

# 组件型熔盐堆燃料组件的设计研究

薛春<sup>1,2</sup> 张海青<sup>1</sup> 朱智勇<sup>1</sup> 林俊<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** 熔盐堆是第四代核反应堆的六种构型之一,具有良好的经济性和固有安全性。以球形包覆颗粒燃料元件为基本单元设计了可用于熔盐冷却高温堆的燃料组件,并在此燃料组件模型下构建了组件型熔盐堆堆芯,研究了组件容器材料的种类、密度、厚度以及球形燃料元件中包覆颗粒填充率、FLiBe熔盐中<sup>7</sup>Li富集度对无限介质增殖因数 $K_{inf}$ 、冷却剂反应性温度系数(Reactivity Temperature Coefficient, RTC)、排空反应性(Void Reactivity, VR)的影响。结果表明,作为组件材料,碳材料明显优于碳化硅材料,提高包覆颗粒(Tristructural Isotropic, TRISO)填充率、<sup>7</sup>Li富集度有利于提高堆芯的中子经济性和安全性。

**关键词** 熔盐堆, 燃料组件, TRISO颗粒, 反应性温度系数

中图分类号 TL32

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.090602

## Design of fuel assembly for molten-salt-cooled reactors

XUE Chun<sup>1,2</sup> ZHANG Haiqing<sup>1</sup> ZHU Zhiyong<sup>1</sup> LIN Jun<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:** Molten salt reactor (MSR), a fourth generation reactor, possesses good economy and inherent safety properties. By using the fuel assembly in molten-salt-cooled reactor, it is expected that the fuel load and release can be easier and reliable, which is similar to that widely used in LWR (Light Water Reactor). **Purpose:** Based on spherical TRISO (Tristructural Isotropic) coated particle fuel elements, this study aims to design a fuel assembly model for the high-temperature molten-salt-cooled reactor. **Methods:** The MCNP (A Monte Carlo N-Particle Transport Code) is employed to investigate the feasibility and behavior of the fuel assembly by analyzing the infinite multiplication factor  $K_{inf}$ , the reactivity temperature coefficient (RTC) and the void reactivity (VR) of the FLiBe coolant as a function of the composition, density and wall thickness of the assembly material, the TRISO coated particles packing factor and the enrichment of <sup>7</sup>Li in FLiBe salt. **Results and Conclusion:** The results show that carbon-based materials are significantly better than silicon-carbide-based materials for fuel assembly. Increasing the TRISO packing factor and enrichment of <sup>7</sup>Li helps to improve neutron economy and security properties of the reactor.

**Key words** MSR, Fuel assembly, TRISO particle, Reactivity temperature coefficient

中国科学院战略先导科技专项(No.XDA02030200)资助

第一作者: 薛春, 男, 1989年出生, 2012年毕业于中国矿业大学, 现为博士研究生, 研究领域为反应堆物理

通信作者: 朱智勇, E-mail: zhuzhiyong@sinap.ac.cn; 张海青, E-mail: zhanghaiqing@sinap.ac.cn

Supported by Strategic Priority Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02030200)

First author: XUE Chun, male, born in 1989, graduated from China University of Mining and Technology in 2012, doctoral student, focusing on reactor physics

Corresponding author: ZHU Zhiyong, E-mail: zhuzhiyong@sinap.ac.cn; ZHANG Haiqing, E-mail: zhanghaiqing@sinap.ac.cn

收稿日期: 2016-05-27, 修回日期: 2016-07-19

随着世界经济的快速发展,人类社会在能源需求和环境保护之间遇到了尖锐的问题。核能技术能够在提供优质能源的同时大幅度减小碳排放,因此成为备受关注的能够推动社会和谐发展的前沿领域。熔盐堆是四代堆的6种入选堆型之一<sup>[1]</sup>,其使用熔盐作为冷却剂,具有良好的经济性和安全性。目前已提出多种以熔盐作为冷却剂的反应堆概念设计,如美国橡树岭国家实验室的先进高温堆(Advanced high-temperature reactor, AHTR)<sup>[2-3]</sup>、UC伯克利的球床先进高温堆(Pebble Bed-Advanced High Temperature Reactor, PB-AHTR)<sup>[4-5]</sup>等。AHTR是使用氟盐冷却的一个高温堆概念设计,它采用包覆颗粒板状燃料组件。PB-AHTR是以TRISO(Tristructural Isotropic)颗粒燃料球作为燃料元件,石墨作为反射层,2LiF-BeF<sub>2</sub>熔盐(FLiBe熔盐)作为冷却剂的球床先进高温堆设计,通过燃料球在熔盐中的缓慢流动,可实现燃料的在线换料。钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)核能系统项目是中国科学院2011年启动的首批先导研究专项之一<sup>[6]</sup>,其致力于建立支撑未来TMSR核能系统发展的技术研发能力,解决钍铀燃料循环和钍基熔盐堆相关重大技术挑战,从而为未来工业示范级钍基熔盐堆的建造以及实现钍资源的有效使用打下基础。该项目计划至2020年建成一座10 MW钍基熔盐固态燃料实验堆(Thorium Molten Salt Reactor-Solid Fuel 1, TMSR-SF1),该实验堆采用静止随机球床堆芯。未来球床熔盐堆将类似于气冷堆,可通过在线换料大幅度提高燃料的使用效率。但目前所采用的单球换料方式存在机构复杂、操作繁琐的问题,因此建立一种能够有效换料的技术对于熔盐堆的发展具有重要意义。

