

钍基熔盐堆核能系统中熔盐的 蒸馏纯化与分离

耿俊霞, 窦 强, 王子豪, 杨 洋, 黄 卫,
付海英*, 李文新, 吴国忠, 李晴暖

中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800

摘要: 氟盐具有化学与辐射稳定性高、热容量大、传热性能好、运行温度高和蒸汽压低等优点, 被用作熔盐堆的燃料载体和冷却剂。随着熔盐堆技术的发展, 开发熔盐的净化、回收工艺非常必要。熔盐减压蒸馏技术基于物质挥发性差异进行组分分离, 由于过程操作简单、不引入新的物质等特点, 在燃料处理过程中有广泛应用。利用减压蒸馏技术对钍基熔盐堆核能系统的载体盐回收、电解产物纯化、模拟燃料球去除浸渗熔盐等方面进行了研究。研究表明, 含 CsF 、 SrF_2 、 LaF_3 和 ThF_4 的 FLiNaK 盐经减压蒸馏处理, 可从 FLiNaK 中除去 SrF_2 和 LaF_3 , 去污因子分别为 4.4×10^3 和 1.9×10^3 , Th 的去污因子为 94; 通过蒸馏可去除电解产物表面夹带的氟盐, 纯化电解产物; 燃料球中浸渗熔盐在 $1\ 085\ ^\circ\text{C}$ 下处理 37 h 可去除石墨球中 94% 的浸渗熔盐。

关键词: 减压蒸馏; 载体盐; 净化; 电解产物; 燃料球

中图分类号: O658.3 文献标志码: A 文章编号: 0253-9950(2017)01-0036-07

doi: 10.7538/hhx.2016.YX.2015081

Purification and Separation of Fluoride Molten Salt in Thorium Molten Salt Reactors System by Low Pressure Distillation

GENG Jun-xia, DOU Qiang, WANG Zi-hao, YANG Yang, HUANG Wei,
FU Hai-ying*, LI Wen-xin, WU Guo-zhong, LI Qing-nuan

Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract: Fluoride molten salt has many advantages such as high chemical and radiation stability, high thermal conductivity and heat capacity, low vapor pressure and so on, so it is used as one of the best fuel carrier salts and coolant for the molten salt reactor (MSR). With the development of MSR technique, it is necessary to develop the technique for the recovery and purification of molten salt. The low pressure distillation was studied on the carrier salt recovery, electrolysis product treatment, and graphite fuel ball cleaning. The results show that the decontamination factor for SrF_2 and LaF_3 is 4.4×10^3 and 1.9×10^3 respectively, and the value for ThF_4 is 94 in FLiNaK salt system. The entrained salt with cathode product

收稿日期: 2015-10-13; 修订日期: 2016-04-29; 网络出版时间: 2017-01-03

基金项目: 中国科学院战略性科技先导专项——钍基熔盐堆核能系统(XDA02030000)

作者简介: 耿俊霞(1987—), 女, 河南郑州人, 硕士, 工程师, 无机化学专业

* 通信联系人: 付海英(1973—), 女, 湖南祁东人, 副研究员, 从事放射化学研究, E-mail: fuhaiying@sinap.ac.cn

after electrolysis is removed by vacuum distillation, and the salt immersed in the graphite ball can also be removed and the removal rate ratio is up to 94%.

Key words: low pressure distillation; carrier salt; purification; electrolysate; graphite ball

作为国际上公认的六种第四代核反应堆中唯一的液体燃料堆,熔盐堆引起了愈来愈多的关注,其最主要的特征是使用熔融氟盐作为核燃料载体和反应堆冷却剂。相对于氦气、水、金属钠等反应堆冷却剂,熔盐冷却剂因具有化学与辐射稳定性高、热容量大、传热性能好、运行温度高和蒸汽压低等优点,赋予了熔盐堆更高的安全性能和更广阔的发展优势。与熔盐堆类似,美国橡树岭国家实验室(ORNL)、麻省理工学院(MIT)、加州大学伯克利分校(UCB)和威斯康辛大学(UW)等机构联合开发的氟盐冷却高温堆(fluoride salt cooled high temperature reactor, FHR)也使用熔盐冷却剂,可在常压下更为安全地运行;同时采用高温气冷堆业已成熟的高温技术,具备高能量转换效率的特点,故而有望成为一种非常有竞争力的先进反应堆型^[1]。

