

高放废液回转煅烧炉的启动方法

贺 诚, 张 华*, 张克乾, 李 扬, 李 争, 孙惠琳, 明玉周, 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, 当高放废液刚开始进料时, 回转煅烧炉内温度较高, 液体在高温炉管上容易发生莱顿弗罗斯特效应, 导致最初一批高放废液不能完全实现前部蒸发、后部煅烧的工艺过程。当高放废液进料量过大时, 更有高放废液从炉尾流出的风险, 所以需要在进高放废液之前借由水(或稀释的高放废液)带走炉膛内多余的热量使温度降低, 这个过程称为回转煅烧炉的启动过程。本工作研究了水、稀释模拟高放废液、模拟高放废液三种启动介质在 5、15、30 r/min 三种转速下对回转煅烧炉低温启动和高温启动的影响。启动验证试验结果表明: 低温启动时, 启动效果为水 > 稀释的模拟高放废液 > 模拟高放废液, 推荐的转速为 15 r/min, 流速为 40 L/h; 高温启动时, 启动效果为模拟高放废液和蔗糖的混合溶液 ≈ 稀释的模拟高放废液 > 水, 推荐的转速为 30 r/min, 流速为 80 L/h。并且通过试验验证了上述两种启动工艺的可行性, 试验结果对优化回转煅烧炉工艺, 推动两步法冷坩埚玻璃固化技术进入工程化具有一定的指导意义。

关键词: 回转煅烧炉; 启动; 水; 模拟高放废液; 转速

中图分类号: TL941.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-9950(2025)02-0142-08

doi: 10.7538/hhx.2025.47.02.0142

Starting Method of High Level Liquid Waste Rotary Calciner

HE Cheng, ZHANG Hua*, ZHANG Ke-qian, LI Yang, LI Zheng,
SUN Hui-lin, MING Yu-zhou, LONG Hao-qi

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

Abstract: In the two-step cold crucible induction melting vitrification process, the Leidenfrost effect can lead to the formation of a vapor layer on the furnace tube when high level liquid waste (HLLW) is introduced. This phenomenon occurs due to the high temperature of the rotary calciner, preventing the initial batch of liquid from fully evaporating and calcining. Additionally, excessive feed quantities increase the risk of high level liquid waste exiting the furnace prematurely. To address this, excess heat must be removed by introducing water (or high level liquid waste) before feeding the HLLW, a procedure known as the calciner start-up process. This study investigated the effects of three start-up media: water, diluted HLLW, and simulated HLLW at rotational speeds of 5 r/min, 15 r/min, and 30 r/min on both low- and high-temperature start-up processes. The results of verification test indicate that for low-temperature start-up, water is the most effective medium, followed by diluted HLLW and simulated HLLW. The recommended parameters are a rotational speed of 15 r/min and a flow rate of 40 L/h. For high-temperature

收稿日期: 2023-12-13; 修订日期: 2024-03-27

基金项目: 后处理专项科研项目 (BG202312100403)

* 通信联系人: 张 华

start-up, simulated high level liquid waste with sucrose and diluted HLLW have similar effects, both of which are superior to water. The suggested parameters are a rotational speed of 30 r/min and a flow rate of 80 L/h. The feasibility of these start-up processes was confirmed through experimental validation. These findings provide valuable insights for optimizing the rotary calciner process and advancing the engineering application of the two-step cold crucible induction melting vitrification technique.

Key words: rotary calcination furnace; start-up; water; simulated high level liquid waste; rotational speed

乏燃料后处理产生的高放废液放射性强、酸性高、腐蚀性大,不能长期储存,必须进行进一步的处理。玻璃固化是目前唯一工程应用的高放废液处理技术。我国自主研发的两步法冷坩埚玻璃固化技术的第一步是煅烧,当回转煅烧炉达到设定温度后,高放废液从回转煅烧炉的炉头进料,经过蒸发、脱硝、煅烧后变成具有一定尺寸的氧化物颗粒^[1-3],然后垂直掉落到冷坩埚内与基础玻璃珠熔融为玻璃固化体。

