

高温 FLiBe 熔盐颗粒粒径分布特征研究

刘立志^{1,2} 付海英¹ 刘忠英¹ 马继飞¹ 杜林¹
唐晓星¹ 钱渊¹ 姚剑¹ 李玉兰¹

1(中国科学院上海应用物理研究所 微观界面物理与探测重点实验室 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 含铍熔盐有很强的化学毒性,为了实现高温含铍熔盐颗粒的准确监测和有效去除,了解其粒径分布特征是解决问题的关键。基于熔盐减压蒸馏实验装置和低压冲击采样器,搭建了用于测量高温熔盐颗粒粒径的实验装置,并研究不同实验工况下 FLiBe 熔盐的粒径分布。实验结果表明:常温下熔盐颗粒粒径分布集中在 2.5 μm 以上;而高温(930 $^{\circ}\text{C}$)下则集中在 0.26~2.5 μm 。同时研究了高温实验工况下,气体吹扫和采样时间对熔盐颗粒粒径分布的影响。研究表明:采样时间并未对粒径分布产生明显影响;而气体吹扫虽然改变了最终熔盐颗粒的排放浓度,但未对粒径分布产生显著影响。样品扫描电镜结果验证了实验装置粒径刻度的准确性,而观测到熔盐颗粒呈规则的球形而非晶状这一现象,推测是由熔盐颗粒碰撞沉积导致。

关键词 钍基熔盐堆, FLiBe, 高温熔盐, 粒径分布

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.100605

Study on the particle size distribution of high temperature FLiBe molten salt

LIU Lizhi^{1,2} FU Haiying¹ LIU Zhongying¹ MA Jifei¹ DU Lin¹
TANG Xiaoxing¹ QIAN Yuan¹ YAO Jian¹ LI Yulan¹

1(Key Laboratory of Interfacial Physics and Technology, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

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

Abstract [Background] Beryllium bearing molten salt has strong chemical toxicity, hence needs to be accurately monitored and effectively removed at high temperature. [Purpose] This study aims at the characteristics of particle size distribution of high temperature FLiBe molten salt. [Methods] Based on the experimental device of low pressure distillation of molten salt and Dekati low pressure impact sampler (DLPI), an experimental device for measuring the particle size of high temperature molten salt particles was set up, and the particle size distribution of FLiBe molten salt under different experimental conditions was studied. The effect of gas purging and different sampling time on the particle size distribution of molten salt particles under high temperature were investigated, and scanning electron microscope (SEM) was employed to examine the experimental measurement results. [Results & Conclusions] The experimental results show that the particle size of the molten salt particles is concentrated above 2.5 μm at room temperature, while at high temperature, it is concentrated at 0.26~2.5 μm . The sampling time has no obvious influence on the particle size distribution of molten salt particles; although the final concentration of molten salt particles is changed by gas purging, it does not significantly affect the particle size distribution. The SEM results of

国家自然科学基金(No.11705267)、王宽诚教育基金(No.GJTD-2018-10)资助

第一作者: 刘立志, 男, 1993年出生, 2016年毕业于南京工业大学, 现为硕士研究生, 研究方向为高温熔盐颗粒物特征研究

通信作者: 李玉兰, E-mail: liyulan@sinap.ac.cn; 姚剑, E-mail: yaojian@sinap.ac.cn

收稿日期: 2020-04-08, 修回日期: 2020-07-11

Supported by National Natural Science Youth Fund (No.11705267) and WANG Kuancheng Education Fund (No.GJTD-2018-10)

First author: LIU Lizhi, male, born in 1993, graduated from Nanjing University of Technology in 2016, master student, focusing on the characteristics of high temperature molten salt particles

Corresponding author: LI Yulan, E-mail: liyulan@sinap.ac.cn; YAO Jian, E-mail: yaojian@sinap.ac.cn

Received date: 2020-04-08, revised date: 2020-07-11

the collected samples verify the accuracy of the particle size scale of the experimental device, and it is observed by SEM that the molten salt particles are in the shape of regular spherical rather than crystalline, which may be caused by the collision and deposition of molten salt particles.

