

熔盐实验堆堆芯结构变化对反应性的影响分析

于世和 刘亚芬 杨 璞 冀锐敏 朱贵凤 周 波 康旭忠 严 睿 邹 杨

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 熔盐堆采用液态燃料,由于燃料的流动性,堆芯结构的变化会直接影响堆芯活性区的燃料盐装载量,从而影响堆芯物理特性参数。本文基于蒙特卡罗程序MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code),以2 MW液态燃料钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor-Liquid Fuel, TMSR-LF1)设计模型为参考,系统研究了套管破裂、石墨构件移动、石墨破损、燃料盐浸渗度等因素对堆芯反应性的影响。结果表明:对于堆芯套管破裂,堆芯引入正反应性,破裂位置离堆芯中心越近,引入的反应性越大;对于石墨构件移动,随着扇形石墨构件向外移动,堆芯反应性增加;对于堆芯石墨破损,破损发生后,原燃料盐流道被石墨堵住时,则堆芯反应性减小;对于堆芯石墨破损,破损发生后,新燃料盐流道形成时,当石墨破损半径较小时,堆芯反应性会增加,当石墨破损半径较大时,堆芯反应性会减小。对于堆芯石墨发生燃料盐浸渗,堆芯反应性增加,且燃料盐渗入量越大,反应性变化越大。本研究为2 MW TMSR-LF1安全分析提供参考依据。

关键词 熔盐堆,钍基熔盐堆,堆芯结构,反应性

中图分类号 TL3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.020603

Effect analysis of core structure changes on reactivity in molten salt experimental reactor

YU Shihe LIU Yafen YANG Pu JI Ruimin ZHU Guifeng ZHOU Bo KANG Xuzhong
YAN Rui ZOU Yang

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

Abstract [Background] Liquid fuel is used in the molten salt reactor, altering core structure will cause direct change of fuel salt loading and affect the physical parameters of the reactor core due to flowing fuel. [Purpose] This study aims at the influence of core structure changes on reactivity. [Methods] The 2 MW thorium molten salt reactor-liquid fuel (TMSR-LF1) model was taken as the reference reactor, and the reactivity variations were calculated by using MCNP (Monte Carlo N particle transport code) with consideration of parameter changes caused by channel tube rupture, graphite component movement, graphite damage, and fuel salt penetration. [Results] Computational results reveal that casing rupture leads to positive reactivity in reactor core, the closer the rupture location is to the core center, the greater the reactivity is introduced. When the graphite component moves outward, the reactivity of the reactor core increases. When core graphite is damaged, decrease of the reactivity appears in the case of the original fuel salt channel blocked by graphite. In the case of new fuel salt channel formed through the damaged

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02010000)、钍铀燃料循环特性和若干关键问题研究项目(No.QYZDY-SSW-JSC016)资助

第一作者: 于世和, 男, 1984年出生, 2012年于哈尔滨工程大学获硕士学位, 研究方向为反应堆物理

通信作者: 严睿, E-mail: yanrui@sinap.ac.cn

收稿日期: 2018-04-21, 修回日期: 2018-08-09

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDA02010000), Thorium Uranium Fuel Cycle Characteristics and Key Problem Research Project (No.QYZDY-SSW-JSC016)

First author: YU Shihe, male, born in 1984, graduated from Harbin Engineering University with a master's degree in 2012, focusing on reactor physics

Corresponding author: YAN Rui, E-mail: yanrui@sinap.ac.cn

Received date: 2018-04-21, revised date: 2018-08-09

graphite the reactivity will increase when the graphite damage radius is small, and decrease when the graphite damage radius is large. The permeability of fuel salts in the core increases reactivity, and the greater the permeability of fuel salts, the greater the impact on reactivity. **[Conclusions]** This study provides a basic reference for safety analysis of 2 MW TMSR-LF1.

