

固态燃料钍基熔盐实验堆燃耗补偿棒位计算

朱贵凤 严睿 于世和 彭红花 康旭忠 杨璞 周波 邹杨

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 燃耗补偿棒位是反应堆监测的一项重要参数,同时棒位移动会对堆芯物理参数分布造成影响。计算了固态燃料钍基熔盐实验堆(Thorium Molten Salt Reactor with Solid Fuel, TMSR-SF1)的补偿棒位变化,并分析其对功率、通量及燃耗分布的影响。在一般蒙特卡罗燃耗软件基础上耦合了调棒临界搜索功能,计算表明大部分临界搜索只需三次,验证了算法收敛的有效性。对 TMSR-SF1 未分组补偿棒方案进行了计算,结果表明:补偿棒位在氙平衡及寿期末时刻有较大提升幅度,其余时刻近似线性上升;补偿棒初期在总行程一半偏上位置,增加了堆芯轴向功率及中子通量分布的不均匀性,相对寿期末功率峰因子偏大 17%,最大中子通量偏大 12%。该变化未对总体设计参数造成显著影响,证明补偿棒未分组方案具有设计可行性。

关键词 燃耗, 补偿棒, 固态燃料钍基熔盐实验堆

中图分类号 TL3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.110601

Location calculation of shim rods in thorium molten salt reactor with solid fuel

ZHU Guifeng YAN Rui YU Shihe PENG Honghua KANG Xuzhong YANG Pu
ZHOU Bo ZOU Yang

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

Abstract [Background] The location of shim rods is one important monitoring parameter of nuclear reactor, and the shift of shim rods will affect the core physical parameters. [Purpose] This study aims to calculate the location of shim rods varied with burnup time in thorium molten salt reactor with solid fuel (TMSR-SF1), and analyze its effect on the spatial distribution of power density, flux and burnup. [Methods] A reactivity search by adjusting shim rods is coupled to conventional Monte Carlo burnup code. It is validly shown that 3 times are mostly required to realize reactivity convergence. The location of shim rods with one group scheme in TMSR-SF1 is calculated. [Results] Results show that shim rods are sharply moved when near to the time of xenon equilibrium and end of life, while linear changed under middle burnup time. Shim rods at the beginning are located in the upper side of half rod route, which increases the axial unevenness of power density and flux. The power peak factor and maximum flux are 17% and 12% larger than those at the end of life. [Conclusions] This change of power peak factor and maximum flux are accepted and it is feasible to use one group scheme of shim rods in TMSR-SF1.

Key words Burnup, Shim rods, TMSR-SF1

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02010000)、中国科学院前沿科学重点研究项目(No.QYZDY-SSW-JSC016)资助

第一作者: 朱贵凤, 男, 1987 年出生, 2015 年于中国科学院大学获博士学位, 研究方向为反应堆物理

通信作者: 邹杨, E-mail: zouyang@sinap.ac.cn; 严睿, E-mail: yanrui@sinap.ac.cn

收稿日期: 2018-06-22, 修回日期: 2018-09-18

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02010000), the Frontier Science Key Program of Chinese Academy of Sciences (No.QYZDY-SSW-JSC016)

First author: ZHU Guifeng, male, born in 1987, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2015, focusing on reactor physics research

Corresponding author: ZOU Yang, E-mail: zouyang@sinap.ac.cn; YAN Rui, E-mail: yanrui@sinap.ac.cn

Received date: 2018-06-22, revised date: 2018-09-18

固态燃料钍基熔盐实验堆(Thorium Molten Salt Reactor with Solid Fuel, TMSR-SF1, 简称 SF1)^[1-2]是采用球型燃料元件^[3]和熔盐冷却介质^[4]的高温、低压新型反应堆,具有较高的固有安全性^[5-8]。球型燃料元件从底部进入堆芯,通过熔盐浮力作用从顶部排出;其可以实现在线换料操作,并维持较低的剩余反应性。

