

熔盐实验堆堆芯物理参数研究

于世和 李晓晓 刘亚芬 康旭忠 杨璞 冀锐敏
朱贵凤 周波 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(Molten Salt Reactor, MSR)采用熔融的氟化盐混合物作为燃料,由于核燃料的特殊性,MSR在中子物理学方面与传统固体燃料反应堆有着较大区别。本文基于蒙特卡罗程序MCNP(Monte Carlo N Particle Transport Code),以美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)熔盐堆实验(Molten-Salt Reactor Experiment, MSRE)为参考反应堆,系统研究了堆芯尺寸、燃料盐体积比、燃料盐重金属摩尔比、燃料盐渗透等物理参数对堆芯物理特性参数的影响。结果表明:随着堆芯尺寸增加,堆芯临界装载量有最小值;随着燃料盐体积比增加,燃料盐回路系统中重金属临界装载量先减少后增加,燃料温度系数的绝对值同样先减小后增加;燃料盐浸渗对堆芯反应性的影响,与燃料盐体积比增加对堆芯反应性产生的影响一致。本研究为2 MW液态燃料钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor-Liquid Fuel, TMSR-LF1)设计提供理论参考。

关键词 熔盐堆,熔盐堆实验,堆芯物理参数,临界参数

中图分类号 TL3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.030604

Study on core physical parameters for molten salt experimental reactor

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

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

Abstract [Background] Molten salt reactor (MSR) adopts molten fluoride salt mixture as fuel. The neutronic features of MSR are different from those of traditional solid-fuel reactors due to specific nuclear fuels. [Purpose] This study aims at the effects of core parameters on reactor physics of MSR. Parameters include core size, fuel volume fraction, fuel concentration, fuel salt penetration and so on. [Methods] Molten-salt reactor experiment (MSRE) of Oak ridge national laboratory (ORNL) was taken as the reference reactor and the calculation was completed by using MCNP (Monte Carlo N particle transport code). [Results] The calculation results show that with the increase of core size, the critical mass of core has a minimum value. With the increase of fuel volume fraction, the critical mass of fuel salt loop system first decreases and then increases, and the absolute value of fuel temperature coefficient decreases firstly and then increases. The effect of fuel salt penetration on core reactivity is consistent with that fuel volume fraction increment. [Conclusions] This study provides basic theoretical reference for the design of thorium molten salt reactor-liquid fuel (TMSR-LF1).

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: 2018-10-11, 修回日期: 2018-12-29

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 research

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

Received date: 2018-10-11, revised date: 2018-12-29

Key words Molten salt reactor, MSRE, Core physical parameters, Critical parameters

熔盐堆作为6种第四代反应堆中唯一的液体燃料反应堆。最早的研究开始与20世纪50年代^[1-3]。熔盐堆采用溶解在氟化锂、氟化钠等氟化盐中的钍或铀的液态融合物作为燃料,在高温熔融的液态下,既作为核燃料、又作为载热剂,把燃料和载热剂融合为一体,与传统的固态堆有显著的不同。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。

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TMSR(Thorium Molten Salt Reactor)中心^[4],拟建设2 MW液态燃料钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor-Liquid Fuel, TMSR-LF1)。TMSR-LF1燃料富集度较低,⁶Li含量较高,与美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)熔盐堆实验(Molten-Salt Reactor Experiment, MSRE)有较大区别。其堆芯尺寸、燃料盐体积比、燃料盐重金属摩尔比等物理参数,与传统固态堆相比,选择比较灵活;且有燃料盐浸渗等特有物理现象。本文基于蒙特卡罗程序MCNP(Monte Carlo N Particle Transport Code),以MSRE作为参考,建立了熔盐实验堆模型。以上述物理参数为变量,研究熔盐堆堆芯物理特性参数的变化规律。

1 计算模型与方法

1.1 计算模型

熔盐实验堆的堆芯如图1所示。堆芯活性区由正方形结构的石墨组件组成,石墨组件侧壁挖有规则通道,石墨组件组合在一起形成燃料盐通道。石墨组件的几何结构参考MSRE组件结构^[5-6]。堆芯活性区直径为1.8 m,高度为1.8 m。

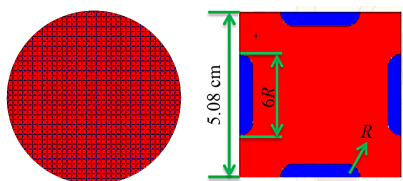


图1 计算模型结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of computational model

堆芯采用液态燃料,熔盐燃料的成分为LiF-BeF₂-UF₄,燃料为浓缩铀,富集度为17.0%,⁷Li丰度99.95%。慢化剂采用石墨,密度为1.86 g·cm⁻³。