Key words TMSR, FLiBe, High temperature molten salt, Particle size distribution

含铍熔盐的化学毒性很强,在2012年被国际癌症研究机构列为一类致癌物^[1]。铍的主要危害是吸入毒性,含铍颗粒(尤其是 BeF_2 等易溶于水的化合物)随着呼吸进入人体,对肺部造成不可逆的损伤^[2-4]。而FLiBe熔盐作为钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)专项的冷却剂和燃料盐载体,其安全控制不可忽视。研究发现颗粒物粒径分布会严重影响除铍效率^[5]。针对熔盐制备与反应堆运行的特殊高温工况,为了实现对含铍熔盐颗粒的准确监测和有效去除,必须充分了解高温FLiBe熔盐颗粒的粒径分布和形态特征。

高温FLiBe熔盐具有熔点低、沸点高、热容高、腐蚀性较强等特点,目前研究领域主要集中在堆冷却剂^[6-7]、腐蚀机理与防腐机制^[8-13]和热物理性质^[14-17]等方面,但对高温FLiBe熔盐尾气的粒径分布研究鲜有报道。研究发现不同粒径的颗粒物对人的伤害程度不同,并且越细的颗粒物对人的伤害也越大。超细颗粒物(粒径小于 $0.1\ \mu\text{m}$)可穿透肺泡进入血液循环系统,造成心脑血管等系统结构和功能的损害^[18-21]。因此对含毒颗粒的监测和处理更为重要。

本文通过搭建与低压冲击采样器(Dekati Low Pressure Impactor, DLPI)连接的熔盐减压蒸馏实验装置,研究了不同工况下高温FLiBe熔盐颗粒的粒径分布特征及其影响因素,以及熔盐颗粒的微观结构,为监测和去除高温尾气中的熔盐颗粒提供实验依据。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

高温熔盐颗粒粒径分布特征研究装置(如图1)基于减压蒸馏实验装置与DLPI搭建。其中,DLPI出口设置压力计,监测采样过程中的压力变化,保证DLPI粒径大小刻度的准确性。为保证实验结果的可靠性,所有采样气体均未经过过滤器。减压蒸馏实验装置^[22]的工作原理为利用熔盐主要成分碱和碱土金属卤化物在低压(真空)条件下比大多数裂变产物明显高的蒸气压来回收载体熔盐并分离大量裂变产物。低压冲击采样器用于将气体中的熔盐颗粒分级采集在滤膜上,通过分析滤膜上Be的浓度,得到熔

盐颗粒的粒径分布。实验所用滤膜为Whatman公司生产的Nuclepore聚碳酸酯膜。

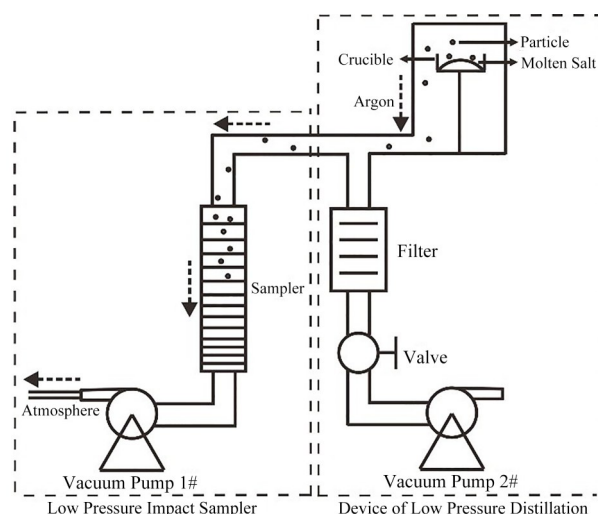


图1 高温熔盐颗粒粒径分布特征研究装置
Fig.1 Schematic diagram of device for studying particle size distribution of molten salt particles at high temperature