作为首个以熔盐为传热介质的球床实验堆,燃料球在堆芯的堆积及流动规律数据仍在积累^[9-10],熔盐环境下的燃料球操作技术有待检验。因此 SF1 第一阶段采用一次燃料装载方案,预备反应性满足寿期要求,需要一定的补偿棒来控制长期反应性变化。

补偿棒棒位随燃耗时间变化,是仪控监测的一项重要参数。补偿棒的棒位移动会对堆芯功率及通

量分布造成影响。固态燃料熔盐堆的控制棒一般布置在侧反射层中^[11],棒与棒之间还存在干涉效应。因此,研究燃耗补偿棒位变化及对堆芯参数的影响很有必要。

本文基于 MOBAT 燃耗程序^[12],开发临界调棒搜索的功能,对其临界搜索效率进行分析。研究固态燃料钍基熔盐实验堆的补偿棒棒位变化及堆芯功率分布变化情况。

1 临界调棒燃耗计算方法

临界调棒燃耗计算的基本思路是在每个燃耗步计算中改变补偿棒的位置,以补偿燃耗步长内的反应性损失。

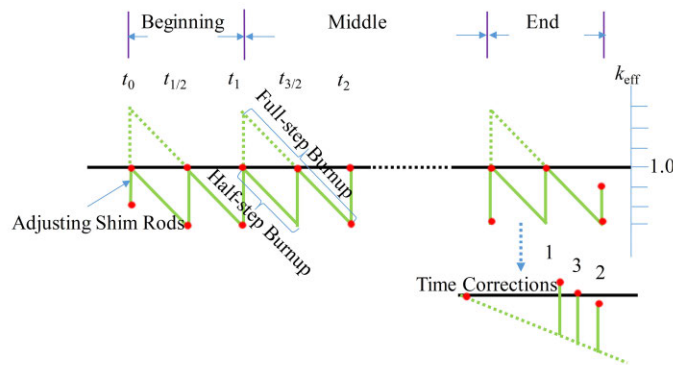


图1 临界调棒燃耗计算过程
Fig.1 Calculation process of burnup with adjusted control rods

补偿棒的位置对局部能谱具有较大影响,会改变局部燃耗区的核素单群截面。为提高计算准确性,单群截面采用半步长燃耗时刻截面。具体过程为:1) 使用步长初的单群截面与中子通量计算半步长时的核素演化;2) 根据半步长时的反应性下降,调节补偿棒棒位达到临界;3) 根据半步长临界下的状态计算此时的单群截面与中子通量;4) 使用步长初的核素浓度,新获得的半步长时刻单群截面和中子通量计算全步长下的核素演化;5) 最终,根据全步长末的反应性下降,调节补偿棒棒位达到临界,以此完成一个燃耗步长内的计算。

临界棒位搜索采用线性插值法,首先假设一个棒位位移,计算两者 k_{eff} 变化,根据两点插值得到临界时的棒位,如果拟合得到的棒位还不能临界,则根据最新两个 k_{eff} 继续插值,直到达到收敛标准。临界搜索的收敛域与统计误差相关,收敛域落入统计误差内,则线性插值可能失效,收敛域过大则计算得到的棒位准确性降低。本文根据程序测试采用 2.5 倍的统计误差作为临界搜索收敛域。

临界棒位的初始假定位移对收敛具有较大影响,不同寿期时刻的处理不一样。在寿期初,缺乏参照对象,建议根据控制棒的 S 型微分价值曲线进行大范围搜索,如控制棒全行程 1/6。在寿期中端,可以将上一次燃耗步长棒位位移作为本次初始假设位移。在寿期末,存在将补偿棒提到上位仍不能实现临界的状态;此时,应固定补偿棒棒位,缩短燃耗步长以实现临界。

补偿棒位的移动要求对模型几何做修改。以 MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code)模型为例,由于控制棒整体移动涉及多个栅元,为简便修改,几何面采用平移卡。通过仅修改平移卡轴向数值达到控制棒移动的目的。平移卡卡号代表控制棒编号。

