DOI:10.11918/202505058

脉冲流化床在氟化尾气高效回收中的工业应用

侯彦龙[1,2],杨校铃[2],陈义武[2],李莉莉[1],赵子轩[1],魏亮亮[1,3]

(1.哈尔滨工业大学 环境学院,哈尔滨 150090;2.中核四0四有限公司,兰州 732850;
3.城乡水资源与水环境全国重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090)

摘 要:针对天然铀生产氟化过程尾气中氟气过剩导致的资源浪费与环境污染问题,设计并研制了一套基于脉冲流化床系统的氟气回收的工艺,以实现物料自循环与氟气资源化利用。该工艺以四氟化铀(UF_4)为吸收剂,通过分析氟气回收系统中不同反应温度、氟化尾气流量、物料停留时间等条件对氟气吸收率的影响,优化确定最佳工艺参数,并将最佳工艺参数应用于工业规模脉冲流化床。结果表明:系统内反应温度的提升有利于氟气吸收率的提高,但过高的温度会促进氟气与UF_4反应生成六氟化铀(UF_6),不利于氟气回收,故确定最佳反应温度为210~230 ℃;反应器中氟气的吸收率随氟化尾气流量增加而增大,氟气尾气流量建议控制在35 m^3/h以下,最佳停留时间为1.33 h。氟气回收系统连续运行1个月,尾气中氟气体积分数从优化前的12%~15%降至0.01%。氟气与UO_2发生反应转变为UO_2F_2是实现氟气回收的关键途径。本研究为核工业高浓度氟化尾气的高效回收与资源化处理提供了创新性解决方案。

关键词:脉冲流化床;氟气回收;氟化尾气;工业应用;稳定性验证

中图分类号:TL94 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)10-0155-07

Industrial application of pulsed fluidized bed for efficient recovery of fluorination tail gas

Hou Yanlong[1,2], Yang Xiaoling[2], Chen Yiwu[2], Li Lili[1], Zhao Zixuan[1], Wei Liangliang[1,3]

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. The 404 Company Limited, China National Nuclear Corporation, Lanzhou 732850, China; 3. State Key Laboratory of Urban-rural Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

Abstract: To address the resource waste and environmental pollution problems caused by excessive fluorine gas in the fluorination tail gas of natural uranium production, this study designed and developed a fluorine gas recovery process based on a pulsed fluidized bed system to realize material self-circulation and fluorine gas resource utilization. This process used uranium tetrafluoride (UF_4) as the absorbent. By analyzing the effects of different reaction temperatures, fluorination tail gas flow rates, material residence times, and other conditions on the absorption rate of fluorine gas in the fluorine gas recovery system, this paper optimized and determined the optimal process parameters, which were then applied to the industrial-scale pulsed fluidized bed. The results indicate that the increase of reaction temperature in the system is beneficial to the improvement of fluorine gas absorption rate, but excessively high temperature promotes the reaction between fluorine gas and UF_4 to generate uranium hexafluoride (UF_6), which is detrimental to fluorine gas recovery. Therefore, the optimal reaction temperature is determined to be 210 – 230 ℃. The absorption rate of fluorine gas in the reactor rises with the increase of fluorination tail gas flow rate. It is recommended to control the fluorination tail gas flow rate below 35 m^3/h, and the optimal residence time is 1.33 h. When the fluorine gas recovery system was operated continuously for 1 month, the volume fraction of fluorine gas in the tail gas decreased from 12% – 15% before optimization to 0.01%. The reaction of fluorine gas with UO_2 to form UO_2F_2 is the key pathway to realize fluorine gas recovery. This paper provides an innovative solution for the efficient recovery and resource treatment of high-concentration fluorination tail gas in the nuclear industry.

Keywords: pulsed fluidized bed; fluorine gas recovery; fluorination tail gas; industrial application; stability verification

收稿日期:2025-05-26;**录用日期**:2025-08-10;**网络首发日期**:2025-12-03
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20251203.0814.002
基金项目:中核集团青年英才项目
作者简介:侯彦龙(1989—),男,博士研究生;魏亮亮(1985—),男,教授,博士生导师
通信作者:魏亮亮,weill333@163.com

