

温度与气压对 LiF 蒸发速率的影响

窦强,付海英,杨洋,耿俊霞,王子豪,李文新,吴国忠,李晴暖*

中国科学院上海应用物理研究所,中国科学院核辐射与核能技术重点实验室,上海 201800

摘要:减压蒸馏技术是钍基熔盐反应堆燃料处理中回收和纯化核燃料载体氟盐(${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2$)可选的技术。本工作使用自行设计并研制的热失重蒸发炉,通过观察燃料载体盐的主要成分 LiF 在减压蒸馏过程中的失重行为,研究了蒸发温度和气压对 LiF 蒸发速率的影响。结果表明:LiF 的蒸发速率在随着蒸发温度的升高以及气压下降而增大的变化中存在着明显的拐点,蒸发速率的突变可以用熔盐在低气压条件下的沸腾来解释。并进一步讨论了熔盐的沸腾对减压蒸馏回收和纯化燃料载体氟盐的影响。

关键词:LiF;减压蒸馏;蒸发温度;气压;沸腾

中图分类号:O658.3 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9950(2014)06-0357-06

doi:10.7538/hhx.2014.36.06.0357

Distillation Behaviors of LiF Salt Under Different Pressures and Evaporation Temperatures

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

Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory
of Nuclear Radiation and Nuclear Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract: Low pressure distillation is a preferred technology for recycling the fluoride carrier (${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2$) of molten salt reactor system. In this study, the thermal weight reductions of the LiF salt during low pressure distillation were observed using a salt evaporation furnace for the thermogravimetric analysis, and the evaporation rate of LiF salt was investigated under different pressures and evaporation temperatures. It was found that the evaporation rate of LiF increased sharply with increasing evaporation temperature as well as decreasing pressure. This may contribute to the boiling of LiF salt under low pressures. The effect of the boiling of LiF salt on the recovery of fluoride was also studied in this work. These results are not only important to understand the distillation behaviors of LiF salt but also provide critical information for parameter optimization of the carrier recovery.

Key words: LiF; low pressure distillation; evaporation temperature; pressure; boiling

收稿日期:2014-01-21;修订日期:2014-06-06

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:窦强(1982—),男,新疆伊宁人,副研究员,无机化学专业

* 通信联系人:李晴暖(1973—),女,浙江余姚人,研究员,从事放射化学研究,E-mail: liqingnuan@sinap.ac.cn

近年来,具有能量密度高、洁净、低碳特点的核裂变能获得了迅速发展的机会。熔盐堆是国际上推荐的四代堆(GIV)中唯一的液态燃料反应堆,反应堆中的熔盐同时起着核燃料的载体和冷却剂等双重功能。由于熔盐堆的独特优势,已经引起各国科学家的广泛关注^[1]。中国科学院上海应用物理研究所承担了中国科学院核能先导专项“钍基熔盐堆核能系统(TMSR)”的研究任务。按照熔盐堆设计方案,燃料载体盐采用 LiF 和 BeF₂ 低熔点共晶盐。由于天然 Li 中丰度为 7.5% 的 ⁶Li 的中子俘获截面高达 940 巴(94 MPa),因此,钍基熔盐堆必须使用丰度大于 99.99% 的 ⁷LiF 熔盐。这种高丰度的 LiF 非常昂贵,且全世界每年的产量有限。所以,熔盐堆燃料处理中,除了回收核燃料和 ²³³Pa、去除裂变产物外,还必须及时回收并循环使用 ⁷LiF,以提高熔盐堆电功率的经济性^[2]。

