

## 工业技术

# ZrF<sub>4</sub> 生产工艺能耗分析

汤宇甍<sup>1,2</sup>, 汤睿<sup>2</sup>, 钱渊<sup>2</sup>, 姜迪<sup>2</sup>, 徐益升<sup>1\*</sup>

(1. 华东理工大学化工学院, 上海 200237;  
2. 中国科学院上海应用物理研究所熔盐化学工程技术部, 上海 201800)

**摘要:**传统的 ZrF<sub>4</sub> 生产工艺在气态 HF 氛围下进行, 对高温反应设备要求高, 产品纯度低, 能耗高。研究设计了一种基于液态 HF 的 ZrF<sub>4</sub> 生产工艺, 并根据工业中的实际生产条件设计了气态 HF 法的工艺流程; 通过 Aspen Plus 软件模拟, 计算了上述两种工艺流程的总能耗。结果表明, 每生产 1 t ZrF<sub>4</sub> 产品, 液态 HF 法的能耗总值为 3 097. 813 kg 标准油, 气态 HF 法为 6 803. 966 kg 标准油。由此可见, 液态 HF 法的工艺流程每年可节省 54. 47% 的操作费用, 具有更高的经济效益, 对工业生产 ZrF<sub>4</sub> 的低能耗转型具有重要意义。

**关键词:** 能耗; ZrF<sub>4</sub>; 液态 HF 法; 气态 HF 法

中图分类号: TB24

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)02-0223-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.02.040

## Energy consumption analysis on ZrF<sub>4</sub> production process

TANG Yu-meng<sup>1,2</sup>, TANG Rui<sup>2</sup>, QIAN Yuan<sup>2</sup>, JIANG Di<sup>2</sup>, XU Yi-sheng<sup>1\*</sup>

(1. School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Molten Salt Chemical Engineering Technology Department, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** A new ZrF<sub>4</sub> production process based on liquid HF is developed and designed to address issues such as high equipment requirements, low product purity, and high energy consumption associated with traditional ZrF<sub>4</sub> production processes conducted in a gaseous HF atmosphere. A gaseous HF process flow is also designed according to actual production conditions in industry. The total energy consumption of the new process and traditional one is calculated by using Aspen Plus software. It is shown that the liquid HF process consumes 3 097. 813 kg of standard oil for producing every 1 ton of ZrF<sub>4</sub>, while the gaseous HF process consumes 6 803. 966 kg of standard oil. It is found that the liquid HF process can save 54. 47% of operating costs annually compared to the gaseous HF process, making it more economically beneficial and significant for the low energy consumption transformation of industrial ZrF<sub>4</sub> production.

**Key words:** energy consumption; zirconium tetrafluoride; liquid HF method; gaseous HF method

四氟化锆 (ZrF<sub>4</sub>) 是一种重要的化工原料, 具有较小的热中子吸收截面、较高的热容、良好的流动性和导热性、很宽的液态工作范围以及优异的化学稳定性<sup>[1-3]</sup>。在核工业中可以用于核反应堆中的燃料棒和管道等部件的制造; 在医疗器械中可用于人工耳蜗等器械的制造; 在电子行业中可用于一些关键部件的制造; 在军工领域中可以作为重要的结构材料<sup>[4-7]</sup>。此外, 高纯 ZrF<sub>4</sub> 可以用于制备低损耗、高功率中红外光纤, 能够实现小尺寸光纤激光器等器件的制备和激光手术刀等民生医疗产品的生产<sup>[7-11]</sup>。

目前, 国内 ZrF<sub>4</sub> 在工业上制备的方法主要有 3 种, 分别是氟锆酸铵热解法、二氧化锆氟化法和水合

四氟化锆脱水法<sup>[12]</sup>, 这几种方法都在 500~650℃ 的高温下反应, 也就是原料在气态 HF 的氛围中反应。然而, 高温反应不仅存在过程中的温度和反应速率难以控制, 容易产生副反应和杂质, 从而降低产品纯度和产率的问题, 还对设备材料、仪表性能等要求很高, 同时还需要消耗大量的能源来维持反应体系的高温状态, 因此能耗较大、整体运行成本较高。

在我国双碳战略及节能减排政策的背景下, 亟需寻求一种更节能高效的 ZrF<sub>4</sub> 生产方法。针对气态 HF 法能耗和成本高的问题, 可优先考虑液态 HF 法生产制备 ZrF<sub>4</sub>, 而目前基于该方法的研究还未见报道。鉴于此, 本文中通过 Aspen Plus 软件设计了

