

# 干法后处理流程中电解精炼设备研发进展

张金宇, 林如山\*, 张 磊, 唐洪彬, 叶国安

中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

**摘要:** 高燃耗快堆乏燃料具有高钚含量、强放射性、高释热率等特点。基于溶剂萃取原理的水法后处理工艺存在溶剂易辐解等问题, 宜对高燃耗快堆乏燃料采用干法后处理工艺进行处理。熔盐电解干法工艺采用耐辐照的无机盐为介质, 通过电化学方法分离回收锕系元素, 是最具应用前景的干法后处理技术。在熔盐电解干法工艺流程中, 承担锕系元素分离任务的电解精炼单元是核心环节。本文调研了乏燃料干法后处理过程中电解精炼设备的研发进展, 分析了电解精炼设备关键技术和发展趋势, 为我国快堆乏燃料电解精炼设备的研发提供了参考。

**关键词:** 快堆乏燃料; 干法后处理; 熔盐电解; 电解精炼设备

**中图分类号:** TL24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2023)02-0093-09

**doi:** 10.7538/hhx.2023.YX.2021035

## Progress and Development of Electrorefiner in Dry Reprocessing Process

ZHANG Jin-yu, LIN Ru-shan\*, ZHANG Lei, TANG Hong-bin, YE Guo-an

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(26), Beijing 102413, China

**Abstract:** Fast reactor spent fuel with high burnup has the characteristics of high plutonium content, high radioactivity and high heat release rate. The aqueous reprocessing based on solvent extraction principle has the problem of solvent radiolysis. It is better to adopt the dry reprocessing. Dry reprocessing based molten salt electrolysis using irradiation-resistant inorganic salts as media, through electrochemical separation and recovery of actinide, is the most promising dry reprocessing technology. In the process of molten salt electrolytic dry reprocessing, the electrorefining unit is the core link which is responsible for the actinide separation. In this paper, the research and development progress of electrorefiner in the dry reprocessing of spent fuel is investigated, and the key technologies and development trend of electrorefiner are analyzed, which provides a reference for the research and development of fast reactor spent fuel reprocessing in China.

**Key words:** fast reactor spent fuel; dry reprocessing; molten salt electrolysis; electrorefiner

先进快堆核能系统具有铀资源利用率高、废物量小等特点, 是核能可持续发展的必由之路。快堆核能系统的优势发挥依赖于后处理对锕系元

素的分离和复用, 因此后处理是先进快堆燃料循环的关键环节。高燃耗快堆乏燃料具有高钚含量、强放射性、高释热率等特点, 基于溶剂萃取原

理的水法后处理工艺存在溶剂易辐解的问题而难以胜任。熔盐电解干法工艺采用无机盐为介质,具有较高的辐照稳定性,适合处理高燃耗的快堆乏燃料,尤其是金属乏燃料<sup>[1-2]</sup>。同时熔盐电解干法工艺具备工艺流程短、临界风险低、不产生难以处理的高放废液等特点<sup>[3]</sup>,是快堆乏燃料后处理有竞争力的技术选择之一。

熔盐电解干法后处理工艺最早是基于金属乏燃料处理开发的,目前也适合于混合氧化物燃料(MOX)等氧化物乏燃料后处理。针对氧化物乏燃料处理,需增加首端氧化物转化过程,将氧化物形态转化为金属形态<sup>[4]</sup>。用于处理金属乏燃料的熔盐电解干法工艺典型流程示于图 1<sup>[5]</sup>。金属乏燃料首先经首端拆解剪切,得到乏燃料短段,作为电解精炼工艺单元的原料;在电解精炼设备中,乏燃料短段填充到阳极篮,在电解条件下铀钚等锕系元素和活泼裂片元素经阳极溶解进入熔盐体系,贵金属等惰性裂片元素和包壳留在阳极篮中;在电解条件下铀钚等锕系元素扩散至阴极并被还原为金属,从而实现与裂片元素分离;回收的锕系元素经阴极处理纯化后,可作为喷射铸造燃料的原料;活泼裂片元素留在熔盐中,积累到一定浓度后将影响电解精炼工艺和锕系产物品质,需对熔盐进行处理,可通过逆流萃取回收残留锕系元素和沸石柱净化活泼裂片元素,实现溶剂盐再生复用;分离的裂变产物经废物处理转化为陶瓷废物。惰性裂片元素和包壳等经进一步处理转化为金属废物。因此,在整个熔盐电解干法后处理工艺流程中,电解精炼工艺单元是核心环节。

电解精炼工艺对设备的要求主要有:高温、氯化物熔盐腐蚀环境对设备材料耐腐蚀性能要求高;锕系金属在高温下化学性质活泼,所以设备中

保护气氛的水、氧含量要非常低;极毒性超铀元素(TRU)物料操作,对设备密封性要求高;放射性固体热室内远距离操作,对设备可靠性和操作与检维修性能要求高。本文即针对乏燃料电解精炼设备的研发进展进行调研分析,以期为我国干法后处理相关设备发展提供参考。

