

模拟高放废液在回转煅烧过程中的出料研究

贺 诚, 孙惠琳, 李 争, 张克乾, 李 扬, 张 华*, 龙浩骑

中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

摘要: 在两步法冷坩埚玻璃固化工艺中, 高放废液在回转煅烧炉内经过蒸发、脱硝、煅烧成金属氧化物后掉落到冷坩埚内和基础玻璃珠一起熔融成玻璃固化体。为了使煅烧物出料量和玻璃珠进料量相匹配, 保证玻璃产品的包容量满足要求, 对回转煅烧炉不同工艺条件下的出料量和出料平衡时间进行了研究。结果表明: 煅烧物经历 25~30 min 的等待期和过渡期后会进入出料稳定期, 回转煅烧炉转速的降低、蔗糖添加量的减少和进料量的增加均会延长煅烧物达到稳定出料所需要的时间, 其中转速对其影响最大。连续实验过程中改变进料量会破坏回转煅烧炉内的固-液平衡, 伴随着旧固-液界面坍塌和新固-液界面的生成, 从而导致煅烧物的出料量发生变化, 经过一定的过渡期后煅烧物出料量重新达到稳定, 停止进料 15~20 min 后能将煅烧炉内的物料全部排出。煅烧物出料研究对优化和改进煅烧炉工艺, 实现煅烧炉和冷坩埚两台关键设备的联动, 推动两步法冷坩埚玻璃固化技术推向工程化具有一定的指导意义。

关键词: 煅烧物; 出料; 模拟高放废液; 平衡时间

中图分类号: TL941.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-9950(2026)01-0018-07

doi: 10.7538/hhx.2026.48.01.0018

Discharge of Simulated High Level Liquid Waste During Rotary Calcination

HE Cheng, SUN Huilin, LI Zheng, ZHANG Keqian, LI Yang, ZHANG Hua*, LONG Haoqi

Department of Radiochemistry, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

Abstract: In the two-step cold crucible vitrification process, high level liquid waste is evaporated, denitrated, and calcined in a calciner to form metal oxides. These oxides then fall into the cold crucible, where they are melted together with base-glass frit to produce a vitrified waste form. To ensure coordination between the calcined material and glass frit during the integrated operation of the calciner and cold crucible, and to guarantee that the waste loading of the final glass product meets requirements, this study investigated various process parameters in standalone calciner tests. These included the salt content of the waste solution, rotational speed of the furnace, sucrose dosage, as well as discharge rate and stabilization time under different operating conditions. The experimental results show that the calcined material enters a stable discharge period after a 25-30 minutes accumulation and transition stage. Factors such as lower salt content in the waste solution, reduced rotational speed, decreased sucrose addition, and higher feed rate all prolong the time required to reach stable discharge, with rotational speed having the

收稿日期: 2024-06-24; 修订日期: 2025-01-13

基金项目: 后处理专项 (BG202312100403)

* 通信联系人: 张 华

most significant effect. During stable discharge, a change in the feed rate leads to a transition period of about one hour before discharge stabilizes again. After stopping the feed, all material inside the calciner can be discharged within 15-20 minutes. This study on the discharge behavior of calcined materials provides valuable guidance for optimizing and improving the calcination process, enabling integrated operation of the calciner and cold crucible, and advancing the two-step cold crucible vitrification technology toward engineering application.

Key words: calcinate; discharge; simulated high level liquid waste; balance time

我国实行核燃料闭式循环策略,需对乏燃料进行后处理,以回收未反应的U和新产生的Pu,该过程中将产生大量高放废液^[1-3]。后处理厂产生的高放废液酸度高、放射性强、腐蚀性大,一直是制约核工业发展的瓶颈问题之一^[4]。目前国际上唯一工程化处理高放废液的方法是玻璃固化技术,我国也正在进行两步法冷坩埚玻璃固化工程样机的研制:高放废液首先在回转煅烧炉内通过蒸发、脱硝、煅烧形成具有一定尺寸的煅烧物粉末,然后与基础玻璃投送到冷坩埚坩埚体内,通过高温熔融最终形成均一的玻璃固化体^[5]。