熔盐堆的载体盐使用丰度大于 99.99%、价格昂贵的⁷LiF 熔盐。而且在熔盐堆运行过程中多种裂变产物将在载体盐内不断累积,影响裂变反应的进行。因此,随着熔盐堆技术的发展,从经济性和堆运行效率角度出发,需要实现裂变产物的去除和熔盐的循环利用。

与大部分裂变产物相比,熔盐堆的燃料载体盐具有较高的蒸汽压^[2],减压蒸馏技术基于物质的蒸汽压差异用于物质间的分离,因此可采用该技术实现燃料盐中裂变产物的分离和载体盐的回收。ORNL 在 20 世纪 60 年代就开展过熔盐减压蒸馏技术的研究工作,曾测量了 LiF/LiF-BeF₂ 等体系中裂变产物的相对挥发度,并开展了工程级熔盐蒸馏工作,成功分离出稀土裂变产物,同时回收载体盐^[3]。在中国科学院上海应用物理研究所承担的中国科学院先导专项“钍基熔盐堆核能系统(TMSR)”中,首次使用钍作为主要的核燃料。钍在燃料盐中的含量往往是裂变产物含量的 $10^3 \sim 10^5$ 倍^[4],在燃料盐的蒸馏过程中钍的浓度还将不断富集,这一富集过程可能影响载体盐的蒸馏行为,因此需要考察钍的存在对载体盐分离回收的影响,同时关注钍在蒸馏过程中的分布。

减压蒸馏属于物理过程,具有工艺原理简单、无副产物、易于连续处理等技术特点,已应用到以

燃料后处理为中心的核能技术的各个方面。目前燃料后处理中发展的干法分离技术中,电化学分离方法是研究最为广泛的乏燃料后处理技术之一,用以实现锕系与镧系元素的分离。然而在获得的电解产物中会夹带有熔盐电解介质,影响电解产物的循环使用。减压蒸馏技术可在不改变产物性质的同时有效清除熔盐。例如美国阿贡国家实验室(ANL)使用减压蒸馏方法处理了公斤级的电解产物,成功地实现了金属铀产物的分离回收^[5];韩国原子能研究所(KAERI)也在其干法流程中使用减压蒸馏方法处理氧化物乏燃料经电解还原后得到的金属铀,并成功地将其与附着的氯盐电解质进行了分离^[6]。TMSR 采用氟盐作为燃料载体,熔盐电化学作为 TMSR 燃料处理备选方案之一,关于氟盐中锕系电化学行为的研究报道较少,氟盐体系的电解产物表面也会附着电解介质。电解产物形态的研究有利于确定电解工艺条件及实现产物循环利用,可利用减压蒸馏技术对产物进行初次纯化,去除表面氟盐。

此外,TMSR 专项拟建的固态燃料熔盐堆以 TRISO 燃料球为燃料,使用氟盐作为冷却剂^[7]。固态燃料熔盐堆在运行过程中,熔盐长期与燃料球接触,可能会扩散至燃料球的基体石墨中,ORNL 的研究证明石墨表面或近表面的缝隙的确存在熔盐浸渗现象^[8]。若乏燃料球不经过处理直接放置,球中浸渗熔盐可能腐蚀储存容器,对环境安全构成威胁。然而到目前为止并没有关于从燃料球中除盐的研究报道。由于石墨材料与熔盐存在着极大的挥发性差异,因此,减压蒸馏技术可能也适用于分离燃料球中的浸渗熔盐,从而有效提高储存过程中燃料球的稳定性。

为了考察 ThF₄ 的存在对载体盐回收和其他裂变产物的分离效果是否存在影响,以及 ThF₄ 与载体盐之间的分离,本工作利用热失重式蒸发炉,使用含 ThF₄ 和代表性裂变产物 CsF、SrF₂、LaF₃ 的 FLiNaK 熔盐模拟燃料盐,考察了减压蒸馏净化载体盐的效果以及 ThF₄ 在蒸馏过程中的挥发行为。同时为了探索熔盐减压蒸馏技术在氟盐体系电解产物表面熔盐的去除和燃料球中浸渗氟盐的净化中的应用潜力,研究了 FLiNaK 盐体