核燃料循环中六氟化铀(UF_6)是铀唯一稳定的气态化合物,其的清洁安全制备是核燃料循环的核心关键工序。在 UF_6 制备过程中,为提高 UF_4 转化率并确保氟化反应完全,传统工艺需保证氟气有一定的过剩量,致使尾气中的氟气体积分数较高[1-2]。氟气的过量提供导致氟化工艺生产成本较高,且过量的氟元素易被人体吸收而引发疾病(世界卫生组织在污染元素排名中将其列为第 3)[3-4],不同国家在氟化物的排放上有着严格的要求,并开发了系列技术用于氟气处理;另一方面,氟元素价值高,尾气中氟的回收具有巨大的资源化效益。为降低氟气排放量并提高资源利用率,针对高浓度含氟废气可通过吸收或吸附制成原料回用或进行氟化物副产品生产。因此,亟需发展一种新型的氟气回收技术,实现氟化尾气中氟气高效回收利用。

目前,针对含氟废气,工业上常采用湿法吸收、化学分解和干法吸附对其进行处理[5]。湿法吸收对设备材质要求较高,易造成腐蚀[6];化学分解对反应条件要求较高,需要通过高温等条件实现化合物分解[7-8];干法吸附是利用固态碱性物质吸收含氟废气,其优点是无废液产生、工艺简单、费用低[9],但目前干法吸附主要适用于废气量小的工厂[10]。由于氟气价值较高,为避免资源浪费,针对高浓度含氟废气,主流趋势是通过吸收或吸附制成原料回用或氟化物副产品,如氢氟酸、氟盐类、白炭黑等产品。在核工业中,为解决氟化过程中过量的氟化尾气,传统工艺大多采取木炭燃烧的方式处理过剩的氟气,导致大量木炭和氟气的浪费;此外,有团队研发了卧式搅拌炉氟气回收利用系统,但系统与氟化生产系统匹配性较差,运行稳定性不高[11]。

综上,提出利用氟化工艺的原料 UF_4 作为吸收剂,吸收氟化过程尾气中过量的氟气,将反应后的中间物料回收并作为 UF_6 氟化的原料,从而实现氟化尾气中氟气的二次利用。氟化原料 UF_4 作为吸收剂不仅可实现物料系统内部的自循环,而且避免二次放射性废物的产生。UF_4 颗粒粒径分布较广,且反应为放热反应,为有效促进反应过程中固态氟化中间产物的生成(尽可能控制气态 UF_6 的产生),亟需研制一种高效的氟气吸收设备。近年来,脉冲流化床常用于处理黏性强、易结团、不易流化或其他有特殊要求的热敏性物料,相较于传统流化床[12-13],其具有较高的传热系数,能有效克服沟流、死区和局部过热等[14-15],适用于处理直径从 0.05 mm 到几毫米的粉状物料、大颗粒、晶体、薄片、纤维等物料[16]。此外,脉冲流化床内部无转动部件,密封性较好,适合作为 F_2 回收的设备。然而,将脉冲流化床作为 F_2 回收系统在核工业领域尚未见报道。

因此,提出以 UF_4 为吸收剂,基于其通过氟化反应实现吸附过量 F_2 的特性,设计了一套基于中试规模的脉冲流化床 F_2 回收系统。在此基础上,测试了其在稳态气流和脉冲气流下的流化效果,并探究了不同氟化尾气流量、温度、停留时间等条件对氟气吸收率的影响,提出了最优运行工艺参数,并应用于工业生产线,有效提高了氟化生产过程中氟气的利用率。研究结果可推动氟化工序的可持续发展,为核工业中 F_2 资源的回收利用开辟新路径。

1 试验原理及方法

1.1 试验原理

氟化工序以 UF_4 为原料,与氟气在高温条件下反应可制备 UF_6。因反应条件差异,反应过程伴随着 U_2F_9、U_4F_{17}、UF_5 等中间产物的生成,另未充分反应的 F_2 则随尾气排出(约占 60%)。研究发现氟气与 UF_4 反应分为两步进行,当氟气与 UF_4 反应温度较低时,则生成中间氟化物,即

$$4UF_4(s) + F_2(g) \rightarrow 2U_2F_9(s) \quad (1)$$

$$8UF_4(s) + F_2(g) \rightarrow 2U_4F_{17}(s) \quad (2)$$

$$2UF_4(s) + F_2(g) \rightarrow 2UF_5(s) \quad (3)$$

铀的中间氟化物(U_2F_9、U_4F_{17}、UF_5)在高温下可以进一步与氟气反应生成 UF_6,利用该原理,提出将氟化工艺的原料 UF_4 物料作为吸收剂在低温的条件下吸收氟化反应尾气中的过量氟气,反应生成的铀的中间氟化物在后续氟化工艺中可作为原料,进一步与氟气反应生成产品 UF_6,从而实现物料自循环,在不引入新物质的条件下实现氟气回收,节约生产成本。具体工艺原理如图 1 所示。