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-11-30

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目 (YJKYYQ20200050); 国家重点研发计划 (2021YFB3500903)

作者简介: 汤宇甍 (1997-), 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向为化工流程模拟, 769054933@qq.com; 徐益升 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向为生物吸附、高分子材料制备与分析, 通讯联系人, yshxu@ecust.edu.cn。

一套基于液态 HF 的  $ZrF_4$  生产工艺流程,同时还实现了 HF 的全循环利用。此外,根据目前工业上常用的在气态 HF 条件下生产  $ZrF_4$  的方法——二氧化锆氟化法建立了一套符合实际工业生产条件的严格模拟流程,以期在生产相同质量  $ZrF_4$  的目标条件下对 2 种方法进行详细的能耗分析对比。

## 1 理论分析

液态 HF 法原理是利用原料液态 HF 和氢氧化锆在  $10^\circ\text{C}$  低温下反应生成  $ZrF_4$  和水,这是一个剧烈的放热反应,会使得反应温度变高,并且在高浓度 HF 的条件下,反应温度可能会更高。因此,该反应通常在低温下进行反应,通过使用冷却器或在冰浴中来控制反应温度。在工业生产中,需要控制原料液态 HF 过量使得反应充分,然后对未反应的 HF 和反应生成的  $H_2O$  进行精馏提纯,提纯出来的 HF 循环利用,从而构建工艺流程。

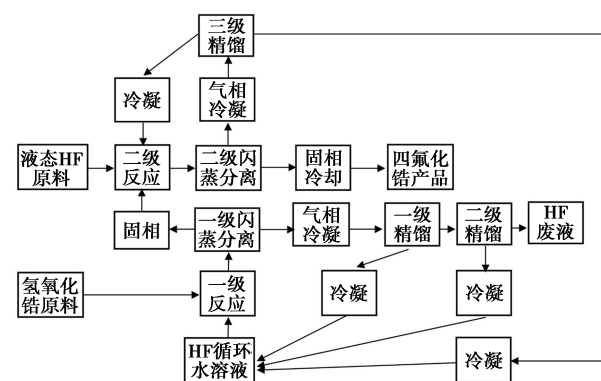
气态 HF 法原理是利用原料氟化氢铵和二氧化锆在  $600\sim 700^\circ\text{C}$  高温下反应生成  $ZrF_4$ 、 $NH_3$ 、HF 和  $H_2O$ 。在该反应中,氟化氢铵在  $129^\circ\text{C}$  开始分解为  $NH_4F$  和 HF,  $NH_4F$  在  $130^\circ\text{C}$  开始分解为  $NH_3$  和 HF,中间产物水和四氯化锆在高温下脱水生成无水四氯化锆。由于 HF 在常压下的沸点是  $19.51^\circ\text{C}$ ,所以整个反应过程均在气态 HF 的氛围中进行。在工业生产中,需要控制原料氟化氢铵过量使得反应充分,该反应产生的气相混合物包括等摩尔的氨气和氟化氢以及少量的水蒸汽,需要进行处理。先通过冷凝将混合物冷却,然后在  $120^\circ\text{C}$  的条件下,使氨气和氟化氢按 1:2 的质量比反应生成氟化氢铵<sup>[13-14]</sup>。生成的氟化氢铵可以冷却后作为原料循环投入反应,而剩下的气相混合物冷凝后形成高浓度的氨水,可通过加水形成 25% 的工业氨水。

## 2 流程简述

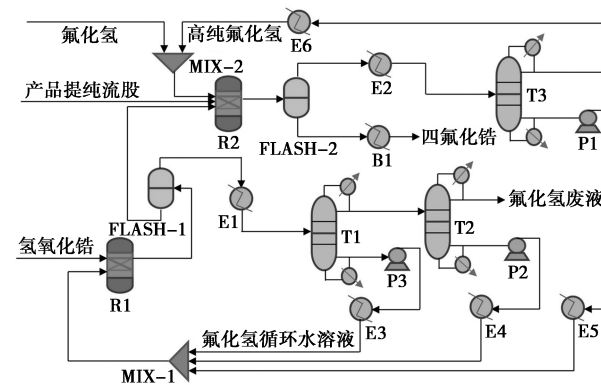
### 2.1 液态 HF 法制备 $ZrF_4$ 流程

液态 HF 法制备  $ZrF_4$  构建的工艺流程如图 1 (a) 所示。原料氢氧化锆与 HF 循环水溶液在  $10^\circ\text{C}$  低温下进行一级反应,反应产物进过一级闪蒸分离。其中分离出的气相 HF 和水蒸汽冷凝后,通过一级精馏和二级精馏提纯,得到 HF 含量较低的 HF 废液,并将精馏分离得到的 HF 含量高的水溶液分别经过冷凝后循环利用。一级闪蒸分离出的固相含有  $ZrF_4$  和可能未完全反应的氢氧化锆原料,与液态 HF 原料在  $10^\circ\text{C}$  低温下进行二级提纯反应,其中液