本课题组长期从事模拟高放废液煅烧工艺研究,针对实验室规模的小型回转煅烧炉,开展了不同煅烧条件和不同脱硝剂对煅烧物性能的影响研究^[4-8],已初步确定了煅烧工艺参数,但由于存在莱顿弗罗斯特效应(莱顿弗罗斯特效应是一种常见的物理现象,当液态的水接触到一个远高于其沸点的高温物体时,最先接触到物体的水就会瞬间蒸发变为水蒸气,而水蒸气的导热极差,因此会将液体和高温物体隔开,导致被水蒸气保护的液体存在时间延长^[9]),在回转煅烧炉放大装置上进行试验时,最初一批高放废液不能完全实现前部蒸发、后部脱硝煅烧的工艺过程,使煅烧物性能不满足要求,当高放废液进料量过大时,更有高放废液从炉尾流出的风险,所以需要在进高放废液之前借由水(或稀释的高放废液)带走炉膛内多余的热量使温度达到平衡,这个过程称为回转煅烧炉的启动过程。

在两步法冷坩埚玻璃固化联动试验过程中,需要在冷坩埚完成启动过程^[10-11]、待冷坩埚内玻璃珠融化到一定程度的前提下,回转煅烧炉才开始加热启动,启动过程完成后开始进高放废液能有效改善煅烧物出料初期的产品性能,同时降低进料量过大时炉尾流水的风险。但是在实际运行过程中,会出现设备出现故障或工艺需要调整等情况,回转煅烧炉需要停止进料,保温待机,待设备恢复正常或工艺调整后重新进料,需要研究

回转煅烧炉在运行温度下的快速启动方案,使回转煅烧炉迅速恢复到正常工况。

不同的启动介质及流量带走的热量不同,会影响炉内液体的蒸发效率从而影响炉内最终的热量平衡^[12],同时回转煅烧炉转速会影响介质在炉管内的停留时间^[13]从而影响炉内最终的热量平衡。为了保证高放废液刚开始进料时不发生莱顿弗罗斯特效应,本工作拟对不同启动介质、启动介质流量及回转煅烧炉转速进行工艺研究,以确定最终的启动方案。

1 试验过程

1.1 启动介质

1) 去离子水

去离子水氯离子质量浓度不高于 25 mg/L,氟离子质量浓度不高于 2 mg/L,电导率不高于 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$,电阻率不低于 2500 $\Omega\cdot\text{cm}$,pH 为 6.0~8.0,无浑浊、无油、无沉淀物。

2) 模拟高放废液

废液源项为我国后处理大厂运行过程产生的高放废液。工艺试验用含渣水的燃料为 55 GWd/t(以 U 计)的模拟高放废液,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。

使用的模拟高放废液按文献 [14] 的方法进行配制,使用的试剂均来自国药集团,纯度为分析纯。

3) 稀释的模拟高放废液

将模拟高放废液用去离子水 1 : 1(体积比)稀释后得到稀释后的模拟高放废液。

1.2 试验设备及流程

图 1 为回转煅烧炉的示意图,试验所用 ERP 型回转煅烧炉装置尺寸为 7 618 mm \times 1 600 mm \times 1 490 mm,额定加热功率为 204 kW,一区到四区加

表1 含渣水的模拟高放废液的组成

Table 1 Composition of simulated high level liquid waste containing slag water

化学试剂	质量浓度/(g·L ⁻¹)	化学试剂	质量浓度/(g·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 ₄ ·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		(125.00)

注: La代替U; Ce代替Pu; Nd代替Np、Am和Cm; Co代替Ru和Rh; Ni代替Pd; Mn代替Tc, Ru/Rh/Pd用银粉替代, Zr用氧化锆替代; 括号内数据为总质量浓度

热温度分别为600、640、850、880℃, 废液在前两区实现蒸发, 后两区实现脱硝煅烧。

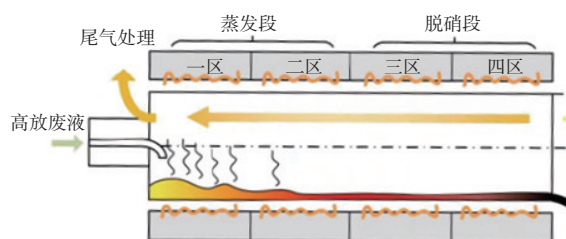


图1 回转煅烧炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rotary calcination furnace