Key words Molten salt reactor, TMSR, Core structure, Reactivity

熔盐堆作为6种第四代反应堆之一,最早的研究开始于20世纪50年代^[1-4]。熔盐堆是采用熔盐混合燃料循环、以石墨为慢化剂产生裂变能量的热中子反应堆。其熔盐混合燃料为铀、钍、钍等氟化物,在高温熔融的液态下,即作为核燃料、又作为载热剂,把燃料和载热剂融合为一体,不需要固体燃料元件^[5]。熔盐堆在固有安全性、经济性、核燃料可持续发展及防核扩散等方面具有独特优势^[6]。

2011年,中国科学院瞄准核能领域国家重大战略需求,启动了“未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核能系统”战略性先导科技专项,成立了钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)中心^[7],拟建设2 MW液态燃料钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor-Liquid Fuel, TMSR-LF1)。在堆芯几何结构、燃料等方面,TMSR-LF1与传统固态堆有很大区别。由于采用液态燃料,在堆芯结构发生变化时,如套管破裂、石墨破损、石墨构件移动等,会直接影响堆芯活性区的燃料盐装载量,从而影响堆芯剩余反应性。因此,需要对这些改变堆芯结构的现象进行分析。本文以TMSR-LF1作为参考,采用蒙特卡罗程序MCNP(Monte Carlo N Particle Transport Code)^[8],建立了熔盐实验堆模型。研究与分析熔盐实验堆堆芯套管破裂、石墨构件移动、堆芯石墨破损、燃料盐渗透等改变堆芯结构的现象对堆芯反应性的影响。

1 计算模型与方法

1.1 计算模型

熔盐实验堆的计算分析模型如图1所示。由内向外主要包括燃料盐流道区、无燃料盐流道石墨区、燃料盐缝隙、主容器;由上向下主要包括上石墨层、上腔室、上支撑板、堆芯、下支撑板、下腔室、下石墨层。

堆芯活性区位于上下支撑板之间,由打孔的石墨构件拼接构成,其中径向由中心1个六棱柱石墨构件和周边12个扇形石墨构件构成,轴向各分4层。石墨构件中的孔道,以及石墨构件与石墨构件拼接形成的孔道,形成了燃料盐流道,流道直径4.0 cm,流道中心距10.0 cm。堆芯石墨区直径为230 cm,高

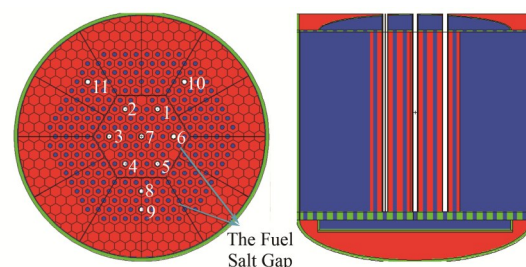


图1 计算模型结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of computational model

度为180 cm。同时,石墨构件上开有功能通道,其中1#、2#、3#、4#、5#为控制棒通道,7#、6#、8#、9#径向中子通量测量通道,10#为中子源通道,11#为实验样品辐照通道,功能通道套管内径为4.4 cm。

堆芯采用液态燃料,熔盐燃料的成分为LiF-BeF₂-ZrF₄-UF₄(65.39-28.34-4.72-1.55 mol%),燃料为²³⁵U,富集度为19.75%,⁷Li丰度99.95%,密度为2.345 g·cm⁻³。慢化剂采用石墨,密度为1.785 g·cm⁻³,石墨线性热膨胀系数为3.49×10⁻⁶ K⁻¹。功能通道套管材料采用哈氏合金,密度为8.68 g·cm⁻³,哈氏合金线性热膨胀系数为1.34×10⁻⁵ K⁻¹。

1.2 计算方法

考虑到熔盐实验堆几何结构的复杂性,及高温下,堆芯石墨构件的移动,本文采用MCNP程序建模分析。MCNP程序是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)开发的一个运用蒙特卡罗方法进行输运计算的计算机程序。MCNP程序的输入灵活,参数合理,能够完整描述任何模型在体积结构和材料密度等方面的细节。该程序的输出数据准确丰富,对于一个反应堆系统能够给出诸如有效增殖系数、能谱、单群或多群截面、中子产生和泄漏率等各种计算结果。

2 套管破裂的影响

熔盐堆堆芯中功能通道的套管外侧直接与燃料盐接触,是放射性泄漏的一道屏障。假设由于事故原因,造成通道套管破裂,在重力的作用下,堆芯中的燃料盐会流入套管中。燃料盐的液位面远高于堆芯活性区的顶端,因此,燃料盐会充满堆芯活性区中的套管。