中国原子能科学研究院(简称原子能院)对高放废液的回转煅烧技术进行了实验室规模的实验,对脱硝剂的选择、煅烧条件的选择进行了一系列的研究^[6-10],同时于2017—2020年进行了数次连续24 h和连续72 h煅烧炉单体实验,对煅烧物和尾气吸收液进行了分析^[11]。原子能院在2018年进行了连续24 h的冷坩埚玻璃固化单体运行实验,所得的玻璃固化体性能满足行业标准^[12]。

在之前的研究中,回转煅烧炉(简称煅烧炉)和冷坩埚都是单体运行的,同时冷坩埚运行时并未加入煅烧物,所使用的原料为基础玻璃珠和化学试剂(由模拟高放废液中硝酸盐含量转化为相应的氧化物含量)。而在实际的工程运行过程中,由于煅烧炉和冷坩埚用直筒型的转接装置连接,煅烧产物从煅烧炉炉尾连续掉入冷坩埚,而基础玻璃珠则是通过玻璃进料系统称量后批次进入冷坩埚,为了使玻璃产品的包容率满足要求,需要使煅烧物的出料量和玻璃珠的进料量匹配起来,此时就需要对煅烧物在运行过程中的出料量进行研究。

前期实验结果表明在长期运行过程中存在许多情况:煅烧物在煅烧炉内有一定的夹带和滞留,导致实际出料量比理论出料量低;在冷坩埚出料阶段,若煅烧炉停止进料,恢复进料后煅烧

物的出料量需多长时间重新达到稳定;在稳定运行阶段,若因工艺需要调整煅烧炉的进料量,此时的出料量如何变化以及多长时间重新达到出料平衡;在运行结束阶段,停止进料后煅烧炉内残留的煅烧物多长时间排空等。当出现上述情况时,玻璃珠的进料量需要根据不同工况下煅烧物的实际出料量做出相应的调整,所以有必要对煅烧炉不同阶段和不同工况下的出料量进行研究,确保玻璃包容量在整个运行周期内均满足要求。

本工作拟针对燃耗55 GWd/t(以U计,下同)核燃料后处理厂的模拟高放废液,在中国原子能科学研究院自主研发的ERP型回转煅烧炉上进行煅烧炉出料工艺实验,对煅烧炉运行阶段和停止进料阶段的煅烧物出料量进行研究,并考察煅烧炉出料速率的变化。同时针对增大进料量、降低进料量、暂停进料后重新进料等可能出现的运行情况,对煅烧物出料量的变化和重新达到出料平衡所需要的时间等进行研究。实验结果对优化和改进煅烧炉工艺,实现煅烧炉和冷坩埚两台关键设备的联动,推动两步法冷坩埚玻璃固化技术推向工程化具有重大的指导意义。

1 实验部分

1.1 主要仪器与设备

本实验在原子能院自主研发的回转煅烧炉科研样机上进行,图1为回转煅烧炉的示意图,回转煅烧炉尺寸为7618 mm×1600 mm×1490 mm,额定加热功率为204 kW,一区到四区加热温度依次为600、640、850、880 °C,废液在前两段实现蒸发,后两段实现脱硝煅烧。

LQ-C20002型电子天平,精度为0.0001 g,上海瑶新电子科技有限公司。

1.2 模拟废液组成

废液源项为我国后处理大厂运行过程产生的模拟高放废液。工艺实验用燃耗为55 GWd/t

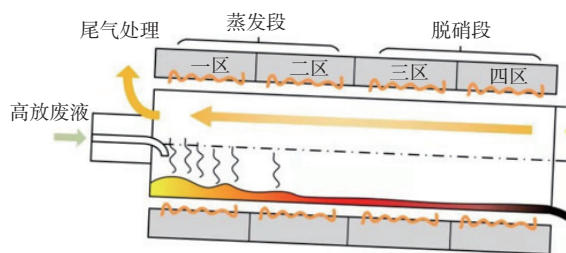


图1 煅烧炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calciner

(以U计)的模拟高放废液(含渣水),其中渣水的主要成分为Zr,来自于乏燃料切割过程产生的不溶性残渣。渣水与模拟高放废液的体积比为3.6:1,经过计算后得出含渣水的模拟高放废液组分列入表1^[9]。

表1 模拟高放废液的组成^[9]Table 1 Composition of simulated high level liquid waste^[9]