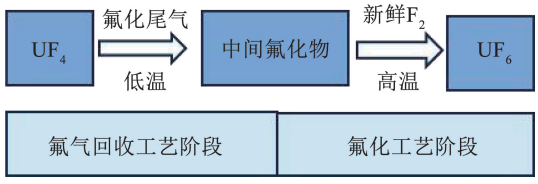


图 1 氟气回收工艺原理

Fig. 1 Principle of fluorine gas recovery process

1.2 试验系统

1.2.1 试验系统工艺流程

试验系统工艺流程如图 2 所示,氟化尾气经过膜压机进行增压后与氮气混合从底部以脉冲形式进入脉冲流化床内,与 UF_4 逆流接触反应;反应后剩余气体经过脉冲流化床顶部过滤器过滤后进入后端尾气系统。为有效测定尾气中氟气体积分数,分别在脉冲流化床的入口和出口利用紫外光谱法进行测定,氟气吸收率计算如下:

$$\alpha = \frac{V_i - V_o}{V_i} \tag{4}$$

式中：α 为氟化尾气氟气吸收率，%；V_i 为脉冲流化床入口氟化尾气中氟气体积，m^3；V_o 为脉冲流化床出口氟化尾气中氟气体积，m^3。

脉冲流化床导通率计算公式如下：

$$d = \frac{t_o}{T} \tag{5}$$

式中：t_o 为脉冲开启时间，s；T 为脉冲开启与关闭的整个周期时长，s。

脉冲流化床停留时间计算公式如下：

$$\tau = m/G \tag{6}$$

式中：τ 为停留时间，h；m 为脉冲流化床有效质量，kg；G 为进料质量流速，kg/h。

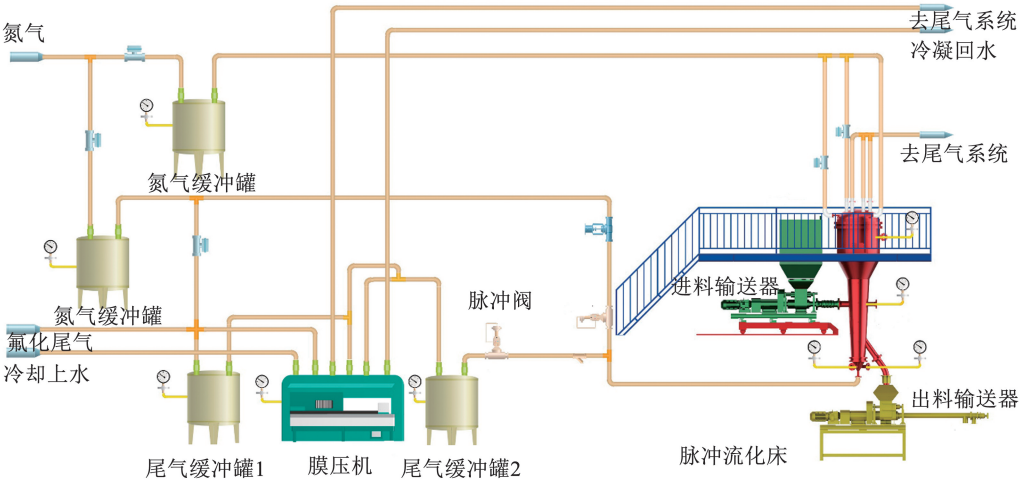


图 2　试验装置系统工艺流程

Fig. 2　Process flow of test device system

1.2.2　脉冲流化床装置设计

脉冲流化床装备分为气体分布板、床体和顶端过滤器，具体结构如图 3 所示。脉冲流化床气体分布板采用侧流式风帽结构，流化气体经气孔、风帽从底部缝隙中喷出，以避免“死料层”现象出现，分布板计算直径为 340 mm，相关计算如下：

$$\varepsilon_0 = 1 - \rho_h/\rho_s \tag{7}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_0 (U/U_{mf})^{5.7 d_p} \tag{8}$$

$$\rho_b = (1 - \varepsilon_f)\rho_s \tag{9}$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{Wt}{0.785 \rho_b C}} \tag{10}$$

式中：ε_0 为固定床孔隙率；ε_f 为流化床孔隙率；ρ_h 为物料的堆密度，kg/m^3；ρ_s 为物料的颗粒密度，kg/m^3；ρ_b 为流化床密度，kg/m^3；U 为操作气速，m/s；U_{mf} 为最小流化速度，m/s；R 为分布板直径，m；W 为流化床固体进料质量流量，kg/h；t 为物料停留时间，h；C 为流化床高径比。