在燃料的高温处理方案中,载体盐的回收计划放在铀氟化挥发工艺之后用减压蒸馏技术完成^[3]。其原理是利用载体盐与大部分裂变产物之间挥发性的差异,在高温低压的条件下,将有用的载体盐蒸馏回收,同时与大多数裂变产物(主要是裂变稀土元素)有效分离。该技术具有工艺简单、无副产物、能耗低等优点^[4-5],因此受到各主要核能国家广泛的兴趣。早在 20 世纪 60 年代美国橡树岭国家实验室(ORNL)就对氟盐的减压蒸馏技术进行了研究。Hightower 等^[6]测定了 Ce、La、Pr、Nd、Sm、Eu、Sr、Y 和 Zr 的氟化物相对于 LiF 的挥发度。文献^[7-9]则设计并制造了一套工程级的减压蒸馏装置,开展了一系列公斤级的非放射性和放射性熔盐蒸馏实验,并取得成功。虽然随着美国熔盐反应堆工程的下马,氟盐的减压蒸馏回收处理技术没有进一步的发展,但是基于减压蒸馏的熔盐处理和回收的研究及其应用依旧在延续。例如,美国爱达荷国家实验室在金属铀乏燃料电解精炼工艺中,将氟盐减压蒸馏技术用于包含熔盐的固态和液态阴极产物的纯化处理^[10-11]。近年来,韩国原子能研究所则将氟盐体系的减压蒸馏技术用于燃料电解精炼过程后的废盐回收和再利用^[12-16]。

为了实现载体盐高效的回收和纯化,除了研制合理的减压蒸馏设备和装置外,还必须详细研究蒸发温度、冷凝温度以及气压等主要工艺条件对减压蒸馏的影响,从而达到优化减压蒸馏工艺的目的。为此,本工作拟以熔盐堆载体盐的主要成分——LiF 盐为研究对象,利用自行研制的热

失重蒸发炉,观察并研究主要蒸馏工艺条件——蒸发温度和气压对 LiF 盐蒸发速率的影响,以了解熔盐在高温减压条件下的蒸发行为,从而为确定载体盐的蒸馏工艺条件提供实验依据。

1 实验部分

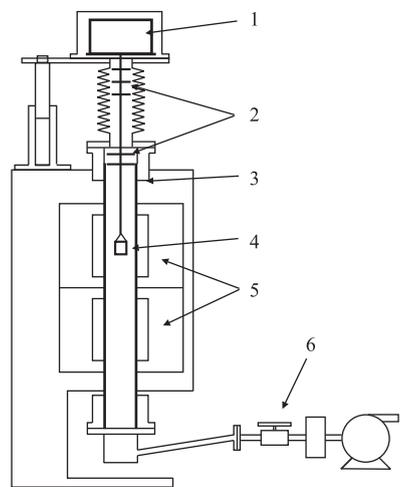
1.1 材料与设备

LiF 盐,纯度 99.99%,国药集团化学试剂有限公司;氩气,纯度 99.999%,上海娄氧气体罐装有限公司。

参考韩国原子能研究所研制的热失重蒸馏装置^[12],并按照氟盐的实验条件和研究需要作了适当修改,研制了热失重蒸发炉,结构示意图示于图 1。蒸发炉由内衬不锈钢衬里的刚玉质炉膛、蒸发坩埚、加热器、称重元件、数字压力传感器和真空系统组成。可利用压力传感器和真空系统来设置调节炉腔内的气压,通过温控仪实现炉体的程序控温。蒸发坩埚截面积为 6.15 cm²,热失重蒸发炉的工作温度范围为 30~1 200 °C,炉腔工作气压范围为 1~10⁵ Pa,压力传感器量程为 1~10⁵ Pa,称重元件量程为 0~8 000 g,灵敏度为 0.01 g,其记录质量数据的频率是每 3 s 记录 1 次。

1.2 实验方法

在氩气气氛的手套箱内称取一定量 LiF 装载在蒸发坩埚内,坩埚置于热失重蒸发炉中,反复抽真空、充氩气的循环操作以排除炉体内的空气。



1——称重元件(Load cell), 2——热辐射盾(Thermal radiation shield),
3——内衬(Liner), 4——蒸发坩埚(Evaporator crucible),
5——加热器(Heater), 6——真空系统(Vacuum system)

图 1 热失重熔盐蒸发炉的结构示意图

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

按实验要求设置蒸发炉的气压 p 和设定温度 θ_1 , 蒸发实验中炉膛都采取如下升温程序:由室温升至 $600\text{ }^\circ\text{C}$ ($10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), $600\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 30 min , $600\text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $800\text{ }^\circ\text{C}$ ($10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), $800\text{ }^\circ\text{C}$ 升至炉膛设定温度 θ_1 ($5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), 炉膛在设定温度 θ_1 下保温蒸发熔盐。并用称重元件实时监测、记录 LiF 熔盐蒸发过程中的质量变化, 换算后得到蒸发速率。由于蒸发实验中熔盐的实际温度与炉膛设定温度可能存在差异, 因此, 在正式实验前的预实验中将一只热电偶探入炉膛中蒸发坩埚将要放置的位置, 然后, 按照与蒸发实验相同的升温程序, 将炉膛升温至设定温度, 并保温 30 min 热电偶显示温度不再变化。这时热电偶测得温度 θ_2 , 由于 θ_2 在达到平衡后获得, 因此可以看作熔盐温度。下文中的熔盐温度或蒸发温度都指的是热电偶测量温度 θ_2 。