本文基于球形包覆颗粒燃料元件构建了一种燃料组件,并由此提出了组件型熔盐堆的设计概念,意在改善燃料元件的换料方式,提高反应堆的经济性。组件型熔盐堆以TRISO包覆颗粒球形燃料元件作为燃料单元,通过将球形燃料元件与三棱柱容器组合形成燃料组件,采用FLiBe熔盐作为冷却剂,石墨作为反射层。与目前球床堆的设计相比,相同的是都使用燃料球和FLiBe熔盐,不同的是组件型熔盐堆应用了燃料组件。燃料组件的引入不仅使装卸料、换料更加方便,而且可以通过组件的径向、轴向位置置换使得燃料达到较高的燃耗,有利于提高堆芯的经济性和实效性。

## 1 模型及原理

### 1.1 组件模型及计算方法

MCNP (A Monte Carlo N-Particle Transport Code)是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室开发的基于蒙特卡罗方法的用于计算三维复杂几何结构中的中子、光子、电子或者耦合中子光子电子运输问题的通用软件包<sup>[7]</sup>。本文均采用MCNP软件进行计算。

堆芯采用球床高温气冷堆使用的球型燃料元件(燃料球),冷却剂为FLiBe熔盐。燃料元件由包覆燃料颗粒和石墨基体混合后压制而成,直径为6.0 cm<sup>[8]</sup>,由燃料区和石墨包壳组成,TRISO包覆颗粒弥散在石墨基体中形成燃料区。TRISO包覆颗粒从内至外分别是燃料核心、疏松热解碳(PrC)、致密热解碳(PyC)、碳化硅(SiC)、致密热解碳(PyC)。计算中采用富集度为17%的UO<sub>2</sub>作为燃料核芯。堆芯的主要材料和几何参数如表1所示。

图1是燃料组件的结构图。六棱柱组件是由六个三棱柱组件组合而成,每个三棱柱组件由组件壁和球形燃料元件组成,部分三棱柱组件用于构成堆芯的控制棒通道或者实验通道。单个三棱柱组件中燃料球共33层、每层三个球成正三角形排列。组件壁由具有一定强度的支撑材料构成,用于固定并支撑内部燃料球。反应堆运行时,熔盐从三棱柱组件中球形燃料元件的空隙中自下而上的流动,由此带走核裂变所产生的热量。

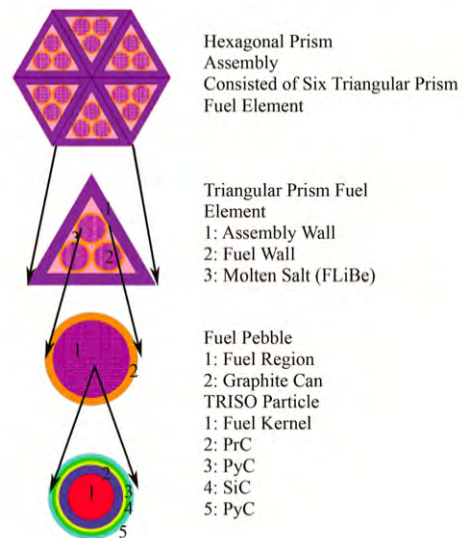


图1 组件模型及组成  
Fig.1 Assembly model and its composition.

表 1 堆芯设计使用的主要材料和几何参数  
Table 1 The main materials and geometrical parameters used in the core design.

燃料球 Fuel pebble	值 Values
燃料球直径 Diameter of fuel pebble / cm	6.0
燃料区域直径 Diameter of the fuel region / cm	5.0
石墨基体和石墨壳密度 Density of the graphite shell and matrix / g·cm <sup>-3</sup>	1.73
<sup>235</sup> U / wt%	17
燃料球中包覆颗粒填充因子 PF of the TRISO in the fuel pebble / %	10
燃料核心 Fuel kernel	
燃料核心半径 Radius of the fuel kernel / μm	250
UO <sub>2</sub> 密度 Density of the UO <sub>2</sub> / g·cm <sup>-3</sup>	10.4
燃料颗粒外包覆层 Coating layer of TRISO	
包覆层材料(从内到外)Material of the coating layer (from inside to outside)	PrC / PyC / SiC / PyC
包覆层厚度 Thickness of the coating layer / μm	90 / 40 / 35 / 40
包覆层密度 Density of the coating layer / g·cm <sup>-3</sup>	1.10 / 1.90 / 3.18 / 1.90
冷却剂 Coolant	
组分 Component	2LiF-BeF <sub>2</sub>
密度 Density	1.987 0 g·cm <sup>-3</sup> @600 °C ; 1.979 4 g·cm <sup>-3</sup> @615.5 °C
反射层 Reflector	
密度 Density / g·cm <sup>-3</sup>	1.76