带临界调棒的燃耗计算与一般燃耗计算的输入卡命令基本一致,只需增加两个信息卡:一个是需要调节的补偿棒棒号,另一个是所有棒位的上限值。

2 TMSR-SF1 计算模型

TMSR-SF1 额定热功率 10 MW^[13]，堆芯采用球形燃料元件（燃料球），冷却剂为 2LiF-BeF₂。燃料球直径为 6.0 cm，燃料为 UO₂，其中 ²³⁵U 富集度为 17.0%。单球铀装载量为 7.0 g。堆芯燃料球填满上圆台与堆芯圆柱大部分，满载时，含约 13000 个燃料球。模型见图 2，设计主要参数见表 1。

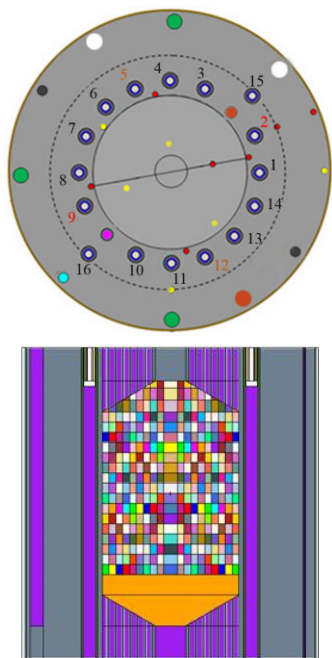


图 2 固态燃料钚基熔盐实验堆计算模型
Fig.2 Calculation model of TMSR-SF1

表 1 固态燃料钚基熔盐实验堆堆芯总体参数
Table 1 Main parameters of TMSR-SF1

项目 Item	参数 Parameter
热功率 Power	10 MW
燃耗寿期 Burnup lifetime	100 EFPD
堆芯平均温度 Core average temperature	625 °C
燃料元件 Fuel pebble	6.0 cm 直径 OD 7.0 g U/pebble 17.0% ²³⁵ U ~13 000 个
冷却剂 Coolant	2LiF-BeF ₂ (⁷ Li >99.99at%)
活性区尺寸 Core size	圆柱 高 Height 180 cm 直径 Diameter 135 cm 圆台 水平夹角 30° Truncated cone Horizontal angle 30° 高 Height 30.31 cm
反射层厚度 Thickness of reflector	75 cm

控制棒布置于侧反射层内，共计 16 根控制棒。15#和 16#为调节棒，5#、12#棒为安全停堆棒，1#、3#、4#、6#、8#、9#、11#、13#、14#为燃耗补偿棒；

2#、7#、10#作为第二套停堆系统控制棒。安全停堆棒长期处于上限位；调节棒位于中间位。所有控制棒结构一致^[3]，有效行程 240 cm。下限位在下圆台低平面，上限位在上圆台顶平面。各功能控制棒尽量对称布置，以减少周向功率及通量分布差异。本次分析中，假定补偿棒不分组，统一棒位高度。

燃料球一次装载有效高度 160 cm，如图 2 所示，热态满功率初始剩余反应性约 0.063。堆芯燃耗区按照 r_z 网格进行划分： r 方向 10 等间隔划分， z 方向 19 等间隔划分；除去上圆台石墨区，共计 181 个燃耗区。

MCNP 计算采用 ENDF/B-VII.0 库，每代粒子数 1×10^5 ，共计 400 有效代，统计误差约 13×10^{-5} 。MCNP 与 ORIGEN 更换核素 130 种，其中裂变产物 90 种，钢系核素 40 种。燃耗步长选取时间点为：0~2 d 选取 5 个点，2~10 d 选取 4 个点，10~80 d 选取 7 个点，80~110 d 选取 6 个点。

3 结果分析

3.1 补偿棒棒位与燃耗时间

计算得到补偿棒棒位随燃耗时间变化曲线见图 3。初始临界棒位为 126 cm，在总行程一半位置略偏上。寿期初受氙毒影响，补偿棒有较大幅度上升。在燃耗中期，补偿棒随时间近似线性提升，在寿期末端由于控制棒微分价值偏低，提棒幅度较大。100 满功率燃耗天时刻，补偿棒棒位为 229 cm，接近上限位。证明所预留剩余反应性满足 100 满功率燃耗天设计要求。