在研究蒸发温度对蒸发速率影响的实验中, 炉内气压设置为 5 Pa , 当熔盐样品升温至预设温度值后, 保持温度恒定直至熔盐完全蒸发。实验进行 5 轮, 蒸发温度分别为 880 、 910 、 950 、 $1\ 000$ 、 $1\ 045\text{ }^\circ\text{C}$ 。除了温度为 $1\ 045\text{ }^\circ\text{C}$ 的实验中熔盐用量为 20 g 外, 其余实验均使用 10 g 的熔盐。

气压对蒸发速率影响的实验研究进行了 2 轮, LiF 样品分别使用 12.5 g 和 20.0 g 。蒸发温度设置均为 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$, 气压设置初值为 400 Pa 。当熔盐样品升温至预设的 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 后, 保持恒温恒压的蒸发, 同时用称重元件实时监测记录样品质量。蒸发一定时间后调节气压到下一个更低值, 继续在 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 下蒸发, 实时记录样品质量。蒸发一定时间后再次调低气压, 重复上述步骤直到每轮实验一共完成 5 个循环, LiF 最后被完全蒸发。2 轮实验的蒸发过程中, 气压依次从 400 Pa

改变到 5 Pa (第一轮实验) 或从 300 Pa 改变到 3 Pa (第二轮实验), 每段气压下蒸发时间为 50 min 到 25 min 不等, 较长的蒸发时间适用于蒸发速率较慢的、对应较高气压下的蒸发过程。

2 结果

2.1 蒸发温度对蒸发速率的影响

本工作在 5 Pa 的气压下, 考察温度在 880 、 910 、 950 、 $1\ 000$ 、 $1\ 045\text{ }^\circ\text{C}$ 下 LiF 熔盐的蒸发行为, 得到 LiF 在不同温度下的蒸发失重曲线示于图 2(a)。由于 $1\ 045\text{ }^\circ\text{C}$ 下熔盐蒸发速率过快, 为了更好地观察 LiF 的蒸发过程, 该实验中将样品量增加至 20.0 g 。从图 2(a) 可知: 无论蒸发温度高低, LiF 都能显示平稳的失重过程直至完全蒸发, 但是, 随着蒸发温度的升高, 失重曲线变得愈来愈陡峭, 样品蒸发所需时间愈来愈短。

蒸发速率是熔盐蒸馏工艺中的关键指标, 它表示单位时间内单位面积熔盐的蒸发量。本工作的熔盐蒸发实验中, 实验蒸发速率可通过对图 2(a) 失重曲线求一阶导数再除以坩埚截面积计算得到:

$$v = \frac{1}{S} \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

式中: v , 给定时间的实验蒸发速率, $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$; S , 蒸发面积, cm^2 ; dm , 质量变化量, g ; dt , 时间的变化, min 。由此得到不同温度下 LiF 熔盐的蒸发速率随时间变化曲线示于图 2(b)。由图 2(b) 可知: 随着温度的升高, 蒸发速率显著增大; 在 880 、 910 、 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 下 LiF 熔盐蒸发速率呈现平台, 表明蒸发过程比较平稳, 蒸发速率保持均匀; 而在 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1\ 045\text{ }^\circ\text{C}$ 的较高温度下, 蒸发过程中蒸发速率存在涨落, 尤其在 $1\ 045\text{ }^\circ\text{C}$ 更明显。