态 HF 原料要过量,目的是确保氢氧化锆原料完全反应。将二级反应的产物进行二级闪蒸分离,塔底得到的固相经过冷却后得到  $ZrF_4$  产品,塔顶得到的气相 HF 和水蒸汽则通过三级精馏提纯,将精馏分离的产物分别经过冷凝后循环利用。本工艺流程实现了氢氧化锆原料在液态 HF 中制备  $ZrF_4$ ,且满足了 HF 的全流程循环利用。对应的 Aspen Plus 模拟流程如图 1 (b) 所示,其中在实际生产过程中,制备的  $ZrF_4$  可以通过产品提纯流股进行循环提纯操作。



(a) 工艺流程



R1—一级反应器;R2—二级反应器;FLASH-1—一级闪蒸罐;FLASH-2—二级闪蒸罐;T1—一级精馏塔;T2—二级精馏塔;T3—三级精馏塔;MIX-1、MIX-2—混合器;P1、P2、P3—泵;E3、E4、E5、E6—循环冷凝器;E1—一级初冷器;E2—二级初冷器;B1—产物冷却器

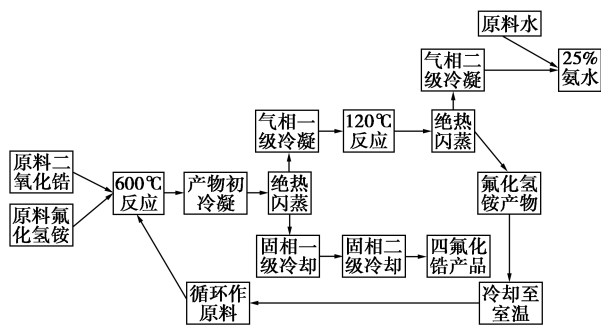
(b) 模拟流程

图 1 液态 HF 法制备  $ZrF_4$  的工艺流程简图和相应的流程模拟

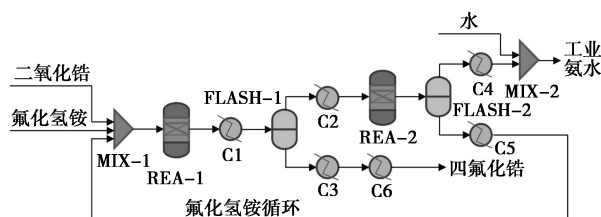
### 2.2 气态 HF 法制备 $ZrF_4$ 流程

气态 HF 法制备  $ZrF_4$  构建的工艺流程如图 2 (a) 所示。原料二氧化锆和氟化氢铵在  $600^\circ\text{C}$  进行反应,生成的气固混合物先进行初步冷凝到  $300^\circ\text{C}$ ,然后再进行绝热闪蒸。分离出的固相经过一级冷却到  $40^\circ\text{C}$ ,再通过二级冷却到  $25^\circ\text{C}$  得到  $ZrF_4$  产物;分

离出的气相混合物中包含气态 HF、氨气以及少量的水蒸汽,将气相混合物进行一级冷凝后在 120℃ 进行反应得到固态氟化氢铵和气相混合物。将反应后的气固混合物绝热闪蒸:分离出来的固态氟化氢铵经过冷却至室温后可循环加入原料进行反应;分离出来的气相混合物则通过二级冷凝后得到高浓度的氨水,加入原料水可得 25% 氨水工业使用。对应的 Aspen Plus 模拟流程如图 2(b) 所示。



(a) 工艺流程



MIX-1、MIX-2—混合器;REA-1—四氟化锆反应器;

REA-2—氟化氢铵反应器;FLASH-1、FLASH-2—绝热闪蒸罐;

C1—初级冷凝器;C2—气相一级冷凝器;C3—四氟化锆初冷器;