FLiBe熔盐是 LiF 和 BeF_2 按摩尔比2:1混合后形成的复盐 Li_2BeF_4 ,熔点 $459\ ^\circ\text{C}$,沸点 $1430\ ^\circ\text{C}$ 。实验最终温度定为高于FLiBe熔盐熔点的 $930\ ^\circ\text{C}$,保证了足够的熔盐蒸发速率与蒸发量,为熔盐颗粒的去除提供必要的技术支持。具体实验步骤为:开启2#真空泵,压力维持约 $0.1\ \text{Pa}$,室温下经 $1.5\ \text{h}$ 升温至 $710\ ^\circ\text{C}$,关闭2#真空泵,保温 $1\ \text{h}$ 后经 $0.5\ \text{h}$ 升温至 $930\ ^\circ\text{C}$,DLPI采样时维持1#真空泵运行,抽气速度为 $30\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,气体压力约 $8.0\sim 9.5\ \text{kPa}$;常温常压条件下选择涉铍手套箱内的气体作为采样对象(见表1)。

表1 实验条件
Table 1 Experimental conditions

编号 No.	温度 Temperature / $^\circ\text{C}$	压强 Pressure / kPa	采样时间 Time / min	吹扫气体 Purge gas
a	常温 Normal	常压 Normal	30	—
b	930	8.0~9.5	30	—
c	930	8.0~9.5	30	氩气 Ar
d	930	8.0~9.5	15	氩气 Ar

1.2 样品分析

采样滤膜用微波消解仪(屹尧科技,Topex)做样品处理与试剂空白,具体操作参考《空气和废气颗粒

物中铅等金属元素的测定电感耦合等离子体质谱法》(HJ 657-2013)^[23]。采样滤膜上Be浓度用电感耦合等离子体质谱仪(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)(Thermo Fisher, X Series)分析测定,具体操作如下:

1) 仪器校准

开启等离子体后将仪器预热 20 min。用 $1 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 质谱仪校准溶液优化仪器参数,再用 $5 \sim 10 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 多元标准溶液对仪器进行质量校正和分辨率校验。

2) 标准溶液与内标

将铍标准溶液按照浓度从低到高顺序依次测定。测试使用钬为内标,将标准溶液在样品雾化前以蠕动泵的另一进样管加入,从而与样品充分混合。

3) 样品测定

先用质量分数为 2% 硝酸对测样系统进行彻底清洗。从空白样品开始测定,每测完一个样品,均需将进样管经 2% 硝酸溶液(质量分数)和超纯水浸洗后再测定其他样品,以避免样品间相互干扰。若样品中铍的浓度超出标准曲线线性范围,则将该样品适当稀释后重新测定。

4) 结果计算与表示

不同粒径熔盐颗粒铍浓度计算公式:

$$C_i = \frac{(c_i - c_0) \cdot N_i \cdot V_i}{v_i \cdot t_i} \quad (1)$$

式中: C_i 为 i 样品铍浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; c_i 为 i 样品溶液铍浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; c_0 为空白样品溶液铍浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; N_i 为 i 样品稀释倍数,无单位; V_i 为 i 样品定容体积, mL; v_i 为 i 样品抽气速度, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; t_i 为 i 样品采样时间, min。

2 结果与讨论

2.1 常温常压下涉铍手套箱内熔盐颗粒粒径分布特征

在常温常压下,使用 DLPI 采集涉铍手套箱内空气中的熔盐颗粒样品,分析其中的 Be 浓度,结果如图 2 所示。实验结果表明:在常温常压环境中,熔盐颗粒主要集中在大于 $2.5 \mu\text{m}$ 的大粒径范围内。同时比较同样在常温常压下熔盐制备现场熔盐颗粒的粒径分布(图 2),进一步证实了常温常压下熔盐颗粒主要集中在大粒径范围内这一结论。

由图 2 中数据对比可以发现,相对手套箱这种封闭环境和熔盐制备现场这种敞开式的环境,熔盐颗粒在封闭环境中更容易积聚形成大颗粒。因此在处理尾气中熔盐颗粒的时候,可以考虑先将含熔盐

