

空间核反应堆安全分析

张一帆, 屈 伸, 曹良志, 郑友琦
(西安交通大学核科学与技术学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 空间核反应堆是空间能源的重要候选方案, 其寿命长、功率大、结构紧凑, 但其特有的中子学特性、与传统快堆迥异的设计方案对堆芯安全分析提出了挑战。本文以热管型空间堆为例, 首先基于蒙特卡洛方法对空间堆在水淹和沙埋事故工况下, 进行了稳态中子学计算分析, 结果表明: 堆芯在事故工况下不会重返临界。同时, 基于瞬态多物理分析程序 TMACS, 进行了单根控制鼓旋转瞬态过程计算。结果表明: 空间堆在热工反馈和热膨胀反馈的多物理耦合下, 在特定的瞬态过程中能够保持功率稳定, 满足安全要求。

关键词: 空间堆; 安全分析; 瞬态计算; 多物理耦合

中图分类号: TL 329.2; TL 433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.06.017

Safety Analysis of Space Nuclear Reactor

ZHANG Yifan, QU Shen, CAO Liangzhi, ZHENG Youqi

(School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Space nuclear reactor is an important candidate for space power source. It has the advantages such as long life, large power, and compact structure. However, its unique characteristics of neutronics and the design scheme different from traditional fast nuclear reactors pose challenges to the core safety analysis. In this paper, the calculation and analysis of the steady-state neutronics of a heat-pipe space reactor under the accident conditions of water flooding and sand burial are conducted based on the Monte-Carlo method. The results show that the core would not return to the critical state under the accident conditions. Meanwhile, based on the transient multi-physics analysis program TMACS, the transient rotation process of a single control drum is carried out. The results show that, in a particular transient process under the multiple physical couplings of thermal-hydraulic feedback and thermal expansion feedback, the space reactor can maintain the power stable and meet the safety requirement.

Key words: space reactor; safety analysis; transient calculation; multi-physical coupling

0 引言

空间反应堆电源的应用大大提高了航天器的适应性和工作能力, 拓宽了航天器的应用领域, 为航天技术的发展提供了新的空间^[1]。美国及苏联于 20 世纪 50 年代开始了空间反应堆电源的研究, 并成功发射了 30 多颗使用核反应堆作为电源的卫星^[2]。目前世界上多个国家正积极开发大功率核反应堆电源, 用于航天器推进与供电。本文以自主设计的 MW 级热管型空间反应堆(以下简称热管堆)为例, 采用目前国际上公认的蒙特卡洛方法进行中子学

分析^[3], 采用确定论方法进行瞬态模拟, 进行了典型的水淹和沙埋事故分析, 与单根控制鼓旋转瞬态过程模拟, 验证了在特定事故工况下所设计的空间堆的安全性能。

1 堆芯设计方案

本文所分析的对象为自主设计的一种 MW 级热管型空间反应堆。图 1 给出了采用该反应堆燃料组件的设计简图^[4]。该组件将热管元件嵌套在管状燃料元件当中, 呈现一体式结构。相对于国际上成

收稿日期: 2019-10-09; 修回日期: 2019-10-19

作者简介: 张一帆(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为先进核反应堆设计。

通信作者: 郑友琦(1984—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为核反应堆数值方法及新一代核能系统中子学方法。

熟的、研究较多的热管堆堆芯设计方案 SAIRS、HP-STMCs、S⁺、SCoRe^[5]等,这种采用嵌套一体式燃料热管组件的设计增大了堆芯的冷却,从而使得热管堆中热管的热效率大大提高。

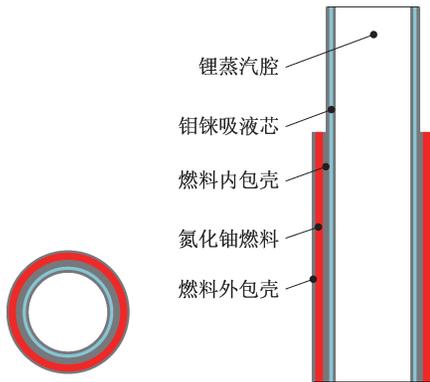


图 1 单根热管组件设计简图^[5]

