

# FLiNaK 熔盐中 CsF 的蒸发与分离

贾昀澎<sup>1,2</sup> 王子豪<sup>1</sup> 耿俊霞<sup>1</sup> 杨洋<sup>1</sup> 窦强<sup>1</sup> 丛海霞<sup>1</sup> 李晴暖<sup>1</sup> 付海英<sup>1</sup>

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** Cs 的同位素是核裂变的主要产物之一, 在熔盐反应堆液态燃料盐中以 CsF 的化学形态存在, 定期从燃料盐中除去或减少其含量将有助于提高反应堆的中子经济性。本文用 FLiNaK 熔盐模拟熔盐堆载体盐 FLiBe 体系, 研究了 CsF 在不同蒸发条件下的蒸发行为, 并尝试进行了减压蒸馏和金属 Li 还原蒸发技术分离 CsF 的实验研究。研究表明, 在 5 Pa 蒸馏压力下, CsF 的蒸发量随温度呈线性上升趋势, 780 °C 时 CsF 的含量由 1% 降到 0.14%, 分离率达 86%, 但此时载体盐的蒸发量达 9.5%; 在常压、700 °C 条件下, 熔盐中 CsF 的蒸发比例随还原剂 Li 的添加量而提高, 当添加的金属 Li 的摩尔浓度与 CsF 为 120:1 时, CsF 分离率达 91%。研究结果为了解 CsF 在氟盐体系中的蒸发行为和建立可行的分离方法提供基础实验依据。

**关键词** CsF, FLiNaK, 蒸发, 还原

**中图分类号** TL426, TL241.2<sup>72</sup>

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.020602

## Evaporation and separation of CsF in FLiNaK molten salt

JIA Yunpeng<sup>1,2</sup> WANG Zihao<sup>1</sup> GENG Junxia<sup>1</sup> YANG Yang<sup>1</sup> DOU Qiang<sup>1</sup>  
CONG Haixia<sup>1</sup> LI Qingnuan<sup>1</sup> FU Haiying<sup>1</sup>

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract Background:** The removal of CsF, a major fission product in molten salt reactor, on a regular basis is helpful for the improvement of neutron economy of the reactor. **Purpose:** This study aims to investigate the evaporation behavior of CsF under different experimental conditions in FLiNaK molten salt. **Methods:** Two different evaporation methods, namely vacuum distillation and reductive evaporation by metal lithium, were employed in this work. **Results:** The results from the experiments of vacuum distillation at 5 Pa revealed a linear correlation between evaporated mass of CsF and evaporation temperature. At 780 °C, the CsF concentration in molten salt decreased from 1% to 0.14% upon distillation with a separation rate of 86% despite the loss of 9.5% of the carrier salt. Reductive evaporation by metal lithium was carried out at 700 °C and  $1.01 \times 10^5$  Pa. The amount of evaporated CsF increased with the increase of lithium added into the molten salt. The separation rate was 91% at a molar ratio of lithium to CsF of 120. **Conclusion:** Fundamental data are provided to understand the evaporation behaviors of CsF in fluoride molten salt, which could further benefit the establishment of efficient separation technique for CsF removal from spent fuel.

**Key words** CsF, FLiNaK, Evaporation, Reductive

中国科学院战略性科技先导专项(No.XDA02030000)资助

第一作者: 贾昀澎, 男, 1991 年出生, 2013 年毕业于兰州大学, 现为硕士研究生, 无机化学专业

通信作者: 付海英, E-mail: fuhaiying@sinap.ac.cn

Supported by the Strategic Priority Program of the Chinese Academy of Sciences (No.XDA02030000)

First author: JIA Yunpeng, male, born in 1991, graduated from Lanzhou University in 2013, master student, major in inorganic chemistry