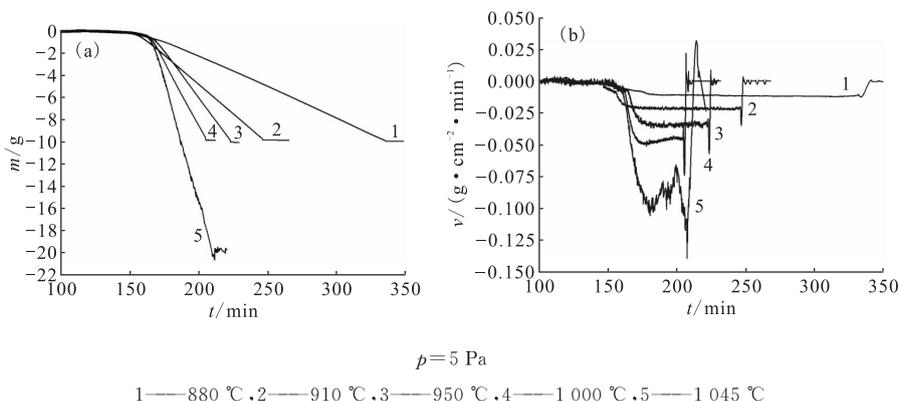
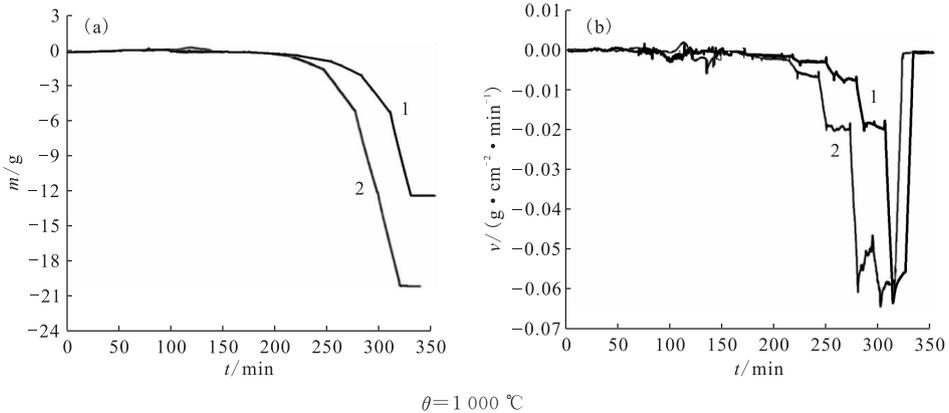


图 2 不同温度下 LiF 熔盐的蒸发失重曲线(a)和蒸发速率曲线(b)

2.2 气压对蒸发速率的影响

为了研究气压对蒸发速率的影响,本工作在 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 下,测量了 LiF 熔盐随气压降低的蒸发失重曲线,结果示于图 3(a)。测量中气压分 5 段逐次下降,对应图 3(a)显示的失重过程从 170 min 开始也分 5 段随着气压的降低显示不同的失重特征。每一时间段失重曲线呈直线下降,表明平稳的蒸发;但随着气压的下降,失重加快,失重曲线变的更为陡峭。为了更清楚看到不同气压段的蒸

发特征,对图 3(a)中曲线求导并除以坩埚截面积获得的蒸发速率随压力变化曲线,结果示于图 3(b)。由图 3(b)可知:每条蒸发速率曲线也以气压变化为界,呈现出了 5 个平台,随着气压的降低, LiF 熔盐蒸发速率依次分段显著增大,表明气压对于熔盐的蒸发速率有着重要影响;在恒定气压时段,大多数情况熔盐的蒸发速率相对稳定,只是在实验测定的最低几个气压下,蒸发速率存在明显涨落。



1——气压先后保持在 400、200、100、50、5 Pa (During this run the pressure was held at 400, 200, 100, 50, 5 Pa in turn), $m(\text{LiF}) = 12.5\ \text{g}$;
2——气压先后保持在 300、150、75、30、3 Pa (During this run the pressure was held at 300, 150, 75, 30, 3 Pa in turn), $m(\text{LiF}) = 20.0\ \text{g}$

图 3 LiF 盐随气压降低的蒸发失重曲线(a)和蒸发速率曲线(b)

Fig. 3 Thermal weight reductions(a) and evaporation rates(b) of LiF salt during the distillation under different pressures

3 讨论

从上述结果可以看到,蒸发速率随蒸发温度增加而增加,而随气压降低而增加。为了更好地表征蒸发速率与温度和气压的关系,这里引入平均蒸发速率 \bar{v} 概念,定义为 $\bar{v} = \frac{1}{S} \frac{\Delta m}{\Delta t}$,即在一定的气压和/或一定温度下的蒸发区段内熔盐的蒸发总量除以