注：熔盐密度公式<sup>[9]</sup>： $\rho=2.28-4.884\times 10^{-4}T$

Note: Formula of the density of molten salt<sup>[9]</sup>:  $\rho=2.28-4.884\times 10^{-4}T$

## 1.2 计算原理

反应堆设计中首要考虑的是堆芯的安全问题，反应性温度系数(Reactivity Temperature Coefficient, RTC)是衡量反应堆设计是否合理的一个重要指标<sup>[10]</sup>。反应堆温度的变化引起的反应性变化会造成反应堆中子密度或者功率的变化，该变化又会引起温度的进一步变化，形成一种反馈效应。为了保证反应堆的安全运行，设计中要求堆芯的总 RTC 为负值，以便形成负反馈效应。在低富集度铀作为燃料的反应堆中，燃料的 RTC 总是负值<sup>[10]</sup>。石墨反射层的温度变化不大，而且可以控制，因此只需要考虑熔盐冷却剂的 RTC。RTC 的计算如式(1)所示：

$$\alpha_T = \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\partial \left( \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} \right)}{\partial T} = - \frac{\partial \left( \frac{1}{k_{\text{eff}}} \right)}{\partial T} \quad (1)$$

式中： $\rho$ 为堆芯的反应性； $k_{\text{eff}}$ 为堆芯的有效增殖因子； $T$ 为温度。

图 2-4 给出了熔盐主要核素及 <sup>12</sup>C、<sup>28</sup>Si 的中子散射截面图。弹性散射在中子慢化中起主要作用，从图 2 中弹性散射截面数据来看，<sup>9</sup>Be 与 <sup>12</sup>C 具有相近的散射截面，因此 FLiBe 熔盐具有一定慢化作用，慢化作用主要来自于 <sup>9</sup>Be，不过其慢化效果微弱于石墨。核素吸收中子的相互作用有辐射俘获反应( $n,G$ )、裂变反应( $n,f$ )、( $n,\alpha$ )、( $n,P$ )、( $n,T$ )等。从

图 3 可以看出，<sup>6</sup>Li 的( $n,T$ )反应截面极高，远高出 <sup>7</sup>Li 和 <sup>9</sup>Be 的中子吸收截面，而且中子能量越低反应截面越高，吸收效应越强，说明 <sup>6</sup>Li 的中子毒性最强，且能谱越软毒性越强。

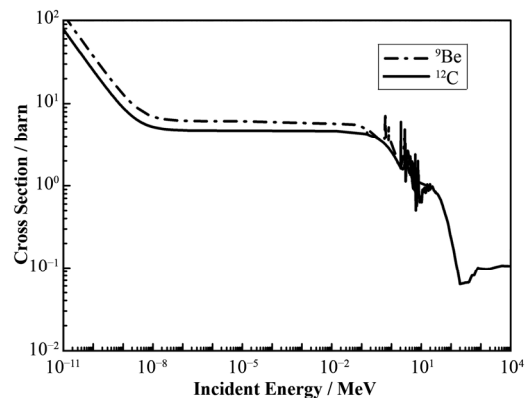


图 2 <sup>12</sup>C、<sup>9</sup>Be 的中子弹性散射截面  
Fig.2 Elastic neutron scattering cross section for <sup>12</sup>C and <sup>9</sup>Be.

2LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐具有慢化作用，同时又含有毒性强的中子毒物 <sup>6</sup>Li，因此当冷却剂熔盐体密度随温度发生变化时会有两个相反的效应发生。一方面，熔盐温度增加时熔盐密度会减小，熔盐中单位体积中子毒物 <sup>6</sup>Li 量的减小会引起反应性的增大；另一方面，由于熔盐密度的减小，<sup>9</sup>Be 的量会减小，从而使其慢化作用减弱（弹性散射截面高出非弹性散射截面 2-5 个数量级，因此只考虑弹性散射，也即是

慢化作用)燃料的共振吸收增加,引起反应性减小。可见,冷却剂 FLiBe 熔盐的 RTC 是两种效应的综合结果。

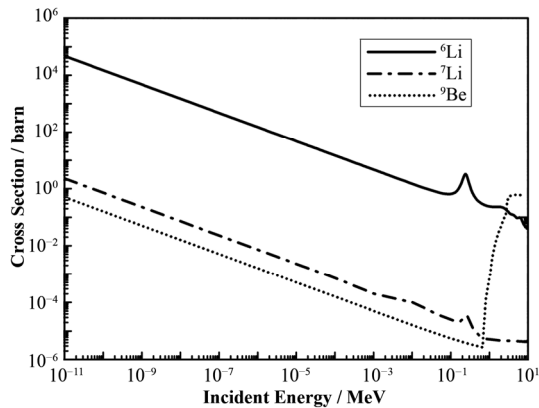


图 3  ${}^6\text{Li}$  的  $(n,T)$ 、 ${}^7\text{Li}$  的  $(n,G)$ 、 ${}^9\text{Be}$  的非弹性散射截面  
Fig.3  $(n,T)$  reaction for  ${}^6\text{Li}$ ,  $(n,G)$  reaction for  ${}^7\text{Li}$ , nonelastic neutron scattering cross section for  ${}^9\text{Be}$ .

