

油基岩屑高温等离子体气化过程数值模拟研究

吴徐磊¹, 于海龙^{1*}, 张世锋¹, 陈海群^{2*}, 徐亚运¹, 郑和³

(1.常州大学石油与天然气工程学院, 江苏常州 213164;

2.常州大学石油化工学院, 江苏常州 213164;

3.中石化华东石油工程公司江苏钻井公司, 江苏南京 210019)

摘要:使用 Aspen Plus 软件中的 Gibbs 自由能平衡计算模块对油基岩屑的气化过程进行了物理建模和数值模拟研究, 分析了等离子体炬功率、ER 值和气化剂的流速等操作运行条件对气化效果的影响。确定了汽化过程最佳操作参数, 体炬功率为 25 kW, 当量比为 0.3, 气化过程应保证充足的氧气。

关键词:油基岩屑; 等离子体气化; 数值模拟; Aspen Plus

中图分类号: X741

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)02-0227-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.02.041

Numerical simulation of high temperature plasma gasification of oil-based cuttings

WU Xu-lei¹, YU Hai-long^{1*}, ZHANG Shi-feng¹, CHEN Hai-qun^{2*}, XU Ya-yun¹, ZHENG He³

(1.School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2.School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

3.Jiangsu Drilling Company, East China Petroleum Engineering Company, Sinopec, Nanjing 210019, China)

Abstract: By using the Gibbs free energy balance calculation module in Aspen Plus software, physical modeling and numerical simulation are performed for the oil-based rock cuttings gasification process. The influences of operating conditions such as plasma torch power, equivalence ratio value, and the flow rate of gasifier on the gasification effect are analyzed. The optimal operating parameters for the gasification process are determined as follows: the plasma torch power is 25 kW, the equivalence ratio is 0.3, and the sufficient oxygen shall be ensured for the gasification process.

Key words: oil-based cuttings; plasma gasification; numerical simulation; Aspen Plus

近年来,随着我国经济的快速发展,能源需求大幅增加,石油和页岩气作为我国能源的基石其需求和开采力度不断加大,如何妥善处理伴随产生的油基岩屑等危险固体废弃物已成为能源和环境保护领域的一个关键问题^[1-6]。相关学者和专家在油基岩屑高温等离子体汽化熔融技术领域开展了一系列的研究工作^[7],利用等离子体的高温特性可以在短时间内将其熔融为玻璃态熔渣,经过激冷后形成玻璃体,达到国家环保排放标准;高温等离子体射流能够将油基岩屑中的烃类等有机污染物进行快速热解,转化为 H₂ 和 CO 等小分子气体,称为合成气,根据合成气中有效气(H₂+CO)成分的高低,可以二次开发利用^[8-9]。

高温等离子体汽化熔融实验装置成本高,实验测

试条件严格,因此,该技术和装备的研发面临着巨大挑战。而数值模拟方法成本低、速度快,能够有效弥补单纯实验研究的不足。经过比较分析,本文中拟采用 Aspen Plus 这款大型化学过程模拟软件进行系统研究。该软件已被广泛应用于模拟各种材料的汽化过程,包括生物质、城市固体废物和含油污泥等^[9-13]。

1 Aspen Plus 模型及验证

1.1 Aspen Plus 高温等离子体汽化反应模型的建立

为了进一步优化高温等离子体汽化熔融炉处理废弃油基岩屑的操作运行参数,降低实验测试难度和成本,提高理论研究和装备研发的效率,本文中使

收稿日期:2023-04-14;修回日期:2023-11-29

基金项目:中国石油化工集团工程公司科技项目计划(2021K2450);江苏省研究生科研创新计划(SJGX22_1437, KYCX21_2814)

作者简介:吴徐磊(1997-),男,硕士生;于海龙(1975-),男,博士,教授,研究方向为固废处理、新能源与多能互补技术,通讯联系人, yhl@cczu.edu.cn;陈海群(1970-),男,博士,教授,研究方向为碳功能材料设计、清洁生产技术开发,通讯联系人, chenhq@cczu.edu.cn。

用 Aspen Plus 软件对不同运行工况下的油基岩屑等离子体汽化过程进行数值模拟研究。鉴于前人的研究成果和本团队前期实验测试的过程,本文中拟利用热解、汽化和重组 3 个反应器来模拟分析油基岩屑等离子体汽化炉内的汽化过程,具体的模型工艺流程见图 1。