Fig.1 Single heat pipe design sketch^[5]

由图 1 可见,热管按照径向由内而外可分为蒸汽腔、内管壁、吸液芯、外管壁 4 部分。蒸汽腔中充有 Li 蒸汽,吸液芯和内外热管壁的材料均为 Mo-Re 合金。外部的燃料组件可分为内包壳、管状燃料以及外包壳。内外包壳材料均为 Mo-Re 合金。该合金为谱移吸收体材料^[6],可在热管堆发生水淹和沙埋事故时,有效吸收热管堆慢化的热中子,从而防止堆芯重返临界。燃料热管组件按照轴向可划分为 3 段(包覆燃料管的部分为热管的蒸发段,液态金属 Li 吸收燃料裂变热后蒸发;Li 蒸汽沿蒸汽腔流经绝热段;到达冷凝段后,Li 蒸汽放出汽化潜热,重新冷凝为过冷液态 Li 后,经吸液芯回流到蒸发段),从而实现将活性区裂变热带出堆芯的目的。设计方案选用 ²³⁵U 富集度为 90% 的 UN 材料,燃料管内径为 1.23 cm,外径为 1.28 cm。同时在堆芯活性区中心^[7]设计安全棒,起到紧急停堆的作用。其安全棒结构设计如图 2 所示,参数如表 1 所示。

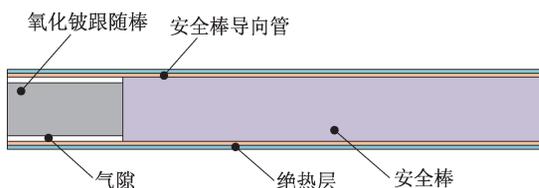


图 2 热管堆安全棒结构示意图

Fig.2 Safety rod structure of heat pipe reactor schematic diagram

表 1 热管堆安全棒参数设定

Tab.1 Heat pipe reactor safety rod parameters

组件名称	数量	材料
BeO 跟随棒	1	BeO
安全棒	1	Hf
安全棒热管导向管	1	Mo-Re
绝热层	1	SiO ₂
间隙	1	Li 蒸汽

2 稳态安全分析

2.1 水淹、沙埋事故工况下的堆芯安全性分析

水淹和沙埋事故工况是空间堆发生燃料再入事故(即发射失败,热管堆再次进入大气层事故)后的两种严重事故工况^[8]。本文采用蒙特卡洛方法对热管堆水淹和沙埋事故工况进行稳态计算分析。

假设堆容器壁没有破裂,即海水并未进入堆芯。此时堆芯所处环境如图 3 所示,假设在水淹工况下,堆芯被海水所包围;在沙埋工况下,堆芯被湿沙所包围。堆芯触发停堆信号,6 个控制鼓起最大控制作用,安全棒处于弹出状态。

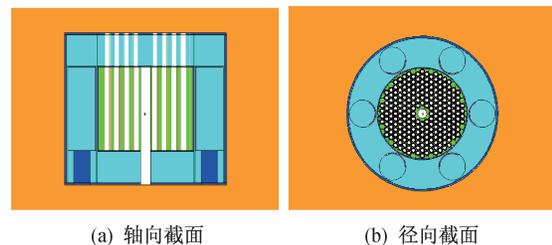


图 3 水淹或沙埋事故工况下的堆芯结构

Fig.3 Core structure under water flooded or sand buried accident conditions

计算了外部水淹和外部沙埋工况下的堆芯有效增殖系数,并与外部真空(太空中正常工况)工况下的结果进行对比,见表 2。表中的 0° 表示 6 根控制鼓均正对堆芯。

表 2 热管堆在水淹或沙埋事故工况下堆芯 k_{eff} 对比

Tab.2 k_{eff} of heat pipe reactor core under water flooded or sand buried accident conditions