该区段覆盖的时间(折算到单位蒸发面积),在数值上等于该区段蒸发速率的平均值。本工作得到的平均蒸发速率与蒸发温度和气压的关系示于图 4。由图 4(a)可知,随着炉温从 $880\ ^\circ\text{C}$ 升高到 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$,平均蒸发速率从 $1.1 \times 10^{-2}\ \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 逐步增加到 $4.6 \times 10^{-2}\ \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。显然,这是因为熔盐蒸气压随着温度的增加而增加,从而导致平均蒸发速率的稳步增加。值得注意的是当炉膛温度再

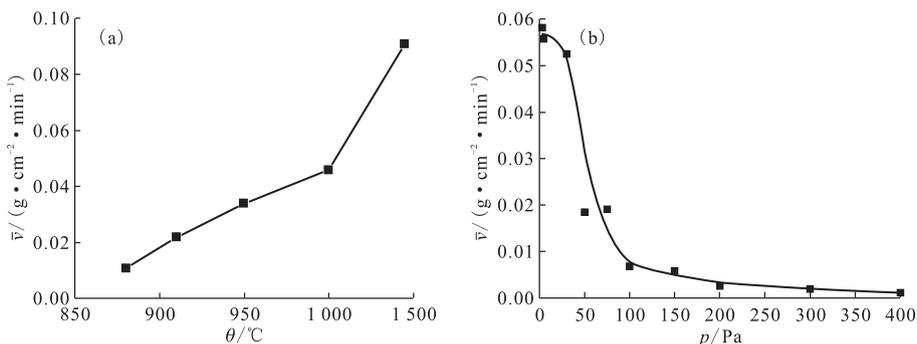


图 4 LiF 平均蒸发速率随温度(a)和气压(b)变化曲线

Fig. 4 Average evaporation rates of LiF salt with regard to temperatures(a) and pressures(b)

增加 45 °C 到 1 045 °C 时,平均蒸发速率从 $4.6 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 跳跃至 $9.1 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。类似的现象在平均蒸发速率与气压依赖关系中同样存在,正如图 4(b)所示,在 1 000 °C 下当气压从 400 Pa 降低到 100 Pa 时,平均蒸发速率只是从 $1 \times 10^{-3} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 缓慢增加到 $7 \times 10^{-3} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。平均蒸发速率的急骤升高发生在气压从 100 Pa 进一步下降后,当气压降到 30 Pa 时,平均蒸发速率迅速跃升到 $5.4 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。由此可见,熔盐蒸发速率与温度和气压的变化依赖关系中都存在蒸发速率突然变化的“拐”点,有理由认为这个拐点应该是由熔盐的沸腾造成的。

众所周知,溶液的蒸气压随温度增加而增加,当蒸气压低于环境气压时,蒸发仅仅发生在液体表面。当溶液蒸气压大于环境气压时,液体内部的蒸气也能摆脱环境气压的抑制冲出液面而蒸发,这就是沸腾。发生沸腾时,液体的蒸发不再是一个表面过程,此时,更多的溶液内部液体一起参与蒸发,因此蒸发速率急骤增加。从图 4(a)可知,拐点处于 1 000 °C,推测沸腾应该发生在略高于 1 000 °C。当炉膛温度设置在 1 045 °C 时,LiF 盐温度达到沸点,蒸发速率骤然增加。熔盐在沸腾时温度不再升高,但是炉膛温度高于沸腾的熔盐温度,源源不断的热量从炉膛输入,保证了液-气转化所需要的大量热量要求,从而使蒸发速率持续保持在一个高水平上。预计炉膛温度进一步增加,使得更多的热量输入坩埚将促使蒸发速率更迅速提高。类似的沸腾现象同样发生在气压对蒸发速率影响的实验中,但具体过程有所不同。如图 4(b)所示,温度保持在 1 000 °C,当气压从 400 Pa 降到 100 Pa 时,平均蒸发速率只有并不显著的增加,且都低于 $7 \times 10^{-3} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,这是因为此时环境气压始终高于熔盐蒸气压,蒸发速率仅仅由于抽气速率的加快而增加。当气压降到 50~75 Pa 时,平均蒸发速率突然明显升高到 $2 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 左右,气压降到 30 Pa 时,平均蒸发速率跃升至 $5.4 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。显然,其原因在于当环境气压下降到与 LiF 熔盐在 1 000 °C 的蒸气压相当或更低时,熔盐进入沸腾状态,坩埚内整体熔盐的蒸发导致蒸发速率急骤增加。因为 30 Pa 下熔盐液面的蒸气无法被真空系统及时抽走,因此继续降低环境气压对蒸发速率不会产生明显影响(图 4(b))。因此,拐点出现在 30~100 Pa。