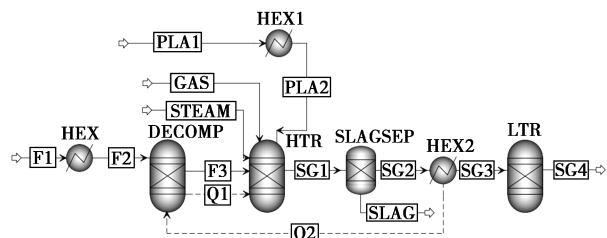


图 1 等离子体汽化过程 Aspen Plus 系统模型工艺流程

1.2 模型验证

为了验证该模型的可行性和准确性,本文中对 Sukthang 等^[14]的实验过程进行了数值模拟,并将模拟的结果与 Sukthang 的实验结果数据进行了对比和误差分析。

Sukthang 的实验以生物质为汽化原料,利用高温等离子体进行汽化,汽化原料生物质的工业分析及元素分析成分如表 1 所示。汽化实验条件如下:生物质进料速率为 209.90 kg/h,初始温度为 25℃,汽化压力为 0.1 MPa;等离子体炬载气为空气,质量流速为 205.09 kg/h;等离子体炬功率为 50 kW。采用该模型以同等汽化条件进行数值模拟的结果和 Sukthang 的实验测试结果数据对照如表 2 所示。

表 1 工业分析及元素分析(质量分数) %

工业分析				元素分析					
水分	固定碳	灰分	挥发分	C	H	O	N	Cl	S
16.02	17.53	1.53	80.94	49.20	60.50	42.74	0.47	0	0.03

表 2 模拟结果与实验结果比较

合成气体积分数	实验数据/%	模拟数据/%	误差/%
CO	34.55	36.59	5.90
H ₂	36.27	38.17	5.27
CO ₂	23.29	23.73	1.89
CH ₄	5.89	0.94	84.04

从表 2 可以看出,除 CH₄ 外,数值模拟结果中合成气组分的误差均小于 6%,都在数值模拟计算允许误差范围之内。虽然 CH₄ 的模拟结果误差较

大,但由于 CH₄ 在合成气中所占比例较小,不是汽化产物的主要成分,因此,可忽略该项成分的模拟误差。综上可知,上述利用 Aspen Plus 软件建立的数值模拟模型用来模拟高温等离子体汽化反应是可行的,模拟误差均在允许误差范围之内,表明该模型具有较高的准确性。

2 模拟条件的设定

本文中用于高温等离子体汽化熔融反应的原料为来自华东石油工程公司江苏油田某钻井平台的油基岩屑样品,工业分析和元素分析如表 3 和表 4 所示,该油基岩屑的低位发热量为 9.75 MJ/kg。

表 3 油基岩屑成分分析及工业分析(质量分数) %

	成分分析			工业分析			
	含水率	含油率	含渣率	水分	固定碳	灰分	挥发分
废弃油基岩屑	3.65	18.25	78.10	3.65	1.88	76.12	18.35

表 4 油基岩屑元素分析(质量分数) %

	C	H	O	N	Cl	S
废弃油基岩屑	10.70	1.35	5.78	0.16	0.38	2.80

注:不包含无机盐组分。

分析等离子体汽化过程性能的常用指标有气体热值、汽化产率和汽化效率^[12,15]。

(1) 气体热值指汽化反应产生的单位体积气体混合物完全燃烧所释放的热量,可以影响汽化过程的经济性和效率,单位为 MJ/m³。根据实际情况,可简化为:

$$LHV = 12.63 \times CO + 12.75 \times H_2 + 39.82 \times CH_4 + 25.35 \times H_2O$$

式中,CO、H₂、CH₄、H₂S 分别为 CO、H₂、CH₄、H₂S 在合成气中的体积分数,%。

(2) 汽化产率是指在汽化反应中,单位质量的油基岩屑原料产生的气态产物的体积,单位为 m³/kg。汽化产率的计算公式为:

$$GP = Q_d / Q_m, Q_d = T_0 q / T$$

式中,q 为气体产物的体积流量;T₀ 为标准状态下的温度;T 为气体产物的温度;Q_d 为气体产物的体积流量,m³/h;Q_m 为油基岩屑原料的进料速率,kg/h。