$\theta/(\circ)$	k_{eff} (外部真空)	k_{eff} (外部水淹)	k_{eff} (外部沙埋)
0	0.961 44	0.964 40	0.966 25

由表 2 中的对比计算可以发现:在外部水淹的工况下,堆芯会引入 296 pcm 的正反应性;在外部沙埋

的工况下堆芯会引入 481 pcm 的反应性。由于泄漏出来的中子,在外部的海水或湿沙原子的散射作用下得以慢化,使得有一定的几率反射回堆芯。湿沙的慢化作用强于海水,因此,沙埋工况对安全性影响更大。

但是,本文设计的热管堆中有大量的结构材料及包壳材料 Mo-Re 合金^[10],该材料为谱移吸收体材料,拥有较大的热中子吸收截面,热中子的吸收截面是快中子吸收截面的 $10^3 \sim 10^4$ 倍,因此,堆芯活性区的能谱并不会随外部水淹或沙埋事故工况的影响而变软。反之,堆芯活性区的能谱仍然偏硬。将正常工况、水淹事故工况以及沙埋事故工况下的堆芯平均能谱进行统计,如图 4 所示。

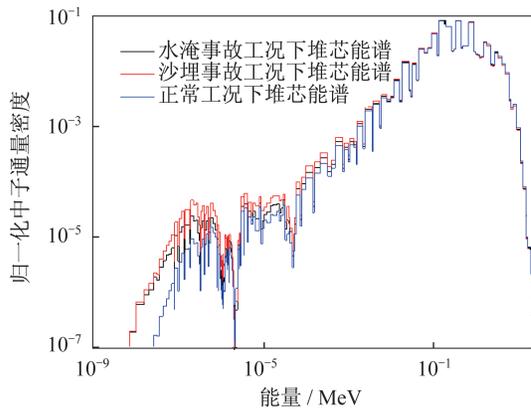


图 4 热管堆堆芯归一化平均中子能谱对比

Fig.4 Normalized mean neutron energy spectrum ratio in heat pipe core

通过能谱对比可以看出:正常工况下,热管堆的能谱偏硬;水淹和沙埋事故工况的引入会使能谱软化,但是由于谱移吸收体材料的存在,使得其影响并不显著;沙埋下的热管堆堆芯平均能谱相对于水淹事故下的平均能谱较软。因此,堆芯外部水淹或者沙埋事故工况,对堆芯活性区的以及能谱的影响并没有太大。由此看来,谱移吸收体材料对热管堆在事故工况下起着相当大的保护作用。

2.2 水淹和沙埋混合事故工况下的堆芯安全性分析

热管堆发射失败或失控状态下,坠入大气层最终掉落沙滩是另一种事故工况,即混合事故工况。

2.2.1 热管堆外壁未破裂

热管堆掉落沙滩事故工况下的堆芯结构示意图如图 5 所示。由图 5 可见,堆芯下部外侧被湿沙所包

围,堆芯上部外侧被海水所包围,沙子与海水间有一条分界线。该模型较为简单,为水淹沙埋混合事故工况的分层模型。设置分界线位置的高低,可以进行热管堆在不同混合事故工况下堆芯的临界计算。

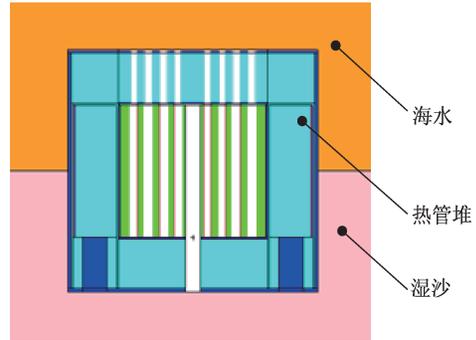


图 5 水淹和沙埋混合事故工况下的堆芯结构图

Fig.5 Core structure under mixed accident conditions of water flooding and sand burial