颗粒的尾气经过大体积缓冲罐,让含熔盐的尾气有机会积聚、沉降,从而降低其浓度,再汇入其他处理工艺中。

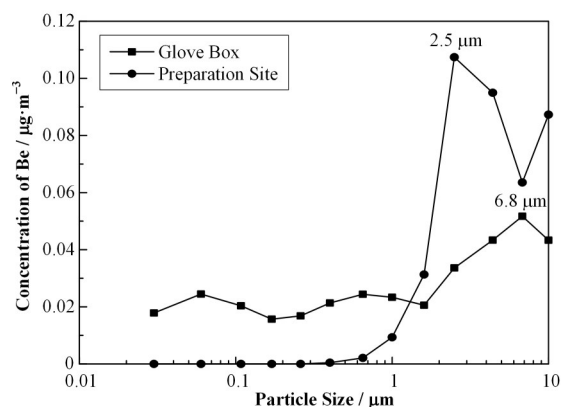


图2 氩气氛围手套箱和熔盐制备现场空气铍颗粒粒径分布
Fig.2 Particle size distribution of Be in argon in glove box and in air of molten salt preparation site

2.2 不同工况下熔盐颗粒的粒径分布特征

针对常温常压、高温密闭、高温气体吹扫(模拟反应堆运行工况)这三种不同工况,使用 DLPI 分别采集减压蒸馏腔体内气氛中的熔盐颗粒样品。在常温常压的手套箱内,高温熔盐自然挥发,遇空气骤冷积聚形成颗粒;而高温密闭和高温氩气吹扫则是强制抽出熔盐蒸汽,在略低于蒸发温度下形成颗粒。分析不同工况下的 Be 浓度,结果如图 3 所示。

实验结果表明,常温和高温状态下熔盐颗粒的粒径分布有明显区别:常温下的熔盐颗粒在冷凝积

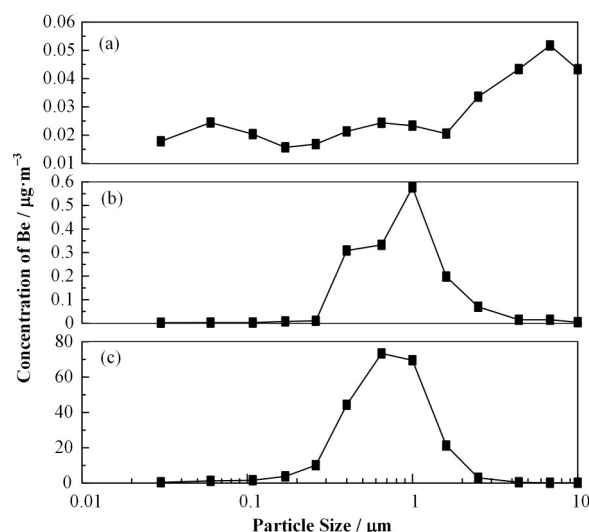


图3 不同工况下减压蒸馏腔体内熔盐颗粒中Be浓度的粒径分布

(a) 常温常压, (b) 高温密闭, (c) 高温氩气吹扫

Fig.3 Particle size distribution of Be concentration in molten salt particles in vacuum distillation chamber under different working conditions

(a) Normal temperature and pressure, (b) High temperature sealing, (c) High temperature argon purge

聚的作用下大部分集中在大粒径段范围(大于 $2.5\ \mu\text{m}$), 熔盐颗粒随着粒径减小铍的浓度迅速降低; 而高温下的熔盐颗粒则大部分集中在 $0.26\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的粒径范围内, 在粒径大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 和小于 $0.26\ \mu\text{m}$ 范围内铍的浓度随熔盐粒径变化快速减小。从图3实验数据(a)与(b)、(c)对比来看, 温度和压强对熔盐颗粒粒径分布和Be浓度有重要影响, 而(b)和(c)的数据显示, 虽然在高温下气体吹扫对Be浓度影响很大, 但对粒径分布的结果影响有限。

2.3 熔盐颗粒粒径分布特征的影响因素

2.3.1 影响因素讨论

为了模拟熔盐真实应用场景, 选取气体吹扫和采样时间两个变量。在真实的熔盐应用环境中, 熔盐颗粒会被通入的氩气裹挟带走, 氩气吹扫可能会对熔盐颗粒的粒径分布产生影响。熔盐颗粒是不断产生并生长的, 采样时间的长短可能直接影响到熔盐颗粒的粒径分布情况。