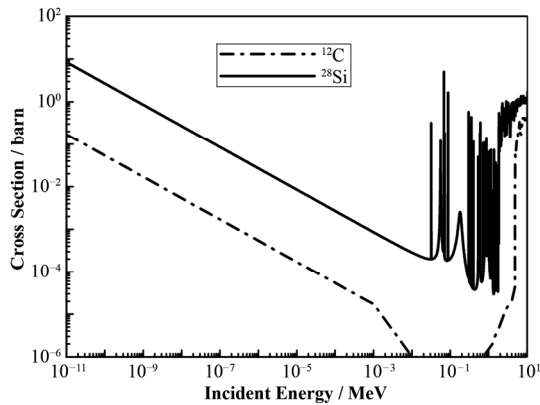


图 4  ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{28}\text{Si}$  的中子非弹性散射截面  
Fig.4 Nonelastic neutron scattering cross section for  ${}^{12}\text{C}$  and  ${}^{28}\text{Si}$ .

在液体冷却剂的反应堆中,若有气泡产生,因气泡的密度远小于液体的密度,气泡的存在会使冷却剂的密度减小,此时会出现如下三种效应<sup>[10]</sup>:1)冷却剂的有害中子吸收减小( ${}^6\text{Li}$ 吸收中子),表现为正效应;2)中子泄漏增加,表现为负效应;3)中子慢化能力变小,能谱变硬,燃料的共振吸收增加,裂变减小,同时 ${}^6\text{Li}$ 的中子吸收截面减小,表现为负效应。因此总的净效应是上述各因素的叠加。冷却剂中所包含的蒸汽泡的体积分数被称为空泡份额,当空泡份额为100%时即为全排空,所引起的反应性变化称为排空反应性(Void Reactivity, VR)。VR的计算公式<sup>[10]</sup>如式(2)所示:

$$\alpha_V^M = \frac{\Delta\rho}{\Delta x} = \frac{\Delta(-\frac{1}{k_{\text{eff}}})}{100\%} \quad (2)$$

式中: $x$ 为空泡份额。

因此要实现冷却剂 RTC、VR 为负值,可以从两个方面进行考虑,第一通过选择不同的组件容器材料,改变容器的厚度及 TRISO 填充率,使能谱变硬,从而使得 ${}^6\text{Li}$ 的 $(n,T)$ 截面减小;第二减少毒性核素的含量,即提高 ${}^7\text{Li}$ 的富集度(减少 ${}^6\text{Li}$ ),以减少熔盐冷却剂对中子的吸收。

${}^6\text{Li}$ 的富集度随着反应堆的运行而发生变化。一方面 ${}^6\text{Li}$ 吸收中子发生 $(n,T)$ 反应,使得 ${}^6\text{Li}$ 的富集度减小,另一方面 ${}^9\text{Be}$ 吸收中子发生 $(n,\alpha)$ 反应并经过 $\beta$ 衰变会生成 ${}^6\text{Li}$ 。两者在反应堆中最终会达到平衡,平衡时 ${}^6\text{Li}$ 的富集度为0.0007%<sup>[11-12]</sup>。本工作设计的组件型熔盐堆中熔盐的体积份额较大,因此需要考虑反应堆运行初始时冷却剂 ${}^6\text{Li}$ 对 RTC 的影响。

## 2 计算结果与分析

本文计算了不同组件壁材料(密度为 $1.76\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的石墨、密度为 $2.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的碳化硅)、组件壁厚(0-4 cm)、燃料球中 TRISO 颗粒填充率(也称 TRISO 填充因子,取为5%-50%)、熔盐温度(888 K、1188 K)、 ${}^7\text{Li}$ 富集度(99.99%、99.995%)下组件模型的无限介质增殖因数 $K_{\text{inf}}$ ,进而根据式(1)、(2)计算出 RTC 以及 VR,研究了燃料球中 TRISO 填充率(或燃料装载量,用 C/HM 表示。C/HM 指的是碳原子个数与铀原子个数之比)、组件壁厚(不同材料下)分别对 $K_{\text{inf}}$ 、熔盐冷却剂 RTC、熔盐 VR 的影响。在本工作涉及的计算中使用了反射界面,即忽略了中子泄漏的影响。