床体采用圆锥床结构，全锥角为 6°，床体高度为 2 100 mm，计算如下：

$$H = DR \tag{11}$$

式中：H 为流化床锥体高度，m；D 为锥体与分布板半径比，依据《流态化手册》[17] 中经验值进行选择。

顶端过滤器内布置 48 根过滤管，实现了相同体积内更多过滤管的布局。过滤管数计算如下：

$$N = A \frac{Q}{v\pi DL} \tag{12}$$

式中：N 为过滤管数；A 为安全系数；Q 为流体流量，m^3/h；v 为过滤速度，m/h；D 为单根过滤管外径或有效过滤直径，m；L 为单根过滤管的有效过滤长度，m。

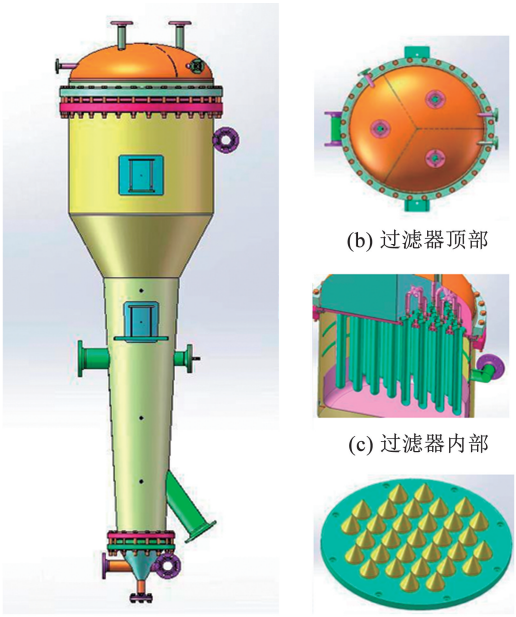


图 3　脉冲流化床结构示意

Fig. 3　Schematic diagram of pulsed fluidized bed structure

2 结果与讨论

2.1 脉冲流化床与稳态流化床对床层压差的影响

以 10 m^3/h 气体流量分别进行上行与下行流态化试验,验证流化床设计的可行性,结果如图 4 所示。由图 4(a)可以看出,在稳态气流情况下,流化床上行曲线在床层压差为 20.8 kPa 时为最低流化状态,此时临界流量为 20.7 m^3/h,临界气速为 0.06 m/s。随着气速增加,床层压差出现短暂下降后再次上升,并最终在 27.3 kPa 时达到稳定流化态。下行曲线与上行曲线几乎一致,证明流化床已成功流态化。在流化床处于流化状态下启动脉冲,如图 4(b)所示,导通率从 0.2 升高至 0.5 过程中,平均床层压差为 26.2 kPa,低于稳态流化时的压差 27.3 kPa。当导通率较低时,脉冲气流的间歇性输入能保证床层在关闭阶段部分回落,颗粒间空隙恢复的同时床层结构趋于松散,一定程度上降低了平均床层压差。此外,脉冲气流的周期性冲击增强了气固接触效率,同时避免了持续高气流导致的颗粒过度悬浮。当导通率持续提升至 0.7 时,床层压差陡然升高至 27.5 kPa,超过了无脉冲条件下的流化压差 27.3 kPa。归因于随着脉冲开启时间的增大,单位时间内气体输入强度更高,流化床内物料受到脉冲冲击更频繁,致其回落时间缩小,床层压差不断增加,可见在持续的脉冲气流冲击下存在床体内打破流化态的风险。与稳定气流流化床相比,引入脉冲可通过周期性扰动物流床层,降低床层压差,促进大小颗粒上下返混,使床内物料状态更加蓬松[14],增强气固接触面积,提升吸收气体效率。综合考虑压差稳定性及返混效率,建议导通率为 0.2 ~ 0.5。