2.3.2 气体吹扫

气体吹扫对熔盐颗粒粒径分布的影响结果可以见图3(b)和(c), 这两次实验在保证其他实验条件相同的情况下, 分别采用密闭蒸发和通入氩气载带蒸发两种方式。结果发现, 高温状态下, 两次实验的Be浓度和峰值都有差异, 但熔盐颗粒都集中在 $0.26\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的粒径范围内。在氩气吹扫条件下, 熔盐气压减小, 熔盐蒸发速率大幅增加, 高速氩气气流裹挟大量颗粒进入采样器, 导致铍浓度增大两个数量级。采样压力的变化对粒径分布有影响, 但峰值偏移不大, 可以为尾气处理工艺的设计提供参考。氩气的通入并未改变熔盐颗粒的碰撞概率, 从而对熔盐颗粒的粒径分布产生明显影响, 这说明有无气体吹扫没有造成熔盐颗粒粒径分布的显著影响。

2.3.3 采样时间

在高温气体吹扫的工况下, 保证其他实验条件相同, 分别采集 15 min 和 30 min 的熔盐颗粒样品, 分析其中的Be浓度, 结果如图4所示。实验结果表明, 采样时间的变化没有对熔盐颗粒粒径分布产生明显影响。这一方面说明了粒径分布结果的可重复性和可靠性, 也证明了监测工艺的可行性。另外两次实验采样时间分别为 15 min 和 30 min, 而后者浓度峰值大约是前者的两倍, 推测随着时间推移熔盐颗粒产生速率有逐渐增大的趋势。综上所述, 我们可以得出气体载带的高温 FLiBe 熔盐颗粒的粒径分布主要集中在 $0.26\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的粒径范围内这一结论, 从而为熔盐堆的尾气处理方案提供准确有效的实验数据。

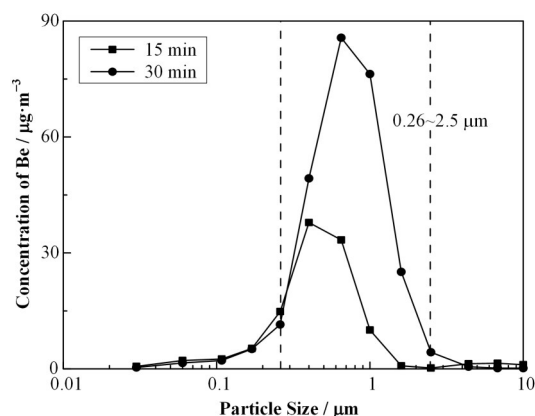


图4 不同采样时间对熔盐颗粒粒径分布的影响
Fig.4 Effect of different sampling time on particle size distribution of molten salt

2.4 微观结构熔盐颗粒的形态特征

DLPI的粒径刻度依赖于流经的气体压力, 只有在出口压力保持在 10 kPa 的时候, 厂家提供的粒径刻度才是可信的。但是, 在实际的实验过程中, 无论是密闭工况还是气体吹扫工况, 都很难保证出口压力一直维持在 10 kPa, 这就可能造成 DLPI 粒径刻度的不准确。因此, 为了校准前期实验结果中的粒径刻度, 我们使用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) (LEO, 1530VP) 从微观结构分析不同粒径采样膜上熔盐颗粒的大小 (以熔盐颗粒粒径为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的采样膜为例), 分析结果如图5所示。