Corresponding author: FU Haiying, E-mail: fuhaiying@sinap.ac.cn

收稿日期: 2015-09-18, 修回日期: 2016-01-04

熔盐堆燃料在线处理进行裂变产物分离是钍基熔盐反应堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)核能系统主要的研究内容之一<sup>[1]</sup>。Cs 是核裂变的主要产物之一,在熔盐堆液态燃料内以 CsF 的化学形态存在,其物理化学性质与载体盐  ${}^7\text{LiF}\cdot\text{BeF}_2$  相近,能稳定存在于燃料盐中<sup>[2]</sup>。Cs 的同位素  ${}^{137}\text{Cs}$  是核燃料  ${}^{233}\text{U}$  裂变生成的重要核素,裂变产额可达约 6.8%<sup>[3]</sup>,  ${}^{137}\text{Cs}$  半衰期长达 30 a,是出堆燃料盐中主要的短寿命放射性毒物和热源。而另两种同位素  ${}^{135}\text{Cs}$  和  ${}^{133}\text{Cs}$  的中子俘获截面分别达到  $2.5\times 10^{-27}\text{ m}^2$  和  $1.27\times 10^{-26}\text{ m}^2$ ,在堆内长期积累不利于反应堆的正常运行,是中子毒物。

在 TMSR 燃料在线处理流程概念设计中,提出了干法在线分离并循环经济价值高的物质(U 和载体盐  ${}^7\text{LiF}\cdot\text{BeF}_2$ )、离线分离  ${}^{233}\text{U}$  ( ${}^{233}\text{Pa}$  衰变得到)和 Th 的思路,在所设计的流程中选用氟化挥发技术用于铀的分离,减压蒸馏技术用于载体盐的分离和纯化<sup>[4]</sup>。减压蒸馏技术是利用载体盐与其他物质的挥发性差异实现载体盐的纯化。与氟化挥发技术相比,根本的差别在于减压蒸馏分离不需要通过任何化学反应,仅利用物质间物理化学性质的差异。在 20 世纪 60–70 年代,美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)在发展熔钍基盐增殖堆(Molten Salt Breeder Reactor, MSBR)时,也提出采用减压蒸馏净化和回收载体盐的方案,并用熔盐实验反应堆(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE)的真实燃料盐进行了减压蒸馏分离裂变产物并回收载体盐的试验,所回收的载体盐中稀土裂变产物的去污系数超过  $10^2$ ,验证了该方法的可行性<sup>[5–6]</sup>。但研究也表明熔盐减压蒸馏分离稀土类裂变产物所需温度高达 1000 °C,该温度下 CsF 会和载体盐一起被蒸馏收集并回收,无法实现载体盐中 CsF 的分离和去除<sup>[7]</sup>。

20 世纪 90 年代,美国阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)用电化学的方法对 MSRE 的乏燃料盐进行分离研究,发现最困难的是分离与载体盐中 Li 和 Be 同族的 Cs 和 Sr,并提出利用  $\text{BeF}_2$ 、LiF 和 CsF 在高温下的挥发性差异,可行的分离方法还是蒸馏<sup>[8]</sup>。在一定的温度范围内, CsF 的饱和蒸气压比载体盐组分 LiF 和  $\text{BeF}_2$  的饱和蒸汽压略高,700 °C 时 CsF 的饱和蒸汽压为 100 Pa,而 FLiBe ( $\text{LiF}\cdot\text{BeF}_2$  摩尔比 66%–34%)共晶盐的蒸汽压小于 10 Pa<sup>[9]</sup>。这些研究数据表明,通过控制蒸馏条件(温度和压力等),可以从载体盐中分离 CsF。同时,ORNL 也利用 Li 金属在氟盐体系中极强的还原性还原并分离 Cs<sup>[10–11]</sup>,在金属还原萃取实验中采用 Li

金属将 CsF 还原成金属 Cs 并用液态 Bi 金属将 Cs 从氟盐中萃取出来,获得了较好的结果,但金属还原萃取存在熔盐中 Bi 夹带的问题,在 Cs 得到分离时会引入另一杂质 Bi。

本工作采用与熔盐堆载体盐 FLiBe 物化性质相近的 FLiNaK (LiF-NaF-KF 摩尔比 46.5%-11.5%-42%)共晶盐,研究了 CsF 在减压蒸馏条件下的蒸发行和分离率。同时利用金属还原产物 Cs 较低的沸点和在高温下具有高挥发性,用金属 Li 直接还原蒸发的方式替代金属还原萃取法进行 CsF 与载体盐分离的可行性研究。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

试剂: LiF, 纯度 99.99%, 上海中锂实业公司; NaF, 成都西亚试剂公司; KF, 纯度 99.99%, 黄河精细化工有限公司; CsF, 纯度 99.99%, Sigma-Aldrich; Li (颗粒, 4–10 目), 纯度 99%, Sigma-Aldrich; 氩气, 纯度 99.999%, 上海娄氧气体罐装有限公司。

