 ; 3— CO ; 4— CO_2 ; 5— CH_4

图 2 进料含水率对合成气各组分的影响

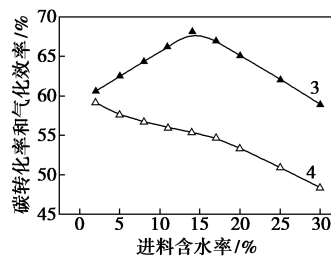
时开始产生 CO_2 ;而 CH_4 变化规律则相反,从体积分数为 1.72%缓慢减小到 0 后不再产生; H_2 和 CO 无论体积分数还是变化幅度都较明显, H_2 的体积分数先增长至最大值 35.20% (含水率 17%)再减小; CO 的体积分数先增加至最大值 32.27% (含水率 14%)再减小; N_2 体积分数一直在递减。

含水率少于 14%时, CO 和 H_2 的体积分数随着含水率增加而增加,是水蒸汽参与气化反应,促进了水煤气反应 $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$ 向正反应方向移动, CO 和 H_2 的生成量变多;当含水率超过 14%,一方面过多的水分蒸发吸收了氧化反应释放的热量,削弱了水煤气反应 $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$,抑制 H_2 和 CO 的产生速率,另一方面含水率过高导致原料中 C 的质量分数的下降以及氧化物的增多使得部分 CO 氧化为 CO_2 。

如图 3 所示,合成气热值随着进料含水率的增加一直下降,下降了 29.5%;随着含水率增加,气体产率增加至最高点 $1.187 \text{ m}^3/\text{kg}$ (含水率 14%)再减小。热值下降是因为进料含水率增加导致不可燃组分的增加, H_2/CO 比例增加;气体产率与可燃气体组分体积分数相关,变化趋势也与主要成分 CO 和 H_2 的变化趋势相同。等离子气化效率随着含水率增加而一直减小,而碳转化率却是先增大后减小。



(a)



(b)

1—合成气热值;2—气体产率;3—碳转化率;4—气化效率

图 3 进料含水率对气化参数的影响

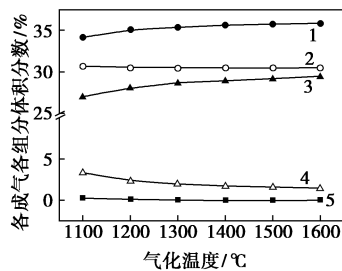
由此可见,适量的含水率有利于气化反应的进行,含水率过高时需要预处理,如机械脱水处理等,降低含水率确保系统稳定运行并减少能源消耗,含水率过低需要增加蒸汽发生器来通入适量的水蒸汽

参与反应。

3.2 气化温度对气化反应的影响

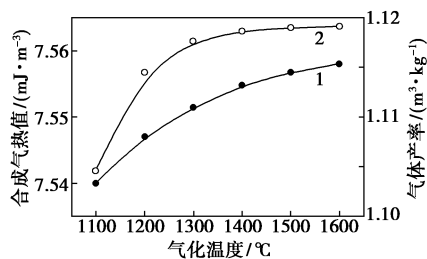
气化温度是气化过程中重要的操作条件,设定合理的模拟参数:进料速率为 1 kg/s,温度 25℃,压力 101.3 kPa;空气当量比 $ER = 0.2$ 不变,温度 25℃,压力 101.5 kPa;气化炉内温度一般不低于 1 000℃,气体出口温度保持在 850℃ 以上避免二噁英等有毒有害物质产生,故设定气化温度范围为 1 100~1 600℃。

图 4 为气化温度对合成气体积分数的影响。随着气化温度的升高,CO 和 H₂ 体积分数在缓慢增加,CO₂ 体积分数却在缓慢降低;CH₄ 和 N₂ 的体积分数没有明显的变化,其中 CH₄ 的产生量忽略不计,N₂ 不参与反应。气化炉内温度升高增强了 2 个吸热反应 $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ 、 $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$,削弱了放热反应 $C + O_2 \rightarrow CO_2$,温度升高促进了 H₂ 和 CO 的生成并消耗了 CO₂^[9-11]。