C6—四氟化锆冷却器;C4—氨水冷凝器;C5—氟化氢铵冷却器

(b) 模拟流程

图 2 气态 HF 法制备 ZrF<sub>4</sub> 的工艺流程简图和相应的流程模拟

在 2 种方法模拟过程中,液态 HF 法采用 WILS-HF 模型,气态 HF 法采用 ELECNRTL 模型,对 2 个工艺流程调整并优化设计参数,使得 2 个工艺流程都生产 1 kmol/h 的 ZrF<sub>4</sub> 以方便进行对比。模拟结果显示,液态 HF 法原料 HF 利用率达到 98.58%,产物 ZrF<sub>4</sub> 的质量分数几乎为 1;气态 HF 法所得氨水质量分数为 25%,氨水质量分数为 99.89% 满足工业需求,产物 ZrF<sub>4</sub> 的质量分数为 97.03%,工业上火法制备四氟化锆时,产物质量分数通常在 95%~99.5% 之间,结果符合实际。

### 3 能耗分析

#### 3.1 公用工程的设置

模拟过程中的公用工程选用以下 4 种。

(1) 蒸汽:压力为 0.3 MPa 饱和蒸汽,模拟中低压蒸汽一般用于温度小于 150℃ 的模块加热。

(2) 冷却水:进口压力为 0.4 MPa,进口温度为 30℃,出口压力为 0.25 MPa,出口温度为 40℃,模拟中一般用于对操作温度在 40℃ 以上的模块冷却。

(3) 冷冻水:选用乙二醇溶液作为制冷剂,进口温度和出口温度分别为 -10℃ 和 -5℃,换热热容为 3.56 kJ/kg,模拟中一般用于冷却至 30℃ 以下的模块冷却。

(4) 柴油:燃烧剂,进口温度和出口温度分别为 700、500℃,换热热容为 3 300 kJ/kg,模拟中一般用于加热至 500℃ 以上的模块进行换热。

#### 3.2 液态 HF 法制备 ZrF<sub>4</sub> 的能耗计算

根据不同模块的操作温度,选择相应的公用工程,计算每个装置每小时的能耗。计算结果如表 1 所示。

表 1 液态 HF 法制备 ZrF<sub>4</sub> 公用工程能耗表 kg/h

模块名称	单元操作	公用工程类别	公用工程用量
E6	循环冷凝器	冷冻水	288.803
E5	循环冷凝器	冷冻水	1863.757
E4	循环冷凝器	冷冻水	99272.816
E3	循环冷凝器	冷冻水	142149.515
T3	精馏塔塔顶冷凝器	冷冻水	21211.942
E2	二级初冷器	冷冻水	28864.757
B1	产物冷却器	冷冻水	1344.738
R1	一级反应器	冷冻水	492453.398
R2	二级反应器	冷冻水	4667.466
FLASH-1	一级闪蒸罐	蒸汽	671.962
FLASH-2	二级闪蒸罐	蒸汽	77.663
T1	精馏塔塔釜再沸器	蒸汽	1607.369
T2	精馏塔塔釜再沸器	蒸汽	538.707
T3	精馏塔塔釜再沸器	蒸汽	9.470
T1	精馏塔塔顶冷凝器	冷却水	71381.068
T2	精馏塔塔顶冷凝器	冷却水	28552.816
E1	一级初冷器	冷却水	26904.369

在液态 HF 法制备 ZrF<sub>4</sub> 的工艺流程中,还包括 P1、P2、P3 3 个泵进行循环流股输送,其中泵的压力为 2.5 MPa,泵的效率为 65%,再计算 3 个泵消耗的总功率,计算结果为 50.769 kWh。

#### 3.3 气态 HF 法制备 ZrF<sub>4</sub> 的能耗计算

根据不同模块的操作温度,选择相应的公用工

程,计算每个装置每小时的能耗。计算结果如表 2 所示。

表 2 气态 HF 法制备 ZrF<sub>4</sub> 公用工程能耗表 kg/h

模块名称	单元操作	公用工程类别	公用工程用量
REA-1	四氟化锆反应器	柴油	1019.419
C1	初级冷凝器	冷却水	10821.022
C2	气相一级冷凝器	冷却水	6068.156
C3	四氟化锆初冷器	冷却水	743.447
REA-2	氟化氢铵反应器	蒸汽	1042.675
C4	氨水冷凝器	冷冻水	39047.806
C5	氟化氢铵冷却器	冷冻水	31443.357
C6	四氟化锆冷却器	冷冻水	450.229