仪器: Optima 8000 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES), 美国 PerkinElmer 公司; NexION 300 D 电感耦合等离子体质谱仪(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS), 美国 PerkinElmer 公司; X 射线多晶衍射仪(X-ray diffraction, XRD; X' Pert Pro MPD), 荷兰帕纳科公司。

### 1.2 实验装置

减压蒸馏装置采用立式真空管式炉(图 1)<sup>[12]</sup>, 由刚玉材质炉膛、蒸发坩埚、加热器、数字压力传感器和真空系统组成, 蒸发坩埚截面积为  $3.8\text{ cm}^2$ 。还原蒸发实验在与氩气气氛覆盖的手套箱相连的电加热炉中进行, 炉膛内和手套箱内的水和氧气含量均小于  $0.1\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 炉内压力为  $1.01\times 10^5\text{ Pa}$ 。所有实验实际温度均用数显热电偶进行了温度校正, 温度误差 $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 1.3 FLiNaK 熔盐本体制备

将 LiF、NaF、KF 在真空干燥箱中 300–400 °C 下干燥 4 h 除水, 然后按 LiF-NaF-KF 为 46.5%-11.5%-42%的比例称重, 添加质量比为 10%–15%的高纯氟化氢铵(经重结晶提纯后含量 $\geq 99.9\%$ ), 密封、混匀。转移至真空熔炼炉中高真空除水 2 h, 充

高纯  $N_2$  (含量为 99.999%) 至常压, 程序升温: 室温至  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , 升温时间为 1 h;  $300\text{--}450\text{ }^\circ\text{C}$ , 升温时间为 2 h;  $450\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$ , 升温时间为 1 h;  $750\text{ }^\circ\text{C}$  保温时间为 2–3 h。冷却至  $600\text{ }^\circ\text{C}$  左右, 倒料至连接的熔盐储罐中冷却至室温<sup>[13]</sup>。取块状熔盐, 在手套箱内研磨备用。

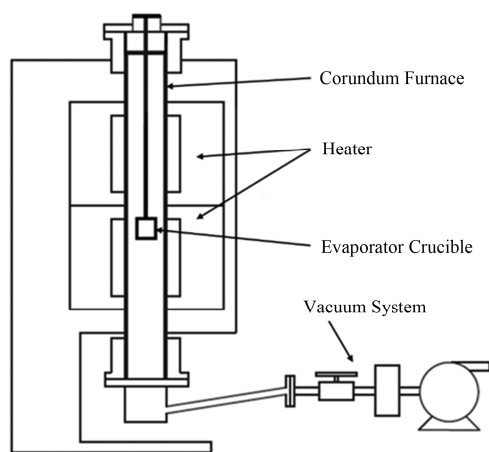


图 1 立式真空管式炉的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of a vertical vacuum tubular furnace.

#### 1.4 FLiNaK-CsF 熔盐的制备

将 FLiNaK 熔盐粉末和 CsF 按照质量比 99:1 称量, 并机械混合均匀, 称量和混合过程均在手套箱中进行。将混合均匀的熔盐粉末置于加热炉内的纯镍坩埚中, 以  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温至  $570\text{ }^\circ\text{C}$ , 保温 5 h, 自然冷却至室温。对冷却盐的不同部位取样, 进行均匀性分析, 确保 CsF 在本体盐中分布的均匀性。将冷却后的盐在手套箱内粉碎并研磨后作为后续实验的原料盐。

#### 1.5 减压蒸馏实验

在氩气气氛的手套箱内称取 10 g FLiNaK-CsF 粉末于蒸发坩埚内, 坩埚置于蒸发炉中, 密封后抽真空至压力为  $(5\pm 2)\text{ Pa}$ , 在  $200\text{ }^\circ\text{C}$  下除去炉膛内的水汽, 升至  $530\text{ }^\circ\text{C}$  并保温 1 h 使熔盐充分熔融, 再升至实验温度 (分别为  $645\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $690\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $740\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $780\text{ }^\circ\text{C}$ ), 在实验温度下蒸发 30 min, 实验结束后继续抽真空, 自然冷却, 粉碎后取样分析。