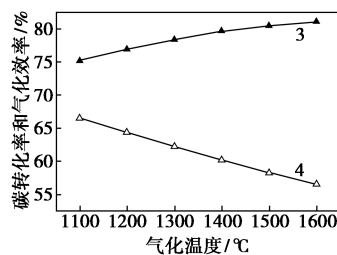


1—H₂;2—N₂;3—CO;4—CO₂;5—CH₄

图 4 气化温度对合成气组分体积分数的影响



(a)



(b)

1—合成气热值;2—气体产率;3—碳转化率;4—气化效率

图 5 气化温度对碳的转化率和等离子体气化效率的影响

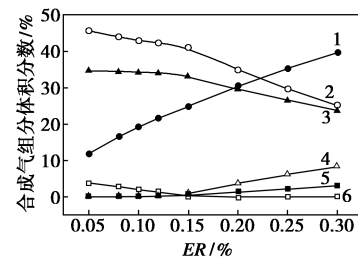
如图 5 所示,合成气中的可燃气体的体积分数随着气化温度升高而增加,气体产率也随之增加。气化温度上升使得碳的转化率保持增长,而等离子体气化效率却随着气化温度上升而下降,因为更高的炉内温度需要更多等离子体炬电能。

气化温度较高时,温度变化对气化反应的影响并不明显,无论是合成气的组分体积分数还是气体产率和热值,变化的幅度比较小。所以热等离子体系统运行时,确保出口温度高于 850℃ 的情况下控制反应区以相对较低的温度进行气化反应,有利于能源高效利用。

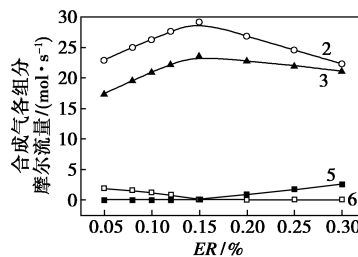
3.3 当量比 ER 对气化反应的影响

为了研究空气当量比 ER 对气化反应的影响,设定如下的模拟条件:进料速率为 1 kg/s,温度 25℃,101.3 kPa;通入空气温度 25℃,压力 101.5 kPa, ER 变化范围是 0.05~0.30。

图 6 为当量比 ER 对合成气组分含量的影响。图 6(a) 显示,随着 ER 的增加,CO、H₂ 体积分数持续降低,当 $ER > 0.15$ 时下降得更快,N₂ 体积分数保持稳定增加;H₂O、CO₂ 和 CH₄ 体积分数并不高,当 $ER < 0.15$ 时,没有 H₂O 和 CO₂ 生成,当 $ER > 0.15$ 时,H₂O 和 CO₂ 开始产生并逐渐增多;而 CH₄ 的体积分数随着 ER 增加下降到 0 后不再产生。图 6(b) 显示,随着 ER 增加,CO 和 H₂ 的摩尔流量先增加后减小,极值点为 $ER = 0.15$,CH₄ 和 CO₂ 摩尔流量变化趋势跟图 6(a) 体积分数变化规律相同。



(a)



(b)

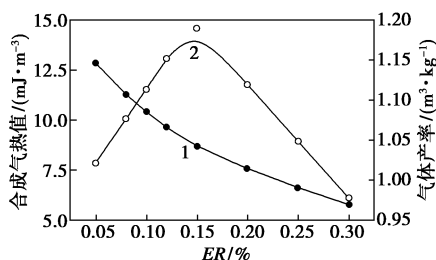
1—N₂;2—H₂;3—CO;4—H₂O;5—CO₂;6—CH₄

图 6 ER 对合成气各组分的影响

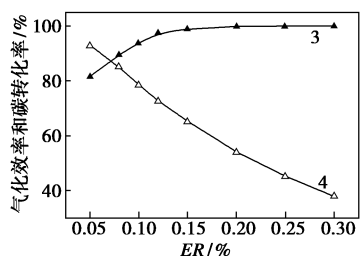
ER 增加后促进了吸热反应公式 $C + H_2O \rightleftharpoons$

$\text{CO} + \text{H}_2, \text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$ 向正反应方向进行,使得 CO 和 H_2 产量增加;后期过多的 O_2 参与反应后 CO_2 开始产生,促进反应公式 $\text{C} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$ 、 $\text{CO} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 向正反应方向进行,使得合成气中 CO 和 H_2 摩尔流量下降。