## 1 美国乏燃料电解精炼设备研发进展

美国乏燃料干法后处理研发主要单位是阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)和爱达荷国家实验室(Idaho National Laboratory, INL),其电解精炼设备研发总体上经历了三个阶段。第一阶段重点是关键技术攻关,通过实验室规模设备及工艺验证原理可行性,如 Mark-III 电解精炼设备和热料电解精炼装置(hot fuels dissolution apparatus, HFDA);第二阶段重点是电解精炼设备工程规模放大验证,如 Mark-IV 和 Mark-V 电解精炼设备<sup>[6]</sup>;第三阶段重点是商业规模应用探索,如基于平板电极的商业规模电解精炼设备(planar electrode electrorefiner, PEER),基于优化的平板电极,完成了商业规模电解精炼设备设计。

### 1.1 电解精炼设备关键技术攻关阶段

20 世纪 80 年代,美国最早提出了一体化快堆计划,并开发了熔盐电解精炼干法后处理工艺流程<sup>[7]</sup>。为验证熔盐电解精炼工艺流程,ANL 开发了 Mark-I、Mark-II、Mark-III 等系列实验室规模的电解精炼设备。其中 Mark-I 和 Mark-II 电解精炼设备可操作克量级物料,分别验证了固体阴极上铀的沉积和液态镉阴极上超铀的沉积。Mark-III 电解精炼设备可操作公斤级物料,并设置了搅拌器,完成了公斤级冷铀验证。为实

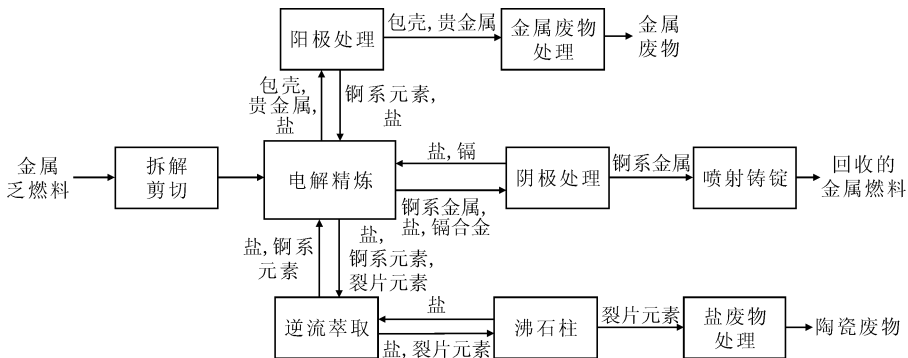
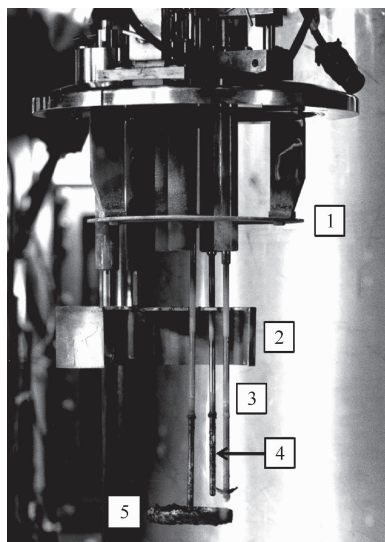


图 1 熔盐电解精炼的典型工艺流程图<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Typical process flow diagram of molten salt electrorefining<sup>[5]</sup>

现电解精炼设备的热室内应用,INL 进一步开发了用于真实乏燃料热验证装置 HFDA,每批次物料操作规模设计值为 50 g。HFDA 装置结构示于图 2,主反应容器材质为低碳钢,尺寸为  $\phi 108 \text{ mm} \times 192 \text{ mm}$ ,反应器内部组成主要有隔热板、炉盖、搅拌器、燃料段固定器、残渣篮<sup>[8]</sup>。



1——隔热板,2——炉盖,3——搅拌器,  
4——乏燃料段固定器,5——残渣篮

图 2 HFDA 内部结构图<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Internal structure diagram of HFDA<sup>[8]</sup>

INL 采用真实金属乏燃料对 HFDA 装置进行了验证。乏燃料短段尺寸为  $\phi 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ,反应容器底部为 25 mm 厚的镅层,上层为 51 mm 厚

的 LiCl-KCl 共晶熔盐。操作温度  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,电解电流为 3.5 A。早期 HFDA 装置采用固定器夹持乏燃料短段作阳极,单批次只能处理 1 个乏燃料短段。为增大处理量,将乏燃料段固定器改进为可旋转的钢制阳极篮,可容纳 20 个乏燃料短段,同时在阴极设置固定刮刀,用于将阴极产物从阴极上物理分离<sup>[9]</sup>。HFDA 装置的设计和验证是乏燃料电解精炼从实验室规模到工程放大规模的过渡,为电解精炼设备热室应用提供了宝贵的经验和数据。