(3) 汽化效率 η 是油基岩屑汽化所产生的合成气中的化学能与燃料中的化学能之间的比例。不考虑焦油的产生,汽化效率的计算公式为:

$$\eta = (LHV \times G_p \times m) / (LHV_1 \times m + 3600 \times P)$$

式中,LHV 为气体产物低位发热量,kJ/m³;G_p 为汽

化产率, m^3/kg ; LHV_1 为油基岩屑原料低位热值, kJ/kg ; P 为体炬功率, kW ; m 为单位时间参与反应的油基岩屑原料的质量, kg/h 。

3 结果与讨论

3.1 等离子体炬功率对汽化结果的影响

根据前人实验测试结果,可以发现体炬功率与载气流量存在显著相关性。过大或过小的载气量均会导致无法起弧或直接灭弧。因此,在调整体炬功率的同时,需要相应地调整载气(N_2)流量。本文中忽略能量的额外损失,根据能量守恒定律,电源提供的电能将完全转化为氮气的能量,即 $W=Q$,可以推导出氮气流量的计算公式:

$$M = (3600 \times P) / (C \times \Delta t)$$

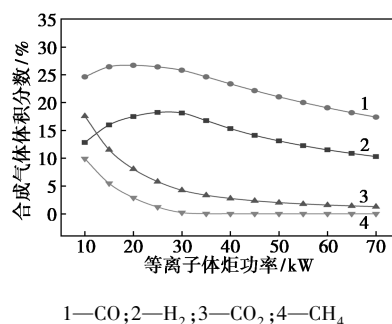
式中, M 为电离过程中 N_2 的质量流量, kg/h ; P 为体炬功率, kW ; C 为 N_2 的比热容,取 $C=1.038 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; Δt 为电离过程中 N_2 温度的上升,假定 N_2 的温度从 25°C 上升到 4100°C ,则 $\Delta t=4075$ 。则不同的体炬功率对应的 N_2 质量流量如表 5 所示。

表 5 体炬功率与载气(N_2)质量流量对应关系

项目	数值										
功率/ kW	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
流量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	13.8	17.2	20.7	24.1	27.6	31.1	34.5	37.9	41.4	44.8	48.3

为研究体炬功率对汽化结果的影响^[16-17],设置模拟初始条件如下:油基岩屑进料速率为 $50 \text{ kg}/\text{h}$ 、初始温度为 25°C 、初始压力为 0.1 MPa ;汽化剂 O_2 质量流量为 $5 \text{ kg}/\text{h}$ 、初始温度为 25°C 、初始压力为 0.1 MPa ;各反应器的压力 0.1 MPa ;体炬功率变化范围设定为 $10 \sim 70 \text{ kW}$ 。

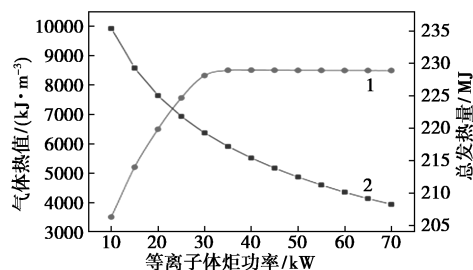
图 2 为体炬功率对合成气组分影响的数值模拟结果。随着体炬功率的升高, CH_4 和 CO_2 的体积分数呈现逐渐减小的趋势,在体炬功率为 $10 \sim 25 \text{ kW}$ 范围内, H_2 和 CO 的体积分数呈上升趋势,但随着体炬功率的进一步增加而下降。是因为体炬功率增加导致输入能量增多,促使 Boudouard 反应和水煤气反应正反应方向移动,导致 H_2 和 CO 的体积分数增加, CO_2 的体积分数减少。但在体炬功率达到 25 kW 后,通入的载气(N_2)流量随功率不断增加,起到了主导作用,致使合成气总量不断增加,导致了 CO 和 H_2 在合成气中的体积分数不断降低。