本文分析中,堆芯活性区尺寸选取范围(直径×高):1.4 m×1.4 m、1.6 m×1.6 m、1.8 m×1.8 m、2.0 m×2.0 m。燃料盐体积比(Fuel Volume Fraction, FVF)选取范围:1%、2%、5%、10%、20%、22%、30%。燃料盐重金属摩尔比(Fuel concentration, FC)选取范围:1%、2%、3%、4%、6%、8%、12%。燃料盐体积比为石墨组件中燃料盐体积占总体积的比值。燃料盐重金属摩尔比为UF₄占总燃料盐成分的摩尔比。燃料盐渗透百分比指燃料盐体积占石墨的体积比。

1.2 计算方法

鉴于石墨组件的几何结构复杂性,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)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^[7]。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 堆芯尺寸的影响

不同尺寸的堆芯,上下腔室的燃料盐体积不一样,对应的回路中的燃料盐体积也不一样。为了方便,本节只考虑堆芯活性区的燃料盐体积,暂不考虑堆芯外的燃料盐体积。

堆芯尺寸的大小,本身影响燃料盐重金属装载量的大小。同时,堆芯尺寸越大,中子泄漏率越小,所需的重金属临界装载量,也会相应地减小^[8]。因此,堆芯尺寸的大小直接决定了燃料盐重金属装载量的大小,合理的堆芯尺寸可以使堆芯燃料盐装载量较小,同时满足堆芯剩余反应性要求。

从表1可以看出,当燃料盐体积比为5%时,随着堆芯尺寸变大,由于中子泄漏率变小,所需的燃料盐重金属摩尔比也变小。但是堆芯尺寸变大,燃料盐体积也增加。两者共同作用,最小燃料盐重金属临界装载量出现在堆芯尺寸1.8 m×1.8 m,为92 kg。为了进一步研究堆芯尺寸影响的普遍规律,同时改变燃料盐重金属摩尔比和燃料盐体积比,最小燃料盐重金属临界装载量出现在1.8 m×1.8 m,为64 kg,如表2所示。计算发现,堆芯活性区的最小燃料盐重金属临界装载量出现在过慢化区。因此,本文选取堆芯尺寸1.8 m×1.8 m,作为研究对象。

表1 堆芯尺寸对临界参数影响(FVF=5%)
Table 1 Critical concentration and mass as a function of core size (FVF=5%)

堆芯尺寸 Core size / m×m	临界重金属摩尔比 Fuel critical concentration / %	堆芯临界质量 Core critical mass / kg
1.4×1.4	10.2	147.2
1.6×1.6	4.0	95.8
1.8×1.8	2.6	92.0
2.0×2.0	1.9	94.3

表2 堆芯尺寸对临界参数影响
Table 2 Critical concentration and mass as a function of core size

堆芯尺寸 Core size / m×m	燃料盐体积比 Fuel volume fraction / %	临界重金属摩尔比 Fuel critical concentration / %	堆芯临界质量 Core critical mass / kg
1.4×1.4	5	10.2	147.2
1.6×1.6	2	8.3	73.9
1.8×1.8	1	10.5	64.0
2.0×2.0	1	7.3	64.6

3 燃料盐体积比

3.1 燃料盐体积比对临界的影响

对于熔盐堆来说,燃料盐流道就相当于传统固态堆的燃料栅元,燃料盐流道的半径、栅距的不同,即燃料盐体积比的大小变化,影响着堆芯重金属燃料和慢化剂的装载量,决定堆内的中子能谱分布,进而决定着堆芯的物理特性。保持燃料盐流道栅距不变,通过改变燃料盐流道半径来改变燃料盐体积比。

并暂定堆芯活性区以外的燃料盐体积为 1.5 m^3 ,燃料盐回路系统燃料盐体积等于堆芯活性区燃料盐体积加上堆芯活性区以外的燃料盐体积,燃料盐回路系统中重金属临界装载量简称系统质量,等于燃料盐回路系统燃料盐质量乘以燃料盐中重金属质量百分比。

从表3可以发现,随着燃料盐体积比增加,临界燃料盐重金属摩尔比先减少后增加;活性区重金属临界装载量一直增加;系统质量先减少后增加。

表3 燃料盐体积比对临界的影响
Table 3 Effect of fuel volume fraction on critical parameters

燃料盐体积比 Fuel volume fraction / %	临界重金属摩尔比 Fuel critical concentration / %	堆芯临界质量 Core critical mass / kg	系统质量 System mass / kg
1	10.49	63.97	2 160.1
2	5.30	70.59	1 227.0
5	2.63	92.01	694.9
10	1.91	135.41	579.1
15	1.89	201.69	642.3
20	2.16	305.34	805.5
22	2.76	429.33	1 060.6