组分	$\rho/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	组分	$\rho/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$
NaNO ₃	13.99	SeO ₂	0.29
AgNO ₃	0.16	Sm(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	2.41
Ba(NO ₃) ₂	4.54	SnO ₂	0.22
Cd(NO ₃) ₂	0.29	Sr(NO ₃) ₂	2.39
Ce(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	7.38	TeO ₃	1.85
CsNO ₃	4.82	Y(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	1.80
Eu(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	0.41	Zr(NO ₃) ₄ ·5H ₂ O	17.67
Gd(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	0.46	NaMnO ₃ ·3H ₂ O	1.72
La(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	5.32	Pr(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	3.41
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	22.11	RbNO ₃	0.79
Nd(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	13.62	Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	9.53
Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	3.50	Ag	0.001
ZrO ₂	5.84	Σ	125

注:模拟高放废液燃耗为55 GWd/t(含渣水);原废液中的放射性元素和贵金属元素用同族的非放元素等摩尔代替,渣水中的Zr用氧化锆替代,酸度为2 mol/L HNO₃。

将表1中的组分按照文献[13]的方法配制成模拟高放废液,所用试剂均来自国药集团,分析纯。

1.3 实验过程

实验设备流程:将配制的模拟高放废液暂存于模拟废液储罐,实验前通过液体进料单元将废液注入供液罐。实验开始后,开启回转煅烧炉加热,调到设定的转速,待达到设定温度且煅烧炉内温度平衡后,向回转煅烧炉通入去离子水(目的是为了缓解进液后炉内的压力变化),待炉内温度和压力稳定后停止通水,液体进料单元通过供液罐和添加剂罐向炉内按照一定的糖硝比(添

加剂蔗糖与废液中硝酸根的摩尔比)进料,产生的煅烧物存入煅烧物暂存罐。

(1) 煅烧炉启动

首先将回转煅烧炉转速调至5~10 r/min,同时将煅烧炉各加热段按预设程序升温,待温度达到目标温度后调节转速至设定转速(炉头到炉尾四区温度分别为600、640、850、880℃),同时开启尾气系统的循环泵和风机,调节补气阀使负压维持在-1000~-200 Pa之间,待温度重新稳定后开始以额定流量进模拟高放废液。

(2) 煅烧炉运行

进料后继续调节补气阀使煅烧炉炉头、炉尾压差保持在-500~-300 Pa。

(3) 煅烧炉停炉

实验达到预定时长后关闭进料系统;停止进料30 min后,关闭压空冷却、风机、尾气系统循环泵,关闭煅烧炉加热系统,调节煅烧炉转速在5~10 r/min,使炉管缓慢降温。在实验过程中,从煅烧炉开始出料起,每隔5 min称量煅烧物的出料量并取样编号,直至实验结束。

1.4 实验方法及条件

根据文献[14-15],高放废液在煅烧炉内从液体进料到固体出料所需的时间分为3段:高放废液从进入炉管到被加热到沸腾温度的时间 t_h ,液体蒸发时间 t_b ,煅烧物煅烧时间 t_d 。具体如式(1—3)。

$$t_h = \frac{0.55(1+\beta)}{\chi} \left(\frac{Q}{\sqrt{R}} \cdot \frac{\nu}{g \sin \alpha} \right)^{3/7} \ln \frac{T_{r,s} - T_0}{T_{r,s} - T_g} \quad (1)$$

$$t_b = 1.28 \frac{\gamma \rho (1 + \beta_1)}{A \Delta T^3} \left(\frac{Q}{\sqrt{R}} \cdot \frac{\nu}{g \sin \alpha} \right)^{2/7} \left[1 - \left(\frac{C_0}{\rho_s} \right)^{2/3} \right] \quad (2)$$

$$t_d = 1.77 \frac{L}{R} \cdot \frac{\sqrt{\theta}}{n \alpha} \quad (3)$$

式中: β 、 β_1 为考虑到气液两相换热过程的热损失系数; χ 为热扩散系数; Q 为高放废液进料速率; R 为炉管内径; ν 为高放废液的运动黏度; α 为炉管的水平倾角; n 为炉管转速; $T_{r,s}$ 、 T_0 、 T_g 分别为回转煅烧炉内表面温度、高放废液的进料温度和高放废液的沸腾温度; γ 为蒸发热; ρ 为蒸发高放废液的密度; C_0 为高放废液中盐分的浓度; ρ_s 为高放废液沉淀的密度; L 为干燥煅烧段的炉程; θ 为煅烧物的运动休止角; $\Delta T = T_{r,s} - T_g$; g 为重力加速度; A 为修正参数。