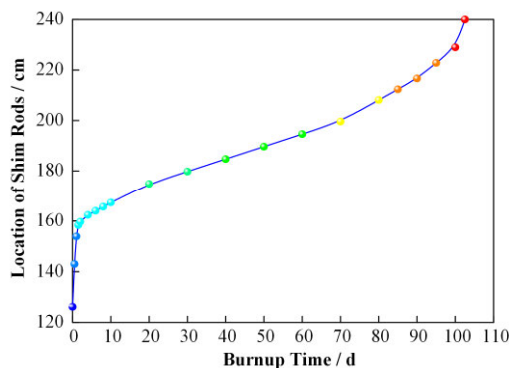


图 3 补偿棒棒位随燃耗时间变化
Fig.3 Location of shim rods vs. burnup time

3.2 临界搜索效率

临界调棒搜索效率影响总计算时间，如图 4 所示。由于氙毒对补偿棒价值的不可预判性，该时刻搜索次数为 3~4 次；在燃耗时间步长发生明显变化

时, 交接点的搜索次数为 3~4 次; 在棒位曲线平滑区仅 1 次计算即可获得 2.5 倍统计误差(约 33×10^{-5}) 的收敛标准。

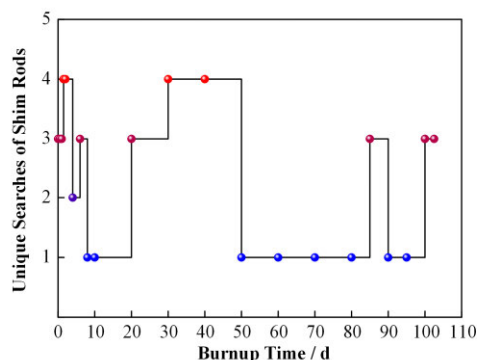


图 4 不同燃耗时刻临界棒位搜索次数
Fig.4 Unique searches of shim rods at different burnup time

3.3 功率密度与中子通量分布

补偿棒引起的不同燃耗时刻轴向功率密度和中子通量分布见图 5。由于初始补偿棒位于行程中间位置, 造成轴向上部功率和通量被抑制; 随着补偿棒棒位移至上限位, 轴向功率和中子通量趋向对称。

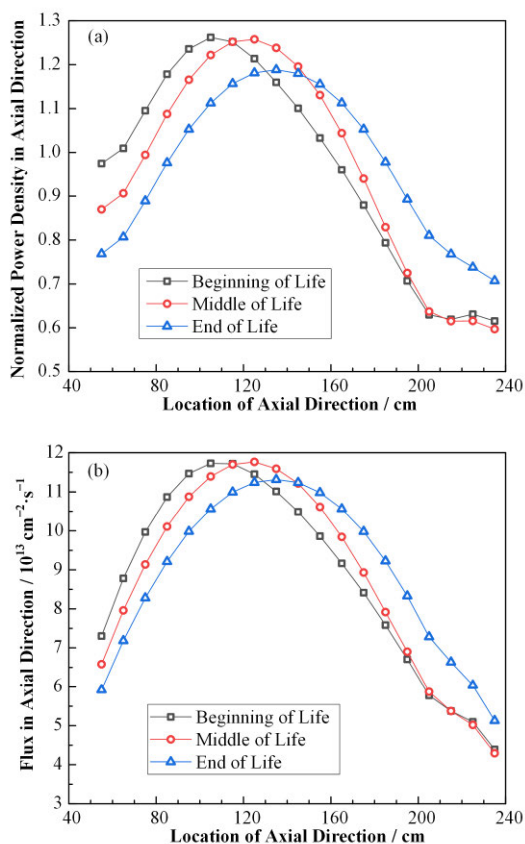


图 5 不同燃耗时刻功率密度(a)、中子通量(b)轴向分布
Fig.5 Distribution of power density (a) and flux (b) at different burnup time

其中上部由于圆台球床影响, 较下部功率和通量下降略有延缓。此外, 功率密度相对中子通量在轴向两端下降缓慢, 主要因为靠近石墨反射层, 能谱软化, 增大了单群裂变截面。