## 1.2 电解精炼设备工程规模放大与验证

20 世纪 90 年代,为处理 EBR-II 快堆金属乏燃料,ANL 和 INL 对电解精炼设备进行了工程规模放大和验证,先后开发了 Mark-IV 和 Mark-V 电解精炼设备<sup>[10]</sup>,分别用于驱动层燃料和包覆层燃料的处理,并在燃料整备设施 (fuel conditioning facility, FCF) 中完成了热验证。

Mark-IV 电解精炼设备设计规模为每批次 24 kg 乏燃料,其结构示于图 3<sup>[11]</sup>。Mark-IV 电解精炼设备主容器材质为 2.25Cr-1Mo 钢,尺寸为  $\phi 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ <sup>[12]</sup>;Mark-IV 电解精炼设备设有两个阳极篮和两个阴极。多孔阳极篮呈十字形结构,开孔率 50%,孔径 4 mm,以增大阳极物料溶解表面积,并方便金属离子扩散;阳极篮具有旋转功能(最大转速为 50 r/min),可对熔盐进行有效搅拌;为有效控制铀枝晶在阴极的生长,在两个阴极底部和侧面设有刮刀。

ANL 采用 EBR-II 驱动层燃料对 Mark-IV 电解

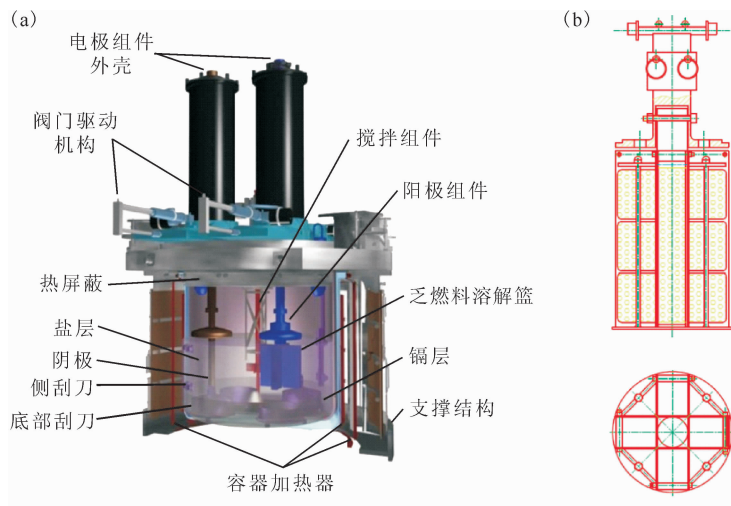


图 3 Mark-IV 电解精炼设备 (a)<sup>[11]</sup> 和阳极篮 (b) 的结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Mark-IV electrorefiner (a)<sup>[11]</sup> and anode basket (b)

精炼设备进行了热验证<sup>[13]</sup>。乏燃料短段长 6.3 mm, LiCl-KCl 共晶盐质量约为 430 kg( $w(\text{UCl}_3)=10\%$ ), 反应器底部液态镅质量为 531 kg, 温度 500 °C, 电流 200 A。验证结果表明: 铀溶解率为 94% 时, 有 27% 的钍溶解, 此时阴极沉积的产物为较纯的金属铀<sup>[14]</sup>。为了提高锕系元素收率, 需提高阳极中锕系元素溶解率, 研究表明, 锕系元素的溶解率提高到 99.7%, 阳极篮中 80% 的金属钍也被溶解, 此时阴极发生铀钍共沉积。Mark-IV 电解精炼设备累计处理了超过 1 t 的 EBR-II 驱动层燃料。

EBR-II 的包覆层乏燃料中  $w(\text{Pu})\approx 1\%$ , 与驱动层乏燃料相比, 临界风险显著降低, 可提高批次操作量, 以满足更大库存量的包覆层乏燃料处理需求。因此 ANL 开发了针对包覆层乏燃料处理的 Mark-V 电解精炼设备, 设计每批次操作规模为 120 kg 乏燃料, 其结构示于图 4<sup>[15]</sup>。

Mark-V 电解精炼设备主容器材质和尺寸与 Mark-IV 一致。电极系统设计有 4 个同心圆结构的阴阳极模块, 单个阴阳极模块结构示于图 5<sup>[16]</sup>。每个模块由三个阴极管( $\phi=6、16、27\text{ cm}$ )和所围成的 9 个阳极腔室组成, 该同心圆结构的电极设计缩短了阴阳极间距, 增大了阴极面积, 可有效优化电场, 增大电流; 阳极篮前缘装有陶瓷刮刀, 可随阳极的转动对阴极沉积物进行连续刮落, 刮落的产物收集在阴阳极模块底部的产物收集篮中<sup>[16]</sup>。

ANL 采用 EBR-II 包覆层乏燃料对 Mark-V 电解精炼设备进行了热验证。包覆层乏燃料短段长 18.3 mm, LiCl-KCl 共晶盐质量约为 600 kg, 温度 500 °C, 电流 2 400 A, 阳极转速 40 r/min。验证