计算结果如图 6 所示。统计误差为 24 pcm,该统计误差的影响使得堆芯有效增殖系数曲线并不很光滑。由图 6 可以看出,当采用分层模型时,水淹和沙埋混合事故工况下的堆芯 k_{eff} 位于外部纯水淹或外部纯沙埋单一事故工况下的堆芯 k_{eff} 之间。

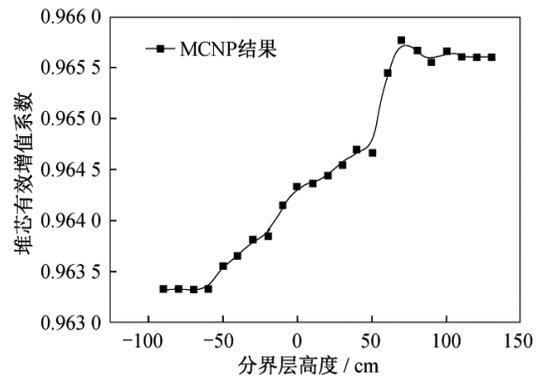


图 6 水淹和沙埋混合事故工况下的堆芯 k_{eff} 变化曲线

Fig.6 Core k_{eff} curve under mixed accident conditions of water flooding and sand burial

在混合事故工况下,堆芯依然会引进一个正反应性,但是该正反应性的最大值为外部沙埋事故工况下引进的正反应性。因此,若能保证外部沙埋工况下,堆芯不会发生重返临界就能保证混合事故工况下堆芯的安全性。

2.2.2 热管堆外壁破裂

热管堆外壁破裂、沙水混合物进入堆芯时的示

意图如图 7 所示。此时,外部及热管中均被沙水混合物充满,该模型为打混模型。

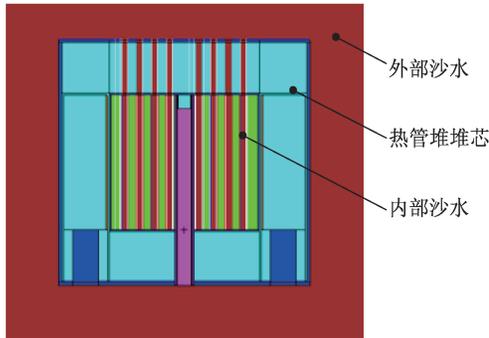


图 7 沙水混合物进入堆芯示意图

Fig.7 Diagram of sand-water mixture entering core

调整海水和湿沙的质量比,计算堆芯 k_{eff} ,结果如图 8 所示。由计算结果可以看出,沙水混合物进入堆芯后会引入一个正反应性。混合物中海水的质量份额在 50% 左右,引入的反应性最大。此时为危险时刻,堆芯 k_{eff} 为 0.967 32,引入的正反应性为 588 pcm。

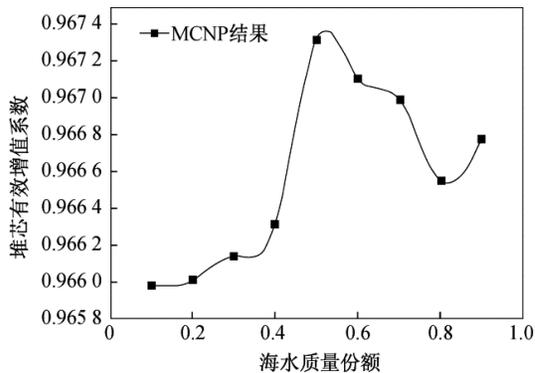
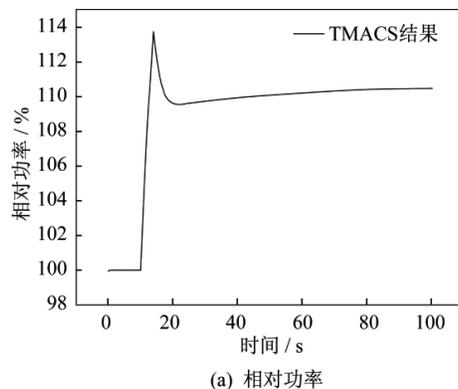
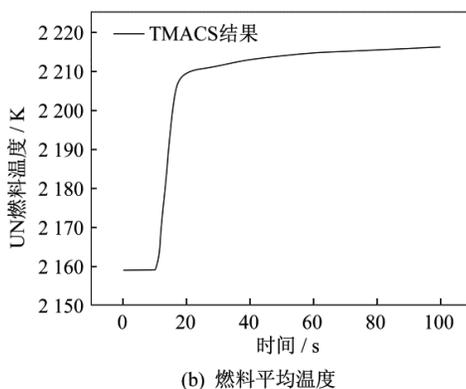