由上可知,影响煅烧物出料量的因素主要为

炉管转速、进料量和高放废液的运动黏度,而蔗糖添加量对高放废液蒸发过程的运动黏度影响最大,所以本工作主要针对不同转速、进料量和蔗糖添加量开展研究,同时针对煅烧炉运行过程中可能存在的进料量增加、减少和停止进料等情况,开展煅烧炉的出料情况研究。

2 结果与讨论

2.1 煅烧炉运行阶段出料情况

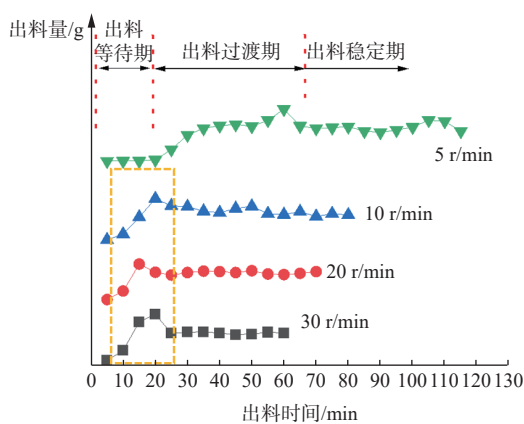
(1) 转速对煅烧物出料情况的影响

前期研究结果表明煅烧物出料可分为三个过程:出料等待期、出料过渡期和出料稳定期。模拟高放废液在炉管内蒸发、干燥、煅烧,通过一段时间后从炉尾掉落下来,这段时间称为煅烧物出料的等待期。不同转速下煅烧物的出料量变化示于图2。由图2可知:煅烧物的出料等待期时间较短,一般为5~10 min,但随着炉管转速的降低,特别是当煅烧炉转速降到5 r/min时,等待时间达到20 min。这是因为转速很低时,模拟高放废液在炉内发生滑落和滚落,此时大部分水因为重力作用处于炉管底部,结合式(2)和式(3),由于水在炉内的蒸发效率降低,从而使模拟高放废液蒸发干燥所需的时间延长,同时随着转速降低,煅烧物煅烧时间更长,这两者导致煅烧物的出料等待时间从30 r/min时的5 min延长到5 r/min时的20 min。在炉管内蒸发后的模拟高放废液会慢慢变成黏稠状的沉淀,随着模拟高放废液持续进入到煅烧炉内,粘在炉管壁上的沉淀会逐渐干

燥脱落,但同时又有新的沉淀粘在炉管壁上。刚开始时粘在炉管壁上的沉淀脱落速率远大于沉淀的生长速率,导致出料量增加。随后沉淀的脱落速率逐渐降至与沉淀的生成速率相等,出料量又慢慢降低,这个过程称为煅烧物出料的过渡期。当转速从30 r/min降到10 r/min时,过渡期时间变化不大,约为20~25 min。但是当转速降到5 r/min时,出料过渡期时间延长到40 min。通常来说出料过渡期时间是由煅烧物在固-液界面处的脱落速率和煅烧物煅烧时间决定的,当煅烧物脱落越慢,煅烧时间越长,则出料过渡期时间越长。当煅烧炉转速降低时,煅烧物脱落速率降低。而且随着转速降低,模拟高放废液蒸发效率变慢,固-液界面后移,当转速为5 r/min时固-液界面在煅烧炉三区中段($L=1.68$ m),而转速在10~30 r/min时固-液界面在煅烧炉二区($L=1.98\sim 2.43$ m)。从式(3)可知,煅烧物煅烧时间与转速成反比,与 L 成正比,但是与转速对煅烧时间的影响相比, L 的变化很小,其对煅烧时间的影响可以忽略不计,当转速由30 r/min降到5 r/min,煅烧时间延长,所以出料过渡期的时间随转速降低而延长。且根据前面的分析,煅烧物的出料等待期也随着转速降低而延长,故煅烧物达到稳定出料所需的时间由30 r/min时的25 min延长到5 r/min时的70 min。除非煅烧炉运行工艺条件发生变化,煅烧物经过过渡期后出料量逐渐趋于稳定,称为出料稳定期。在两步法冷坩埚连续运行时,为了保证废物玻璃体的包容量,煅烧物的出料量会影响玻璃珠的加入量。虽然煅烧物在刚开始出料时会经过等待期-过渡期-稳定期,但1 h内能达到出料平衡,基本不会影响玻璃珠的加入量。