试验流程: 将预先配制的模拟高放废液、稀释后的模拟高放废液和去离子水分别暂存于模拟废液罐、添加剂罐和去离子水罐中。开启回转煅烧炉加热, 将炉管调到设定的转速, 待达到设定温度且回转煅烧炉内温度平衡后, 向回转煅烧炉通入一定流速的相应介质液体, 将炉头负压维持在-500~-100 Pa, 观察炉管内液体蒸发情况(进模拟高放废液和稀释的模拟高放废液时观察炉内固-液界面的位置), 并观察煅烧物出料情况, 如果炉尾流出液体则记录从进液开始到炉尾流出液体所需要的时间。

1.3 试验条件

实验中使用去离子水、稀释的模拟高放废液

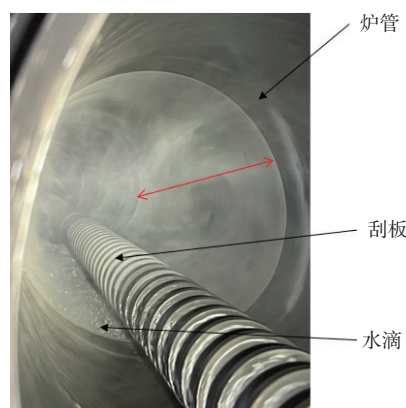
和模拟高放废液作为回转煅烧炉启动过程的介质, 在高温启动过程中, 为了改善启动效果, 模拟高放废液中添加了一定量的蔗糖。在低温启动时, 介质流速设置在30~60 L/h; 高温启动时, 介质流速设置在60~80 L/h; 回转煅烧炉转速为5、15、30 r/min。高温启动时的各区温度为600、640、850、880℃, 低温启动时的各区温度均为300℃。

2 结果与讨论

2.1 莱顿弗罗斯特温度点的确定

回转煅烧炉运行时, 炉管表面温度较高, 刚进入炉管的水以液滴的形式存在, 当其与炉管接触后迅速沸腾, 其表面形成的水蒸气保护层会使内部水珠保持液体的状态, 从而使水滴快速滚动至炉尾而流出。所以为了避免在运行中发生莱顿弗罗斯特效应, 需要先探究水在Inconel 690不锈钢(炉管材质)中的莱顿弗罗斯特温度点。

回转煅烧炉各区温度依次升高到600、640、850、880℃后, 往回转煅烧炉内通入80 L/h的去离子水, 直到回转煅烧炉内出现莱顿弗罗斯特效应(图2)。炉管中部由于发生莱顿弗罗斯特效应, 水滴直接从炉管上滚过去, 并未将中部的炉管润湿。而回转煅烧炉炉管前段(液体蒸发带走热量)和后段(位于加热模块外)由于温度较低, 并未发生该效应, 导致炉管被水润湿。通常来说, 炉管发生莱顿弗罗斯特效应与水流量和炉内温度有关, 当水流量一定时, 降低炉管后两区温度会使发生莱顿弗罗斯特效应的区域逐渐减小, 直至达到某一温度时炉管内不发生莱顿弗罗斯特效应, 此时整根炉管都将被水润湿。根据试验



红箭头部分为发生莱顿弗罗斯特效应的区域

图2 回转煅烧炉内的莱顿弗罗斯特效应

Fig. 2 Leidenfrost effect in rotary calcination furnace

现象来看, 当后两区温度逐渐降低到 300 °C 时, 整根炉管逐渐被水润湿, 说明水在 Inconel 690 不锈钢中发生莱顿弗罗斯特效应的起始温度为 300 °C 左右。

Inconel 690 不锈钢是一种镍基合金, 主要成分为 Ni、Cr、Fe, 表 2 为不同金属材料发生莱顿弗罗斯特效应的起始温度点。由表 2 可知: Fe 和 Ni 的莱顿弗罗斯特温度分别为 324 °C 和 300 °C, 而 Inconel 690 不锈钢中 Ni 和 Fe 的质量分数占 80% 以上, 所以其莱顿弗罗斯特温度在 300 °C 左右是合理的。