### 2.1 燃料装载量、组件壁厚度对 $K_{\text{inf}}$ 的影响

当反应堆的尺寸为无限大时,中子的泄漏损失便等于零,这时增殖因数将只与系统的材料成分和结构有关。通常,把无限大介质的增殖因数称为无限介质增殖因数,以 $K_{\text{inf}}$ 表示。无限增殖因数 $K_{\text{inf}}$ 可以反映组件的材料成分、结构参数和燃料的成分对组件的影响,同时 $K_{\text{inf}}$ 也可以反映组件组成堆芯时的有效增殖因子 $k_{\text{eff}}$ 的情况,从而为组件结构的优劣提供了判定依据。在 MCNP 模拟计算中,采用反射界面模拟无限介质,由此得到组件的 $K_{\text{inf}}$ 。

图5是当组件壁厚为1.0 cm时,组件 $K_{\text{inf}}$ 随着 C/HM 的变化关系,其反映了燃料装载量对组件 $K_{\text{inf}}$ 的影响。图6是当燃料球中 TRISO 填充率为25%时(C/HM=136.278),组件 $K_{\text{inf}}$ 随组件壁厚的变化关系,其反映了组件壁厚对组件 $K_{\text{inf}}$ 的影响。从图5可以看出,三种材料组件的 $K_{\text{inf}}$ 均随着 C/HM 先增加后减小,存在一个极大值,极大值对应的 C/HM 值即是最佳 C/HM 值。极大值左边是欠慢化区,右

边是过慢化区。当处于欠慢化区时，能谱偏硬，共振吸收效果强。因此随着  $C/HM$  的增大，能谱变软，共振吸收效果减弱， $K_{inf}$  增加。在过慢化区，由于慢化剂的过量，慢化剂的中子吸收效应强，随着  $C/HM$  的增加， $K_{inf}$  逐渐减小。碳材料和碳化硅材料的  $K_{inf}$  相差很大，差值随着  $C/HM$  而变大，在  $C/HM$  大于 550 时碳化硅材料组件的  $K_{inf}$  甚至会低于 1，这是由于硅的中子吸收截面远大于碳的中子吸收截面的缘故(图 4)。因此从中子经济性方面来看，选碳材料作为组件壁将明显优于碳化硅材料。

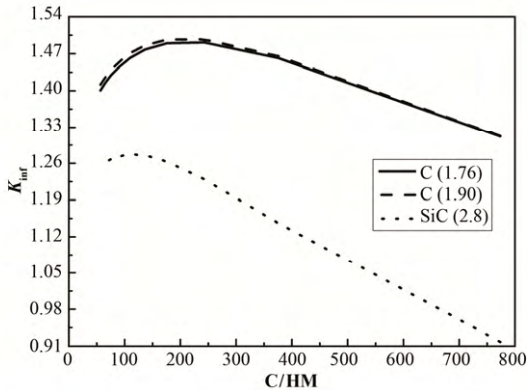


图 5 组件壁厚为 1.0 cm 时组件  $K_{inf}$  随着  $C/HM$  的变化关系  
Fig.5  $K_{inf}$  as a function of  $C/HM$  at a fuel assembly wall thickness of 1.0 cm.

从图 6 可以看出，碳材料组件的  $K_{inf}$  随着组件壁厚度而增加，并在壁厚度大于 2 cm 后趋近于平缓，而碳化硅材料组件的  $K_{inf}$  随着壁厚的增加而减小。这是因为随着碳材料组件壁厚的增加，慢化效果逐渐增强，反应性会逐渐增加；而碳化硅材料组件中，由于硅的中子吸收效果很强，因此碳化硅的增加将意味着反应性的减小。另外比较图中两种密度碳材料的数据可以看到， $K_{inf}$  随着碳材料密度而增加。

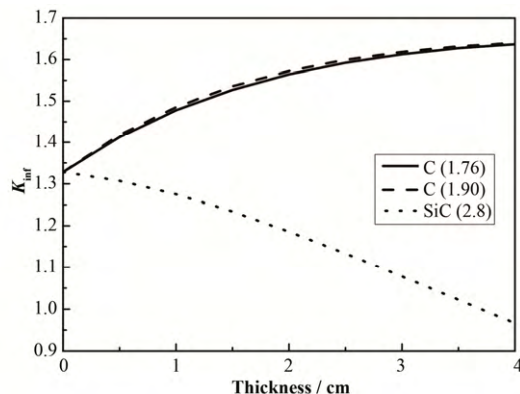


图 6 燃料球中 TRISO 填充率为 25% 时组件  $K_{inf}$  随着组件壁厚的变化关系  
Fig.6  $K_{inf}$  as a function of fuel assembly wall thickness at a TRISO packing factor of 25%.