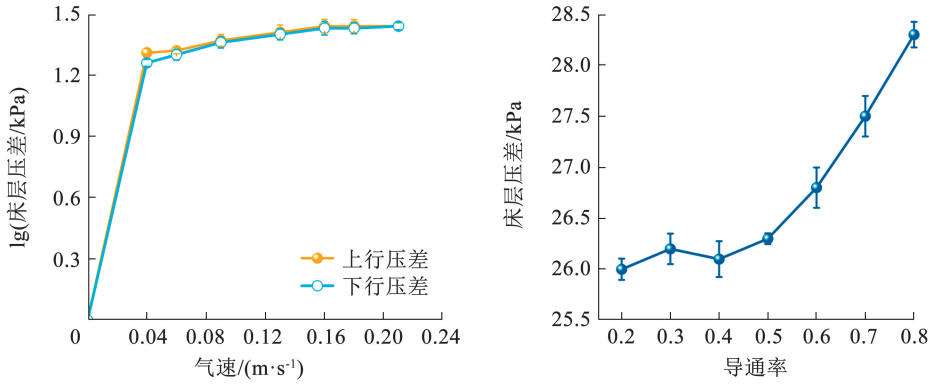


图 4 脉冲流化床与稳态流化床对床层压差的影响

Fig. 4 Effect of pulsed fluidized bed and steady-state fluidized bed on bed pressure drop

2.2 脉冲进气对流化床床内温度控制的影响

流化床内温度场分布一定程度上会影响 UF_4 物料与氟气反应进程。通过设置脉冲进气、稳定进气两种模式,研究了进气模式对流化床内温度场分布的影响,将进气总量控制在 30 m^3/h,脉冲周期为 10 s,导通率为 0.5,结果如图 5 所示。

以稳定进气进行氟气吸收,当温度达到反应温度时(图 5 中时刻 0 对应温度),床体温度出现迅速升高。由图 5 可知,系统的主反应区集中在床体中下段(尤其下段),当下段温度达到 270 ℃时,上升趋势依旧较快。为有效控制流化床内温度,当反应进行至 1 200 s 时将系统进气方式改为脉冲进气,此后温度上升趋势明显减缓,反应区下段达到 288 ℃时温度开始下降,并在下降至 255 ℃左右后趋于稳定,下降温度约 30 ℃,下降率约 10%,与 Li 等[12-13]在传热方面的研究一致。研究结果表明,脉冲进气的方式使得床体内物料状态更加蓬松、流化态效果更好,对于有效散热和维持温度稳定有显著效果,适合于热敏性物质[15]。脉冲进气可通过增强流化态扰动、优化热传递路径,显著提升床层温度控制能力。

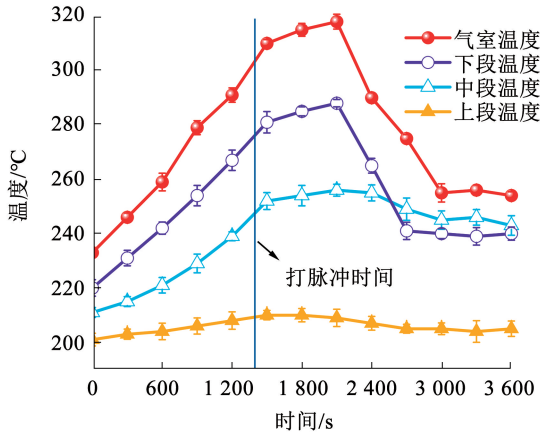
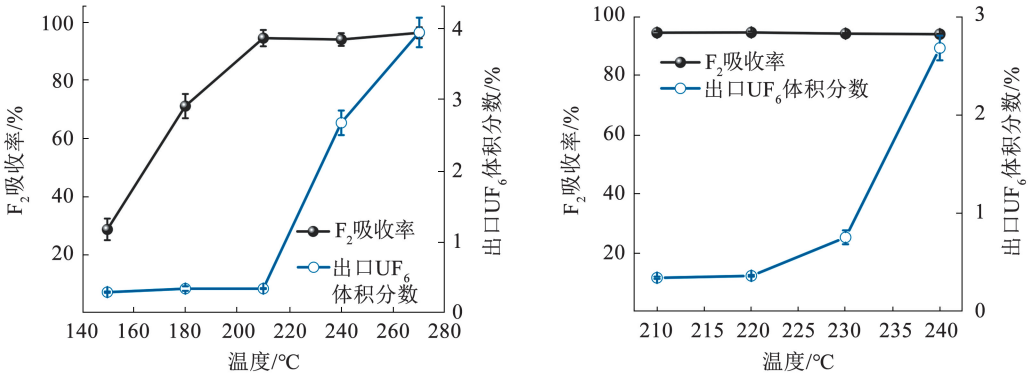