1— CO ; 2— H_2 ; 3— CO_2 ; 4— CH_4

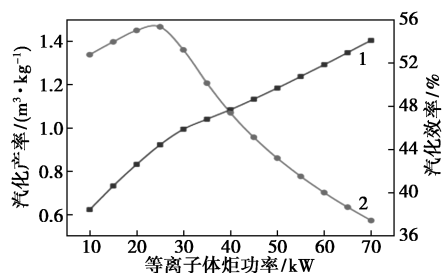
图 2 合成气体体积分数随体炬功率的变化

如图 3 所示,合成气的热值随着体炬功率的增大不断减小,总发热量逐渐增大,最终趋于平稳,不再显著增加。这是因为随着体炬功率的增加,载气(N_2)流量的增加,稀释了合成气中的可燃成分,从而降低气体的热值。汽化效率随着体炬功率的升高先增大后降低,汽化产率则随着体炬功率的上升而增加。当体炬功率开始升高时,汽化程度逐渐加强,直至完全汽化,因此汽化效率在前期会提高。但等离子体汽化处理油基岩屑是不可逆的过程,存在损失,随着等离子体炬功率的不断提高,能量损失越大,汽化效率也随之下降。



1—总发热量; 2—气体热值

(a) 气体热值和总发热量



1—汽化产率; 2—汽化效率

(b) 汽化产率和汽化效率

图 3 体炬功率对汽化结果的影响

尽管提高汽化功率可以促进汽化进程,但本文中数值模拟结果表明,更高的体炬功率并不意味着更高的汽化效率。综合考虑,在本文中模拟的实验条件下体炬功率最佳值为 25 kW ,此时可以处理的油基岩屑量为 $50 \text{ kg}/\text{h}$ 。

3.2 当量比(ER 值)对汽化结果的影响

当量比(ER 值)是完成汽化所需实际氧气量占油基岩屑完全氧化所需理论氧气量的比值,它的大小决定了进入汽化系统的氧气量,计算公式为:

$$ER = \frac{\text{气化过程实际可用氧气量}}{\text{油基岩屑完全氧化所需要的氧气量}}$$

研究氧气当量比(ER 值)对汽化过程的影响^[18],设置模拟初始条件如下:油基岩屑进料速率为 50 kg/h、初始温度为 25℃、初始压力为 0.1 MPa;各反应器的压力 0.1 MPa;体炬功率 25 kW;载气(N_2)进气量 22.23 kg/h;汽化剂 O_2 初始温度为 25℃、初始压力为 0.1 MPa,汽化剂当量比(ER 值)的变化范围是 0.1~0.6(此时汽化剂氧气的进气量变化范围为 1.88~11.27 kg/h)。

图 4 为 ER 值对合成气组分影响的数值模拟结果。随着 ER 值的增加, H_2 和 CO 的体积分数先增加后减少, CH_4 的体积分数逐渐减少, CO_2 的体积分数随 ER 值的增加而增加。在 ER 值处于 0.1~0.2 范围时, C 的氧化和水煤浆反应主导着整个反应过程,合成气中的 H_2 和 CO 的体积分数增加, CH_4 的体积分数减小;在 ER 值为 0.2~0.28 时,随着 ER 值的增加导致 CO_2 体积分数的增加, H_2 和 CO 体积分数的减少。主要是因为更多 O_2 的进入促进了燃烧反应的增强。

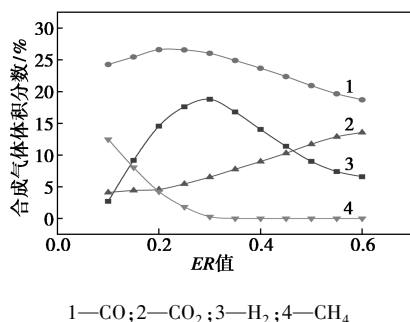
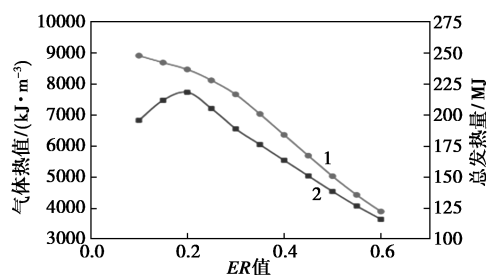
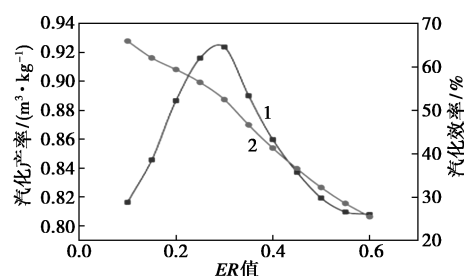