套管破裂后,燃料盐流入套管中,导致活性区的体积增加,堆内燃料盐的装载量增加。计算结果见表1,从表1可以看出,套管破裂,堆芯引入正反应性,且破裂位置离堆芯中心越近,引入的反应性越大,其中通道7#的套管破裂引入反应性最大,为 1.54×10^{-3} 。

表1 通道套管破裂对反应性的影响
Table 1 Effect of channel tube rupture on reactivity

通道编号 Channel number	套管破损引入反应性 Effect of channel tube rupture on reactivity / 10^{-5}
1#	129
2#	130
3#	121
4#	100
5#	114
6#	116
7#	154
8#	79
9#	67
10#	74
11#	54

3 石墨构件移动的影响

熔盐实验堆堆芯由石墨构件拼接构成,中心是1个边长为45 cm六棱柱石墨构件,周边为12个外半径为115 cm的扇形石墨构件构成,石墨与主容器壁之间留有0.5 cm燃料盐缝隙。石墨构件之间通过键与销连接与定位,最底层石墨构件固定在下支撑板上。周边12个扇形石墨构件,石墨构件都有一个定位键,每个键均匀布置在直径为202.4 cm的径向,并处于石墨构件的角平分线上。

由于堆芯存在两种结构材料:石墨与哈氏合金,它们的膨胀系数差别很大。所以,在高温下,堆芯几何结构需考虑自身膨胀外,还需考虑石墨构件的移动。本文仅考虑周边12个扇形石墨构件一起移动。即周边12个扇形石墨构件一起随下支撑板膨胀而移动。轴向只考虑膨胀,不考虑移动。熔盐实验堆堆芯膨胀移动后的示意图见图1,从图1中可以看到,由于周边扇形石墨构件的外移,形成明显的18条燃料盐缝隙。

由于石墨销键的间隙存在或者损坏,造成扇形石墨构件移动与原来的设计值可能不一致,从而影响反应性变化。因此,本文分析考虑三种模型:1)堆芯模型考虑热膨胀效应导致的几何结构的变化,不

考虑扇形石墨构件随轴向定位键的移动;2)堆芯模型考虑热膨胀效应导致的几何结构的变化,同时考虑扇形石墨构件随轴向定位键的正常移动;3)堆芯模型考虑热膨胀效应导致的几何结构的变化,考虑石墨销键的间隙存在或者损坏,并假设扇形石墨构件最大位移移动(扇形石墨构件的外壁与主容器内壁紧贴)。

计算结果见表2,随着扇形石墨构件向外移动,堆芯反应性增加;每移动0.1 cm,堆芯反应性约增加 6×10^{-4} 。这是因为扇形石墨构件外移,相当于堆芯活性区体积增大,造成堆芯反应性增加。

表2 石墨构件移动对反应性的影响
Table 2 Effect of graphite component movement on reactivity

模型 Models	k_{eff}	差值 Difference / 10^{-5}
1	1.002 25	0
2	1.005 22	295
3	1.008 87	655

4 石墨构件破损的影响

石墨构件破损后,破损的石墨可能留在堆芯,也有可能随着燃料盐流出堆芯。即石墨构件破损,相当于改变了活性区的体积,或者说改变了活性区燃料盐的装载量。

原有燃料盐流道有可能堵有大小不一的石墨块;也有可能形成新的燃料盐流道。因此,本文从两方面来分析石墨构件破损对反应性的影响:1)原有燃料盐流道被堵;2)新燃料盐流道形成。为了便于分析,假设破损范围贯穿整个活性区,并只发生一处。图2为石墨构件破损位置举例示意图,与图1比较,图2左图外侧一个燃料盐流道被堵,图2右图外侧增加一个半径为4 cm的燃料盐流道。