图 8 堆芯 k_{eff} 变化曲线

Fig.8 Core k_{eff} variation curve



(a) 相对功率



(b) 燃料平均温度

3 热管堆瞬态安全分析

热管堆全堆芯建模示意图如图 9 所示。考虑热态满功率状态下单根控制鼓旋转的瞬态过程。瞬态过程是由 1 号控制鼓在 2 s 内顺时针旋转 30° 所引起的。采用自主开发的确定论瞬态分析程序 TMACS 进行模拟计算分析,计算中考虑了热工反馈和膨胀反馈。

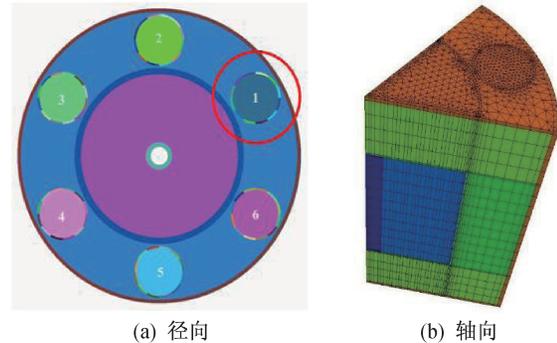


图 9 热管堆全堆芯 R-Z 几何模型

Fig.9 R-Z geometric model of the whole core of the heat pipe reactor

扰动的初始时刻为 10 s,终止时刻为 12 s,时间步长为 2 ms,瞬态过程持续到 100 s 结束。堆芯热态为满功率,即 3 MWt。图 10 给出了瞬态计算结果,包括相对功率、燃料平均温度、反应性、冷却剂平均温度随时间的变化。

从图 10 中可以看出,当 1 号控制鼓旋转后,功率升高引起燃料温度升高,随即通过燃料温度系数引入负反馈使得功率水平立即下降,此时热管中的冷却剂温度在缓慢的变化,并且堆芯随之膨胀,导致功率水平略微上升。由于燃料温度变化过程较快,导致功率曲线存在持续时间非常短的功率峰值,达到 113.8% 的额定功率水平。在这两种负反

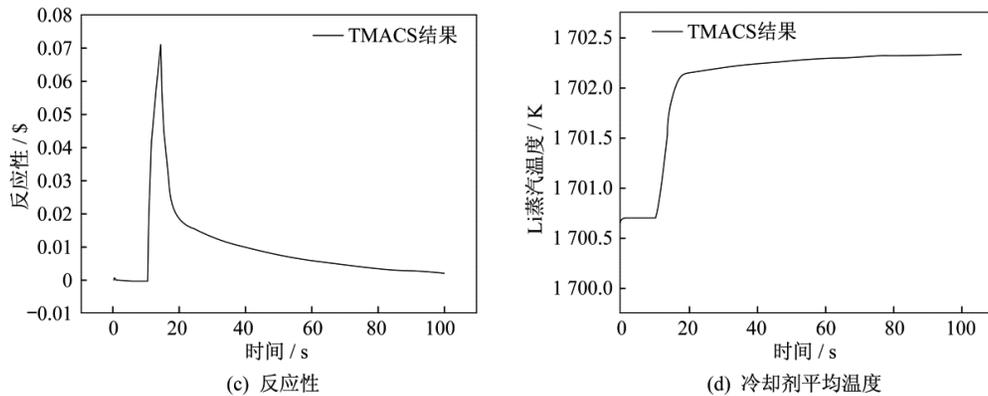


图 10 堆芯 HFP 状态 1 号控制鼓突转 30°考虑双重反馈的瞬态结果

Fig.10 No.1 control drum rotation 30° with double feedback transient results in core HFP state