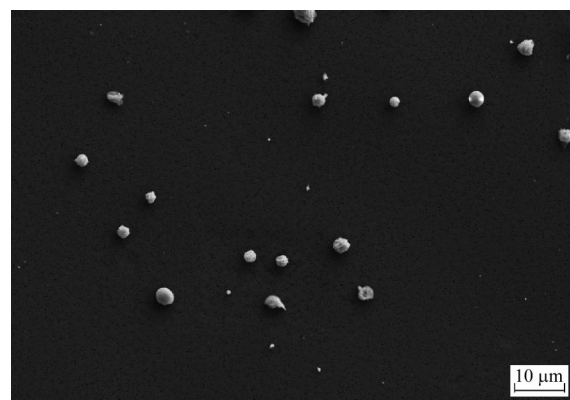


图5 熔盐颗粒粒径为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的采样膜扫描电镜结果
Fig.5 Results of SEM by using sample film with molten salt particle size of $2.5\ \mu\text{m}$

从图5可以看出, 熔盐颗粒粒径为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的采样膜上的熔盐颗粒大小不一, 但大部分颗粒的粒径大小集中在 $2.5\ \mu\text{m}$ 附近, 这与 DLPI 的粒径刻度十分相符, 也表明了前期实验结果的准确性。另外, 从图上还可以发现, $2.5\ \mu\text{m}$ 左右的熔盐颗粒呈现规则的球形, 而不是晶体状, 可能是熔盐颗粒碰撞沉积导致的。至于这一变化具体是在减压蒸馏腔体内还是在传输管道中发生的, 还需要进行深入研究。

3 结语

考虑到FLiBe熔盐中铍和氟的化学毒性,如何有效去除工艺尾气中的熔盐颗粒是熔盐堆安全开展的一个重要环节,而高温熔盐颗粒的粒径分布是尾气处理工艺设计的关键参数。

本研究基于熔盐减压蒸馏实验装置,利用低压冲击采样器通过滤膜分级采集—ICP-MS分析的方式研究实验过程中高温FLiBe熔盐颗粒的粒径分布,为熔盐颗粒的去除提供实验依据。研究结果表明:

1)常温和高温下熔盐颗粒的粒径分布是有区别的:常温下的熔盐颗粒分布集中在大粒径段(大于 $2.5\text{ }\mu\text{m}$);而高温下则集中在 $0.26\sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

