

石墨-熔盐反应堆堆芯中子通量与钍铀转换比

汤晓斌¹ 谢 芹^{1,2} 姚泽恩² 陈 达¹

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京, 210016;
2. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州, 730000)

摘要:作为获国际认可的第四代核电站反应堆堆型之一的熔盐堆(Molten salt reactor, MSR), 具有固有安全性高、经济性好、核资源可持续发展以及易于防止核扩散等优点。针对石墨-熔盐零功率堆的几何参数, 利用蒙特卡罗计算程序MCNP5建立了物理计算模型, 计算临界情况下堆芯径向、轴向中子通量及增殖区厚度与Th-U转换比(Conversion ratio, CR)的关系。结果表明, (1) 石墨-熔盐零功率堆堆芯中子通量密度分布较为平坦; (2) 石墨-熔盐零功率堆反射层厚度和增殖区厚度在一定范围内, CR随反射层厚度或增殖区厚度的增加而增加, 当超出该范围, CR不再随反射层厚度或增殖区厚度的增加而明显增加。

关键词:熔盐堆; 蒙特卡罗方法; MCNP; 中子通量

中图分类号: TL329 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2012)06-0775-05

Neutron Flux and Th-U Conversion Ratio for Graphite-Molten Salt Reactor

Tang Xiaobin¹, Xie Qin^{1,2}, Yao Zeen², Chen Da¹

(1. College of Material Science and Technolgy, Nanjing Universeity of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: The molten salt reactor (MSR) is the only one liquid-fuel reactor in six candidates of Generation IV advanced nuclear reactor, which is characterized by remarkable advantages in safety, economics and sustainable development of the fissile resource and proliferation resistance of nuclear energy. A detailed computational model using the Monte Carlo code MCNP5 is set up, in order to study about radial/axis neutron flux and the influences of the reflect thickness or blanket thickness on the conversion ratio (CR) of the Th-U fuel cycle. Main results obtained in this calculation show that: (1) The neutron flux distribution of the graphite-molten zero power reactor core is relatively smooth. (2) CR will increase with the increasing of the thickness of reflector and/or the thickness of breeding region in a certain range and when it exceeds this range CR cannot get increased significantly.

Key words: molten salt reactor (MSR); Monte Carlo method; MCNP; neutron flux

熔盐堆概念最早由美国橡树岭国家实验室 (Oak ridge national labtoratory, ORNL) 提出^[1], 由于其中子经济性、连续换料特性和固有安全性、发电效率高、核资源利用效率高、防止核扩散等优点倍受国际核能界的推崇^[2-3], 并被第四代国际核能论坛 (GIF) 确定为6种第四代反应堆候选堆型之一, 同时也是唯一的一个液体燃料反应堆^[4]。熔盐堆与其他堆型最大的不同是其采用溶解在氟化锂、氟化钠等氟化物的钍或铀的液态融合物作为燃料^[5]。这个特性决定了熔盐堆中熔盐既是燃料又是冷却剂, 且熔盐堆中含有的裂变材料仅在其流入堆芯时达到临界。这一与现有常规固体燃料反应堆截

基金项目: 中国博士后科学基金(20100481140)资助项目; 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研(Y1065-063)资助项目。

收稿日期: 2012-01-06; **修订日期:** 2012-03-20

通讯作者: 汤晓斌, 男, 副教授, 1978年出生, E-mail: tangxiaobin@nuaa.edu.cn。

然不同的工作原理,对新型熔盐反应堆的物理设计和研究工作提出了更高要求,尤其对于堆芯内的中子输运计算存在较大难度^[6]。本文通过基于蒙特卡罗方法的数值模拟计算,研究石墨-熔盐零功率堆中子通量分布,以及增殖区厚度与Th-U 转换比(Conversion ratio,CR)的关系,为我国今后开展熔盐堆的实验工作提供参考。

1 石墨-熔盐零功率堆模型

1.1 反应堆整体

石墨-熔盐零功率堆是一种冷态熔盐堆,产生的热量不足以将其燃料融化,其燃料仍然为块状燃料。整个反应堆为高 4 195 mm,直径 4 340 mm 的圆柱体,由中心向外依次为:活性区、钍基增殖区(简称“增殖区”)、反射层、空气层、屏蔽层。