#### 1.6 金属还原蒸发实验

在氩气气氛的手套箱内称取 10 g FLiNaK-CsF 粉末盐和  $0\text{--}0.5\text{ g}$  的金属 Li 颗粒, 将两者混合于镍坩埚中, 置于氩气气氛的电阻炉炉膛中, 以  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温至  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , 保温 3 h, 实验结束后自

然冷却至室温, 粉碎后取样分析。

#### 1.7 样品分析

样品中的 Cs 采用 ICP-MS 分析, Li、Na、K 采用 ICP-AES 分析。每次实验后将整体熔盐粉碎成粉末, 准确称量 3–4 份熔盐粉末平行样, 用浓  $HNO_3$  在  $190\text{ }^\circ\text{C}$  溶解 30 min, 用去离子水稀释至相应浓度进行测试, 实验结果为平行样测试结果的平均值。熔盐样品整体蒸发量由实验前后熔盐质量差获得。

CsF 蒸发比例的计算公式为:

$$\Psi = \frac{m_0 - m'}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $m_0$  为实验前熔盐中 CsF 的质量;  $m'$  为实验后熔盐中 CsF 的质量。还原蒸发实验中 Cs 的蒸发比例计算公式同式(1), 所用质量以元素 Cs 计。

## 2 结果与讨论

### 2.1 减压蒸馏实验

研究了不同温度 ( $645\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $690\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $740\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $780\text{ }^\circ\text{C}$ ) 和  $5\text{ Pa}$  的真空度下 CsF 的蒸发行为, 得到了 CsF 和熔盐本体在不同温度下的蒸发比例(图 2)。

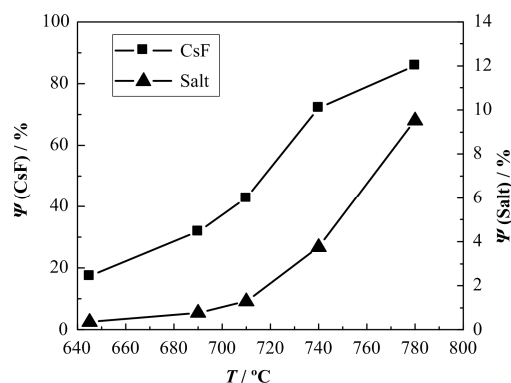


图 2 CsF 和熔盐的蒸发比例随温度的变化曲线  
Fig.2 Evaporation ratios of CsF and molten salts at different temperature.

从图 2 可知, 温度条件对 CsF 的蒸发有较大的影响, 随着温度的升高, CsF 的蒸发比例呈线性上升趋势,  $780\text{ }^\circ\text{C}$  下蒸馏 30 min, 熔盐中 CsF 的含量由 1% 降到 0.14%, FLiNaK 本体盐随温度也有不同程度的蒸发。当蒸发温度升高时, 熔盐本体的蒸发量升高, 在  $710\text{ }^\circ\text{C}$  以前, 载体盐蒸发率增加平缓, 在  $710\text{ }^\circ\text{C}$  以后蒸发率增加显著, 熔盐蒸发比例从  $710\text{ }^\circ\text{C}$  时的 1.3% 增加至  $780\text{ }^\circ\text{C}$  时的 9.5%。在现有实验条件下, 馏分较难收集, 我们对实验前后坩埚中的熔盐进行 Li、Na 和 K 元素含量分析, 获得蒸

发前后熔盐中 Li、Na、K 的含量, 所蒸发掉盐中的三个元素的含量即为两者的差值, 分析和计算结果如表 1 所示, 表明蒸发盐中 Li、Na、K、Cs 元素的质量比约为 1:1:18:2.6, 在此实验条件下以 KF 蒸发为主。

表 1 780 °C、5 Pa 条件下蒸馏 30 min 前后的熔盐组分  
Table 1 Molten salt components before and after distillation under the condition of 780 °C, 5 Pa.