## 2.2 TRISO 填充率、组件壁厚度对组件冷却剂 RTC 的影响

图 7 是组件壁厚取定值为 1.0 cm 时，组件的冷却剂 RTC 随燃料球中 TRISO 填充率的变化关系。图 8 是燃料球中 TRISO 填充率为 25% 时，组件冷却剂 RTC 随组件壁厚的变化关系。

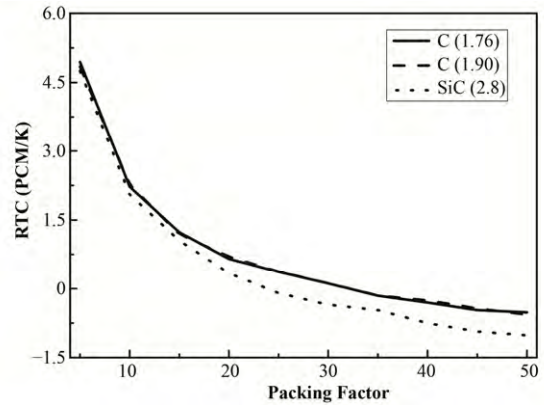


图 7 组件壁厚为 1.0 cm 时组件的冷却剂 RTC 随燃料球中 TRISO 填充率的变化关系

Fig.7 RTC as a function of TRISO packing factor at a fuel assembly wall thickness of 1.0 cm.

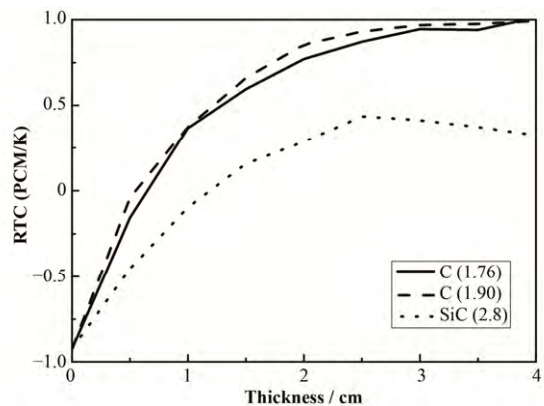


图 8 燃料球中 TRISO 填充率为 25% 时组件冷却剂 RTC 随组件壁厚的变化关系

Fig.8 RTC as a function of fuel assembly wall thickness at a TRISO packing factor of 25%.

图 7 反映了 TRISO 填充率对冷却剂 RTC 的影响。可以看出，随着填充率的增加，三种材料组件的 RTC 均先是大致减小，后趋于平缓，也即其变化率随着填充率的增大而减小。随着燃料球中 TRISO 填充率的增加，在 TRISO 填充率小于 25% 时，组件系统处于过慢化区，组件中装载燃料的总量增大，使得裂变反应的发生迅速增加，放出的快中子也快速增多，使能谱变硬，引起冷却剂 RTC 的大幅减小；

而在 TRISO 填充率大于 25% 时, 组件系统处于欠慢化区。由于慢化中子的减少, 组件中装载的燃料的总量的增加不会引起裂变反应的迅速增加, 因此冷却剂 RTC 的变化率减小, 即变化趋于平缓。另外可以看到, 三种材料组件的 RTC 相差不大, 其差值随着 TRISO 填充率而逐渐增大, 其中碳化硅材料组件的 RTC 略低。其原因是, 在 TRISO 填充率不大的情况下(过慢化区), 碳材料和碳化硅材料组件壁中所含有的 C 元素能够引起中子能谱的变化较小, 因此两种组件的冷却剂 RTC 差值也较小。随着 TRISO 填充率的增加(欠慢化区), 由于慢化剂不足, 碳材料和碳化硅材料组件壁中所含 C 元素的差值引起的能谱变化增大, 从而导致两种组件的冷却剂 RTC 差值逐渐增大; 从堆芯安全性方面考虑, RTC 越低, 越利于堆芯安全, 这就要求 TRISO 颗粒的填充率越大越好, 但过高的颗粒填充率会导致燃料制造过程中的破损率增加, 因此应根据制造工艺水平选取合适的 TRISO 颗粒填充率。

图 8 反映了组件壁厚对 RTC 的影响。组件 RTC 随着组件壁厚的增加先大幅增加, 后趋于平缓, 且碳化硅材料组件的 RTC 低于碳材料组件, 其差距随着组件厚度而增大。究其原因, 也是由于 C 元素在过慢化区和欠慢化区的作用程度不同所致。如图 8 所示, 组件壁厚较小时有利于反应堆的安全, 但过小的组件壁厚将降低燃料组件容器材料的强度, 因此需要权衡多种因素选取合适的组件壁厚。

### 2.3 TRISO 填充率、组件壁厚对 VR 的影响

VR 和冷却剂 RTC 一样, 对反应堆安全具有重要影响。计算中通过改变燃料球中 TRISO 填充率和组件壁厚, 使得组件系统的能谱发生变化, 研究其对三种材料组件的 VR 的影响。