(2) 进料量对煅烧物出料情况的影响

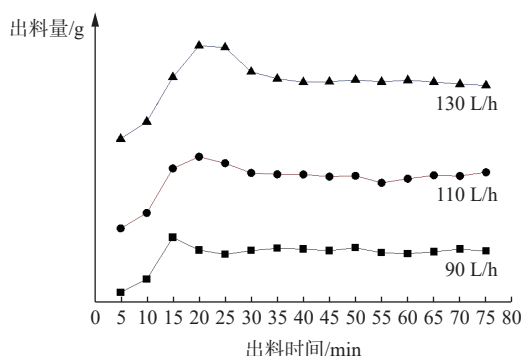
不同进料量下煅烧物的出料变化示于图3,规律与上述分析结果一致。由图3可知:经过5 min的出料等待期和20~25 min的出料过渡期后,固-液界面处煅烧物的脱落和生成达到平衡,随后进入出料稳定期。进料量的增加会使废液蒸发效率降低,但是从实验现象来看,当进料量在90~130 L/h时,固-液界面均在煅烧炉二区附近,变化不大,说明当前煅烧温度下煅烧炉的蒸发效率足够高。但是进料量越大,固-液界面处堆积的煅烧物越多,此处煅烧物的脱落和生成更难平衡,导致煅烧物稳定出料的时间由25 min延长到40 min。



进料量 110 L/h, 蔗糖添加量 30 g/L。

图2 不同转速下煅烧物的出料量变化图

Fig. 2 Discharge variation chart of calcinate with different rotation



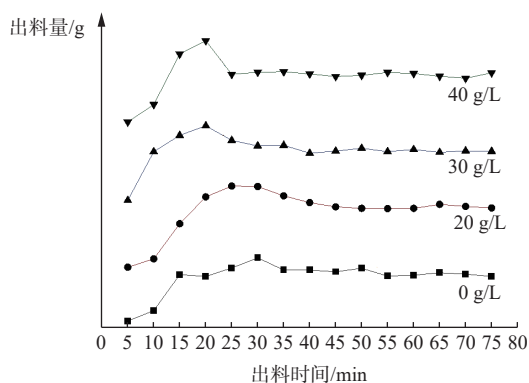
转速 30 r/min, 蔗糖添加量 30 g/L。

图 3 不同进料量下煅烧物的出料变化图

Fig. 3 Discharge variation chart of calcinate with different feed rate

(3) 蔗糖添加量对煅烧物出料情况的影响

不同蔗糖添加量下煅烧物的出料变化图示于图 4。由图 4 可知:当蔗糖添加量由 0 g/L 增加到 40 g/L 时,煅烧物的出料过渡期会缩短,能更快达到稳定出料,这是因为蔗糖受热后熔融形成黏度较大的液体,高温下分解产生的气相小分子使废液蒸干后的沉淀呈疏松的泡沫状形态^[8],在煅烧炉内更容易形成稳定的固-液界面,煅烧物在界面处的生成和脱落速率更容易达到平衡,所以煅烧物稳定出料所需的时间也更短。



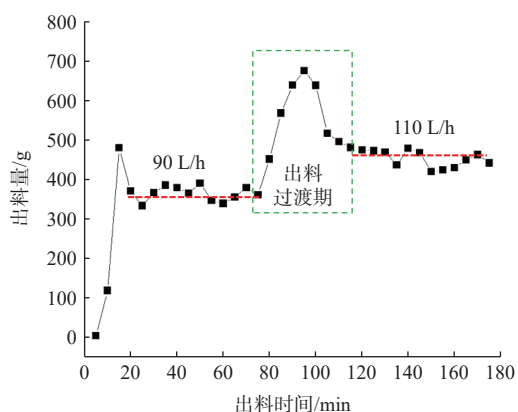
转速 30 r/min, 进料量 110 L/h。

图 4 不同蔗糖添加量下煅烧物的出料变化图

Fig. 4 Discharge variation chart of calcinate with different sucrose addition

(4) 改变进料量后煅烧物的出料情况

煅烧炉的进料量由 90 L/h 增加到 110 L/h 时煅烧物的出料量变化示于图 5。由图 5 可知:当进料量为 90 L/h 时,煅烧物经过 5 min 的等待过程,然后经过 15~20 min 的出料过渡期后达到稳定出