2)高温下,气体吹扫和采样时间对熔盐颗粒样品采集量有影响,但对粒径分布没有明显影响。

3)规则球形而非晶体状的扫描电镜结果说明熔盐颗粒的生长可能是由其碰撞沉积导致。

参考文献

- Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1 - 124[DB/OL]. 2019-07-16. <https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications>.
- Infante P F, Newman L S. Beryllium exposure and chronic beryllium disease[J]. Lancet, 2004, **363**(9407): 415 - 416. DOI: 10.1016/S0140-6736(04)15523-2.
- Strupp C. Beryllium metal I. experimental results on acute oral toxicity, local skin and eye effects, and genotoxicity[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2011, **55**(1): 30 - 42. DOI: 10.1093/annhyg/meq071.
- Strupp C. Beryllium metal II. a review of the available toxicity data[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2011, **55**(1): 43-56. DOI: 10.1093/annhyg/meq073.
- 凡思军, 吴磊, 刘忠英, 等. 超声波增湿撞击流泡沫捕捉塔处理含铍废气研究[J]. 核技术, 2016, **39**(1): 010604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.010604. FAN Sijun, WU Lei, LIU Zhongying, *et al.* Purification of Be-containing offgas by ultrasonic atomization-impinging stream foam tower[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(1): 010604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.010604.
- 周俊, 陈金根, 余呈刚, 等. FLi/FLiBe盐中 ^7Li 富集度对熔盐快堆钍铀转换性能的影响研究[J]. 核技术, 2019, **42**(11): 110601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110601. ZHOU Jun, CHEN Jingen, YU Chenggang, *et al.* Influence of ^7Li enrichment in FLi/FLiBe on Th-U conversion performance for molten salt fast reactor[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(11): 110601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110601.
- Ying D C, Yang H R, Lyu H W, *et al.* Activation of FLiBe coolant in the molten salt reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, **129**: 62 - 66. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.01.038.
- Kondo M, Nagasaka T, Sagara A, *et al.* Metallurgical study on corrosion of austenitic steels in molten salt LiF-BeF₂ (FLiBe)[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, **386** - **388**: 685 - 688. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.12.317.
- Zheng G Q, He L F, Carpenter D, *et al.* Corrosion-induced microstructural developments in 316 stainless steel during exposure to molten Li₂BeF₄(FLiBe) salt[J]. Journal of Nuclear Materials, 2016, **482**: 147 - 155. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2016.10.023.
- Zheng G Q, Kelleher B, Cao G P, *et al.* Corrosion of 316 stainless steel in high temperature molten Li₂BeF₄ (FLiBe) salt[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, **461**: 143 - 150. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2015.03.004.
- Kondo M, Nagasaka T, Xu Q, *et al.* Corrosion characteristics of reduced activation ferritic steel, JLF-1 (8.92Cr-2W) in molten salts FLiBe and flinak[J]. Fusion Engineering and Design, 2009, **84**(7 - 11): 1081 - 1085. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2009.02.046.
- Elbakhshwan M, Doniger W, Falconer C, *et al.* Corrosion and thermal stability of CrMnFeNi high entropy alloy in molten FLiBe salt[J]. Scientific Reports, **9**(1): 18993. DOI: 10.1038/s41598-019-55653-2.
- Kondo M, Nagasaka T, Muroga T, *et al.* High performance corrosion resistance of nickel-based alloys in molten salt flibe[J]. Fusion Science and Technology, 2009, **56**(1): 190 - 194. DOI: 10.13182/FST09-A8900.
- Mei L W, Cai X Z, Jiang D Z, *et al.* The investigation of thermal neutron scattering data for molten salt FLiBe[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2013, **50**(7): 682 - 688. DOI: 10.1080/00223131.2013.785283.
- Britsch K, Anderson M, Brooks P, *et al.* Natural circulation FLiBe loop overview[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, **134**: 970 - 983. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.180.
- Romatoski R R, Hu L W. Fluoride salt coolant properties for nuclear reactor applications: a review[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, **109**: 635 - 647. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.05.036.

- 17 Zhu Y, Hawari A I. Thermal neutron scattering cross section of liquid FLiBe[J]. Progress in Nuclear Energy, 2017, **101**: 468 - 475. DOI: 10.1016/j.pnucene.2017.03.028.
- 18 李林. 不同粒径的大气颗粒物对各疾病别死亡的急性效应的研究[D]. 天津: 南开大学, 2014.
LI Lin. Study on acute cause-specific mortality effects of different size fractions of atmospheric particulate matter [D]. Tianjin: Nankai University, 2014.
- 19 Kreyling W G, Semmler-Behnke M, Takenaka S, *et al.* Differences in the biokinetics of inhaled nano-versus micrometer-sized particles[J]. Accounts of Chemical Research, 2013, **46**(3): 714 - 722. DOI: 10.1021/ar300043r.
- 20 Geiser M, Kreyling W G. Deposition and biokinetics of inhaled nanoparticles[J]. Particle and Fibre Toxicology, 2010, **7**(1): 1 - 17. DOI: 10.1186/1743-8977-7-2.
- 21 Miller M R, Raftis J B, Langrish J P, *et al.* Inhaled nanoparticles accumulate at sites of vascular disease[J]. ACS Nano, 2017, **11**(5): 4542 - 4552. DOI: 10.1021/acsnano.6b08551.
- 22 付海英, 耿俊霞, 杨洋, 等. 乏燃料干法后处理中的熔盐减压蒸馏技术[J]. 核技术, 2018, **41**(4): 040001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040001.
- FU Haiying, GENG Junxia, YANG Yang, *et al.* Low pressure distillation technology of molten salt in spent fuel pyroprocessing field[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(4): 040001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040001.
- 23 中华人民共和国环境保护部. 中华人民共和国环保行业标准: 空气和废气 颗粒物中铅等金属元素的测定电感耦合等离子体质谱法[S]. HJ 657-2013. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environmental Protection Standard of the People's Republic of China: Ambient air and stationary source emission - determination of metals in ambient particulate matter - inductively coupled plasma/mass spectrometry (ICP-MS)[S]. HJ 657-2013. Beijing: China Environment Science Press, 2013.