计算得到 181 燃耗区最大相对功率密度, 在寿期初和寿期末分别为 1.68、1.44; 最大中子通量分布为 $1.68 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.50 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。初始补偿棒棒位增大功率峰因子约 17%, 增大最大中子通量约 12%。

3.4 局部单群裂变截面变化

为突出显示补偿棒对局部燃耗区的影响, 特选取最外圈燃耗区不同轴向位置的 ^{235}U 单群裂变截面数据, 不同燃耗时刻的变化曲线见图 6。受石墨反射层的慢化影响, ^{235}U 的单群裂变截面在轴向两端明显增大。补偿棒所在区域吸收了较多热中子, 一定程度上硬化了局部中子能谱, 使得局部 ^{235}U 的裂变截面变小。补偿棒抽出将局部 ^{235}U 单群裂变截面从 96 靶提高到 107 靶, 影响较明显, 证明本文采用半步法具有一定的必要性。

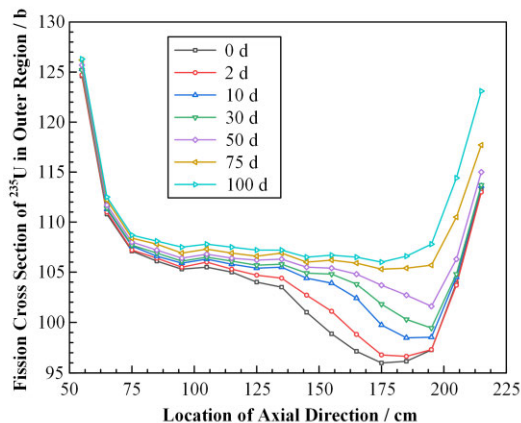


图 6 外圈燃耗区 ^{235}U 单群截面随燃耗时间变化
Fig.6 Fission cross section of ^{235}U in outer region vs. burnup time

3.5 燃耗深度分布

寿期末堆芯燃耗深度分布见图 7。补偿棒布置降低了堆芯上部外燃耗区燃耗深度, 但对内燃耗区影响有限, 燃耗深度在轴向上基本对称。最大铀燃耗深度为 $17.5 \text{ MW} \cdot \text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$, 位于堆芯轴向高度 130 cm 中心燃耗区; 最低燃耗深度为 $6.1 \text{ MW} \cdot \text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$, 位于上圆台最外燃耗区; 平均燃耗深度为 $10.9 \text{ MW} \cdot \text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

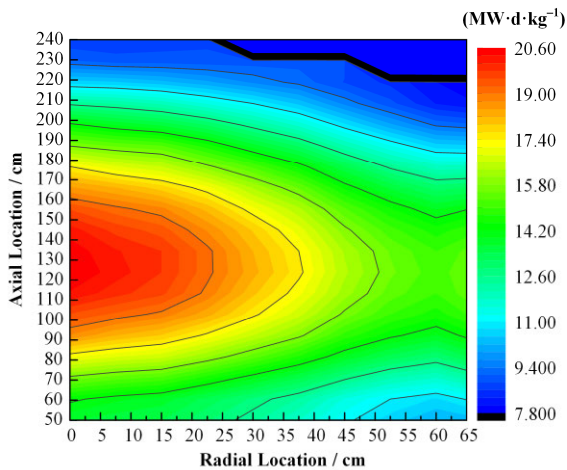


图7 堆芯寿期末燃耗深度分布
Fig.7 Burnup distribution at the end of life

4 结语

本文研究固态燃料熔盐实验堆补偿棒棒位对堆芯物理参数的影响。首先介绍了带临界调棒的燃耗计算方法及程序实现过程，重点阐述了半步法及补偿棒位选取方法。其次，针对固态燃料熔盐实验堆不分组提棒方案进行了计算并研究了其对堆芯参数的影响。主要结论有：