系稀土电解产物的蒸馏纯化过程和模拟燃料球中氟盐的蒸馏去除效果,并对蒸馏前后的试样进行了分析表征。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

FLiNaK 共晶盐, LiF、NaF、KF 的摩尔分数(x)分别为 46.5%、11.5%、42%,由上海应用物理研究所熔盐化学技术工程部提供,氧质量分数(w)低于 2×10^{-4} ,其中 B、稀土杂质、Th、Cs 总质量分数低于 5×10^{-5} 。ThF₄ 由长春应用化学研究所提供,纯度为 99.9%。NdF₃、CsF、SrF₂ 和 LaF₃ 购自 Sigma-Aldrich 公司,纯度为 99.99%。

模拟燃料球为 FLiNaK 浸渗的石墨球:石墨球使用 IG110 石墨,由上海东洋碳素有限公司提供。浸渗 FLiNaK 熔盐的石墨球由上海应用物理研究所材料技术工程部提供^[9],石墨球中熔盐的浸渗量为 13%(质量分数)。

实验中采用立式蒸发装置(图 1),装置设计参数见文献[10];Optima 8000 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)和 NexION 300D 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),美国 Perkin Elmer 公司;1530VP 型场发射电子枪扫描电镜(FE-SEM),LEO 公司,含 X 射线能谱(EDS)配套仪器;X'PERT POWDER 型 X 射线衍射仪(XRD),PANalytical 公司。

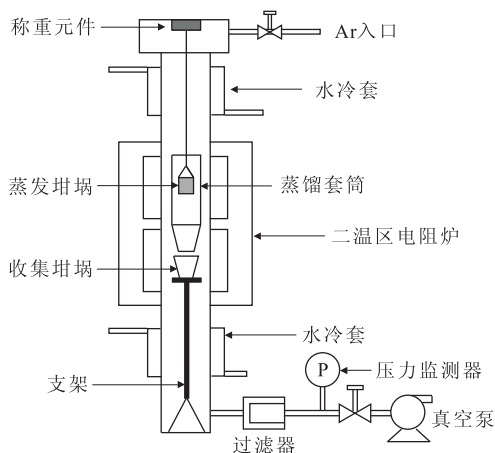


图 1 热失重式蒸发炉结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a salt evaporation furnace for a thermogravimetric analysis

1.2 实验方法

1.2.1 含氟化钍氟盐体系载体盐的蒸馏回收实

验 FLiNaK、ThF₄(摩尔分数为 0.07%)和 CsF、SrF₂、LaF₃(Cs、Sr 和 La 氟化物摩尔分数均为 0.3%)混合后于 750 °C 熔融 360 min,得到的混合熔盐作为原料盐使用。取 10 g 原料盐,将其装入镍蒸发坩埚内,将蒸发坩埚装入镍套筒内,悬挂在蒸馏炉膛中,将收集坩埚放在支架上,密封设备。设备抽真空后于 950 °C 蒸馏 0.5 h,实验结束后将原料盐及蒸馏得到的收集盐溶解、定量稀释,并使用 ICP-AES 进行定量分析。根据检测到的收集产物与原料中氟化物的浓度,计算得到此氟化物的去污因子(decontamination factor, DF),计算公式为:

$$DF = x_{\text{前}} / x_{\text{后}} \quad (1)$$

式中: $x_{\text{前}}$ 为原料盐中待测氟化物摩尔分数, $x_{\text{后}}$ 为收集产物中待测氟化物摩尔分数。

1.2.2 氟盐体系中电解产物的净化实验 在处理电解产物时,不使用镍套筒和收集坩埚。将待处理的电解产物放入到蒸发坩埚中,使用镍丝悬挂在立式蒸发装置的腔体中,密封设备并抽真空至小于 10 Pa,蒸馏温度为 1 000 °C,蒸馏时间为 4 h。将蒸馏处理前后的电解产物使用 XRD 和 SEM-EDS 进行表征。