结果表明, 电解精炼过程中金属离子沉积在阳极篮两侧的阴极管壁上, 刮刀可随阳极篮旋转, 将阴极管上的部分沉积物刮下, 落入底部的产物收集篮中, 整个过程电流效率为 80%。截至 2012 年底, 已累计处理 3.6 t 的包覆层乏燃料<sup>[17-18]</sup>。

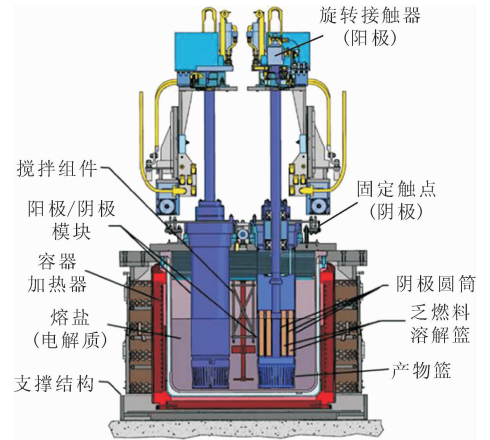


图 4 Mark-V 电解精炼设备的结构示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of Mark-V electrorefiner<sup>[15]</sup>

### 1.3 商业规模电解精炼设备应用探索

电解精炼技术最早是针对快堆金属乏燃料处理开发的, 鉴于熔盐电解干法后处理的技术优势, 美韩等开展了熔盐电解技术应用于压水堆氧化物乏燃料后处理的可行性研究, 探索了商业规模电解精炼设备开发。压水堆乏燃料比快堆乏燃料临界风险更低, 但库存更大, 因此要求电解精炼设备具有更大的产能。这就需要解决以下几个技术难点: 阴阳极合理设计和布局、产物连续收集和转

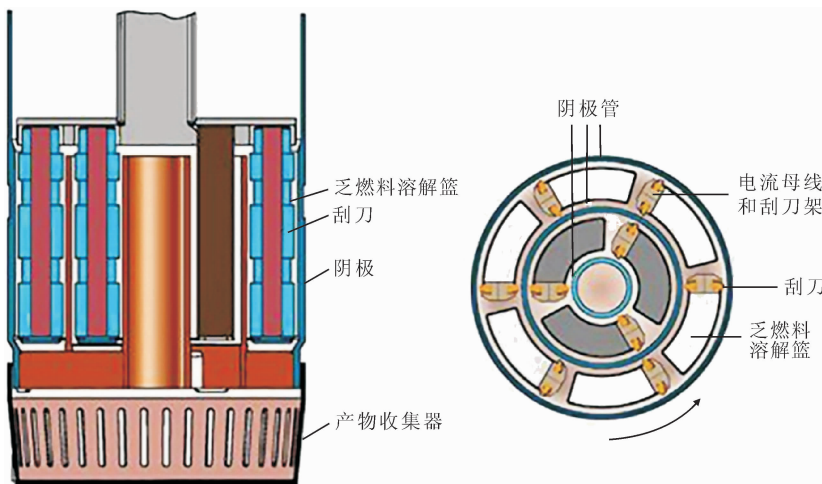


图 5 Mark-V 电解精炼设备阴阳极模块示意图<sup>[16]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of the cathode and anode modules of the Mark-V electrorefiner<sup>[16]</sup>

移、高温流体输送。

美国 ANL 优化了电极设计与布置,开展了基于平板电极的商业规模电解精炼设备设计,并采用 U-10Mo 合金和 U-10Zr 合金验证了商业放大可行性<sup>[19]</sup>,其结构示于图 6<sup>[20]</sup>。电极系统由中

间平板状阳极篮和两侧平行排列的 8 根阴极组成,大表面积平板阳极和阴极阵列可以提高铀系元素的溶解和沉积效率;容器上部设有带孔垂直运动的刮刀,可以提高阴极沉积物的分离和出料效率,其结构示于图 7<sup>[21]</sup>。