表 2 常见金属的莱顿弗罗斯特温度点

Table 2 Leidenfrost temperature point of common metals

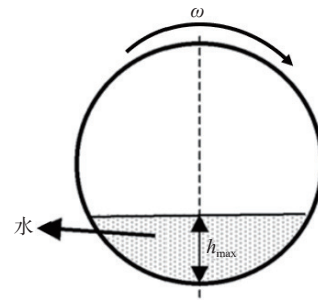
材料	莱顿弗罗斯特温度/°C	材料	莱顿弗罗斯特温度/°C
Fe	324	Ni	300
Al	300	Ag	200
Cu	328	Inconel 690 不锈钢	≈300
Zn	419		

2.2 低温启动工艺研究

低温启动是指回转煅烧炉温度还未达到运行温度时开始进启动介质, 试验中将低温启动的温度设定在 300 °C。正如前面所述, 炉管发生莱顿弗罗斯特效应与进水流速和炉内温度有关, 当温度一定时, 液体流速将是影响水能否发生莱顿弗罗斯特效应的关键因素。所以需要探究不同流速的水在启动过程中是否发生莱顿弗罗斯特效应, 同时需要考察该温度对不同水流速的蒸发效率, 最后综合判断选择最佳的启动流速。

水在回转煅烧炉内的液面高度示于图 3。回转煅烧炉炉管转速会影响水在炉管内的分布状态, 转速慢时水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, 而当转速加快时, 靠近炉管的液面层由于离心力作用变薄, 导致水在炉内的蒸发效率提高^[10]。同时炉管转速还会影响水在炉管轴向上的分速度, 从而影响水在炉管内的停留时间, 所以需要探究不同的炉管转速下的启动工艺。

从前期的运行情况发现, 在光滑的炉管表面容易发生莱顿弗罗斯特效应, 但当炉管上残留有煅烧物时, 发生莱顿弗罗斯特效应的水滴会被煅烧物提前破坏, 能一定程度上缓解莱顿弗罗斯特效应的发生, 所以需要探究稀释高放废液和不稀



h_{max} 表示炉管内水的最高液位, ω 表示煅烧炉旋转角速度

图 3 水在回转煅烧炉内的液面高度

Fig. 3 Liquid level height of water in rotary calcination furnace

释高放废液在低温下的启动工艺。

1) 水的低温启动

当回转煅烧炉四区温度均达到 300 °C 时开始进水, 分别调节回转煅烧炉转速(转速)和进液流速(流速), 得到的启动试验结果列入表 3。由表 3 可知: 当流速为 30 L/h 以下时, 水在 300 °C 的 Inconel 690 不锈钢上不会发生莱顿弗罗斯特效应; 当流速为 30 L/h 时, 水的蒸发效率较高, 炉管内干-湿界面出现在三区附近, 炉尾不会流水, 当流速增加到 40 L/h 以上时, 炉尾有流水的风险。回转煅烧炉转速对水低温启动的影响较为复杂。其主要是因为转速既影响炉内液面层的厚度, 从而影响蒸发效率, 同时转速还影响水在炉管内的轴向速度, 通过影响水流速度进而影响水在炉管内的停留时间。转速为 5 r/min 时, 40 L/h 的流速就会导致炉尾在进水 34 min 后流水; 转速为 15 r/min 和 30 r/min 时, 40 L/h 的流速并不会导致炉尾流水。说明流速在 40 L/h 时, 转速

表 3 水低温启动试验结果

Table 3 Results of water low-temperature start-up test

转速/(r·min ⁻¹)	流速/(L·h ⁻¹)	试验结果
5	30	进水40 min, 炉尾未流水, 干-湿界面在第三区前段
5	40	进水34 min, 炉尾流水
5	50	进水14 min, 炉尾流水
15	40	进水40 min, 炉尾未流水, 干-湿界面在第三区中段
15	50	进水20 min, 炉尾流水
30	40	进水40 min, 炉尾未流水, 干-湿界面在第三区中段
30	50	进水13 min, 炉尾流水