橡树岭国家实验室早期曾用气体携带法系统

研究了 LiF 熔盐的蒸气压与温度的依赖关系,此方法把一种惰性气体以较小的流速通入氟盐的蒸气中,饱和了氟盐蒸气之后,从出气管中排出,而气体中的蒸气在管中冷凝,分析出气管中的熔盐质量即可算出氟盐的蒸气压,并得到了相应的蒸气压(p)的经验表达式^[17]:

$$\lg p = 30.619 - \frac{15450}{T} - 6.039 \lg T \quad (2)$$

考察本工作 LiF 蒸发速率与温度和气压变化的拐点所对应的温度和气压范围可以发现 ORNL 经验公式计算值与本工作研究结果处于在可以相比较的范围之内,这为提出的沸腾现象以及用沸腾解释实验观察结果提供了进一步的支持。但是定量考察沸腾条件,发现拐点在数值上与公式(2)导出的沸点存在不同程度的差异。例如从图 4(b)看,一个比较合理的拐点可能是 50 Pa 附近。这和公式(2)推算的 1 000 °C 下蒸气压大约为 70 Pa 比较接近。略为偏低的原因可能在于本实验中压力传感器配置在靠近真空系统的抽气端,而离熔盐坩埚距离略远,因此本实验给出的环境气压(50 Pa)可能低于熔盐实际所处的气压(70 Pa)。而图 4(a)显示的有关数据与 ORNL 系统性的差异就更大了,其原因除了气压数据偏低与实际值之外还可能与温度的检测、传热过程和温度的不均匀性等有关。更重要的是与在实验中温度升高伴随沸腾前的过热现象有关。图 2(a)显示:1 045 °C 时,蒸发速率展示的轨迹和显著的涨落或许可看作典型的过热现象存在的迹象。由于过热现象的发生使得实验观察到的沸点会大于真正的沸点,对应的蒸气压也就高于公式(2)系统性的预期值。在本工作中发现熔盐的沸腾以及沸腾前后熔盐蒸发速率截然不同的变化,这对于熔盐回收和纯化的减压蒸馏有着重要影响。

作为高温化学技术研究的热点之一,减压蒸馏技术回收和纯化熔盐已经得到愈来愈多的关注,但是本工作在 LiF 减压蒸馏研究中揭示了熔盐在蒸馏过程中沸腾的发生以及沸腾前后熔盐蒸发速率明显的变化,而蒸发速率明显的变化对熔盐减压蒸馏的工艺参数选择有重要意义。氟盐具有强腐蚀性,这种强腐蚀性在高温条件下显示得更为突出,因此尽可能降低熔盐的蒸发温度,这对减轻氟盐对蒸馏设备的腐蚀性有利。在一定的蒸馏压力下,蒸发温度保持在熔盐沸点以上,将极大提高蒸发速率,减少蒸馏时间。但是,正如图 2(b)指出,此时蒸发速率涨落大,蒸发过程剧烈,

熔盐蒸气气泡破裂可能导致难挥发的裂变产物随 LiF 一起进入产品中,从而降低了 LiF 的放射性去污因子。还有,当熔盐已经在沸腾状态下蒸馏时,继续降低系统的环境气压对蒸发速率并无意义(图 4(b)),反而加大了蒸馏设备建设和维护的成本。总之,在使用减压蒸馏技术回收和纯化氟盐时,应该综合考虑蒸馏设备的成本、能耗、蒸发速率和时间、去污纯化效果等诸多因素,在实验基础上优化蒸馏的蒸发温度和气压。