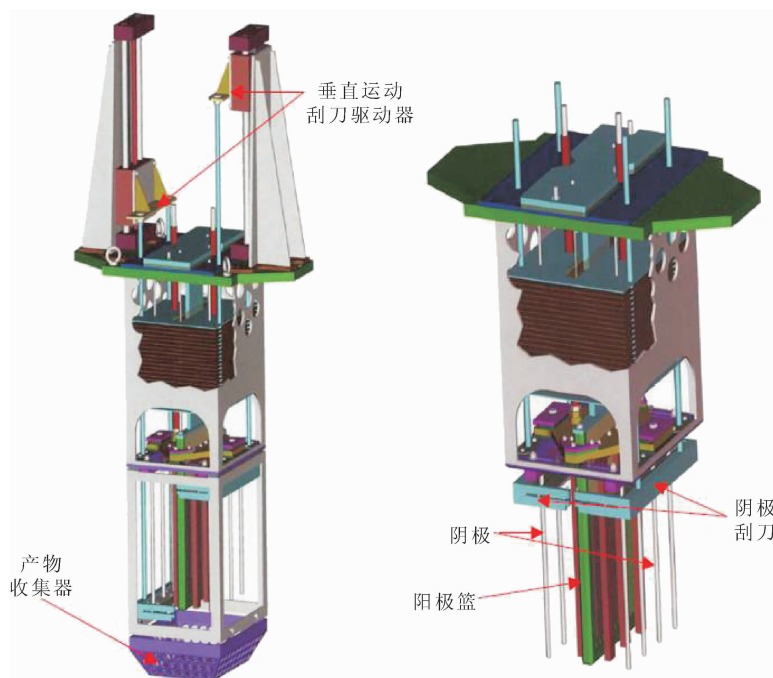


图 6 美国平板电极电解精炼设备结构示意图<sup>[20]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of PEER<sup>[20]</sup>

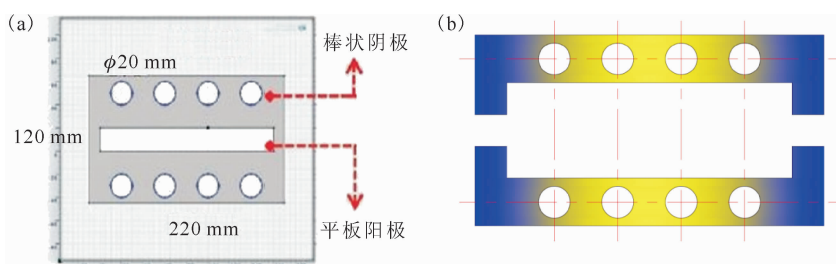


图 7 美国平板电极电解精炼设备的阴极阳极布局图(a)<sup>[21]</sup>和孔状刮刀示意图(b)

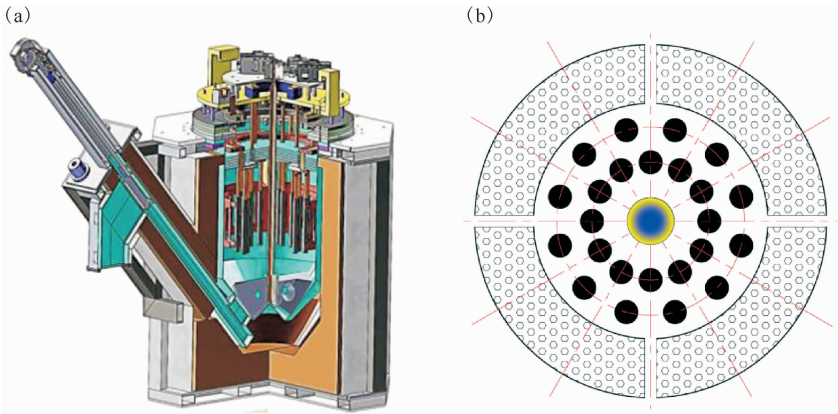
Fig. 7 Schematic diagram of PEER's cathode and anode layout(a)<sup>[21]</sup> and hole-shaped scraper(b)

## 2 韩国乏燃料电解精炼设备研发进展

传统的乏燃料电解精炼设备需要采用刮刀分离阴极产物,并且在批次操作结束后才能进行阴极产物的出料,出料效率低。韩国原子能研究所(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)针对电解精炼设备商业化应用中阴极产物连续收集和转移的难题开发了石墨阴极电解精炼设备,同时配有产物连续出料装置,实现了产物在

线出料<sup>[22-23]</sup>。

石墨阴极电解精炼设备内部组成及电极结构示于图 8<sup>[23]</sup>。设计规模为每批次 50 kg 乏燃料。表 1<sup>[24]</sup>为该设备的电极系统参数,电极系统采用了双层阵列结构,内有 24 个石墨阴极,可实现阴极产物自脱落,外围布置了由 4 个旋转网状阳极篮组成的圆环状阳极区,圆心处设置了一个中央螺旋搅拌器,它与旋转的阳极篮共同实现熔盐的循环流动。产物连续出料装置采用了斗式出料的

图 8 韩国石墨阴极电解精炼设备(a)<sup>[23]</sup>及电极结构(b)示意图Fig. 8 Schematic diagram of Korean graphite cathode electrorefiner(a)<sup>[23]</sup> and electrode system structure(b)表 1 韩国石墨阴极电解精炼设备电极系统参数<sup>[24]</sup>Table 1 Electrode system parameters of Korean graphite cathode electrorefiner<sup>[24]</sup>

阴极					阳极 <sup>1)</sup>			
直径/ cm	长/ cm	有效浸没 深度/cm	每个阴极 表面积/cm <sup>2</sup>	总表面积/ cm <sup>2</sup>	每个篮容积/ cm <sup>3</sup>	篮总容积/ cm <sup>3</sup>	装载比 (空隙率)/%	铀的总装载量/ (kg <sup>-1</sup> )
2	20	17	112	2 681	1 315	5 260	50	50