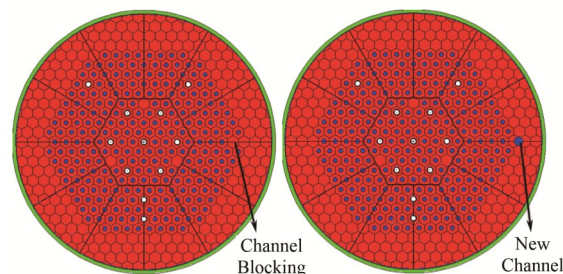


图2 石墨构件破损示意图
Fig.2 Schematic diagram of graphite components damage

4.1 燃料盐流道被堵

活性区以外的石墨可能会流入燃料盐流道,导致燃料盐流道被堵。比如,围成上下腔室和泵槽的石墨,作为填充物而采用的石墨,以及连接石墨构件

的销与键等,都有可能破损后进入到燃料盐流道。燃料盐流道被堵也分两种情况考虑:第一种情况燃料盐流道中50%区域被石墨填充;第二种情况燃料盐流道中100%区域被石墨填充。

图3是原有燃料盐孔道被堵对堆芯反应性的影响,横坐标表示被堵燃料盐孔道在堆芯中的径向位置,起始点为堆芯中心。从图3中可以看出,当燃料盐流道被石墨堵住时,堆芯反应性减小,但是减小幅度较小,堆芯反应性变化不超过 1×10^{-3} 。燃料盐流道被石墨填充的越多,堆芯反应性减小幅度越大。靠近堆芯中心和活性区边界处的燃料盐流道被堵对堆芯反应性影响较大。

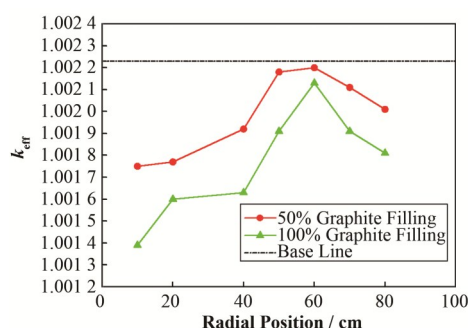


图3 燃料盐流道被堵对反应性的影响

Fig.3 Effect of fuel salt flow channel blocking on reactivity

4.2 新燃料盐流道形成

若石墨破损发生在燃料盐流道之间,相当于形成新的燃料盐流道,即增加了一个燃料栅元。并且当石墨破损半径较大时,新形成的燃料盐流道与原有的燃料盐流道就连在了一起。新形成的燃料盐流道的形状不同,对堆芯反应性影响也不一样,但是鉴于新形成的燃料盐流道本身对堆芯反应性的影响较小,因此,流道的形状不同对反应性影响,不在本文中分析,本文对新形成的燃料盐流道做等效半径的圆柱考虑。

径向不同位置石墨破损后,新燃料盐通道形成对堆芯反应性的影响,见图4。 R 表示石墨破损的等效半径,横坐标表示破损燃料盐孔道在堆芯中的径向位置,起始点为堆芯中心。从图4中可以看出,当石墨破损半径较小时,堆芯反应性会增加,但是增加幅度较小,堆芯反应性变化不超过 1.50×10^{-3} ;且靠近堆芯中心和活性区边界处的石墨破损对堆芯反应性影响较大。当石墨破损半径较大($R > 16$ cm)时,堆芯反应性会减小;靠近活性区边界处的石墨破损对堆芯反应性影响较小。