注: 介质均为水

增加会加快水的蒸发效率而不会显著影响水流的轴向速度。

当流速增加到 50 L/h 时, 三种转速下回转煅烧炉炉尾都流水, 但转速为 15 r/min 比 5 r/min 和 30 r/min 的炉尾流水更慢。这主要是因为当转速从 5 r/min 增加到 15 r/min 时, 转速对水蒸发效率的影响大于转速对水停留时间的影响, 虽然 15 r/min 时水流速度快, 但此时的液面更薄, 水的蒸发效率更快, 导致转速为 15 r/min 时炉尾流水更慢。相反的, 当转速从 15 r/min 增加到 30 r/min 时, 转速对水蒸发效率的影响小于转速对水停留时间的影响, 虽然 30 r/min 时水的液面更薄, 蒸发效率更快, 但此时水流速度越快, 水尚未来得及蒸发就流到了炉尾, 导致 30 r/min 时炉尾流水更快。

综上所述, 在用水作为介质进行低温启动时, 最佳的启动工艺为转速 15 r/min, 流速 40 L/h。

2) 模拟高放废液和稀释模拟高放废液的低温启动

当回转煅烧炉各区温度达到 300 °C 后, 分别进稀释的模拟高放废液和模拟高放废液。每做完一个条件, 用去离子水清洗炉管再进行下一个条件试验, 结果列入表 4。低温启动试验现象示于图 4。由表 4 和图 4 可知, 当转速小于 30 r/min 时, 炉尾都未流出液体, 这是因为根据水低温启动试验数据, 300 °C 时炉内热量足够将 40 L/h 的水分蒸干, 当水分蒸干后盐分逐渐析出, 在炉管内形成固-液界面, 其阻挡了模拟高放废液进一步往后流动。但由于启动温度过低, 炉内剩余热量无法短时间内将聚集在固液界面处的盐分全部蒸干, 所以会有泥状的物料逐渐滚落到炉尾。但是当转速为 30 r/min 时, 由于液体轴向速度过快, 如果流速达到 50 L/h 以上最终会有液体从炉尾流出。

表 4 模拟高放废液和稀释模拟高放废液的低温启动试验结果

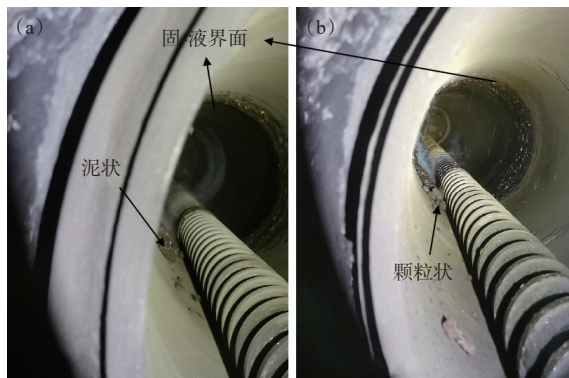
Table 4 Low-temperature start-up test results of simulated HLLW and diluted simulated HLLW

转速/(r·min ⁻¹)	流速/(L·h ⁻¹)	介质	试验结果
5	30	模拟HLLW	16 min炉尾出现泥状物料, 固-液界面在第三区中段
5	40	模拟HLLW	13 min炉尾出现泥状物料, 固-液界面在第三区后段
5	30	稀释模拟HLLW	正常出料, 固-液界面在第三区后段
5	40	稀释模拟HLLW	15 min炉尾出现泥状物料, 固-液界面在第三区后段
15	30	模拟HLLW	正常出料, 固-液界面在第三区中段
15	40	模拟HLLW	14 min炉尾出现泥状物料, 固-液界面在第三区后段
15	30	稀释模拟HLLW	正常出料, 固-液界面在第三区前段
15	40	稀释模拟HLLW	正常出料, 固-液界面在第三区中段
30	40	模拟HLLW	8 min炉尾出现泥状物料, 固-液界面在第三区后段
30	50	模拟HLLW	6 min炉尾流出液体
30	40	稀释模拟HLLW	正常出料, 固-液界面在第三区后段
30	60	稀释模拟HLLW	14 min炉尾流出液体