注:1) 包括 4 个阳极篮

方式。该出料装置包括底部旋转刮板、产物转运铲斗和连接在主容器侧壁上倾斜的出料通道,实现了产物的连续收集和转移<sup>[25]</sup>。

KAERI 采用还原为金属形态的轻水堆氧化物乏燃料对石墨阴极电解精炼设备进行了验证,采用 LiCl-KCl 共晶盐,电流密度 100 mA/cm<sup>2</sup>。验证结果表明,金属铀离子以“铀-石墨”插层化合物的形式沉积在石墨阴极阵列上,当铀的重力大于石墨层间的范德华力时,石墨发生层离,铀枝晶自发脱落,收集在容器底部<sup>[26]</sup>。当积累一定量的阴极产物后,底部刮板旋转将铀枝晶推扫入带孔的铲斗内,铲斗在顶部牵引机构的作用下沿倾斜的出料通道向上移动,同时熔盐从铲斗中渗出。铲斗到达顶部卸料处后,铲斗打开,产物卸出,完成产物出料过程,实现了阴极产物的在线出料。

### 3 日本乏燃料电解精炼设备研发进展

熔盐电解精炼干法工艺涉及熔盐和液态金属两种介质,在工艺流程中两种介质均有转移操作,主要转移方式包括在线液态输送和批式固态转移。批式固态转移需频繁冷却和加热,严重影响产能及设备寿命。高温条件下在线液态输送效率高,同时可避免设备频繁冷却和加热带来的相关

问题。日本中央电力研究院(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)开发了液态熔盐和液态镅/镅合金的在线输送技术,建立了高温液态物料设备系统,通过模拟料验证了工程应用的可行性。

熔盐/液态金属在线输送是电解精炼设备的关键技术之一。CRIEPI 根据熔盐<sup>[27]</sup>和液态金属<sup>[28]</sup>的熔点、密度和黏度等关键性质,开展了输送方式研究。结果表明,电磁泵适合大流量输送,难以满足熔盐和液态镅/镅合金的小流量(0.1~3 dm<sup>3</sup>/min)输送要求<sup>[29]</sup>;气体压力输送方式适合熔盐等液体在柱状设备中的传输,如用于熔盐净化的沸石柱;往复泵适合小流量熔盐和液态镅/镅合金的输送,可用于熔盐电解干法工艺中相关高温液态物料的输送。

为实现从电解精炼设备转移液态镅合金到阴极处理器蒸馏坩埚,CRIEPI 开发了液态镅/镅合金在线输送系统,其系统组成示于图 9,主要由液态阴极坩埚、往复泵、精馏塔、冷凝器、管道(内径 10.1 mm)、加热器等组成。改进后的输送系统采用了 70 kg 镅-钆(模拟铀系元素)合金作为模拟输送对象进行了验证。管道通过加热和保温维持在 500 °C,阴极坩埚中的镅合金通过往复泵直接

输送至蒸馏坩埚,蒸馏坩埚机械转运至精馏塔进行蒸馏,经过冷凝后的纯液态镉通过重力输送回镉阴极坩埚。过程中液态镉合金流量控制在 $0.1\sim 0.9\text{ dm}^3/\text{min}$ ,液态镉流量控制在 $0.5\sim 3\text{ dm}^3/\text{min}$ ,输送率为 $88\%$ ,输送时间为 $15\text{ min}$ ,在较短的时间内实现了较高的输送率。验证结果表明,液态镉/镉合金输送时间大幅缩短,物料转移率显著提高,流量可控性增强。

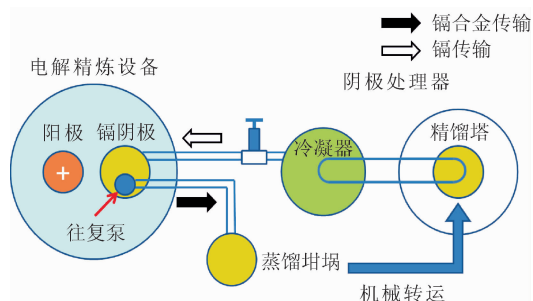


图9 改进后的电解精炼设备液态镉输送系统示意图<sup>[29]</sup>

Fig.9 Schematic diagram of the improved liquid Cd conveying system in the electrorefiner<sup>[29]</sup>

#### 4 其他国家乏燃料电解精炼设备研发进展

欧盟联合研究中心超铀元素研究所(European Commission's Joint Research Centre-Institute for Transuranium Elements, JRC-ITU)重点研究了乏燃料电解精炼技术,创新性开发了基于固体铝阴极的钢系组分离回收技术,完成了U-Pu-Zr合金和模拟金属乏燃料验证。该工艺可一步实现钢系元素组的回收,分离出的钢系产物纯度可达 $99.95\%$ <sup>[30-32]</sup>。

印度英迪拉·甘地原子研究中心(Indira Gandhi Centre for Atomic Research, IGCAR)建立了干法后处理研发验证设施,具备远距离操作和氩气保护气氛条件,可满足熔盐电解精炼全流程工艺验证,已完成公斤级冷铀试验验证<sup>[33]</sup>。