1.2.3 燃料球中浸渗氟盐的去除实验 将模拟燃料球放入到蒸发坩埚中,不使用蒸馏套筒,将坩埚悬挂在立式蒸发装置的腔体中。在体系压力小于 10 Pa 条件下,选择蒸馏温度范围为 750~1 100 °C(低于燃料球最高使用温度限值 1 600 °C^[11]),考察蒸馏温度对石墨球中熔盐去除率的影响。然后选择合适的温度,通过改变蒸馏时间考察处理时间对熔盐去除效率的影响。对蒸馏处理前后的燃料球使用 SEM 进行表征。石墨球中熔盐的去除效率为:

$$\text{熔盐去除效率} = (m_{\text{前}} - m_{\text{后}}) / m_{\text{前}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $m_{\text{前}}$ 是 FLiNaK 浸渗的石墨球质量, $m_{\text{后}}$ 是减压蒸馏处理后石墨球的质量。

2 结果与讨论

2.1 含氟化钍氟盐体系载体盐的蒸馏回收

近年来,课题组已先后开展了 LiF 和氟化物熔盐体系中多种稀土氟化物的蒸发行为研究^[10,12]。TMSR 采用的熔盐中含有一定量的 ThF₄,为了考察 ThF₄ 的存在对其他裂变产物分离的影响以及 ThF₄ 与 FLiNaK 的分离效果,开展了含 ThF₄ 的氟盐体系中载体盐的蒸馏实验。

减压蒸馏实验中,950 ℃、5 Pa 蒸馏条件下三次平行实验得到收集盐中 CsF、SrF₂、LaF₃ 和 ThF₄ 的去污因子平均值分别为 1.1、 4.4×10^3 、 1.9×10^3 和 94(误差小于 10%)。CsF 去污因子为 1.1,说明收集盐中 CsF 的浓度与蒸馏前混合盐中的浓度相当。这是由于 950 ℃下纯 CsF 的饱和蒸汽压高于 LiF、NaF 和 KF^[13],实验温度下 CsF 挥发性较高,易于蒸发,说明简单的一次蒸馏无法有效去除 CsF。实验中 SrF₂ 和 LaF₃ 的去污因子为 10^3 ,说明碱土氟化物与稀土氟化物的挥发性均远低于载体氟盐,这一结果与 ORNL 在 1968 年利用平衡蒸馏装置测得的裂变产物相对挥发度数据基本一致^[14]。ThF₄ 的去污效果较 SrF₂ 和 LaF₃ 低,这与它们之间的蒸汽压差异吻合^[15]。虽然 ThF₄ 的分离相对较差,但是在 TMSR 燃料循环中,减压蒸馏处理后少量存在于收集盐中的钍将随熔盐回堆使用,不会对燃料循环产生不利影响。在本工作中,虽然稀土氟化物具有较高的去污因子,但该结果仍然低于本课题组中测得的不含 ThF₄ 的 FLiNaK 体系中此类氟化物的去污因子^[12],今后拟进一步研究在熔盐减压蒸馏过程中 ThF₄ 的存在及累积对裂变产物分离的影响规律。

2.2 氟盐体系中电解产物的净化

含有 NdF₃ 的 FLiNaK 熔盐经电解后获得的产物示于图 2(a),有大量的熔盐附着在阴极表面,1 000 ℃下蒸馏 4 h 后获得的产物示于图 2(b)。对比蒸馏前后可以看出,经减压蒸馏处理,原本附着在电解产物表面的熔盐消失。图 3 为蒸馏前、后电解产物的 SEM 形貌。从图 3 也可明显看出,图 3(a)中未经处理的电解产物上附着大量的熔盐;而经过减压蒸馏处理后,熔盐被除去,获得晶体状电解产物,如图 3(b)。

进一步对蒸馏处理前后的产物进行 EDS 能谱分析,结果示于图 4。由图 4 可看出,蒸馏前的产物样品表面 K 的质量分数可达 60% 以上,Nd 的质量分数只有 3.74%。易挥发的 LiF、NaF 和 KF 在蒸馏处理过程中从产物表面蒸发除去,故蒸馏后的产物(图 4(b))表面 K 的质量分数较蒸馏前明显降低,小于 5%,Nd 的质量分数则有显著增加,高达 83.37%。

将蒸馏前后的电解产物使用 XRD 进行分析表征,结果示于图 5。由图 5 可以看出,未经减压蒸馏处理的样品中(图 5(a)),有很强的 LiF 和 NaF 的衍射峰,同时存在较弱的 Li₂K₅NdF₁₀ 和 NaNF₄ 的衍射峰,原因是电解产物从氟盐介质