从表 4 可明显看出, 用稀释模拟高放废液启动效果比用模拟高放废液直接启动效果更佳。模拟高放废液经过稀释以后盐含量成倍降低, 聚集在固-液界面处的盐分较少, 此处的蒸发效率较未稀释的模拟高放废液更高, 所以启动效果更好。5 r/min 时, 用 30 L/h 的稀释的模拟高放废液启动时炉尾出料正常, 煅烧物呈颗粒状而不是泥状, 固-液界面更靠前, 而用模拟高放废液启动时大部分呈泥状, 含水率高; 当流速达到 40 L/h 时, 两者均出现泥状煅烧物, 这是因为增加模拟高放废液流速后炉内热量不足, 此时用稀释的模拟高

放废液启动时出现泥状煅烧物的时间更晚, 说明其启动效果更好。可想而知, 当流速进一步增加时, 两者启动效果会逐渐趋于接近, 最终可能都会有炉尾流出液体的情况出现。

当用模拟高放废液和稀释的模拟高放废液作为启动介质时, 转速对启动的影响与用水启动时的影响类似。总的来说, 当转速由 5 r/min 增加到 15 r/min 时, 转速对废液蒸发效率的影响大于转速对其停留时间的影响, 而当转速由 15 r/min 增加到 30 r/min 时, 转速对物料停留时间的影响大于转速对废液蒸发效率的影响, 所以 15 r/min 时的



流速为 30 L/h, 转速为 5 r/min
(a)——模拟 HLLW, (b)——稀释的模拟 HLLW

图 4 低温启动过程试验现象

Fig. 4 Phenomena of low-temperature start-up process test

启动效果比 5 r/min 和 30 r/min 时的效果更好。

总的来说, 对于低温启动, 用水作为启动介质的效果远大于用稀释的模拟高放废液或模拟高放废液, 因为低温时炉管蒸发效率低, 模拟高放废液中的盐分蒸发不完全导致煅烧物呈泥状, 而 300 °C 用水做启动介质不会发生莱顿弗罗斯特效应, 同时干-湿界面在三区附近, 能使整个炉管的温度达到平衡。所以低温启动时推荐的工艺参数为用流速为 40 L/h 水当启动介质, 转速为 15 r/min。

2.3 高温启动工艺研究

高温启动是指在回转煅烧炉一区到四区加热温度分别达到 600、640、850、880 °C 后开始进启动介质。高温启动试验结果列入表 5。

高温启动时水会发生莱顿弗罗斯特效应, 但是由于炉管表面温度很高, 低流速时虽然发生莱顿弗罗斯特效应, 但水滴会在炉管后两区蒸发, 不会出现如图 2 所示的炉尾流水现象。但是当流速继续增加时, 炉管蒸发效率不够, 被水蒸气保护的水滴会流到炉尾, 如表 5 中 30 r/min、80 L/h 炉尾流水的情况。当采用稀释的模拟高放废液作高温启动介质时, 因为稀释的模拟高放废液的比热容更低, 蒸发需要的热量更少, 同时稀释的模拟高放废液产生的煅烧物对水流有一定的阻挡作用, 导致其在炉管内的停留时间更长, 所以炉尾不会发生流出液体现象。

而用模拟高放废液启动时产生的煅烧物更多, 阻挡效果更明显, 但炉尾较为潮湿, 这是因为煅烧物中硝酸钠含量较高, 但其完全分解温度高 (800 °C), 尚未分解完的硝酸钠和亚硝酸钠在炉

表 5 三种介质的高温启动试验结果

Table 5 High-temperature start-up test results of three media

转速/ (r·min ⁻¹)	流速/ (L·h ⁻¹)	介质	试验结果
15	60	水	40 min 炉尾未流水, 干-湿界面在第二区左右
15	80	水	40 min 炉尾未流水, 干-湿界面在第二区左右
30	60	水	40 min 炉尾未流水, 干-湿界面在第二区左右
30	80	水	5 min 炉尾出现水圈, 10 min 炉尾流水
30	60	稀释模拟 HLLW	正常出料, 固-液界面在第二区左右
30	80	稀释模拟 HLLW	4 min 炉尾出现水圈, 10 min 水圈消失, 出料正常
30	60	模拟 HLLW	正常出料, 固-液界面在第二区后段, 炉尾潮湿
30	80	模拟 HLLW	正常出料, 固-液界面在第三区左右, 炉尾潮湿
30	80	模拟 HLLW+蔗糖	正常出料, 固-液界面在第三区左右