我国熔盐电解干法后处理技术发展较慢,目前国内有关熔盐电解精炼设备尚处于实验室测试规模和放大研发阶段。中国原子能科学研究院围绕快堆乏燃料熔盐电解干法后处理和金属材料熔盐电解纯化等应用,掌握了高温密封、电解槽结构、关键设备材料等技术,先后建立了克量级物料测试、百克量级物料实验<sup>[34]</sup>和公斤级物料验证等系列熔盐电解精炼设备。此外,在稀土熔盐电解等非核行业,包头稀土研究院<sup>[35]</sup>、赣州虔东稀土

集团股份有限公司<sup>[36]</sup>、湖南稀土金属材料研究院<sup>[37]</sup>等单位开发了工业规模的熔盐电解精炼设备,为我国熔盐电解干法后处理设备研发提供了参考和借鉴。

#### 5 结论

电解精炼设备是干法后处理工艺流程中的核心设备,美国通过工程规模(百公斤级乏燃料和公斤级超铀)真实乏燃料试验验证了设备放大可行性,并基于优化的平板电极模型完成了商业规模(五百公斤级)电解精炼设备设计。韩国和日本针对电解精炼设备的工程放大应用,分别开发了基于石墨阴极的连续出料技术和高温流体输送系统,提高了设备的处理效率。目前,国外针对电解精炼设备的商业应用探索仍在进行,国内有关熔盐电解精炼设备的研究尚处于实验室规模验证和放大过程关键技术攻关阶段。纵观乏燃料电解精炼工艺特点和国内外电解精炼设备研发实践,电解精炼设备研发需重点考虑以下几个方面。

##### (1) 结构设计方面

电解精炼设备结构设计需综合考虑产能、电流效率、操作方便性。电极结构的合理设计和布局可优化电场分布,提高电解过程电流效率;产能提升可通过阴阳极多模块并联实现。

##### (2) 材料优选方面

设备材料选择需综合考虑腐蚀环境、设备寿命要求以及对产品纯度的影响。主反应容器及阳极篮等关键部件需充分考虑高温、氯化物熔盐、液态金属等腐蚀环境;阴极材料选择应有利于产品分离。

##### (3) 设备可靠性与稳定操作方面

以批式操作为主的电解精炼设备,操作较频繁,需充分考虑其在热室内应用的可靠性,以及远距离操作与检维修过程的可实现性。

##### (4) 物料输送方面

为提高产能,工程化设备需考虑熔盐/液态金属在线输送,可根据输送物料性质,对物料输送形式、输送设备结构、输送过程监测等进行优化设计。

#### 参考文献:

- [1] 刘学刚. 乏燃料干法后处理技术研究进展[J]. 核化学与放射化学, 2009, 31(S1): 35-44.
- [2] Lafreniere P, Zhang Chao, Simpson M, et al. Lab scale electrochemical codeposition experiments for