### 3.4 能耗分析对比

为了使 2 种方法制备 ZrF<sub>4</sub> 的工艺流程能耗进行有效的对比,需要根据国家石油化工设计能耗计算标准 GB/T 50441—2016<sup>[15]</sup>,将燃料、电、纯氢以及耗能工质的统一能源折算值,计算转化为千克标准油折算值。2 种方法的标准油折算值如表 3 和表 4 所示。

表 3 液态 HF 法制备 ZrF<sub>4</sub> 能耗折算表

公用工程类别	公用工程使用总量	标准油折算值
冷冻水	792117.192 kg/h	296.093 kg/h
蒸汽	2905.171 kg/h	191.741 kg/h
冷却水	126838.253 kg/h	19.026 kg/h
电	50.769 kWh	11.169 kg/h
标准油折算总值		518.029 kg/h

表 4 气态 HF 法制备 ZrF<sub>4</sub> 能耗折算表 kg/h

公用工程类别	公用工程使用总量	标准油折算值
柴油	1019.419	1039.807
蒸汽	1042.675	68.817
冷却水	17632.625	2.645
冷冻水	70941.392	26.518
标准油折算总值		1137.787

比较 2 种方法制备 ZrF<sub>4</sub> 的工艺流程能耗可以得出,同样生产 1 kmol/h 的 ZrF<sub>4</sub> 产品中,气态 HF 法比液态 HF 法每小时多消耗的能量相当于 619.758 kg 的标准油。根据该结果可将生产 1 kmol 的 ZrF<sub>4</sub> 的能耗转化为生产 1 t ZrF<sub>4</sub> 的能耗,2 种方法生产 1 t ZrF<sub>4</sub> 的能耗如表 5 所示。

表 5 生产 1 t 四氟化锆产品流程能耗总值

工艺流程	四氟化锆产品质量/t	标准油折算值/kg
液态 HF 法	1	3097.813
气态 HF 法	1	6803.966

由表 5 可知,每生产 1 t 的 ZrF<sub>4</sub> 产品中,气态 HF 法比液态 HF 法多消耗的能量相当于 3 706.153 kg 的标准油。可以看出,液态 HF 法同比每年可以节约 54.47% 的操作费用。若每年生产 2 kt ZrF<sub>4</sub> 产品,则液态 HF 法比气态 HF 法每年可节省 7.412×10<sup>6</sup> kg 标准油的操作费用。按照标准油 4~6 元/kg 的价格,每年可节省的费用为 2 964.8 万~4 447.2 万元。

## 4 结论

创新性地研究设计了一套液态 HF 法制备 ZrF<sub>4</sub> 的工艺流程,并根据工业上气态 HF 法生产 ZrF<sub>4</sub> 的工艺条件构建了相应的工艺流程,利用 Aspen Plus 软件对 2 种方法生产 ZrF<sub>4</sub> 的工艺装置进行了模拟和能耗计算。计算结果表明,每生产 1 t 的 ZrF<sub>4</sub> 产品,液态 HF 法工艺流程能耗总值可折算为 3 097.813 kg 的标准油,气态 HF 法工艺流程能耗总值可折算为 6 803.966 kg 的标准油。液态 HF 法工艺流程操作费用较低,同比每年可节省 54.47% 的操作费用。考虑到高温对应的设备要求高,在投资设备方面液态 HF 法工艺流程设备成本更省。如果再考虑到液态 HF 法在低温下操作,条件温和,安全性高,就可以获知,液态 HF 法工艺流程能够综合地降低生产成本,具有更好的安全性和经济性。

## 参考文献

- [1] Mathieu Salanne, Christian Simon, Pierre Turq. Heat-transport properties of molten fluorides: Determination from first-principles [J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2009, 130(1): 38-44.
- [2] Van der Meer J P M, Konings R J M. Thermal and physical properties of molten fluorides for nuclear applications [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 360(1): 16-24.
- [3] Křepel J, Hombourger B, Fiorina C, et al. Fuel cycle advantages and dynamics features of liquid fueled MSR [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 64: 380-397.
- [4] Sudo S. Progress in optical fiber amplifiers [J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 1996, 7(1): 1-35.
- [5] 宗国强,肖吉昌.氟化物熔盐的制备及其应用进展 [J]. *化工进展*, 2018, 37(7): 2455-2472.
- [6] Bedö S, Pollnau M, Lüthy W, et al. Saturation of the 2.71 μm laser output in erbium-doped ZBLAN fibers [J]. *Optics Communications*, 1995, 116(1/2/3): 81-86.

(下转第 232 页)

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, Bridgewater 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 BiF<sub>3</sub>-PbF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub> 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 TiO<sub>2</sub> 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。