图 4 合成气体体积分数随 ER 值的变化

如图 5 所示, ER 值为 0.3 时,汽化产率达到最大值。然而,随着 ER 值的进一步增加,汽化产率开始下降,并在 ER 值达到 0.55 时逐渐稳定。这是由于在 ER 值为 0.1~0.3 时, CO 的生成速率远大于 H_2O 的生成速率,汽化产率随着 CO 和 H_2 体积分数的增加而增加。 CO 的产率急剧增加,导致合成气的热值增加。当 ER 值大于 0.3 时, CO 的产率开始下降, H_2 和 CH_4 体积分数不断下降,导致合成气的热值降低。



1—总发热量;2—气体热值
(a) 气体热值和总发热量



1—汽化产率;2—汽化效率
(b) 汽化产率和汽化效率

图 5 ER 值对汽化结果的影响

需要注意的是,当 ER 值大于 0.55 时, C 原子已经不会与 O_2 反应生成 CO , CO 与 O_2 反应产生 CO_2 的速率增加,反应速度近似于 H_2 和 O_2 生成 H_2O 的速率。因此,汽化产率不再降低,并且趋于平稳。

汽化效率的持续下降主要是由于随着 ER 值的增加,通入的 O_2 量不断增加,导致汽化温度的降低。为了确保足够高的汽化温度,等离子体炬消耗更多的电能,导致汽化效率持续下降。

综上所述,等离子体汽化处理油基岩屑需要通入适量的氧气来保证反应的 ER 值。反应器中 ER 值大小对处理油基岩屑的汽化产率、合成气组分产出以及汽化效率有显著影响。经过上述数据分析可知,模拟的最佳 ER 值为 0.3。

3.3 不同汽化剂对汽化结果的影响

水蒸汽也是汽化过程常见的汽化剂之一^[19],但是由于纯水蒸汽汽化反应供热较小,单独用作汽化剂很难满足汽化反应的热量需求,所以水蒸汽一般作为辅助汽化剂,与空气或氧气混合汽化。将水蒸汽和 O_2 的混合气作为汽化剂,保证汽化过程的当量比(ER 值)为 0.3,即限制 2 种汽化剂输入的总含氧量为 5.63 kg/h,通过改变水蒸汽和 O_2 的进量来分析水蒸汽对汽化过程的影响。设置模拟初始条件为:油基岩屑进料速率为 50 kg/h、初始温度为 25℃、初始压力为 0.1 MPa;辅助汽化剂水蒸汽含量范围为 0~1,初始温度为 100℃、初始压力为

0.1 MPa。

图6为辅助汽化剂水蒸汽的含量对合成气组分影响的数值模拟结果。可以看出,随着水蒸汽含量的增加, H_2 和CO的体积分数降低。主要是因为 H_2 和CO的生成需要足够的氧气供应。在使用水蒸汽和 O_2 的混合气体时,限制了总含氧量,增加水蒸汽的量,将导致 O_2 的减少,抑制了C和 H_2O 的汽化反应,从而减少了 H_2 和CO的产量。

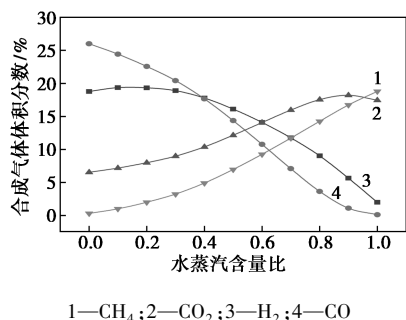
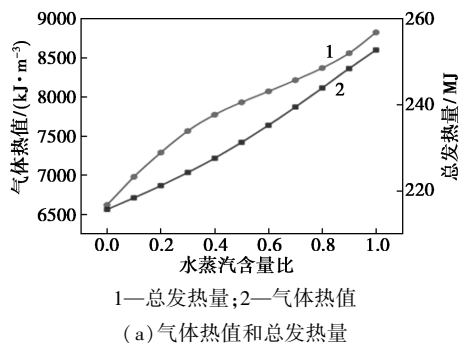