1.2 活性区及钍基增殖区

活性区燃料采用以²³⁵U 为主要裂变材料的核燃料块,燃料成分质量分数如表 1 所示,燃料栅元排列采用正六边形栅格结构。燃料主要分布在长 800 mm 的空心石墨管中,外径为 30 mm,内径为 20 mm。石墨管内放置有总长度为 40 mm 以薄铝管密封的燃料块与长度为 40 mm 石墨块。活性区域石墨块与燃料块交替排列方式剖面示意图如图 1(a)所示。10 块燃料块和 10 块石墨块,按燃料块—石墨块—燃料块……这种间隔排列方式分布于 800 mm 高的活性区域。钍基增殖区几何结构与活性区一样,区别在于增殖区石墨管中只包含钍基燃料块,燃料成分质量分数如表 2 所示。且每根石墨管中燃料块与石墨块的数目比采用 1:1 与 2:0,即全部为钍基燃料两种情况^[6-7]。

表 1 活性区燃料材料成分

| 成分 | 质量分数 |
|------------------|---------------|
| ²³⁵ U | 0.112 487 1 |
| ²³⁸ U | 0.011 630 547 |
| ⁹ Be | 0.160 072 239 |
| ¹⁹ F | 0.715 810 114 |

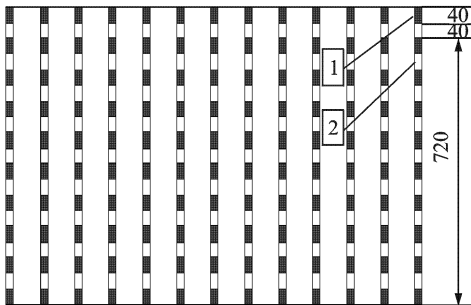
表 2 增殖区燃料材料成分

| 成分 | 质量分数 |
|-------------------|-----------|
| ⁷ Li | 0.048 562 |
| ⁹ Be | 0.001 757 |
| ²³² Th | 0.610 749 |
| ¹⁹ F | 0.338 932 |

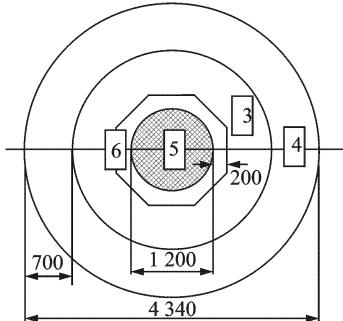
1.3 反射层、空气层及屏蔽层

石墨-熔盐零功率堆的反射层呈正六面态,活性区与整治区域被包裹在其中,整个反射层由上反

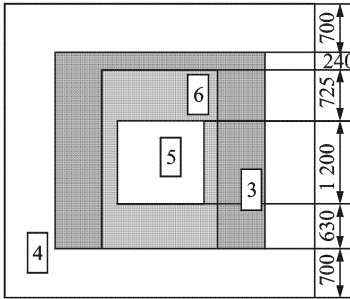
射层、下反射层和侧反射层组成。上反射层的厚度为 725 mm,下反射层厚度为 630 mm,侧反射层厚度为 100~600 mm。屏蔽层由混凝土构成,厚度为 700 mm,在反射层与空气层外部,径向向内外均为圆形,高为 4 195 mm^[8-10]。反射层、空气层及屏蔽层结构示意图如图 1(b,c)所示。



(a) 熔盐堆燃料块与石墨块分布示意图



(b) 熔盐堆径向截面图



(c) 熔盐堆轴向截面图

1. 燃料块;2. 石墨块与活性区石墨;3. 空气区;4. 屏蔽层;
5. 活性区与增殖区;6. 反射层。

图 1 石墨-熔盐零功率堆结构示意图

2 计算结果及分析

2.1 中子通量计算

本文采用蒙特卡罗计算程序是美国洛斯阿拉莫斯国家实验室开发的通用放射性粒子输运程序 MCNP5。整个计算工作基于 IBM 高性能并行计算平台,使用 PGI O3 模式编译的 MCNP 程序完成,服务器的操作系统为 Red Hat Enterprise Linux。