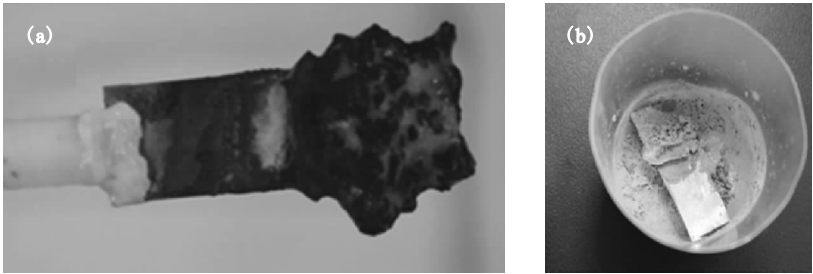


图 2 NdF₃-FLiNaK 电解实验中蒸馏前(a)、后(b)电极产物
Fig. 2 Electrolyte obtained from electrolysis of NdF₃-FLiNaK before(a) and after(b) distillation

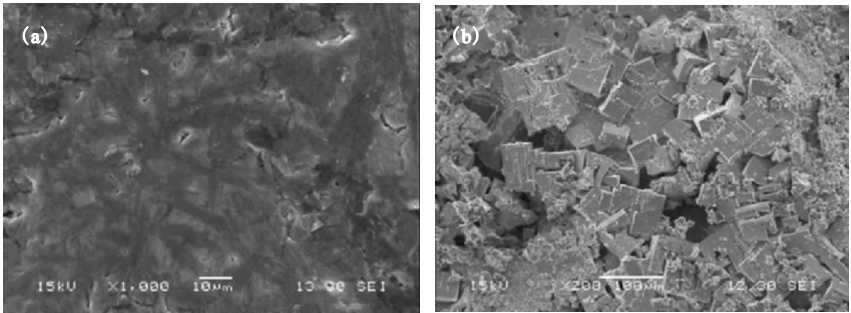


图 3 蒸馏处理前(a)和处理后(b)电解产物的 SEM 形貌
Fig. 3 SEM morphology of electrolyte before(a) and after(b) distillation

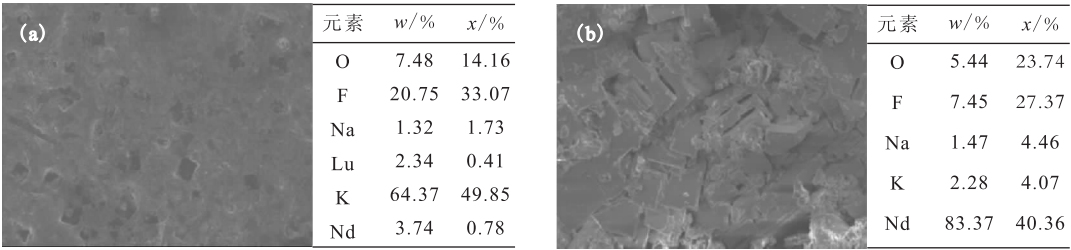


图 4 减压蒸馏处理前(a)、后(b)电解产物的 EDS 表征结果
Fig. 4 EDS results of electrolysate before(a) and after(b) distillation

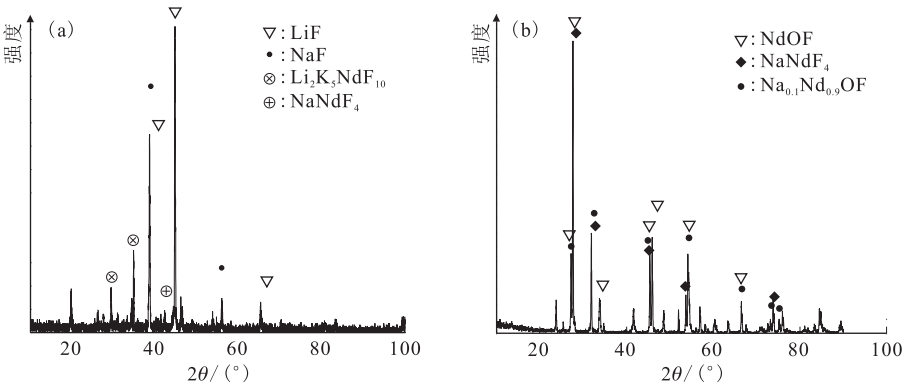


图 5 蒸馏处理前(a)和处理后(b)电解产物的 XRD 图谱
Fig. 5 XRD spectra of electrolysate before(a) and after(b) distillation