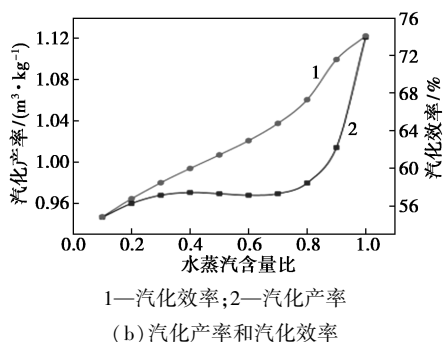
图6 合成气体体积分数随水蒸汽流量的变化

在汽化过程中,水蒸汽与C反应产生 CH_4 。当水蒸汽的量增加时, CH_4 的生成速率和生成量也迅速增加。 CO_2 的产生量增加是因为水蒸汽增加会促进水蒸汽重整反应。

图7为气体热值和总发热量随着水蒸汽含量的数值模拟结果。从图中可以看出,气体热值和总发热量均随着水蒸汽含量的增加而增加。这是因为,增加水蒸汽含量可以促进汽化反应生成 CH_4 这种



(a) 气体热值和总发热量



(b) 产气产率和汽化效率

图7 水蒸汽含量对汽化结果的影响

高热值产物,因此总发热量会随之增加,气体热值也随之上升。汽化效率随着辅助汽化剂水蒸汽含量的增加而增加,因此使用辅助汽化剂水蒸汽作为汽化剂相较于单一使用 O_2 作为汽化剂可以不断提高汽化效率。

使用水蒸汽和 O_2 混合气体作为汽化剂,同时限制总含氧量不变并增加水蒸汽的量,能够促进甲烷化反应,产生大量 CH_4 和 CO_2 气体。这种方法减少了 H_2 和CO的产量,证实了添加水蒸汽有利于 CH_4 的增长,并且抑制CO形成的前提条件是汽化过程中存在足够的 O_2 。然而,大量 CH_4 的存在会导致等离子体汽化炉内温度和压力升高,从而增加成本和操作难度。因此,为了避免等离子体汽化过程中 CH_4 的过量产生,需要调整汽化剂的组成,保证汽化过程中 O_2 的充足,以在实际应用中获得最佳效果。

4 结论

利用Aspen Plus对现有的等离子体处理油基岩屑实验装置进行建模,对油基岩屑的成分以及模型的处理参数及指标进行设定。利用新建模型对废弃油基岩屑汽化过程进行了模拟计算,通过改变等离子体炬功率、当量比(ER 值)、汽化剂种类以及辅助汽化剂水蒸汽温度来模拟研究其对合成气的组分、气体热值、气体产率和汽化效率的影响规律,并分析原因。

(1) 体炬功率的提高在一定程度上能够提高汽化程度,但更高的体炬功率并不意味着更高的汽化效率。综合考虑,处理50 kg/h的油基岩屑时最佳的等离子体炬功率为25 kW。

(2) 当量比(ER 值)是影响汽化过程的重要因素,随 ER 值的增大,合成气 H_2 和CO的体积分数先增大后减小, CO_2 的体积分数持续上升,汽化产率呈现先增大后减小的趋势,在 ER 值=0.3时达到最大值,综合考虑,在本文中模拟条件下, ER 值最佳为0.3。

(3) 汽化剂也是对汽化效果有较大影响的因素。研究发现,如果汽化剂的组成不适当,可能会导致反应不完全或产生不希望的副产物,从而降低汽化效率。因此,在实际生产中需要对空气、氧气、水蒸汽等汽化剂的比例进行合理调整才能达到最佳的汽化效果。

本研究模拟的结果为后续大量实验测试提供了良好的数据参考,可用于后续等离子体汽化过程实

验的设计和条件优化的优化。但在本模拟计算中,只考虑了体炬功率、当量比及辅助汽化剂水蒸汽的量对油基岩屑等离子汽化结果的影响,后续应继续考虑如等离子体载气类型、汽化剂类型及 ER 值、进料速度等对油基岩屑等离子体汽化效果的影响。