本文分别针对:(1)不存在增殖区,仅改变活性区厚度;(2)增殖区燃料全为钍基燃料,固定活性与

增殖区的总厚度 600 mm 不变,改变活性区半径并相应修改增殖区厚度;(3)增殖区燃料为钚基燃料与石墨块数目比为1:1,固定活性与增殖区的总厚度 600 mm 不变,改变活性区半径并相应修改增殖区厚度,3 种的不同情况来计算 K_{eff} 。计算结果如表 3 所示。

通过如上计算,选取 K_{eff} 约为 1 的 3 种堆芯几何参数分别进行中子通量分布情况计算。这 3 种几何参数为:(1)不存在增殖区域,选择活性区域厚度为 410 mm,其有效增殖系数为 1.007 67;(2)钚基燃料与石墨块比例为 1:1,选取活性区域厚度为 510 mm,增殖区厚度为 90 mm,其有效增殖系数为 1.005 73;(3)增殖区燃料区全为钚基燃料,选取活

性区域厚度为 540 mm,增殖区厚度为 60 mm,其有效增殖系数为 1.003 8。计算结果见图 2。

如图 2(a)所示,在无钚增殖区反应堆内距离堆芯中心 200 mm 处的径向中子通量为 4.9×10^{-4} 粒子数/cm²。如图 2(b)所示,含钚(50%)增殖区反应堆内距离堆芯中心 200 mm 处的径向中子通量为 4.0×10^{-4} 粒子数/cm²。如图 2(c)所示,含钚(100%)增殖区反应堆内距离堆芯中心 200 mm 处的径向中子通量为 3.6×10^{-4} 粒子数/cm²。

表 4,5 分别为堆芯径向、轴向中子通量及不均匀度的结算结果,可知无钚增殖区、含钚(50%)增殖区、含钚(100%)增殖区 3 种情况下反应堆的最大径向中子通量是分别为 5.31×10^{-4} 粒子数/cm²、

表 3 石墨-熔盐零功率堆 K_{eff} 计算结果

| 活性区半径/mm | 350 | 360 | 370 | 390 | 410 | 420 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 无增殖区 | 0.913 05 | 0.922 58 | 0.962 91 | 0.974 78 | 1.007 67 | 1.018 46 |
| 一半钚基燃料 | 0.747 89 | 0.759 07 | 0.818 14 | 0.829 92 | 0.873 9 | 0.893 51 |
| 只含钚基燃料 | | | | | | |
| 活性区半径/mm | 440 | 460 | 480 | 500 | 510 | 520 |
| 无增殖区 | 1.028 44 | 1.056 44 | 1.063 85 | 1.085 41 | 1.089 48 | 1.097 15 |
| 一半钚基燃料 | 0.907 02 | 0.947 65 | 0.962 42 | 0.996 75 | 1.005 73 | 1.022 26 |
| 只含钚基燃料 | | | 0.886 32 | 0.929 63 | 0.943 39 | 0.966 38 |
| 活性区半径/mm | 540 | 550 | 560 | | | |
| 只含钚基燃料 | 1.003 8 | 1.010 68 | 1.024 91 | | | |