临界燃料盐重金属摩尔比的变化与堆芯热中子利用系数和逃脱共振俘获概率的变化有关。随着燃料盐体积比增加,被燃料裂变吸收的热中子增加,即热中子利用系数增加,将使堆芯有效增殖系数增加,要保持堆芯临界,需减少燃料盐重金属摩尔比。同时,随着燃料盐体积比增加,活性区石墨减少,堆芯慢化能力减弱,慢化过程中被共振吸收的中子增加,及逃脱共振俘获概率减少,将使堆芯有效增殖系数减小,要使保持堆芯临界,需增加燃料盐重金属摩尔比。在较低的燃料盐体积比值时,前一种效应是主要因素。在较高的燃料盐体积比值时,后一种效应

是主要因素。因此,随着燃料盐体积比增加,临界燃料盐重金属摩尔比先减少后增加,最小值出现在燃料盐体积比为15%时。

堆芯活性区内,燃料盐体积增加对活性区重金属临界装载量的影响占主要因素,因此,随着燃料盐体积比增加,活性区燃料盐重金属临界装载量一直增加。

在整个燃料盐回路系统中,堆芯活性区以外的燃料盐体积占系统总燃料盐体积的绝大部分,而当熔盐堆功率和堆芯尺寸定值时,堆芯活性区以外的燃料盐体积基本上不变。因此,燃料盐回路系统重

金属临界装载量主要受临界燃料盐重金属摩尔比的影响,从表3可以看出,当燃料盐体积比为10%时,燃料盐回路系统重金属临界装载量最小,为579.1 kg。

3.2 燃料盐体积比对温度系数的影响

熔盐堆的燃料盐既是燃料又是冷却剂,因此,燃料盐温度系数可以分为两部分效应的组合:第一部分是燃料盐的温度效应,包括燃料的多普勒效应和其它核素截面随温度变化的效应,温度升高,有效增殖系数下降,产生负的温度效应,而且随着燃料盐体积比增加,负温度效应加强;第二部分是冷却剂的密度效应,冷却剂的密度效应类似于于压水堆慢化剂水的温度效应。

从图2可以看出,存在着一个燃料盐体积比,它使有效增殖因数达到最大值。我们把此处的燃料盐体积比的比值叫做最佳燃料盐体积比,如图2中最佳燃料盐体积比为10%。在过慢化区,如图2中燃料盐体积比小于10%,冷却剂的密度效应是负的温度效应;在欠慢化区,如图2中燃料盐体积比大于10%,冷却剂的密度效应是正的温度效应。

因此,如表4所示,当燃料盐重金属摩尔比为2%时,随着燃料盐体积比增加,燃料温度系数的绝对值先减小后增加,即堆芯燃料盐体积比靠近最佳

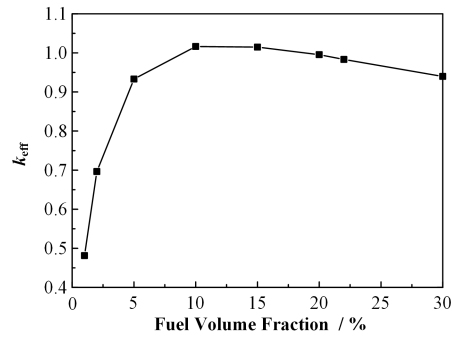


图2 k_{eff} 随燃料盐体积比变化
Fig.2 Variation of k_{eff} with volume fraction of fuel salt

燃料盐体积比时,燃料温度系数绝对值变小^[9]。

对于石墨慢化剂温度系数来说,由于温度升高石墨的体积变化较小,热中子利用系数基本不变。可以说,石墨慢化剂温度系数主要由逃脱共振吸收概率决定的。石墨温度升高,使中子能谱硬化,引起重金属低能部分共振吸收,产生负的温度效应。在过慢化区域,堆芯石墨的含量也大,因此负的温度效应幅度也大。

表4中燃料盐重金属摩尔比为2%,表5为燃料盐临界重金属摩尔比。在表5中不同燃料盐体积比下,要达到临界,与表4相比需要增加或者减少堆芯

表4 不同燃料体积比下的温度系数(FC=2%)
Table 4 Temperature coefficients for different fuel volume fraction (FC=2%)

燃料盐体积比 Fuel volume fraction / %	堆芯质量 Core mass / kg	石墨温度系数 Graphite temperature coefficients / 10^{-5} K^{-1}	燃料温度系数 Fuel temperature coefficients / 10^{-5} K^{-1}
1	14.18	-67.20	-32.85
2	28.37	-34.34	-17.35
5	70.92	-13.41	-8.27
10	141.83	-6.77	-5.96
15	212.75	-4.40	-5.66
20	283.67	-3.47	-6.31
22	316.05	-2.86	-6.58

表5 不同燃料体积比下的温度系数
Table 5 Temperature coefficients for different fuel volume fraction