元素 Element	质量 Mass /g		
	蒸馏前 Before distillation	剩余盐 Residual salt	蒸发盐 Distilled salt
Li	0.778	0.751	0.027
Na	0.642	0.614	0.028
K	3.922	3.437	0.485
Cs	0.082	0.012	0.070

Choi 等根据 20 世纪 70 年代 Chao<sup>[14]</sup>得出的碱金属氟化物蒸发的热力学数据, 计算出 FLiNaK 在各纯组分熔点以下温度时各组分分压关系<sup>[15]</sup>, 得出在 500–1 000 °C, 在 FLiNaK (组分摩尔比为 46.5%LiF-11.5%NaF-42%KF) 中, KF 的分压比 LiF 和 NaF 的分压明显要高, 即 KF 的蒸发比例比 LiF 和 NaF 要高, 实验结果也表明, 在蒸发出来的馏分中三者的摩尔比约为 3.3:1:10.4, KF 在该实验条件下最容易蒸发。

从本实验得到的 CsF 和 FLiNaK 随温度变化时各自的蒸发比例来看, 通过减压蒸馏能有效降低熔盐中 CsF 的含量, 但同时存在分离率和熔盐损失率的平衡问题。美国 ORNL 的 Hightower 等<sup>[16]</sup>提出的 MSBR 燃料盐在线处理流程概念设计中, 选用减压蒸馏来回收和纯化载体盐(LiF-BeF<sub>2</sub>), 其实验研究表明在该减压蒸馏(1 000 °C)条件下 CsF 会随载体盐 FLiBe 一并被分离, 表 2 数据也表明, 在此温度下 CsF 与 BeF<sub>2</sub> 的蒸汽压相当。基于 CsF 积累会影响反应堆经济性的考虑, 他们建议对减压蒸馏分两段进行: 第一段为 CsF 分离, 通过控制分离温度和压力, 使大部分 CsF 从载体盐中分离除去, 同时保证载体盐的损失量尽量小; 第二段实施载体盐的蒸发净化回收。但由于美国熔盐反应堆工程停止, CsF 的分离研究也被搁置。

需要指出的是, 在一定的温度范围内, CsF 的蒸汽压虽大于熔盐堆载体盐的主要成分 BeF<sub>2</sub>, 但两者蒸汽压之比小于 CsF 和 FLiNaK 之比。如在 780 °C、5 Pa 的实验条件下, FLiNaK 的蒸发量约为 CsF 的 10 倍, 这表明即使在 BeF<sub>2</sub> 和 CsF 蒸汽压相差最大的温度下实施减压蒸馏分离, 因体系中 BeF<sub>2</sub>

的浓度远大于 CsF, 会有较大量的 BeF<sub>2</sub> 随 CsF 一并分离。

表 2 700 °C 和 1 000 °C 下熔盐的蒸汽压<sup>[7,15,17]</sup>  
Table 2 Vapor pressure of molten salts at 700 °C and 1 000 °C<sup>[7,15,17]</sup>.

熔盐 Molten salts	蒸汽压 Vapor pressure / Pa	
	700 °C	1 000 °C
FLiBe	<10	1×10 <sup>3</sup>
FLiNaK	<1	240
LiF	—	62
BeF <sub>2</sub>	16	8.5×10 <sup>3</sup>
NaF	—	65
KF	—	780
CsF	100	10×10 <sup>3</sup>

## 2.2 金属还原蒸发实验

金属还原蒸发分离利用金属 Li 对 Cs 离子的还原作用和金属 Cs 的低沸点(678 °C)实现对 CsF 的分离。本工作研究了 700 °C 时不同还原剂用量下 CsF 从 FLiNaK 熔盐体系分离的情况。图 3 显示了随着所添加 Li 和熔盐中 Cs 的摩尔比的增加, Cs 的蒸发比例的变化。

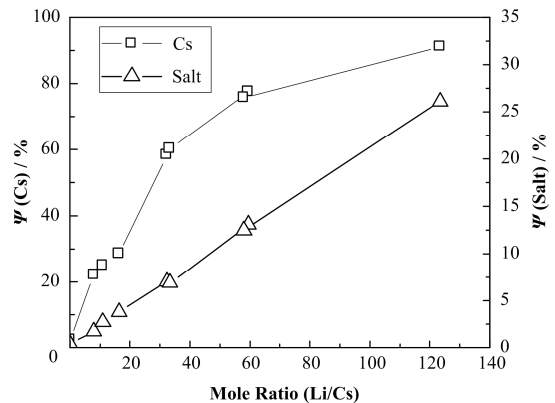
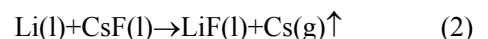


图 3 不同 Li/Cs 摩尔比下 Cs 和熔盐的蒸发比例  
Fig.3 Evaporation ratios of CsF and molten salt at different mole ratios of Li/Cs.