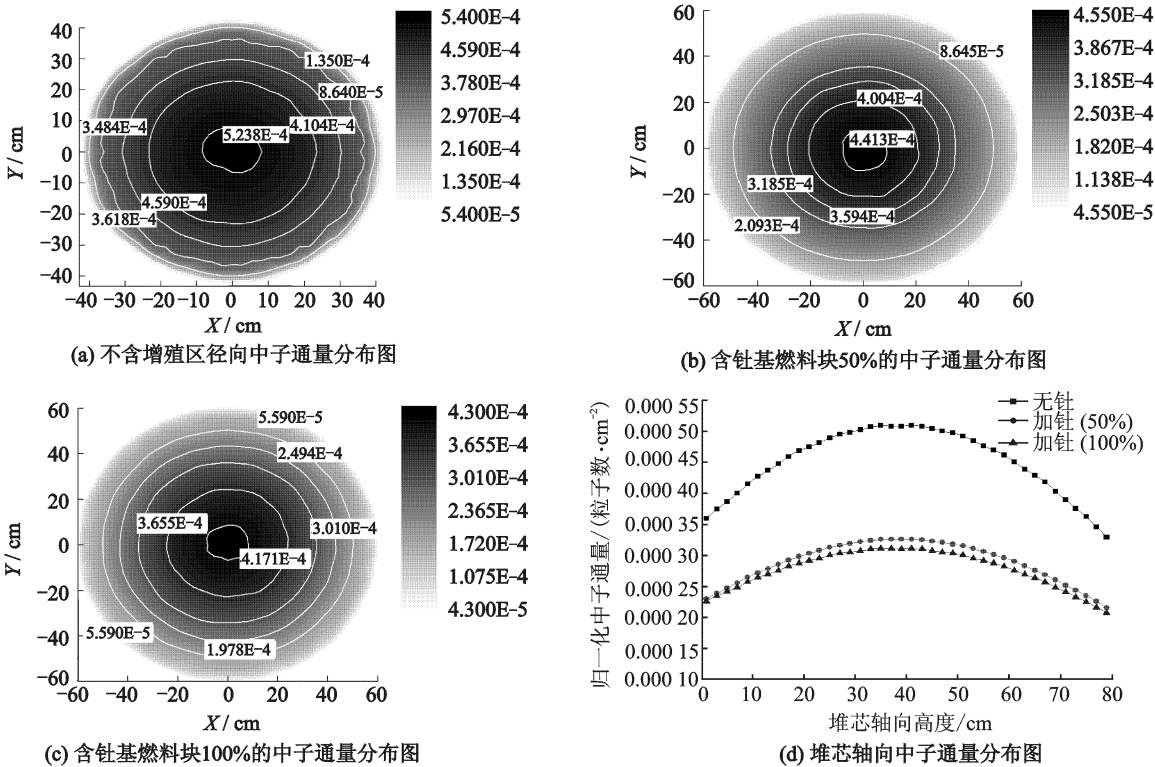


图 2 石墨-熔盐零功率堆堆芯中子通量分布图

表 4 径向中子通量及不均匀度

| 中子通量 | 最小值/ ($10^{-4} \cdot \text{cm}^{-2}$) | 最大值/ ($10^{-4} \cdot \text{cm}^{-2}$) | K_r |
|--------|--|--|---------|
| 无增殖区 | 1.66 | 5.31 | 1.459 7 |
| 一半钍基燃料 | 0.96 | 4.50 | 1.644 1 |
| 只含钍基燃料 | 1.01 | 4.25 | 1.614 4 |

表 5 轴向中子通量及不均匀度

| 中子通量 | 最小值/ ($10^{-4} \cdot \text{cm}^{-2}$) | 最大值 ($10^{-4} \cdot \text{cm}^{-2}$) | K_z |
|--------|--|---|---------|
| 无增殖区 | 3.30 | 5.12 | 1.128 9 |
| 一半钍基燃料 | 2.15 | 3.27 | 1.127 6 |
| 只含钍基燃料 | 2.07 | 3.12 | 0.813 2 |

4.50×10^{-4} 粒子数/ cm^2 及 4.25×10^{-4} 粒子数/ cm^2 。从堆芯中心到距离中心 200 mm, 3 种情况下反应堆的径向中子通量分别下降了 7.72%, 12.5%, 18.1%, 由此可见无钍增殖区反应堆的径向中子通量分布比含钍(50%)增殖区反应堆的径向中子通量平坦, 含钍(50%)增殖区反应堆的径向中子通量分布比含钍(100%)增殖区反应堆的径向中子通量分布平坦。

如图 2(d) 所示, 在堆芯的轴向中心位置 400 mm 处出现中子通量最大值, 且轴向中子通量以此高度对称分布。由表 4 与表 5 中计算所得的轴向与径向中子通量不均匀度参数 K_z 与 K_r , 对于 3 种堆芯径向中子通量不均匀度约为 1.5, 且轴向中子通量不均匀度约为 1.1, 相对于未使用控制棒通量展平的其他堆芯, 这几个物理参量数值相对较小, 这表明上述 3 种石墨-熔盐零功率堆的情况, 堆内中子分布情况较为均匀。