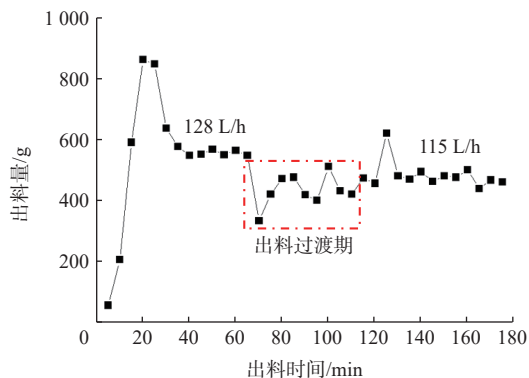
转速 30 r/min, 蔗糖添加量 30 g/L。

图 5 进料量增加时煅烧物的出料变化图

Fig. 5 Discharge variation diagram of calcinate with increasing feed rate

料期;方框部分为进料量由 90 L/h 增加到 110 L/h 时煅烧物出料的过渡期,时间约为 35 min,期间经历了旧固-液界面的坍塌和新固-液界面的形成。随着进料量的增加,模拟高放废液的蒸发效率降低,原本形成的固-液界面会被水流逐渐冲垮,导致煅烧物的出料量增加,而后模拟高放废液会在新的位置生成新的固-液界面,煅烧物逐渐进入出料稳定期。

煅烧炉的进料量由 128 L/h 降低到 115 L/h 时煅烧物的出料量变化示于图 6。由图 6 可知:当进料量为 128 L/h 时,煅烧物经过 5 min 的等待时间,然后经过 25~30 min 的出料过渡期后达到出料稳定期;当进料量降至 115 L/h 后,煅烧物出料量会降低,而且煅烧物重新达到稳定出料的过



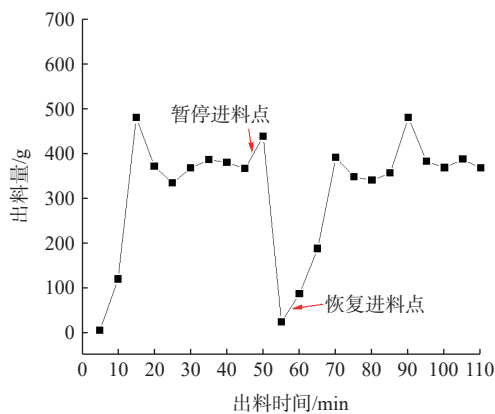
转速 30 r/min, 蔗糖添加量 30 g/L。

图 6 进料量降低时煅烧物的出料变化图

Fig. 6 Discharge variation diagram of calcinate when feed rate decreases

期比图5(增加进料量)时的更长,由35 min增加到65 min。这主要是因为虽然在出料过渡期内均经历了旧固-液界面的坍塌和新固-液界面的形成,但是增加进料量会将旧固-液界面冲垮,加速其坍塌,而降低进料量则是旧固-液界面的自然坍塌。

煅烧炉运行过程中暂停进料后恢复进料的出料情况示于图7。由图7可知:当煅烧炉停止进料后,煅烧物的出料量迅速减少,而恢复进料后其出料量快速上升,整个过程中虽然只停止进料10 min,但煅烧物重新达到稳定出料需要20~25 min。



恢复前后进料量相等, 30 r/min, 蔗糖添加量 30 g/L。

图7 暂停进料时煅烧物的出料变化

Fig. 7 Discharge variation diagram of calcinate during suspension of feeding

2.2 煅烧炉停止进料后的出料情况

停止进料后煅烧物的出料变化示于图8。由图8可知:当煅烧炉停止进料后,煅烧物的出料量

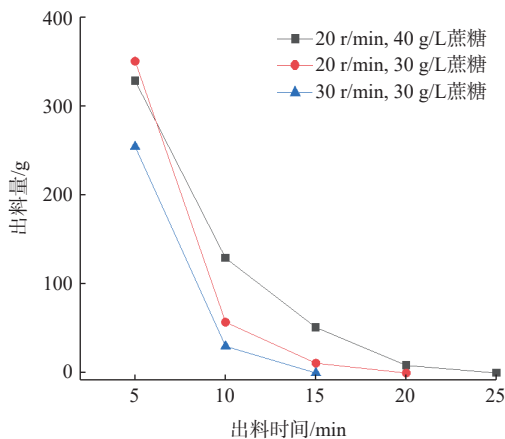


图8 停止进料后煅烧物的出料变化图

Fig. 8 Discharge variation diagram of calcinate after stopping feeding

几乎直线下降,15~20 min后能将所有煅烧物从炉内排空。排空时间包括固-液界面处煅烧物的干燥、坍塌和煅烧物坍塌后在炉管内的停留时间。经过测量分析,煅烧物的固-液界面在炉管第二区中部,根据式(3),煅烧物在炉管内的停留时间约为1.2 min。