从图 3 可知, 在不添加 Li 的实验中, 700 °C 下蒸发 3 h, Cs 的蒸发比例仅为 2%左右; 随着金属 Li 加入量的增加, Cs 的蒸发比例明显增加, 当 Li/Cs=11:1 时, Cs 的蒸发比例达到 25%, 33:1 时达到 60%, 金属 Li 的添加提高了 CsF 分离率。在加入金属 Li 后, 700 °C 下, 熔盐中发生了如下反应:



众所周知, 金属 Cs 的熔点较低, 仅有 28.4 °C, 沸点也仅有 678 °C, 在该条件下, 由于金属 Cs 蒸汽的不断蒸发, 促使反应不断向右进行。

对实验后所剩的熔盐进行称量, 得出不同 Li 用量下熔盐质量的变化, 如图 3 所示, 随着 Li 用量的增加, 熔盐的蒸发比例线性增加, 并在实验过程中发现有大量金属光泽的产物蒸出, 在室温下呈液态, 如图 4 所示。由于选择的本体盐为 FLiNaK 共晶盐, 其中 Na 和 K 的含量远大于 Cs, 金属 Li 极可能将 Na 和 K 还原成金属并蒸发出来。为证实上述的推测, 我们取少量蒸出冷凝产物涂在载玻片上, 置于塑封袋中进行 XRD 分析, 分析结果如图 5 所示, 蒸出产物主要的组成为 KOH、K<sub>2</sub>O 和金属 K。



图 4 还原蒸发蒸出产物实物图  
Fig.4 Picture of the products after reducing evaporation.

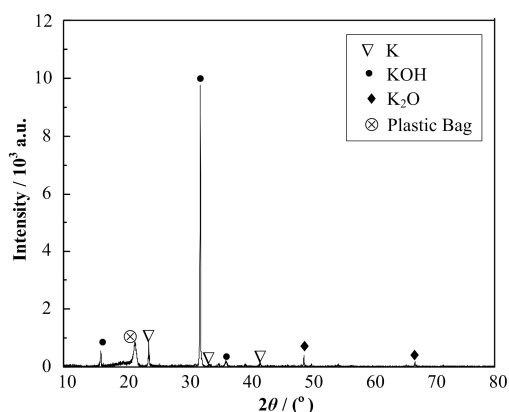


图 5 金属还原蒸发蒸出产物的 XRD 图  
Fig.5 XRD analysis of the products after reducing evaporation.

KOH、K<sub>2</sub>O 的存在是由于金属 K 非常活泼, 在 XRD 测试过程中发生了氧化反应。又将少量冷凝产物溶于稀硝酸中, 通过 ICP-AES 分析 Li、Na、K 的含量, 结果显示 Li、Na、K 的摩尔比为 1:45:640, 说明蒸出产物的主要元素为 K, 只有极少量的 Li。通过以上现象和测试结果, 推测蒸出冷凝的金属为低熔点钾钠合金。

虽然 KF 和 NaF 大量消耗了金属 Li, 但式(2)的发生确实促进了 Cs 的蒸发, Li 金属还原蒸发分离 CsF 的方法在提高 CsF 分离效率的同时, 由于反应在低温常压下进行, 避免了本体盐的挥发。在 FLiNaK 中, Na 和 K 很容易被 Li 还原蒸发, 而真实的熔盐载体盐 FLiBe 中 Be<sup>2+</sup>相对稳定, 不会产生如同 FLiNaK 体系的情况, 还原剂的用量会大大减少, 载体盐的损失也会降低。