2.2 Th-U 转换比计算

^{232}Th 是天然存在的可转换核材料, 它俘获中子后可转换成易裂变核燃料 ^{233}U , 因此 ^{232}Th 是一种可以作为天然铀替代或补充的重要能源资源。熔盐堆可以很好地利用 ^{232}Th 作为其燃料使用, 也可以作为增殖燃料使用。因此, 熔盐堆 Th-U CR 的计算对堆芯的物理设计至关重要, 它的定义是反应堆中每消耗一个易裂变材料原子所产生新的易裂变材料的原子数。

对于熔盐堆, Th-U CR 的表达式如下

$$\text{CR} = \frac{\text{生成的 } ^{233}\text{U} + \text{生成的 } ^{239}\text{Pu}}{\text{消耗的 } ^{235}\text{U}}$$

2.2.1 反射层厚度对转换比的影响

反应堆的反射层由一层散射截面大、吸收截面小的非增殖材料(如石墨等)组成。由于反射层可以

减少芯部中子的泄露, 提高中子的利用率, 因此增加反射层厚度可以有效提高反应堆的转换比。在活性区半径 510 mm、增殖区外半径 800 mm 的堆芯基础上, 不断改变反射层的厚度, 可获得不同反射层厚度下, 增殖区含有一半钍基燃料时与增殖区燃料全为钍基燃料时的 CR, 计算结果如图 3, 4 所示。

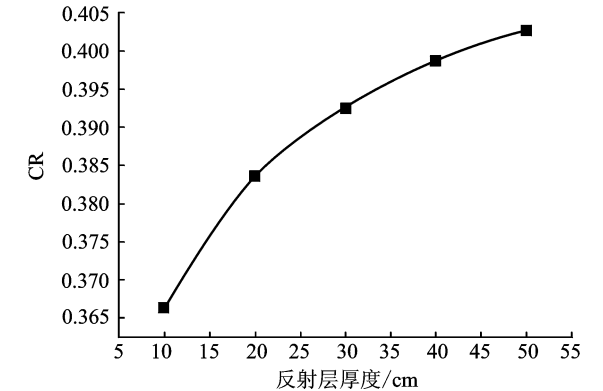


图 3 含钍基燃料块 50% 时转换比随反射层厚度变化图

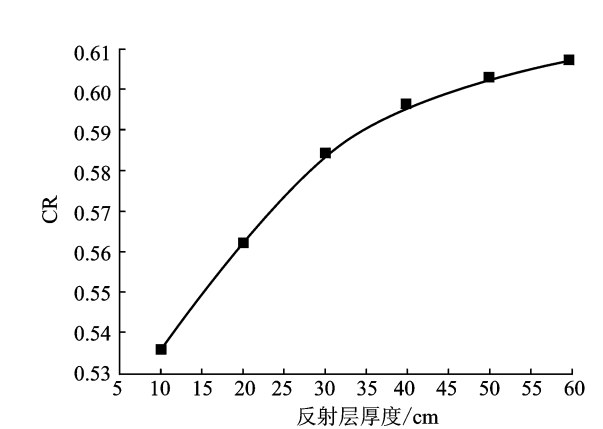


图 4 只含钍基燃料块 100% 时转换比随反射层厚度变化图

如图 3, 4 所示, CR 随着反射层的厚度增加而增加; 但随着反射层厚度的增加, CR 的增速逐渐变小, 这是因为当反射层的厚度达到一定的程度或更大时, 大部分中子在到达反射层外边界界面以前就被散射回去, 泄露程度大大减少, 这时再增加反射层的厚度, 堆芯内的中子通量将几乎不变, 因此 CR 也几乎不变。

2.2.2 增殖区厚度对转换比的影响

在活性区半径为 510 mm、反射层厚度为 400 mm 的几何结构的堆芯基础上, 不断改变增殖区外半径, 计算不同增殖区厚度下含钍(50%)和含钍(100%)的 CR。计算结果如图 5 所示。

如图 5 所示, CR 随着增殖区厚度的增加而增加; 但随着增殖区厚度增加, 其增加幅度减小; 当增殖区的厚度增加到一定的程度时, CR 值将几乎不变。这时因为当增殖区的厚度增加到一定的程度或