馈的作用下,堆芯的功率水平逐渐降低,直至稳定在新的平衡状态。

堆芯瞬态前后的相对功率分布如图 11 所示。由图 11 可以看出,B₂C 涂层对热中子有明显的吸收作用。瞬态前,堆芯的通量分布和功率分布呈 1/6 旋转对称;瞬态后,1 号控制鼓处出现明显变化。

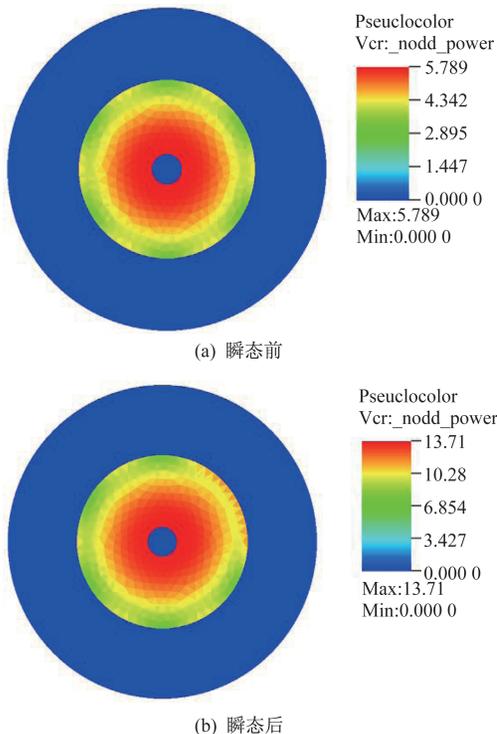


图 11 热管堆瞬态前后相对功率对比

Fig.11 Comparison of relative power before and after transient in heat pipe reactor

4 结语

针对空间堆特有的安全问题,计算了在水淹和沙

埋事故工况下的堆芯有效增殖系数,模拟了考虑热工反馈和膨胀反馈下的单根控制鼓转动的瞬态过程,验证了反应性控制系统失效下的安全性能。计算结果表明,本文所分析的热管型空间堆具有良好的事故安全性,可进行进一步的堆芯性能优化设计。

参考文献

- [1] 冉旭,单建强,朱继洲.空间核反应堆概述[J].国外核动力,2004,5(1):1-5.
- [2] 赵文玉.空间热辐射器[J].国外空间技术,1980(增刊 1):73-96.
- [3] HYUNC L, HONG S L, TAE Y H, et al. An accident-tolerant control drum system for a small space reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 79: 143-151.
- [4] 屈伸,曹良志,郑琪,等.热管堆高温数据库的制作及堆芯初步物理计算[J].现代应用物理,2017(4):82-89.
- [5] 马世俊,杜辉,周继时,等.核动力航天器发展历程(上)[J].中国航天,2014(4):31-35.
- [6] CHADWICK, HERMAN, OBLOZINSK, et al. ENDF/B-VII. 1, Nuclear data for science and technology: Cross sections, covariance, fission product yields and decay data [J]. Nuclear Data Sheets, 2011, 112(12):2887-2996.
- [7] 王立鹏,江新标,赵柱民,等.SiO₂热中子散射截面在空间堆事故分析中的应用[J].原子能科学技术,2014,48(4):680-684.
- [8] 王立鹏,江新标,赵柱民,等.热管式锂冷空间快堆中子学计算分析[J].核科学与工程,2014,34(4):448-453.
- [9] 李华琪,江新标,陈立新,等.HP-STMCs空间堆热管运行参数计算[J].现代应用物理,2014,5(2):154-160.
- [10] 胡彬和,李龙,吴晓春,等.钕铼合金对掉落临界安全的影响[J].原子能科学技术,2016(10):1813-1816.