管中易吸收水蒸气而潮解, 当其滚落到炉尾后 (加热模块外) 由于温度较低, 受潮后的硝酸钠和亚硝酸钠将炉管润湿导致炉尾潮湿。而添加蔗糖作为脱硝剂能有效缓解这个现象的发生, 因为高温下蔗糖能和硝酸钠反应, 所以炉尾不会潮湿。

高温启动过程中, 用稀释的模拟高放废液作为启动介质的效果强于用水作启动介质, 因为水只能平衡炉内前两区的温度分布, 而进模拟高放废液后形成的固-液界面在回转煅烧炉第二区后段甚至接近第三区, 此时又需要消耗时间将炉内温度分布再次达到平衡, 会大大延长启动所需的时间。当往模拟高放废液中加入添加剂蔗糖后, 其启动效果和稀释的模拟高放废液的启动效果接近。所以高温启动时推荐的工艺参数为用流速为 80 L/h 模拟高放废液+蔗糖当启动介质, 转速为 30 r/min。

2.4 启动验证试验

通过前面的启动工艺研究, 确定了两种不同的启动工艺方法: 低温下用水启动和高温下用模拟高放废液和蔗糖的混合溶液启动。接下来设计试验对上面的启动工艺方法进行验证。具体试验条件如下:

条件 1: 回转煅烧炉正常升温, 待温度达到 300 °C 后进 40 L/h 水, 转速 15 r/min, 待温度继续升

高到 600 °C 后进 60 L/h 水, 同时将转速调为 30 r/min, 达到平衡后(四区温度稳定)进 80 L/h 模拟高放废液, 分析煅烧物初始出料速率并观察炉管内物料情况。

条件 2: 回转煅烧炉正常升温, 待前两区温度达到 600 °C 后进 80 L/h 模拟高放废液(不含蔗糖), 达到平衡后(四区温度稳定)进 80 L/h 模拟高放废液和 22 L/h 渣水(含蔗糖), 同时将转速调为 30 r/min, 分析煅烧物初始出料速率并观察炉管内物料情况。

上述两种不同启动条件下前 1 h 煅烧物的出料量变化图示于图 5。由图 5 可以看出, 煅烧物的质量先增加然后减少最后逐渐趋于稳定, 这是因为煅烧物的初始出料包括两个过程。第一个过程为煅烧物在炉头的积累过程: 高放废液在炉管内蒸发干燥生成的沉淀有黏性, 它会暂时“粘”在炉管内壁上导致出料量少。第二个过程为煅烧物的置换过程: 随着模拟高放废液持续进入到回转煅烧炉内, 粘在炉管壁上的沉淀会逐渐干燥脱落, 同时又有新的沉淀粘在炉管壁上。该过程分为两个阶段, 在置换的前期, 积累过程产生的煅烧物被瞬间置换出来, 使煅烧物的脱落速率远大于沉淀的生长速率, 导致出料量增加, 随后煅烧物的脱落速率下降至与沉淀的生成速率相等, 进入稳定置换期, 此时每 5 min 内收集的煅烧物质量逐渐趋于接近。

高温启动后进料前 5 min 产出的煅烧物质量明显比低温启动后进料前 5 min 产出的煅烧物质量少, 说明用模拟高放废液直接高温启动后进料, 煅烧物经历的积累过程时间较长。从图 5 还可以看出: 用水低温启动不仅能缩短煅烧物在炉

头积累所需的时间, 从而改善出料初期煅烧物的产品性能, 同时还能将煅烧物出料达到稳定所需的时间提前 10 min, 使回转煅烧炉能更快地进入稳定运行阶段。

通过验证试验, 认为在回转煅烧炉常规启动时, 用水作启动介质效果更好, 但在某些特殊情况下(如冷坩埚卸料阶段回转煅烧炉需要暂停进料, 卸料完成后回转煅烧炉重新进料或回转煅烧炉某个零部件需要短时间更换), 此时就可以用模拟高放废液和蔗糖的混合溶液进行启动, 虽然会影响前期煅烧物的产品性能, 但能更快地完成启动工艺, 使系统尽快恢复到原来的工况。