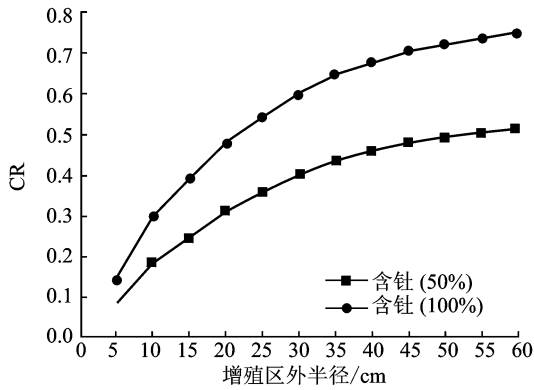


图5 钍-铀CR随增殖区厚度变化图

更大时,大部分中子因被增殖区内部的 ^{232}Th 所吸收而到达不了增殖区的外部,因此增殖区外部的 ^{232}Th 将吸收不到中子,从而不能发生转换过程。

3 结 论

本文以蒙特卡罗程序MCNP5为计算工具,以石墨-熔盐零功率堆的堆芯物理参数为依据,建立了反应堆的燃料元件、钍料元件、慢化剂、堆芯组件、反射层以及外围屏蔽层的精细结构模型,并在此模型的基础上完成了对石墨-熔盐零功率堆堆芯中子通量分布、Th-U转换比等物理参量的计算研究,主要研究结论如下:

(1) 石墨-熔盐零功率堆的中子通量分布和功率密度分布较为平坦,具有很强的对称性,增大了反应堆的输出功率,减少了反应堆功率分布不均所带来的隐患。

(2) 在一定厚度范围内,反应堆的Th-U CR随反射层厚度和增殖区钍层厚度增加而增加,但增加幅度逐渐减小。当反射层厚度和增殖区钍层厚度超过该范围反应堆的CR将不再随反射层厚度和增殖区钍层厚度的增加而增加。如图5所示,在活性区半径为510 mm、反射层厚度为400 mm的几何结构的堆芯基础上,不断改变增殖区外半径,计算不同增殖区厚度下含钍(50%)和含钍(100%)的石墨-熔盐零功率堆的CR可以达到0.75,提高了核资源的利用率。

参考文献:

[1] Rosenthal M, Kasten P, Briggs R. Molten salt reac-

tors—History, status, potential[J]. Nuclear Applications and Technology, 1970, 8(2): 107-117.

[2] 张大林, 秋穗正, 刘长亮, 等. 新概念熔盐堆物理计算方法研究及程序设计[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(12): 1103-1108.

Zhang Dalin, Qiu Suizheng, Liu Changliang, et al. Nuclear calculation and program development for molten salt reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(12): 1103-1108.

[3] 秋穗正, 张大林, 苏光辉, 等. 新概念熔盐堆的固有安全性及相关关键问题研究[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(B12): 64-75.

Qiu Suizheng, Zhang Dalin, Su Guanghui, et al. Research on inherent safety and relative key issues of a molten salt reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(B12): 64-75.

[4] James A L. The fourth generation of nuclear power[J]. Progress in Nuclear Energy, 2002, 40 (3/4): 301-307.

[5] David Le Blanc. Molten salt reactors: A new beginning for an old idea[J]. Nuclear Engineer and Design, 2010, 240(6): 1644-1656.

[6] Ignatiev V. MOSART fuels and container materials study: Case for Na, Li, Be/F solvent system[C]// Proceedings of the 2003 ANS/ENS International Winter Meeting (GLOBAL 2003). USA: Hyatt Regency, 2003.

[7] Nuttin A, Heuer D. Potential of thorium molten salt reactors: Detailed calculations and concept evolution with a view to large scale energy production[J]. Progress in Nuclear Energy, 2005, 46 (1): 77-79.

[8] Delpech S, Merle-Lucotte E, Heuer D. Reactor physics and reprocessing scheme for innovative molten salt reactor system[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2009, 130(1): 11-17.

[9] Merle-Lucotte E, Mathieu L, Heuer D. Influence of the processing and salt composition on the thorium molten salt reactor[J]. Nuclear Technology, 2008, 163(3): 358-365.

[10] Mathieu L, Heuer D, Brissot R. The thorium molten salt reactor: Moving on from the MSBR [J]. Progress in Nuclear Energy, 2006, 48(7): 664-679.