4 结 论

研究了蒸发温度、气压等条件对于熔盐载体盐的主要成分 LiF 蒸发行为的影响。结果发现,被蒸馏的熔盐在一定条件下会发生沸腾现象,导致蒸发速率急剧增加。在沸点附近,熔盐的蒸发速率对气压和温度的变化非常敏感,表明蒸馏工艺参数的选择非常关键,应该综合考虑设备和运行成本、能耗、熔盐回收效率和去污要求进行优化。本工作对熔盐堆的燃料载体盐、氟盐冷却高温堆的冷却剂熔盐以及乏燃料电化学处理的氯化物熔盐的回收和纯化都有参考价值。但是,当熔盐组成增加到二组分或多组分时,蒸发温度和环境气压对熔盐减压蒸馏的影响必将变得更为复杂,需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] Uhlir J. Chemistry and technology of molten salt reactors: history and perspectives [C]. 7th International Symposium on Molten Salts Chemistry and Technology, Toulouse, France, 2005.
- [2] Rosenthal M W, Haubenreich P N, Briggs R B. The development status of molten-salt breeder reactors; ORNL-4812[R]. USA: ORNL, 1972.
- [3] Long D W, Huang W, Jiang F, et al. Study on the electrochemical extraction of rare earth elements from FLINAK [C]. Global 2013: International Nuclear Fuel Cycle Conference, Salt Lake City, USA, 2013.
- [4] Mcneese L E. Consideration of low pressure distillation and its application to processing of molten-salt breeder reactor fuels; ORNL-TM-1730[R]. USA: ORNL, 1967.
- [5] Eun H C, Yang H C, Lee H S, et al. Distillation and condensation of LiCl-KCl eutectic salts for a separation of pure salts from salt wastes from an electrorefining process [J]. J Nucl Mater, 2009, 395(1-3): 58-61.
- [6] Hightower J R, Mcneese L E. Measurement of the relative volatilities of fluorides of Ce, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Ba, Sr, Y and Zr in mixtures of LiF and BeF₂; ORNL-TM-2058[R]. USA: ORNL, 1968.
- [7] Carter W L, Lindauer R B, Mcneese L E. Design of an engineering-scale, vacuum distillation experiment for molten-salt reactor fuel; ORNL-TM-2213[R]. USA: ORNL, 1968.
- [8] Hightower J R, Mcneese L E. Low-pressure distillation of molten fluoride mixtures; nonradioactive tests for the MSRE distillation experiment; ORNL-TM-4434[R]. USA: ORNL, 1971.
- [9] Hightower J R, Mcneese L E, Hannaford B A, et al. Low-pressure distillation of a portion of the fuel carrier salt from the molten salt reactor experiment; ORNL-TM-4577[R]. USA: ORNL, 1971.
- [10] Westphal B R, Mardsen 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 Technol, 2008, 40(3): 163-174.
- [11] Solbrig C W, Westphal B R, Benedict R W. Thermal performance of the cathode processor; determination of the most important parameter; ANL-NT-174 [R]. USA: Argonne National Laboratory, 2001.
- [12] Yang H C, Eun H C, Kim I T. Study on the distillation rate of LiCl-KCl salt under different vacuum conditions[J]. Vacuum, 2010, 84: 751-755.
- [13] Eun H C, Yang H C, Cho Y Z, et al. Vacuum distillation of a mixture of LiCl-KCl eutectic salts and RE oxidative precipitates and a dechlorination and oxidation of RE oxychlorides[J]. J Hazard Mater, 2008, 160(2-3): 634-637.
- [14] Park S B, Cho D W, Woo M S, et al. Investigation of the evaporation of rare earth chlorides in a LiCl-KCl molten salt[J]. J Radio Nucl Chem, 2011, 287(2): 603-608.
- [15] Eun H C, Yang H C, Cho Y J. Separation of pure LiCl-KCl eutectic salt from a mixture of LiCl-KCl eutectic salt and rare-earth precipitates by vacuum distillation[J]. J Nucl Sci Technol, 2008, 40(10): 1295-1300.
- [16] Yang H C, Eun H C, Lee H S, et al. Closed chamber salt distillation system for an enhanced recovery of evaporated pure salt[J]. J Nucl Sci Technol, 2010, 47(11): 973-976.
- [17] Smith F J, Ferris L M, Thompson C T. Liquid-vapor equilibria in LiF-BeF₂ and LiF-BeF₂-ThF₄ systems; ORNL-4415[R]. USA: ORNL, 1969.