图 5 脉冲对床内温度控制的影响

Fig. 5 Effect of pulse on bed temperature control

2.3　反应温度对脉冲流化床氟气吸收的影响

在氟化尾气量为 30 m^3/h、脉冲周期为 10 s、导通率为 0.5 的条件下，控制床层温度分别为 150、180、210、240、270 ℃，F_2 吸收率如图 6 所示。由图 6(a)可以看出，随着温度升高，F_2 吸收率不断增加，当温度上升到 210 ℃，F_2 吸收率达到了 94% 以上；当温度达到 240 ℃时，流化床出口处 UF_6 体积分数显著升高，且该区域随着温度升高愈发明显。为尽可能减少 UF_6 生成，建议脉冲流化床床体温度控制在 210 ~ 240 ℃。为进一步验证温度的精确范围，结合反应原理，在温度为 220、230 ℃条件下进行补充试验，如图 6(b)所示。可以看出，当吸收温度控制在 210 ~ 240 ℃时，F_2 吸收率上升后趋于平衡，约为 94%。同时在 230 ℃时，UF_6 体积分数开始增长。因此，最佳反应温度建议控制在 210 ~ 230 ℃。



(a) 宽范围温度下F_2吸收率　　(b) 窄范围温度下F_2吸收率

图 6　温度与 F_2 吸收率关系

Fig. 6　Relationship between temperature and F_2 absorption rate

2.4　氟化尾气流量对尾气吸收效果的影响

控制床体温度为 210 ~ 230 ℃、脉冲周期为 10 s、导通率为 0.5 的条件下，设定氟化尾气流量分别为 10、20、30、35、40 m^3/h，F_2 吸收率如图 7 所示。

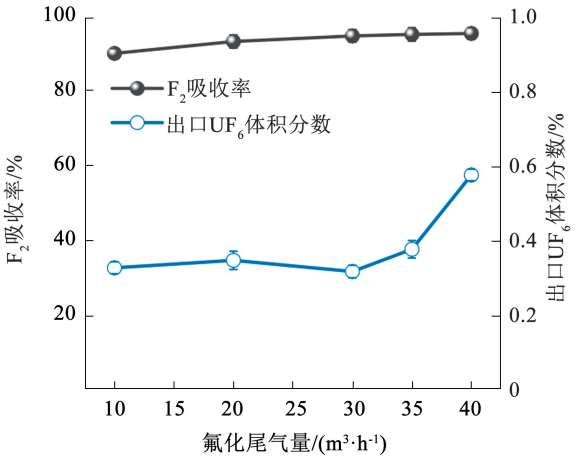


图 7　氟化尾气流量与 F_2 吸收率关系

Fig. 7　Relationship between fluorination tail gas flow rate and F_2 absorption rate

由图 7 可以看出，氟气的吸收率随氟化尾气量增长而增大，当流量达 30 m^3/h 时其吸收率达 95%；进一步提高流量后氟气吸收率增长并不明显。主要原因为低流量时脉冲流化床运行效果不佳，导致物料吸收不均匀，氟气吸收效果不佳，而当氟气与物料流化充分时脉冲流化床的吸收效率较好。试验系统处理氟化尾气的能力可以达到 30 m^3/h 以上，随着氟化尾气流量的增加，系统中氟气总量增加，吸收后尾气中的 UF_6 体积分数将继续增加，容易造成铀的损失，不利于后端淋洗工序的运行，因此，氟气尾气流量建议控制在 35 m^3/h 以下。

2.5　停留时间对尾气氟气吸收的影响

停留时间是衡量设备处理能力的重要因素，控制脉冲流化床进气的氟化尾气量为 30 m^3/h，床层温度在 210 ~ 230 ℃，通过控制进料量，研究物料停留时间分别为 2.65、1.77、1.33、1.06 h 的条件下脉冲流化床的 F_2 吸收率，结果如图 8 所示。