1) 验证了调棒临界搜索的有效性，基本通过3次搜索即可收敛在2.5倍统计误差收敛域内。

2) 初态临界补偿棒棒位在总行程一半略偏上位置，氙毒及临近上限位时刻提棒幅度较大，补偿棒反应性价值满足100满功率燃耗天设计要求。

3) 补偿棒棒位移动对外燃耗区功率、通量及单群裂变截面等带来一定影响，但由于补偿棒在反射层内，对堆芯总体参数如功率峰因子、燃耗深度分布等影响有限。

参考文献

- 1 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, (9): 578–590. DOI: 10.7693/WL20160904.
CAI Xiangzhou, DAI Zhimin, XU Hongjie. Thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Physics, 2016, (9): 578–590. DOI: 10.7693/wl20160904.
- 2 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): 366–374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 366–374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
- 3 冀锐敏, 严睿, 李晓晓, 等. 球形燃料元件中包覆颗粒

的分布效应研究[J]. 核技术, 2017, 40(10): 100604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100604.

JI Ruimin, YAN Rui, LI Xiaoxiao, *et al.* Effect of TRISO-particles distributions in pebble fuel[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(10): 100604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100604.

4 Fratoni M, Greenspan E. Neutronic feasibility assessment of liquid salt-cooled pebble bed reactors[J]. Nuclear Science and Engineering, 2011, 168(1): 1–22. DOI: 10.13182/NSE10-38.

5 左嘉旭, 高新力, 李朝君, 等. 10 MW 固态燃料熔盐实验堆安全分析关键技术初步研究[J]. 核技术, 2017, 40(4): 040601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.040601.

ZUO Jiaxu, GAO Xinli, LI Chaojun, *et al.* Preliminary research of safety analysis for 10-MW thorium-based molten salt reactor-solid fuel[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(4): 040601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.040601.

6 靖剑平, 刘雅宁, 贾斌, 等. 10 MWt 固态燃料熔盐堆控制棒失控抽出事故分析[J]. 核技术, 2016, 39(10): 100604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.100604.

JING Jianping, LIU Yaning, JIA Bin, *et al.* Accident analyses of uncontrolled rod cluster control assembly bank withdrawal for 10-MWt thorium-based molten salt reactor-solid fuel[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(10): 100604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.100604.

7 焦小伟, 王凯, 何兆忠, 等. 固态熔盐堆全厂断电 ATWS 事故工况下的堆芯安全探讨[J]. 核技术, 2015, 38(2): 020604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020604.

JIAO Xiaowei, WANG Kai, HE Zhaozhong, *et al.* Core safety discussion under station blackout ATWS accident of solid fuel molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(2): 020604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020604.

8 朱贵凤, 严睿, 于世和, 等. 动态参数直接统计方法在 TMSR-SF1 中的应用[J]. 核技术, 2018, 41(5): 050603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050603.

ZHU Guifeng, YAN Rui, YU Shihe, *et al.* An application of direct statistical method for kinetics parameters in TMSR-SF1[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(5): 050603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050603.

9 Chen X, Zhang J, Dai Y, *et al.* Experimental investigation of the bed structure in liquid salt cooled pebble bed reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 331:

- 24–31. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2018.02.003.
- 10 林大富, 刘峰瑞, 陈兴伟, 等. 基于折射率匹配方法的球床三维重构[J]. 核技术, 2017, 40(10): 100606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100606.
LIN Dafu, LIU Fengrui, CHEN Xingwei, *et al.* A 3D-reconstruction research on the visual liquid-pebble bed[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(10): 100606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100606.
- 11 于世和, 严睿, 冀锐敏, 等. PB-FHR 的控制棒布局设计及物理效应[J]. 核技术, 2018, 41(1): 010605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.010605.
YU Shihe, YAN Rui, JI Ruimin, *et al.* Layout design and physical effect analysis of control rod in PB-FHR[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(1): 010605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.010605.
- 12 朱贵凤. 氟盐冷却球床高温堆钍利用研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2015.
ZHU Guifeng. Investigation on thorium used in pebble-bed fluoride salt-cooled high temperature reactor[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- 13 TMSR 中心. 10 MW 固态燃料钍基熔盐堆堆芯核设计报告[R]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2015.
TMSR. Core nuclear design of 10 MW thorium-based molten salt experiment reactor with solid fuel[R]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.