图 9 显示了组件壁厚为 1.0 cm 时, 组件 VR 随 TRISO 填充率的变化关系。图 10 是固定填充率为 25% 时, 组件的 VR 随组件壁厚的变化关系。可以看出组件的 VR 随填充率、组件壁厚的变化规律与组件 RTC 随它们的变化规律相同。随着填充率的增加, 三种材料组件的 VR 均先是大幅减小, 后趋于平缓; 碳材料与碳化硅材料组件的 VR 之间的差值随着 TRISO 填充率而逐渐增大, 且碳化硅材料组件的 VR 略低。在 TRISO 填充率固定的条件下, 组件 VR 随着组件壁厚的增加先是大幅增加, 后趋于平缓。如 §2.2 所述, 这些现象均可由 C 元素在过慢化区和欠慢化区的作用得到解释。

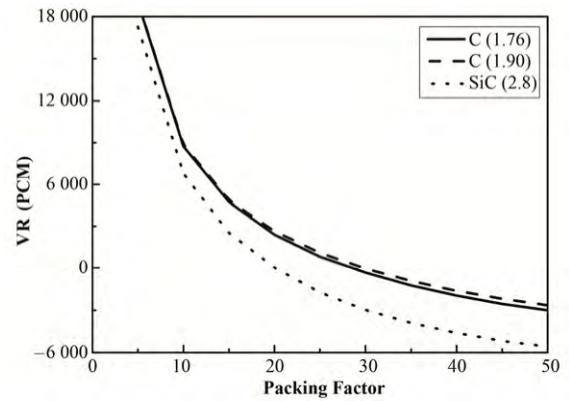


图 9 组件厚度为 1.0 cm 时组件的 VR 随燃料球中 TRISO 填充率的变化关系

Fig.9 VR as a function of TRISO packing factor at a fuel assembly wall thickness of 1.0 cm.

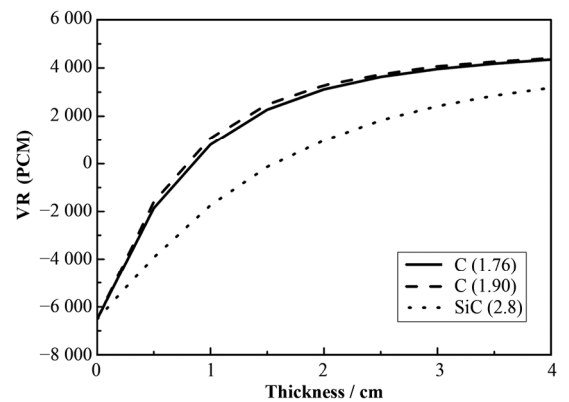


图 10 燃料球中 TRISO 填充率为 25% 时组件的 VR 随组件壁厚度的变化关系

Fig.10 VR as a function of fuel assembly wall thickness at a TRISO packing factor of 25%.

### 2.4 $^7\text{Li}$ 富集度的影响

熔盐中的 Li 包含两个部分:  $^7\text{Li}$  和  $^6\text{Li}$ 。其中  $^6\text{Li}$  为毒性很强的中子毒物, 其含量直接影响组件的  $K_{\text{inf}}$ 、冷却剂 RTC 和 VR。计算了两种  $^7\text{Li}$  富集度 (99.99%、99.995%, 分别对应  $^6\text{Li}$  的浓度为 0.01%、0.005%) 下, 三种材料组件的  $K_{\text{inf}}$ 、RTC 和 VR 值, 分析讨论了  $^7\text{Li}$  富集度对它们的影响, 结果如表 2 所示 (其中  $\Delta$  表示  $^7\text{Li}$  富集度分别为 99.99% 和 99.995% 时各对应项的差值)。

从表 2 中可以看出, 选用 99.995%  $^7\text{Li}$  熔盐时, 三种材料组件的  $K_{\text{inf}}$ 、RTC 和 VR 均明显优于选用 99.99%  $^7\text{Li}$  熔盐。 $^7\text{Li}$  富集度对  $K_{\text{inf}}$  的影响相对较小 (仅 2.2% 左右), 而对冷却剂 RTC 和 VR 的影响则大很多, 这是因为  $^7\text{Li}$  富集度是 RTC 和 VR 的主要决定因素之一。另外, 因为碳材料组件中碳原子的含量比碳化硅材料组件高, 因此碳材料组件的能谱更软,  $^6\text{Li}$  的吸收截面更大, 因此  $^7\text{Li}$  富集度的变化对碳材料组件的影响更显著。

表 2  ${}^7\text{Li}$  富集度对  $K_{\text{inf}}$ 、RTC 和 VR 的影响  
Table 2 Effects of the  ${}^7\text{Li}$  enrichment on  $K_{\text{inf}}$ , RTC and VR.