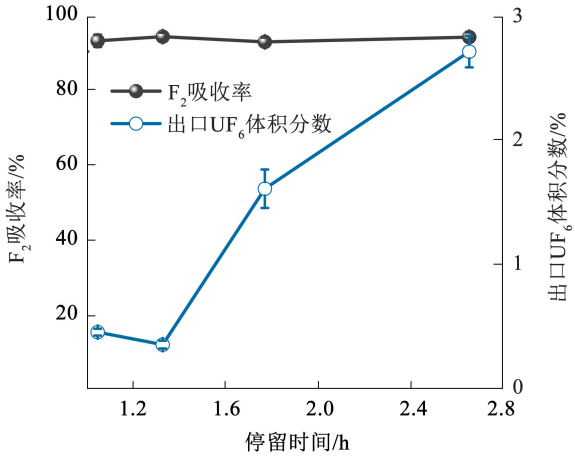


图 8　停留时间与 F_2 吸收率关系

Fig. 8　Relationship between residence time and F_2 absorption rate

由图 8 可以看出,在脉冲流化床内,物料停留时间从 1.06 h 增长到 2.65 h 过程中,氟气的吸收率变化较小,说明尾气中氟气体积分数在 15% 的条件下,停留时间的长短对氟气的吸收率影响较小,且不同停留时间条件下的系统 F_2 吸收率均能达到 93% 以上。随着进一步增加停留时间,氟气与生成的氟化中间物会进一步反应,生成的 UF_6 体积分数会相对较高,不利于脉冲流化床尾气的处理。总体而言,为避免过多 UF_6 的生成,停留时间建议控制在 1.33 h。

2.6 工业连续稳定运行验证

根据上述试验控制氟化尾气量为 30 m^3/h,床层温度为 210 ~ 230 ℃,停留时间为 1.06 h,脉冲周期为 10 s,对脉冲流化床氟气回收系统进行 1 个月试验,每天脉冲流化床出口气体中的氟气体积分数如表 1 所示。可以看出,脉冲流化床在连续运行 1 个月内对尾气中氟气吸收良好,出口氟气体积分数均在 0.6% 以下,且随着系统运行时间的增加,脉冲流化床入口中尾气的氟气体积分数从 29% 降至 12% ~ 15%,归因于 UF_4 物料与尾气中氟气的预反应保障了尾气中氟气体积分数的降低,且当尾气吸收一段时间后,原料中为 UF_4 和铀的中间氟化物的混合物,反应效率更高[1]。同时,持续 1 个月的稳定运行将保证脉冲流化床出口氟气体积分数进一步降低至 0.01%。

表 1 连续运行条件下尾气中氟气吸收前后对比

Tab. 1 Comparison before and after absorption of fluorine gas in tail gas under continuous operation conditions

时间/d	吸收前氟气体积分数/%	吸收后氟气体积分数/%	时间/d	吸收前氟气体积分数/%	吸收后氟气体积分数/%	时间/d	吸收前氟气体积分数/%	吸收后氟气体积分数/%
1	29.5	0.5	10	14.3	0.01	19	15.4	0.04
2	29.7	0.4	11	15.1	0.01	20	15.3	0.01
3	30.1	0.6	12	15.2	0.01	21	15.2	0.01
4	29.2	0.5	13	15.5	0.01	22	15.4	0.01
5	28.9	0.4	14	14.4	0.01	23	15.3	0.01
6	12.7	0.01	15	14.5	0.01	24	15.3	0.01
7	12.5	0.01	16	14.7	0.01	25	15.6	0.04
8	12.9	0.01	17	15.3	0.01	26	15.4	0.01

对 UF_4 吸收氟气前后物料特性进行分析,吸收氟气前后固体物料显示 UO_2F_2 质量分数在增大,而 UO_2 质量分数在降低,表明氟气首先和 UO_2 发生反应,然后转变为 UO_2F_2,再进一步发生氟化反应。物料堆密度从 2.81 g/cm^3 降低至 2.74 g/cm^3,粒径从大颗粒(>75 μm)向中间颗粒(25 ~ 75 μm)转化,表明氟气吸收过程使大颗粒发生破裂,形成更多中间颗粒以及少量细颗粒,该过程有利于后端氟化反应的进行,能够预处理 UF_4 物料,从而提高氟化反应率。

3 结 论

1)设计并建立一套工业级脉冲流化床氟气回收系统,成功实现了氟化尾气中氟气的回收,整体氟气吸收率为 93% ~95%。

2)条件试验表明,脉冲引入会周期性扰动物流床层,从而降低床层压差,促进颗粒返混,提升传质效率。氟气吸收率随着温度增加而增大,最佳吸收温度为 210 ~ 230 ℃。脉冲流化床温度相比传统稳定流化床下降约 10%,更有利于作为热敏性物质反应器,系统处理能力最大可达 35 m^3/h,最佳停留时间为 1.33 h。

3)连续验证试验表明脉冲流化床系统运行稳定,出口氟气体积分数长期稳定在 0.01%。吸收 F_2 后 UF_4 物料的堆密度降低、粒径细化,有利于物料在后续氟化反应中提高转化效率。该工艺显著改善床层温度控制与气固接触效率,克服传统流化床的沟流与局部过热问题。

参考文献

[1]栗万仁, 魏刚, 姚守忠. 铀转化工艺学[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2012