- comparison to computational predictions[J]. Nucl Eng Technol, 2020, 52(9): 2025-2033.
- [3] 林如山,何辉,唐洪彬,等.我国干法后处理技术研究现状与发展[J].原子能科学技术,2020,54(增刊):115-125.
- [4] 唐浩,任一鸣,邵浪,等.熔盐电解乏燃料干法后处理技术研究进展[J].核化学与放射化学,2017,39(6):385-396.
- [5] Koyama T. Nuclear engineering for pyrochemical treatment of spent nuclear fuels[M]//Advanced Separation Techniques for Nuclear Fuel Reprocessing and Radioactive Waste Treatment. 2011: 269-310.
- [6] Goff K M, Benedict R W, Howden K L, et al. Pyrochemical treatment of spent nuclear fuel[C]//Proceedings of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Oct 9-13, 2005.
- [7] Ackerman J P. Chemical basis for pyrochemical reprocessing of nuclear fuel[J]. Ind Eng Chem Res, 1991, 30(1): 141-145.
- [8] Yoo T S, Fredrickson G L, Teske G M. Uranium exchange kinetics in a molten LiCl-KCl/Cd system at 500 °C[J]. J Nucl Mater, 2018, 508: 521-529.
- [9] Benedict R W, Krsul J R, Mariani R D, et al. Small-scale irradiated fuel electrorefining, W-31-109-ENG-37[R]. Idaho Falls, Idaho: Argonne National Laboratory West, 1993.
- [10] Mcfarlane H F, Lineberry M J. The IFR fuel cycle demonstration[J]. Progress in Nuclear Energy, 1997, 31(1-2): 155-173.
- [11] Yoo T S, Vaden D, Fredrickson G L, et al. Analysis of undissolved anode materials of Mark-IV electrorefiner[J]. J Nucl Mater, 2018, 510: 551-555.
- [12] Vaden D. Fuel conditioning facility electrorefiner process model[J]. Sep Sci Technol, 2006, 41(10): 2003-2012.
- [13] Vaden D. Fuel conditioning facility electrorefiner model predictions versus measurements[J]. Sep Sci Technol, 2008, 43(9-10): 2684-2694.
- [14] Li S X, Simpson M F. Anodic process of electrorefining spent driver fuel in molten LiCl-KCl-UCl<sub>3</sub>/Cd system[J]. Mining Metall Explor, 2005, 22(4): 192-198.
- [15] Yoo T S, Vaden D. A new inventory tracking method for Mark-V electrorefiner[J]. Ann Nucl Energy, 2019, 128: 406-413.
- [16] Ahluwalia R K, Hua T Q. Uranium transport in a high-throughput electrorefiner for EBR-II blanket fuel[J]. Nucl Technol, 2004, 145(1): 67-81.
- [17] Simpson S F. Developments of spent nuclear fuel pyroprocessing technology at Idaho National Laboratory, INL/EXT-12-25124[R]. Idaho Falls, USA: INL, 2012.
- [18] Benedict R W, Solbrig C, Westphal B, et al. Pyroprocessing progress at Idaho National Laboratory, INL/CON-07-12983[R]. Idaho Falls, USA: INL, 2007.
- [19] Figueroa J, Williamson M A, van Kleeck M A. GTRI progress in developing pyrochemical processes for recovery of fabrication scrap and reprocessing of monolithic U-Mo fuel[C]//International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Santiago Chile, October 23-27, 2011.
- [20] Lewis D, Graziano D, Miller J F, et al. Chemical technology division annual technical report 2003, ANL-04/06[R]. USA: Argonne National Laboratory, 2007.
- [21] Yoo B U, Kim S H, Park S B, et al. Numerical analysis and experimental validation of planar electrorefiner for spent nuclear fuel treatment using a tertiary model[J]. J Nucl Sci Technol, 2016, 53(12): 2079-2089.
- [22] Choi E Y, Jeong S M. Electrochemical processing of spent nuclear fuels: an overview of oxide reduction in pyroprocessing technology[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2015, 25(6): 572-582.
- [23] Lee H, Park G, Lee J W, et al. Current status of pyroprocessing development at KAERI[J]. Sci Technol Nucl Ins, 2013(1): 1-11.
- [24] Lee J H, Kang Y H, Hwang S C, et al. Assessment of a high-throughput electrorefining concept for a spent metallic nuclear fuel I: computational fluid dynamics analysis[J]. Nucl Technol, 2008, 162: 107-116.
- [25] Kim J G, Lee S J, Park S B. High-throughput electrorefining system with graphite cathodes and a bucket-type deposit retriever[J]. Procedia Chemistry, 2012, 7: 754-757.
- [26] Kang Y H, Lee J H, Hwang S C. Electrodeposition characteristics of uranium by using a graphite cathode[J]. Carbon, 2006, 44(14): 3142-3145.
- [27] Hijikata T, Koyama T. Development of high temperature molten salt transport technology for pyrometallurgical reprocessing[J]. Journal of Power



- Energy Systems, 2009, 3(1): 170-181.
- [28] Hijikata T, Koyama T. Development of high-temperature transport technologies for liquid cadmium in pyrometallurgical reprocessing[J]. J Eng Gas Turb Power, 2009, 131(4): 130-137.
- [29] Hijikata T, Kionoshita K, Uozumi K, et al. Development of transport technologies for high-temperature fluid in pyrometallurgical reprocessing[J]. Energy Procedia, 2013, 39: 127-140.
- [30] Soucek P, Malmbeck R, Nourry C, et al. Pyrochemical reprocessing of spent fuel by electrochemical techniques using solid aluminium cathodes[J]. Energy Procedia, 2011, 7: 396-404.
- [31] Serp J, Allibert M, Terrier A L, et al. Electro separation of actinides from lanthanides on solid aluminium electrode in LiCl-KCl eutectic melts[J]. J Electrochem Soc, 2005, 152(3): C167-C172.
- [32] Cassayre L, Malmbeck R, Masset P, et al. Investigation of electrorefining of metallic alloy fuel onto solid Al cathodes[J]. J Nucl Mater, 2007, 360(1): 49-57.
- [33] Nagarajan K, Subramanian T, Reddy B, et al. Current status of pyrochemical reprocessing research in India[J]. Nucl Technol, 2008, 162: 259-263.
- [34] 叶国安, 郑卫芳, 何辉, 等. 我国核燃料后处理技术现状和发展[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(增刊): 75-83.
- [35] 张志宏, 梁行方, 琚建勇, 等. 我国氟盐体系氧化钨电解制备金属钨技术现状及进展[J]. 有色冶炼, 2001(2): 23-25.
- [36] 龚斌, 章立志, 肖勇, 等. 一种制备稀土金属或稀土合金的方法: 中国, 202010339860. 3 [P]. 2021-05-18.
- [37] 杨庆山, 陈建军, 谢建秋, 等. 氟化物熔盐体系中电解制备镁-钨中间合金[J]. 稀有金属, 2007, 31(S1): 45-49.