燃料盐体积比 Fuel volume fraction / %	堆芯临界质量 Core critical mass / kg	石墨温度系数 Graphite temperature coefficients / 10^{-5} K^{-1}	燃料温度系数 Fuel temperature coefficients / 10^{-5} K^{-1}
1	63.97	-15.60	-7.62
2	70.59	-14.57	-7.76
5	92.01	-10.70	-7.05
10	135.41	-7.33	-6.32
15	201.69	-4.82	-5.95
20	305.34	-3.32	-6.22
22	429.33	-2.02	-6.13

重金属燃料的装载量,即改变燃料盐重金属摩尔比。由于燃料盐重金属摩尔比的变化,除了热中子利用系数和逃脱共振俘获概率发生变化,对快中子增殖因数的影响也较大。也就是说,当燃料盐重金属摩尔比增加时,温度升高,快中子增殖因数变化的幅度增加,具有正的温度效应幅度增加。如当燃料盐体积比为1%时,燃料盐重金属摩尔比从2%增加到10.49%时,温度系数绝对值变小。因此,堆芯临界时,受燃料盐重金属摩尔比的影响,温度系数随燃料盐体积比变化的幅度变缓。

4 燃料盐浸渗

对于熔盐堆来说,慢化剂石墨会发生燃料盐浸渗问题。燃料盐渗入石墨,堆芯石墨装量不变,燃料

盐的装载量增加,相当于燃料盐体积比变大从而对堆芯反应性产生影响。

从以上计算可知,燃料盐体积比为10%是最佳燃料盐体积比。从表6中可以看出,当燃料盐体积比为5%时,为过慢化区,石墨中渗入燃料盐,燃料盐体积比增加,堆芯反应性增加,且燃料盐渗入量越大,反应性变化越大。而燃料盐体积比为15%时是欠慢化区,石墨中渗入燃料盐,燃料盐体积比增加,堆芯反应性减小,且燃料盐渗入量越大,反应性减小幅度变大。

在最佳燃料盐体积比时,石墨中渗入燃料盐,堆芯反应性下降,但是影响较小。另外,燃料盐体积比为5%时,堆芯石墨较多,因此,燃料盐渗入石墨对反应性的影响也较大。

表6 燃料盐渗透对反应性的影响
Table 6 Effect of penetration by fuel salt on reactivity

燃料盐渗透百分比 Percent penetration by fuel salt / %	反应性变化值 Reactivity change		
	燃料盐体积比5%时 Fuel volume fraction 5% / 10 ⁻⁵	燃料盐体积比10%时 Fuel volume fraction 10% / 10 ⁻⁵	燃料盐体积比15%时 Fuel volume fraction 15% / 10 ⁻⁵
0.6	1 061	-422	-571
1	1 549	-670	-912
2	2 306	-1 330	-1 748

5 结语

本文基于MSRE的模型,采用MCNP程序,对熔盐实验堆的堆芯尺寸、燃料盐体积比、燃料盐浸渗等物理参数进行研究分析,得到以下结论:

1) 随着堆芯尺寸变大,堆芯临界装载量有最小值,且出现在过慢化区。

2) 随着燃料盐体积比增加,燃料盐回路系统中重金属临界装载量先减少后增加,最小值出现在最佳燃料盐体积比附近。

3) 当燃料盐重金属摩尔比为定值时,随着燃料盐体积比增加,燃料温度系数的绝对值先减小后增加。

4) 堆芯临界时,受燃料盐重金属摩尔比的影响,温度系数随燃料盐体积比变化的幅度变缓。

5) 燃料盐浸渗对堆芯反应性的影响,与燃料盐体积比增加对堆芯反应性产生的影响一致。

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 (ORNL-TM-728) [R]. Tennessee, America: Oak Ridge National Laboratory, 1965.

- Ji R M, Yu C G, Li M H, *et al.* Study on inherent neutron sources in MSR[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, 29(4): 47. DOI: 10.1007/s41365-018-0396-y.

- 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.

- Haubenreich P N. MSRE design and operations report, Part III: nuclear analysis (ORNL-TM-730)[R]. Tennessee, America: Oak Ridge National Laboratory, 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.

- Pelowitz D B. MCNP6TM user's manual[R]. Los Alamos,

- NM, USA: Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, 2013.
- 8 谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 210-211.
- XIE Zhongsheng. Nuclear reactor physics analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 2004: 210-211.
- 9 于世和, 曹欣荣, 兰兵. 中子能谱对压水堆慢化剂温度系数的影响分析[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(9): 1594-1598.
- YU Shihe, CAO Xinrong, LAN Bing. Analysis of moderator temperature coefficient with neutron spectrum for pressurized water reactors[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(9): 1594-1598.