但煅烧炉停止进料后多久能将煅烧炉内的物料排空主要取决于固-液界面处煅烧物的干燥和坍塌时间,转速越快、蔗糖添加量越少,其排空速率越快。根据实验经验,当停止进料后往煅烧炉内进水或者增加煅烧温度也能大幅度地缩短物料排空时间。

3 结论

针对两步法冷坩埚玻璃固化技术中煅烧炉在不同工艺条件和不同工况运行时煅烧物的出料量和平衡时间进行了研究,得出结论如下:

(1) 煅烧物在出料初期会经过等待期和过液期两个过程,通常来说出料30 min能达到稳定出料;煅烧炉转速的降低、蔗糖添加量的减少和进料量的增加都会延长煅烧物达到稳定出料所需要的时间,其中转速对其影响最大;

(2) 在煅烧炉连续运行过程中改变进料量会破坏煅烧炉内的固-液平衡,伴随着旧固-液界面坍塌和新固-液界面的生成,从而导致煅烧物的出料量发生变化,经过一定的过渡期后煅烧物出料量重新达到稳定;

(3) 在煅烧炉停止进料15~20 min后能将煅烧炉内的物料全部排出。

参考文献:

- [1] 吴华武.核燃料化学工艺学[M].北京:中国原子能出版社,1989.
- [2] 刘学刚,徐景明,梁俊福,等.乏燃料后处理和高放废液分离一体化流程研究进展[J].科技导报,2006,24(7):77-81.
- [3] 叶国安,张虎.核燃料后处理技术发展及其放射化学问题[J].化学进展,2011,23(7):1289-1294.
- [4] 顾忠茂.核废物处理技术[M].北京:中国原子能出版社,2009.
- [5] 罗上庚.放射性废物处理与处置[M].北京:中国环境科学出版社,2007.
- [6] 巴伟伟,贺诚,张华.温度及甲硝比对模拟动力堆高放废液甲酸及甲醛脱硝的影响[C]//中国核科学技术进展报告(第六卷):中国核学会2019年学术年会论文集第6册(核化工分卷、辐射防护分卷).2019.

- [7] 贺诚,张华,李争,等.煅烧条件对模拟高放废液煅烧产物物理化学性质的影响[J].核化学与放射化学,2021,43(6): 465-472.
- [8] 李争,李泉鑫,张华,等.蔗糖脱硝对模拟动力堆高放废液煅烧产物性能及结构的影响[J].原子能科学技术,2022,56(3): 434-442.
- [9] 贺诚,张华,李争,等.煅烧温度和蔗糖添加量对模拟高放废液煅烧物性能的影响[J].核化学与放射化学,2025,47(1): 68-77.
- [10] 张华,李宝军,李扬,等.基于高斯克里金代理模型对模拟高放废液煅烧产物性能影响因素的研究[J].核化学与放射化学,2023,45(1):76-86.
- [11] 李宝军,李玉松,朱冬冬,等.模拟高放废液冷坩埚玻璃固化熔制工艺对尾气挥发影响的研究[M]//中国原子能科学研究院年报,北京:中国原子能出版传媒有限公司,2019.
- [12] 刘丽君,鄯东生,李扬,等.冷坩埚玻璃固化模拟高放废液的24 h连续运行实验研究[J].原子能科学技术,2018,52(12): 2214-2221.
- [13] 汪润慈,李扬,鄯东生,等.模拟放射性废液的配制方法:CN113466002A[P].2021-10-01.
- [14] Kascheev V A, Podymova T V. Modeling of the behavior of liquid radwastes in a rotary calcination furnace[J]. *At Energy*, 2012, 113(2): 106-111.
- [15] Sullivan J, Maier C, Ralston O. Passage of solid particles through rotary cylindrical kilns[R]. Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1927.