两种 ${}^7\text{Li}$ 富集度下不同材料组件 Assemblies of different material with two kind enrichment of ${}^7\text{Li}$		$K_{\text{inf}}$	RTC (PCM/K)	VR (PCM)
${}^7\text{Li}$ (99.99%)	C (1.76 g·cm <sup>-3</sup> )	1.564 7	0.770 5	3 117.82
	C (1.90 g·cm <sup>-3</sup> )	1.572 6	0.855 1	3 286.20
	SiC (2.8 g·cm <sup>-3</sup> )	1.185 8	0.286 6	984.06
${}^7\text{Li}$ (99.995%)	C (1.76 g·cm <sup>-3</sup> )	1.599 7	0.379 7	1 721.90
	C (1.90 g·cm <sup>-3</sup> )	1.607 6	0.469 7	1 901.01
	SiC (2.8 g·cm <sup>-3</sup> )	1.205 2	0.057 4	-371.39
A	C (1.76 g·cm <sup>-3</sup> )	0.035	-0.390 8	-1 395.92
	C (1.90 g·cm <sup>-3</sup> )	0.035	-0.385 4	-1 385.19
	SiC (2.8 g·cm <sup>-3</sup> )	0.019 4	-0.229 2	-1 355.45

### 3 结语

本工作以 2LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐作为冷却剂,以 TRISO 包覆颗粒燃料球作为燃料单元,设计了一个熔盐堆的燃料组件模型。本文所设计的反应堆首次把 FLiBe 熔盐、TRISO 包覆颗粒燃料球和组件三者结合在一起,既保持了熔盐堆的固有安全性,又利用了水堆的换料技术。本文研究了不同的组件壁材料、TRISO 填充率、组件壁厚度以及  ${}^7\text{Li}$  富集度对堆芯无限增殖因数  $K_{\text{inf}}$  以及冷却剂 RTC 和 VR 的影响。研究结果表明:

1) 组件系统的  $K_{\text{inf}}$  随着 C/HM 的增加先增后减,存在一个极大值,此极大值对应于一个最优 C/HM 比值。填充率应选取最佳 C/HM 比对应的 TRISO 填充率。由于硅原子的中子吸收截面远大于碳原子,碳基材料组件的  $K_{\text{inf}}$  明显的大于碳化硅基材料组件。碳材料的密度越大,组件的  $K_{\text{inf}}$  越大。

2) 冷却剂 RTC 随着 TRISO 填充率的增加而减小,当填充率大于 25% 时变化趋势趋缓。大的填充率有利于反应堆的安全运行,但填充率越大,燃料球的制作成本就越高。冷却剂 RTC 随着组件壁厚度而增大,当厚度大于 2 cm 时,其变化趋于平缓。小的组件壁厚度有利于保证反应堆的安全性,但考虑到组件壁材料的强度问题,其厚度不宜过小。冷却剂 VR 的变化规律与 RTC 相近。

3)  ${}^7\text{Li}$  富集度越高,  $K_{\text{inf}}$  越大,冷却剂 RTC 和 VR 越低,越有利于提高堆芯的经济性和安全性。

### 参考文献

- 1 The U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum. A technology roadmap for generation IV nuclear energy systems[R]. Nuclear Energy Research Advisory

Committee and the Generation IV International Forum, December 2002

- 2 Forsberg C W, Pickard P, Peterson P F. Molten-salt-cooled advanced high-temperature reactor for production of hydrogen and electricity[J]. Nuclear Technology, 2003, 3(144): 289-302. DOI: 10.13182/NT03-1
- 3 Varma V K, Holcomb D E, Peretz F J, *et al.* AHTR mechanical, structural, and neutronic preconceptual design[R]. ORNL/TM-2012/320, September 2012
- 4 Philippe B, Edward B, Massimiliano F, *et al.* Analysis and development of the modular PB-AHTR[C]. 2008 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP '08), Anaheim, CA, June 8-12, 2008
- 5 Massimiliano F, Ehud G, Peterson P F. Neutronic and depletion analysis of the PB-AHTR[R]. Berkeley: Department of Nuclear Engineering, University of California, CA 94720-1730, 2007
- 6 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
- 7 X-5 Monte Carlo Team. MCNP - a general Monte Carlo N-particle transport code Volume I: overview and theory[Z]. Version 5. LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, 2003
- 8 Piyush S, Shannon M, Bragg S, *et al.* Challenges in the development of high temperature reactors[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74(10): 574-581. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.02.021
- 9 Serrano-López R, Fradera J, Cuesta-López S. Molten salts

- database for energy applications[J]. Chemical Engineering and Processing, 2013, 73(73): 87–102
- 10 谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 北京: 原子能出版社, 2004: 200–206
- XIE Zhongsheng. Nuclear reactor physics analysis[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2004: 200–206
- 11 de Zwaan S J, Boer B, Lathouwers D, *et al.* Design of a liquid-salt-cooled pebble bed reactor (LSPBR)[J]. Annals of Nuclear Energy, 2007, 34(1): 83–92. DOI: 10.1016/j.anucene.2006.11.008
- 12 Forsberg C W, Peterson P F, Williams D F. Liquid-salt cooling for advanced high-temperature reactors[C]. Proceedings of the ICAPP'05, Seoul, Korea, 2005