如图 7 所示,随着 ER 的增加,合成气热值下降了 55.1%,而气体产率却是先增加至最大值 $1.19 \text{ m}^3/\text{kg}$ ($ER=0.15$) 再减小。合成气热值的不断减少是因为可燃成分 CO 、 H_2 和 CH_4 体积分数在减小;气体产率与合成气中可燃气体 CO 和 H_2 体积分数的变化正相关。随着 ER 的增加,等离子气化效率下降幅达较大,因为等离子体炬消耗更多的电能来保证气化反应的温度;碳转化率从 81.56% 开始增加至 100% 后保持不变,由于增加 O_2 使得含油污泥中裂解的残炭参与气化反应,从而碳转化率增加^[12]。



(a)



(b)

1—合成气热值;2—气体产率;3—碳转化率;4—气化效率

图 7 ER 对含油污泥的等离子气化效率和碳转化率的影响

综上,热等离子体系统需要通入适量的空气,为气化反应提供气化剂, $ER=0.15$ 是最佳值。过量的空气会使得氧化剂 O_2 太多将 CO 氧化为 CO_2 , 导致既需要消耗额外的热量,又降低了合成气的利用价值。

4 结语

基于 Aspen Plus 平台对气化反应进行数值模拟和研究,使用吉布斯自由能最小的原理,建立含油污泥气化 EPJ 模型,进行了进料含水率、气化温度、当

量比 3 个因素对热等离子体气化特性影响的模拟。

随着含油污泥的含水率增加,合成气中 H_2 与 CO 的体积分数先增大后减小,气体产率也是先增加后减小;气化温度较高时温度变化对气化反应影响并不明显, CO 和 H_2 体积分数、气体产率等都变化幅度较小;随着 ER 增加, CO 和 H_2 摩尔流量先增加后减小,体积分数一直在下降,气体产率先增大后减小。所以含油污泥气化的最佳条件是含水率保持在 14%~17%,气化温度在保证反应物充分反应的最低温度,通入空气当量比为 0.15 左右。

参考文献

- [1] Mazzoni L, Janajreh I. Plasma gasification of municipal solid waste with variable content of plastic solid waste for enhanced energy recovery [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 30 (42): 19446-19457.
- [2] Kunze C, Spliethoff H. Modelling, comparison and operation experiences of entrained flow gasifier [J]. *Energy Conversion & Management*, 2011, 52 (5): 2135-2141.
- [3] 刘联胜, 赵荣焯, 王高月, 等. 基于 Aspen Plus 的烟气气氛下生物质气化模拟 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48 (6): 278-283.
- [4] 曹小玲, 陈建行, 熊家佳, 等. 等离子体气化技术处理城市生活垃圾的研究现状 [J]. *现代化工*, 2014, 34 (9): 26-31.
- [5] Gordillo G, Annamalai K, Carlin N. Adiabatic fixed-bed gasification of coal, dairy biomass, and feedlot biomass using an air-steam mixture as an oxidizing agent [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34 (12): 2789-2797.
- [6] 刘凌沁. 生物质气化试验与 Aspen Plus 模拟研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [7] Minutillo M, Perna A, Bona D D. Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combined cycle (IPGCC) power plant [J]. *Energy Conversion & Management*, 2009, 50 (11): 2837-2842.
- [8] Agon N, Hrabovský M, Chumak O, et al. Plasma gasification of refuse derived fuel in a single-stage system using different gasifying agents [J]. *Waste Management*, 2016, 47 (B): 246-255.
- [9] 庞先勇. 等离子体炬辅助煤气化研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [10] Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review [J]. *Waste Management*, 2012, 32 (4): 625-639.
- [11] 蔡敏华, 唐兰, 赵矿美. 基于 Aspen Plus 的等离子体气化生物质模拟分析 [J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2016, 41 (3): 863-869.
- [12] 周劲松, 王铁柱, 骆仲决, 等. 生物质焦油的催化裂解研究 [J]. *燃料化学学报*, 2003, 31 (2): 144-148. ■