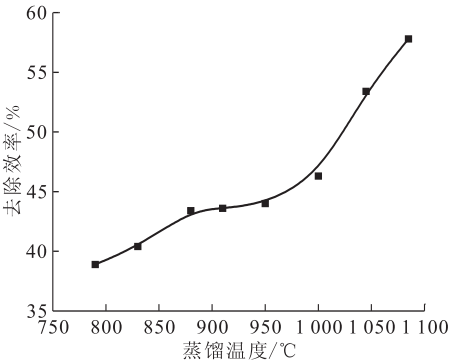
中取出后附着了大量 FLiNaK 熔盐,其中的 NdF_3 与碱金属氟化物形成了上述氟钕酸盐。然而,减压蒸馏处理后的样品中 LiF、NaF 信号基本消失,同时可观察到明显的 NdOF、 NaNdF_4 和 $\text{Na}_{0.1}\text{Nd}_{0.9}\text{OF}$ 的衍射峰(图 5(b)),说明电解产物中夹带的 FLiNaK 熔盐在蒸馏中被有效去除,而挥发性差的 NaNdF_4 残留在产物表面。但是由于实验装置原因,蒸馏中可能引入少量氧,导致部分电解产物转化为 NdOF。虽然在初步探索中减压蒸馏操作(氧的引入)对电解产物表征产生了一定干扰,但从表征结果看,该方法对去除产物中夹带熔盐发挥了积极的作用,后续将通过优化蒸馏实验装置进一步改善蒸馏处理效果。

2.3 燃料球中浸渗氟盐的去除

为考察蒸馏工艺条件对燃料球中浸渗氟盐去除效果的影响,以浸渗 $w \approx 13\%$ FLiNaK 熔盐的石墨球为研究对象,开展了减压蒸馏除盐工艺研究。

首先考察了蒸馏温度对石墨球中熔盐去除效率的影响,结果示于图 6。由图 6 可以看出,在 $790\text{ }^\circ\text{C}$ 下蒸馏处理 4 h 后,石墨球中的浸渗熔盐仅除去 38.9%;而在 $1\ 085\text{ }^\circ\text{C}$ 下处理 4 h 后,浸渗

熔盐去除效率达 57.8%。结果表明石墨球中的熔盐去除效率随着温度的升高而显著增加,这与熔盐蒸汽压随温度的升高而增加的规律吻合。



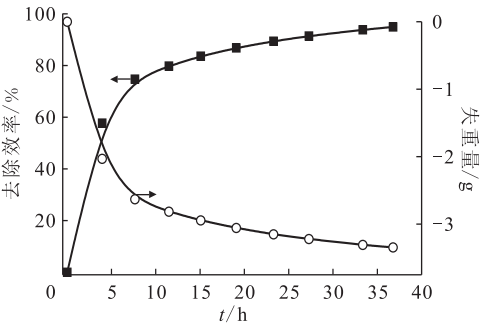
蒸馏体系压力小于 10 Pa,蒸馏时间 4 h

图 6 蒸馏温度对熔盐去除效率的影响

Fig. 6 Influence of distillation temperature on the salt removal efficiency

在上述实验的基础上,选择在 $1\ 085\text{ }^\circ\text{C}$ 下考察蒸馏时间对熔盐去除效率的影响,结果示于图 7。从图 7 可知,大部分熔盐(73.5%)的去除发生在蒸馏过程的前 8 h 内。延长蒸馏时间,石墨球将继续

失重,但失重速率明显减小。在温度为 1 085 ℃ 条件下,经 37 h 蒸馏处理,可将石墨球中约 94% 的浸渗熔盐除去。从该曲线看,在蒸馏处理 37 h 后,