3 结 论

研究了水、稀释模拟高放废液、模拟高放废液三种介质对回转煅烧炉低温启动过程和高温启动过程的影响, 并分析了进液流速及回转煅烧炉转速对启动效果的影响, 得出试验结论如下。

(1) 水在 Inconel 690 不锈钢材质中的莱顿弗罗斯特温度点在 300 °C 左右。

(2) 低温启动时用水作启动介质最佳。启动过程中转速主要影响水的蒸发效率和水在炉管轴向上的分速度, 当转速为 15 r/min 时启动效果最好; 低温启动推荐的工艺条件为 300 °C、15 r/min、40 L/h 水。

(3) 高温启动时用稀释的模拟高放废液作为启动介质最佳。水容易发生莱顿弗罗斯特效应, 流速超过 80 L/h 时炉尾流水, 模拟高放废液中含有硝酸钠导致启动过程中煅烧物受潮在炉尾出现水圈, 加蔗糖后能明显改善此现象。高温启动推荐的工艺条件为 600 °C、30 r/min、80 L/h 模拟高

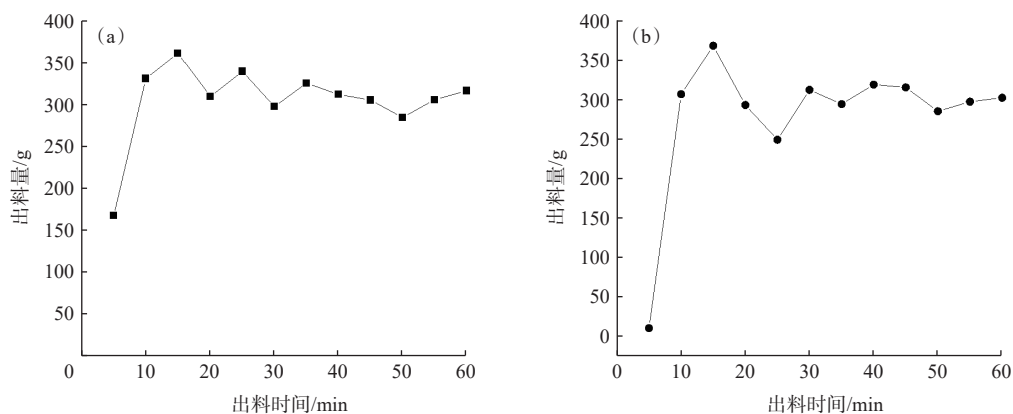


图 5 低温启动(a)和高温启动(b)时煅烧物出料量变化图

Fig. 5 Changes in calcinate discharge during low-temperature(a) and high-temperature(b) start-up

放废液和蔗糖的混合溶液。

通过试验验证了用水低温启动和用模拟高放废液和蔗糖混合溶液高温启动方法的可行性,对优化回转煅烧炉工艺、推动两步法冷坩埚玻璃固化技术进入工程化具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李江波,张生栋.模拟高放废液干燥-煅烧过程产物的分析测试研究[J].材料导报,2015,29(增刊):341-343.
- [3] 刘丽君,张生栋.放射性废物冷坩埚玻璃固化技术发展分析[J].原子能科学技术,2015,49(4):589-596.
- [4] 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).北京:中国原子能出版社,2019.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 赵明伟,阎宇航,邓爽,等.液体的莱顿弗罗斯特效应及贝纳德对流试验研究[J].物理与工程,2017,27(2):42-46.
- [10] 王树博,刘学刚,徐聪,等.冷坩埚玻璃固化启动过程数值分析[J].原子能科学技术,2021,55(2):193-199.
- [11] 刘丽君,郗东生,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.
- [12] 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.
- [13] Sullivan J, Maier C, Ralston O. Passage of solid particles through rotary cylindrical kilns[R]. U. S. Government Printing Office, 1927.
- [14] 汪润慈,李扬,郗东生.模拟高放废液的配制[M]//中国原子能科学研究院年报.北京:中国原子能出版社,2019:147.