### 3 结语

Cs 作为碱金属, 其氯化物的物理化学性质与熔盐堆载体盐主要成分 LiF 极为相近, 在熔盐堆燃料干法处理流程中具有区别于钍铀及其它裂变产物的化学行为。本工作研究了减压蒸馏和金属 Li 还原对 CsF-FLiNaK 熔盐体系中 CsF 的蒸发行为和分离的可能性研究。研究表明, 减压蒸馏能有效从熔盐体系中分离 CsF, 在 5 Pa 蒸馏压力下 CsF 分离率达 86%, 但此时本体盐的蒸发量达 9.5%, 存在载体盐蒸发损失的问题, 在这种情况下需要考虑对随 CsF 蒸发的熔盐进行再处理, 以回收利用尽可能多的载体盐。金属还原蒸发实验中, CsF 的分离率随还原剂 Li 的添加量而提高, 本工作研究中获得 91% 的分离率。还原蒸发的方式仅在常压、较低温度下便可进行, 是可以在保证载体熔盐回收率的同时提高 Cs 的去污的一种方法, 但该方法最大的技术挑战之一是所蒸发的金属 Cs 的截留和收集。

### 参考文献

- 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能——TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 365-374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016  
JIA Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 365-374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016
- Campbell D O, Cathers G I. Processing of molten salt power reactor fuels[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1960, 52(1): 41-44. DOI: 10.1021/ie50601a034
- 林灿生. 裂变产物元素过程化学[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2012: 295  
LIN Cansheng. Process chemistry of fission products[M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2012: 295
- 李晴暖. 钍基熔盐堆核能系统的放射化学[C]. 中国化学会第 29 届学术年会, 北京, 2014  
LI Qingnuan. Radiochemistry of TMSR[C]. The

- twenty-ninth annual meeting of the Chinese Chemical Society, Beijing, 2014
- 5 Scott C D, Carter W L. Preliminary design study of a continuous fluorination-vacuum distillation system for regenerating fuel and fertile streams in a molten salt breeder reactor[R]. ORNL-3791, Tennessee, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1966
- 6 Rosenthal M W, Haubenreich P N, Briggs R B. The development status of molten-salt breeder reactors[R]. ORNL-4812, Tennessee, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1972
- 7 Hightower J R. Relative volatilities of fluorides of Ce, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Ba, Sr, Y and Zr in molten mixtures of LiF and BeF<sub>2</sub> at 1 000 °C[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1972, **17**(3): 342–343. DOI: 10.1021/je60054a022
- 8 Ingersoll D T, Forsberg C W, Ott L J, *et al.* Status of pre-conceptual design of the advanced high-temperature reactor (AHTR)[M]. United States: Department of Energy, 2004
- 9 Olander D R, Fukuda G T, Baes Jr C F. Equilibrium pressures over BeF<sub>2</sub>/LiF (FLiBe) molten mixtures[J]. Fusion Science and Technology, 2002, **41**(2): 141–150
- 10 Rosenthal M W. Molten salt reactor program semiannual progress report for the period[R]. ORNL-4548, Tennessee, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1970: 3
- 11 Perry A M. Molten salt reactor program semiannual progress report for the period[R]. ORNL-4676, Tennessee, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1971: 8
- 12 窦强, 付海英, 杨洋, 等. 温度与气压对 LiF 蒸发速率的影响[J]. 核化学与放射化学, 2014, **36**(6): 357–362. DOI: 10.7538/hhx.2014.36.06.0357
- DOU Qiang, FU Haiying, YANG Yang, *et al.* Distillation behaviors of LiF salt under different pressures and evaporation temperatures[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2014, **36**(6): 357–362. DOI: 10.7538/hhx.2014.36.06.0357
- 13 宗国强, 陈博, 张龙, 等. FLiNaK 熔盐的制备[J]. 核技术, 2014, **37**(5): 050604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.050604
- ZONG Guoqiang, CHEN Bo, ZHANG Long, *et al.* Preparation of FLiNaK molten salt[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(5): 050604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.050604
- 14 Chao J. Thermodynamics of vaporization of alkali fluorides[J]. Thermochemica Acta, 1970, **1**(1): 71–86. DOI: 10.1016/0040-6031(70)85031-6
- 15 Choi Y S, Park H J, Lho T. Evaporation properties of FLiNaK with plasma interaction[J]. Fusion Science and Technology, 2013, **63**(1T): 221–224
- 16 Hightower Jr J R, NcNeese L E. Low-pressure distillation of molten mixtures of lithium fluoride, beryllium fluoride, and zirconium fluoride for removal of rare-earth fission products[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1973, **12**(3): 232–236. DOI: 10.1021/i260047a004
- 17 Yaws C L. Handbook of vapor pressure: inorganic compounds and elements[M]. Vol 4. Gulf Professional Publishing, 1995