蒸馏体系压力小于 10 Pa,蒸馏温度 1 085 ℃

图 7 蒸馏时间对熔盐去除效率的影响

Fig. 7 Influence of distillation time on the salt removal efficiency

石墨球依然存在失重的趋势,意味着继续延长蒸馏时间,浸渗熔盐的去除效率将进一步提高。

利用扫描电镜分析 1 085 ℃ 下蒸馏处理前后石墨球的截面形貌,结果示于图 8。处理前(图 8(a))的石墨球中心位置(左)与表面(右)形貌相同,分布有许多白色的 FLiNaK 盐颗粒。减压处理 4 h 之后,靠近表面处约 800 μm 的区域内,熔盐颗粒基本消失,而较深入的部位仍有明显的熔盐颗粒,说明球体近表面的 FLiNaK 盐已蒸发,如图 8(b)。经 37 h 减压蒸馏处理后,石墨球中心区域的白色颗粒也完全消失,如图 8(c),此时浸渗熔盐的去除效率为 94%。由此推测减压蒸馏方法净化石墨球的机制为:高温、真空条件下,石墨球内最外部的浸渗熔盐首先受热蒸发,使石墨球的外层孔隙空出,内部的熔盐在继续处理时形成蒸汽,通过空出的孔隙缓慢扩散迁移至表面层,继而从石墨球中逸出。

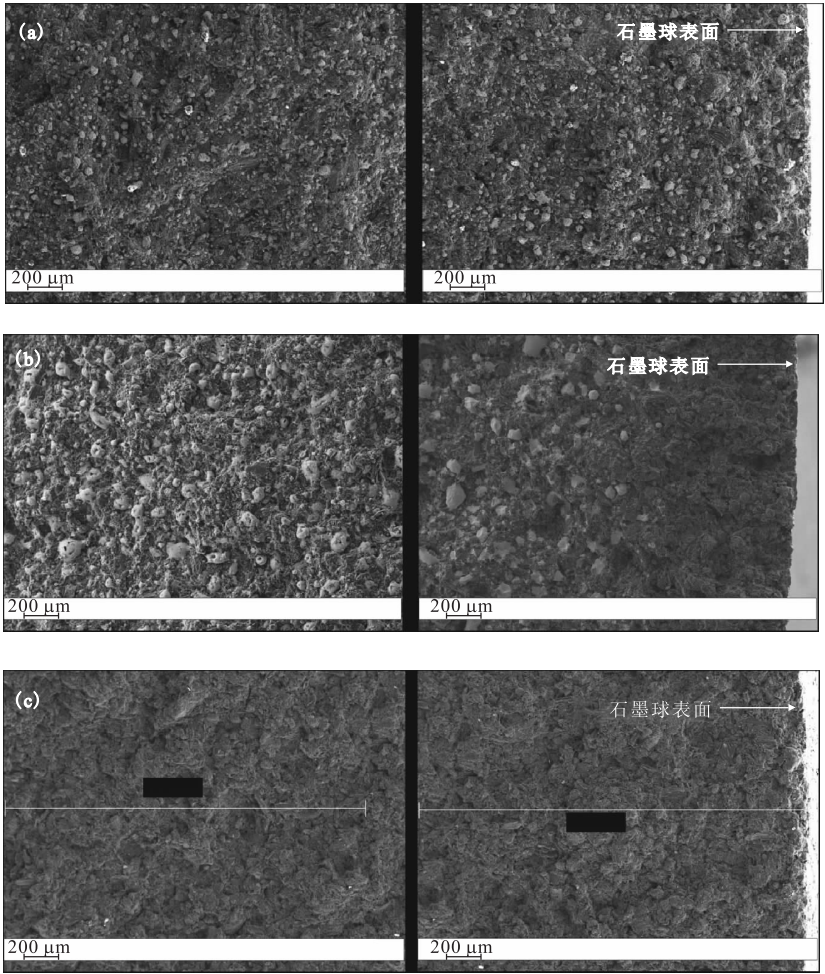


图 8 处理前(a)、1 085 ℃ 处理 4 h(b)和处理 37 h(c)后的石墨球内部(左)和表层(右)石墨结构

Fig. 8 Morphology of inside(left) and surface(right) of graphite before distillation(a), after 4 h(b) and 37 h(c) treatment at 1 085 ℃

研究表明,减压蒸馏技术可将石墨球内的浸渗熔盐有效除去,故适用于处理反应堆运行过程中浸渗到燃料球石墨基体中的熔盐,有利于燃料球的最终处置。

3 结 论

本实验室利用熔盐减压蒸馏技术在 TMSR 载体氟盐蒸馏回收、电解产物和模拟乏燃料球除盐净化等方面进行了研究,得出以下结论:

(1) 在 950 °C 减压蒸馏处理含 ThF_4 、 CsF 、 SrF_2 、 LaF_3 的 FLiNaK 盐,获得的收集盐中 CsF 去污因子为 1.1, SrF_2 、 LaF_3 的去污因子分别为 4.4×10^3 和 1.9×10^3 , ThF_4 去污因子为 94;

(2) 在真空条件下蒸馏处理夹带着氟盐的电解产物,可有效去除电解产物表面的氟盐,有利于电解产物的物性研究和回收利用。

(3) 浸渗熔盐的石墨球经减压蒸馏处理后,绝大部分熔盐被蒸发去除,去除效果随着蒸发温度和时间的增加而显著提升,在压力小于 10 Pa、温度为 1 085 °C 条件下处理 37 h,可除去燃料球中 94% 的浸渗熔盐。

随着核能领域中熔盐技术的发展,减压蒸馏技术的应用范围将逐渐扩大,也将因此面临更多的挑战。减压蒸馏技术在 TMSR 中的应用建立在氟化物的蒸汽压数据基础之上,由于氟盐体系中元素的物理化学性质仍不完备,大规模蒸馏工艺暂不完善,故减压蒸馏方法作为处理乏燃料、回收载体盐和净化电解产物的有效方法,仍需继续开展深入细致的研究。

参考文献:

- [1] Forsberg C W, Hu L W, Peterson P, et al. Fluoride-salt-cooled high-temperature reactor (FHR) for power and process heat, MIT-ANP-TR-157 [R]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [2] Westphal B R, Marsden K C, Price J C, et al. On the development of a distillation process for the electrometallurgical treatment of irradiated spent nuclear fuel[J]. Nucl Eng Tech, 2008, 40(3): 163-174.
- [3] Carter W L, Lindaver R B, McNeese L E. Design of an engineering-scale, vacuum distillation experiment for molten-salt reactor fuel, ORNL-TM-2213[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 1968.
- [4] Mathieu L, Heuer D, Nuttin A, et al. Thorium molten salt reactor: from high breeding to simplified reprocessing[C]. GLOBAL 2003-Nuclear Science and Technology: Meeting the Global Industrial and R&D Challenges of the 21st Century. USA: American Nuclear Society, 2003.
- [5] Brunsvold A R, Roach P D, Westphal B R. Design and development of a cathode processor for electro-metallurgical treatment of spent nuclear fuel[C]. Proceedings of ICONE 8: 8th International Conference on Nuclear Engineering, 2000.
- [6] Choi E Y, Won C Y, Kang D S, et al. Production of uranium metal via electrolytic reduction of uranium oxide in molten LiCl and salt distillation[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2015, 304: 535-546.
- [7] 江绵恒,徐洪杰,戴志敏. 未来先进核裂变能:TMSR[J]. 核能系统,2012,27(3):366-374.
- [8] MacPherson H G. Molten-salt reactor project quarterly progress report for period ending April 30, 1959, ORNL-2723[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 1959.
- [9] He Z T, Gao L N, Qi W, et al. Molten FLiNaK salt infiltration into degassed nuclear graphite under inert gas pressure[J]. Carbon, 2015, 84: 511-518.
- [10] 窦强,付海英,杨洋,等. 温度和气压对 LiF 蒸发速率的影响[J]. 核化学与放射化学,2012,36(6):357-362.
- [11] 陈召林,李斌,柴国早. 高温气冷堆 HTR-PM 安全审评中有关燃料最高温度的考虑[J]. 核安全, 2012(2):16-20.
- [12] 王子豪,耿俊霞,窦强,等. FLiNaK 体系中稀土氟化物相对挥发度的测定,TMSR-RE-PR-TR-2013-15[R]. 中国:中国科学院上海应用物理研究所,2013.
- [13] Yaws C L. Handbook of vapor pressure: volume 4: Inorganic compounds and elements[M]. US: Gulf Professional Publishing, 1995.
- [14] Hightower J R, McNeese L E Jr. Measurement of the relative volatilities of fluorides of Ce, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Sr, Y and Zr in mixtures of LiF and BeF_2 , ORNL-TM-2058[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 1968.
- [15] Smith F L, Ferris L M, Thompson C T. Liquid-vapor equilibria in LiF-BeF_2 and $\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4$ systems, ORNL-4415[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 1969.