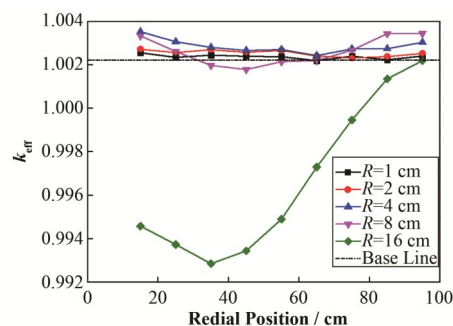


图4 新燃料盐流道对反应性的影响

Fig.4 Effect of new fuel salt flow channel on reactivity

5 燃料盐浸渗的影响

熔盐实验堆堆芯大部分都是石墨,燃料盐渗入石墨^[9],改变了堆芯中燃料盐的装载量,会对堆芯反应性产生影响。

从图5中可以看出,石墨中渗入燃料盐,堆芯反应性增加,且燃料盐渗入量越大,反应性变化越大。图5中燃料盐渗透百分比指已渗透的燃料盐体积占石墨的体积比。

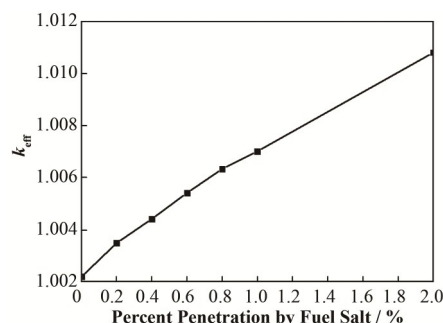


图5 燃料盐渗透对反应性的影响

Fig.5 Effect of penetration by fuel salt on reactivity

6 结语

本文基于TMSR-LF1的设计,采用MCNP程序,研究熔盐实验堆堆芯套管破裂、石墨构件移动、石墨破损、燃料盐渗透4种改变堆芯结构的现象对堆芯反应性的影响,得到以下结论:

- 1) 对于堆芯套管破裂,堆芯引入正反应性,破裂位置离堆芯中心越近,引入的反应性越大,且通道7#的套管破裂引入反应性最大,为 1.54×10^{-3} 。
- 2) 对于石墨构件移动,随着扇形石墨构件向外移动,堆芯反应性增加;每移动0.1 cm,堆芯反应性约增加 6×10^{-4} 。
- 3) 对于堆芯石墨破损,破损发生后,原燃料盐流道被石墨堵住时,堆芯反应性减小,但是减小幅度较小,堆芯反应性变化不超过 1×10^{-3} 。燃料盐流道被石墨填充的越多,堆芯反应性减小幅度越大。
- 4) 对于堆芯石墨破损,破损发生后,新燃料盐

流道形成时,当石墨破损半径较小时,堆芯反应性会增加,但是增加幅度较小,堆芯反应性变化不超过 1×10^{-3} ;当石墨破损半径较大($R > 16 \text{ cm}$)时,堆芯反应性会减小。

5) 对于堆芯石墨发生燃料盐浸渗,堆芯反应性增加,且燃料盐渗入量越大,反应性变化越大。

参考文献

- Bettis E S, Schroeder R W, Cristy G A, *et al.* The aircraft reactor experiment-design and construction[J]. Nuclear Science and Engineering, 1957, **2**: 804–825.
- Haubenreich R C. MSRE design and operations report part I Description of reactor[R]. ORNL-TM-728. Tennessee, America: ORNL, 1965.
- Haubenreich P N, Engel J R, Prince B E, *et al.* MSRE design and operations report part III nuclear analysis[R]. ORNL-TM-730. Tennessee, America: ORNL, 1964.
- 刘亚芬, 梅龙伟, 蔡翔舟. 熔盐堆不同堆芯边界下的物理研究[J]. 核技术, 2013, **36**(3): 030601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.030601.
LIU Yafen, MEI Longwei, CAI Xiangzhou. Physics research for Molten Salt Reactor with different core boundaries[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(3): 030601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.030601.
- 叶奇蓁, 李晓明, 俞忠德, 等. 中国电气工程大典第6卷: 核能发电工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 1142–1144.
- YE Qizhen, LI Xiaoming, YU Zhongde, *et al.* China electrical engineering canon sixth volume nuclear power generation engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 1142–1144.
- Merle-Lucotte E, Heuer D, Allibert M, *et al.* Introduction to the physics of Molten Salt Reactors[R]. NATO Advanced Study Institute on Materials Issues for Generation IV Systems: Status, Open Questions and Challenges, Corsica, France, 2007.
- 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, **45**(9): 578–590.
CAI Xiangzhou, DAI Zhimin, XU Hongjie. Thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Physics, 2016, **45**(9): 578–590.
- Pelowitz D B. MCNP6TM user's manual[R]. Los Alamos, NM, USA: Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, 2013.
- 张宝亮, 戚威, 夏汇浩, 等. 核石墨的孔结构与熔盐浸渗特性研究[J]. 核技术, 2017, **40**(12): 120605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.120605.
ZHANG Baoliang, QI Wei, XIA Huihao, *et al.* Porosity properties and molten salt impregnation characteristics of nuclear graphites[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(12): 120605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.120605.