参考文献

- [1] 余明炎.油基岩屑脱油处理技术对比[J].当代化工研究,2021,(18):73-74.
- [2] Malviya R, Chaudhary R. Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(1): 267-276.
- [3] Xu N, Wang W, Han P, et al. Effects of ultrasound on oily sludge deoiling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1/2/3): 914-917.
- [4] Ramos A, Berzosa J, Espi J, et al. Life cycle costing for plasma gasification of municipal solid waste: A socio-economic approach[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 209: 112508.
- [5] Yuam W, Wang C, Ye X, et al. Comparison of the access level of new energy between domestic and foreign power grid: E3S Web of Conferences[C]: EDP Sciences, 2020.
- [6] Hu G, Liu H, Rana A, et al. Life cycle assessment of low-temperature thermal desorption-based technologies for drill cuttings treatment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 401: 123865.
- [7] 文辉,王丹青.页岩气钻井岩屑的建材资源化利用综述[J].四川建材,2021,47(3):3-4.
- [8] 冯超,王泉斌,乔瑜,等.基于 35 kW 等离子体炬典型生物质气化处置及多工况影响研究[J].节能技术,2021,(3):205-211.
- [9] Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review[J]. Waste Management, 2012, 32(4): 625-639.
- [10] 王希,张春飞,王晓亮,等.城市生活垃圾等离子气化技术研究进展[J].现代化工,2012,32(12):20-24.
- [11] 曹小玲,陈建行,唐世斌,等.基于 Aspen Plus 的垃圾等离子体气化模拟研究[J].工业炉,2014,36(2):1-5.
- [12] 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.
- [13] 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, 42(30): 19446-19457.
- [14] Sukthang N, Lipal P, Arjham W, et al. The potential of high moisture biomass for energy production using plasma-assisted gasification[J]. Oriental Journal of Chemistry, 2017, 33(4): 1805.
- [15] 刘作龙.在不同气化剂条件下生物质气化模拟研究[D].郑州:郑州大学,2011.
- [16] He M, Xiao B, Hu Z, et al. Syngas production from catalytic gasification of waste polyethylene: Influence of temperature on gas yield and composition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(3): 1342-1348.
- [17] Peters J F, Banks S W, Bridgwater A V, et al. A kinetic reaction model for biomass pyrolysis processes in Aspen Plus[J]. Applied Energy, 2017, 188: 595-603.
- [18] Zhang Q, Dor L, Zhang L, et al. Performance analysis of municipal solid waste gasification with steam in a Plasma Gasification Melting reactor[J]. Applied Energy, 2012, 98: 219-229.
- [19] Agon N, Hrabovsky 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: 246-255. ■
- [7] 刘瑞特,姜益光,张龙飞,等.中红外氟化物玻璃光纤研究进展[J].硅酸盐学报,2022,50(4):1085-1099.
- [8] Kavun V Y, Voit E I, Yaroshenko R M, et al. Structure and ion mobility in glasses in the BiF₃-PbF₂-ZrF₄ systems studied by Raman and NMR spectroscopy[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2014, 401: 224-231.
- [9] Santos F A, Delben J R J, Delben A, et al. Thermal stability and crystallization behavior of TiO₂ doped ZBLAN glasses[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2011, 357(15): 2907-2910.
- [10] Saad M. Heavy metal fluoride glass fibers and their applications [C]//2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP). IEEE, 2011: 1-16.
- [11] Rezvani S A, Ogawa K, Fuji T. Highly coherent multi-octave polarization-maintained supercontinuum generation solely based on ZBLAN fibers[J]. Optics Express, 2020, 28(20): 29918-29926.
- [12] 王建何,袁启华,刘国新.红外光导纤维基体无水四氟化锆的制备[J].化学世界,1984,(6):3-5.
- [13] 温丰源,李霞.氟化氢铵的生产工艺与最新进展[J].无机盐工业,2013,45(10):5-7.
- [14] 叶文龙,黄少清,丛海辉.我国氟化铵、氟化氢铵生产、技术现状及发展趋势[J].化工生产与技术,2011,18(6):12-14.
- [15] GB/T 50441—2016.石油化工程设计能耗计算标准[S].北京:中国计划出版社,2016. ■

(上接第 226 页)

欢迎订阅《现代化工》杂志,邮发代号 82—67。