Li Wanren, Wei Gang, Yao Shouzhong. Uranium conversion technology[M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2012

[2]Fis′ kov A A, Makaseev A Y. Utilization of spent sorbents based on lithium, calcium, and barium fluorides from the process of uranium hexafluoride purification[J]. Radiochemistry, 2011, 53: 284. DOI: 10.1134/S106636221103009X

[3]李培成. 浅析我国氟化工行业含氟废弃物资源化处置研究进展[J]. 有机氟工业, 2023(2): 57
Li Peicheng. A brief analysis of the research progress on resource disposal of fluorine-containing waste in China′s fluorine chemical industry[J]. Organic Fluorine Industry, 2023(2): 57

[4]Han Jianlin, Kiss L, Mei Haibo, et al. Chemical aspects of human and environmental overload with fluorine[J]. Chemical Reviews, 2021, 121(8): 4678

[5]Sheldon D J, Crimmin M R. Repurposing of F-gases: challenges and opportunities in fluorine chemistry[J]. Chemical Society Reviews, 2022, 51(12): 4977. DOI: 10.1039/D1CS01072G

[6]李占臣, 魏强, 姚玉婷, 等. 铝合金生产中含氟废气的二段式喷淋处理工程[J]. 环境工程, 2012, 30(增刊2): 207
Li Zhancheng, Wei Qiang, Yao Yuting, et al. Two-stage spray treatment of fluorine-containing waste gas in aluminum alloy production[J]. Environmental Engineering, 2012, 30(S2): 207. DOI: 10.13205/j.hjgc.2012.s2.093

[7]Alva R E, Pacheco P M, Gómez B F, et al. Non-thermal plasma for exhaust gases treatment[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2015, 10: 301. DOI: 10.1007/s11465-015-0344-z

[8]Zhang Xiaoxing, Cui Zhaolun, Li Yalong, et al. Abatement of SF_6 in the presence of NH_3 by dielectric barrier discharge plasma[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 360: 341. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.07.115

[9]刘海刚. 改性氧化铝的制备及对铝电解 HF 气体吸附性能研究[J]. 轻金属, 2016(9): 18
Liu Haigang. Preparation of modified alumina and study on the adsorption performance of HF gas in aluminum electrolysis[J]. Light Metals, 2016, (9): 18. DOI: 10.13662/j.cnki.qjs.2016.09.005

[10]欧健, 李天祥, 隋岩峰, 等. 工业含氟废气处理及资源回收的概述[J]. 无机盐工业, 2021, 53(5): 39
Ou Jian, Li Tianxiang, Sui Yanfeng, et al. Overview of industrial fluorine-containing waste gas treatment and resource recovery[J]. Inorganic Salt Industry, 2021, 53(5): 39

[11]刘大伟, 魏刚, 潘锋. 氟化工艺尾气中 F_2、UF_6 回收工艺研究[J]. 科技视界, 2018(28): 28
Liu Dawei, Wei Gang, Pan Feng. Research on F_2 and UF_6 recovery process in fluorination process tail gas[J]. Science and Technology Vision, 2018(28): 28. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2018.28.010

[12]Li Hongwei, Wang Lei, Wang Ting, et al. Experimental and CFD-DEM numerical evaluation of flow and heat transfer characteristics in mixed pulsed fluidized beds[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(8): 3144

[13]Li Yanjiao, Zhu Fenglong, Zhang Yadong, et al. Characterization of bubble behaviors in a dense phase pulsed gas-solid fluidized bed for dry coal processing[J]. Particuology, 2020, 53: 83. DOI: 10.1016/j.partic.2020.01.002

[14]Nitz M, Taranto O P. Drying of beans in a pulsed fluid bed dryer: drying kinetics, fluid-dynamic study and comparisons with conventional fluidization[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 249. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.05.025

[15]Saidi M, Tabrizi H B, Grace J R. A review on pulsed flow in gas-solid fluidized beds and spouted beds: recent work and future outlook[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(6): 1121. DOI: 10.1016/j.apt.2019.03.015

[16]Li Zhanyong, Su Weiguang, Wu Zhonghua, et al. Investigation of flow behaviors and bubble characteristics of a pulse fluidized bed via CFD modeling[J]. Drying Technology, 2009, 28(1): 78. DOI: 10.1080/07373930903430785

[17]郭慕孙, 李洪钟. 流态化手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008
Guo Musun, Li Hongzhong. Handbook of fluidization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008

（编辑　刘　彤）