

# 意外事故下控制鼓和安全鼓对空间核反应堆反应性影响研究

傅联涛, 李铸伦, 马续波\*, 陈相, 马旭东

华北电力大学核科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2023年12月5日; 录用日期: 2023年12月21日; 发布日期: 2024年1月31日

## 摘要

空间核反应堆电源是未来太空探索能源的必然选择, 近几年逐渐成为全球研究的热点。意外事故工况下的临界状况对空间核反应堆的性能和安全至关重要。本文针对TOPAZ-II热离子反应堆, 对意外事故工况下反应堆反应性无法满足安全要求的问题, 提出了优化方法。研究表明: 在反射层脱落事故下, 只旋转控制鼓可以使TOPAZ-II处于临界安全状态; 在水和湿沙浸入事故下,  $k_{eff}$ 增长非常快, 旋转控制鼓和安全鼓都无法有效降低反应性, 反应堆无法达到临界安全状态。针对该问题对控制鼓和安全鼓进行优化。优化的内容为同时改变鼓内含硼组件的厚度和 $^{10}B$ 的富集度, 计算每次改变下 $k_{eff}$ 的值, 得到 $k_{eff}$ 与含硼组件厚度和 $^{10}B$ 富集度之间的关系拟合曲线。根据得到的拟合曲线, 建立一套满足安全需求的优化方法。该优化方法可为未来空间反应堆设计提供参考价值。

## 关键词

有效中子增殖因子,  $^{10}B$ 富集度, 水和湿沙浸入, 控制鼓和安全鼓, 临界安全

# Research on the Effects of Control Drum and Safety Drum on the Reactivity of Space Nuclear Reactors in Accidents

Liantao Fu, Zhulun Li, Xubo Ma\*, Xiang Chen, Xudong Ma

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Dec. 5<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Jan. 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Space nuclear reactor power supply is an inevitable choice for future space exploration energy,  
\*通讯作者。

文章引用: 傅联涛, 李铸伦, 马续波, 陈相, 马旭东. 意外事故下控制鼓和安全鼓对空间核反应堆反应性影响研究[J]. 核科学与技术, 2024, 12(1): 70-83. DOI: 10.12677/nst.2024.121008

and has gradually become a global research hotpot in recent years. The critical conditions under accidental conditions are crucial for the performance and safety of space nuclear reactors. Aiming at the TOPAZ-II thermionic reactor, this study presents an optimization method for the problem that the reactor reactivity can not meet the safety requirements under accident conditions. The results show that only rotating control drum can make TOPAZ-II in a critical safety state under the accident of reflector falling off; in the event of water and wet sand immersion,  $k_{\text{eff}}$  grows very fast, neither the rotary control drum nor the safety drum can effectively reduce the reactivity, and the reactor cannot reach a critical safety state. To solve this problem, optimize the control drum and safety drum. The content of optimization is to change the thickness of boron components contained in the drum and the enrichment degree of  $^{10}\text{B}$  at the same time, calculate the  $k_{\text{eff}}$  value under each change, and obtain the fitting curve of the relationship between  $k_{\text{eff}}$  and the thickness of boron components and the enrichment degree of  $^{10}\text{B}$ . According to the fitting curve, establish a set of optimization methods to meet the safety requirements. This optimization method can provide reference value for future space reactor design.

## Keywords

Effective Neutron Multiplication Factor, Enrichment of  $^{10}\text{B}$ , Immersion of Water and Wet Sand, Control Drum and Safety Drum, Criticality Safety

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着核技术和航空技术的蓬勃发展, 各国陆续研制出各类空间反应堆以满足探索太空的过程中对供能的需求。早在上世纪 50 年代开始, 以美国和前苏联为首的国家相继开展对空间核反应堆的研制[1]。美国在 50 年代开始着手实施 SNAP 计划, 之后成功地将电功率为 0.5 kW 的 SNAP-10A 空间核反应堆发射上太空, 在此基础上又研制出更大功率的针对低地球轨道和地外表层任务的 SP-100 空间核反应堆[2]。同时期的苏联也在 60 年代开始陆续研制出 TOPAZ-I 和 TOPAZ-II 等型号的空间核反应堆, 其中 TOPAZ-II 型空间核反应堆进行的多次地面试验中[3], 最长运行时间可以达到 14000 小时, 电功率为 6 kW [4]。截止到目前, 美俄已将 36 个空间核反应堆电源送入太空。随着所发射的空间反应堆的数量和功率不断提升, 对于空间核反应堆在发射或回收过程中发生意外事故后的反应性研究变得越来越重要。

为应对空间核反应堆所带来的安全问题, 各国开始陆续对部分空间反应堆进行安全评估和优化。苏联就曾对 TOPAZ-II 开展多项地面试验, 以证明该反应堆系统可以满足实际能量和生命周期的需求[5]。在 1992 年 3 月至 8 月, 美国战略防御倡议组织(SDIO)对俄罗斯的 TOPAZ-II 热离子反应堆进行初步安全评估[6], 评估结果表明 TOPAZ-II 热离子反应堆系统亟待优化以符合 SDIO 的标准, 优化所针对的一个主要问题是水浸入堆芯会造成较为严重的临界安全问题。俄罗斯在 2010 年提出用于太空探索的核电概念 (NEP), 并且 TOPAZ 系列的空间核反应堆在应用 NEP 时具有一定的可行性[7]。目前, 国内多家单位对空间堆进行了较深入的研究。中国原子能院提出了 SPACE-R 空间堆, 并且对 SPACE-R 的堆芯布置进行实际设计[8], 同时对 Kilopower 的外围反射层做进一步优化[9], 提出了堆芯外围涂覆  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  涂层的方法使其能够满足意外掉落事故下的安全需求。

本文结合国内外对于空间核反应堆意外事故下的安全研究现状, 从空间核反应堆的反应性控制系统出发, 通过对控制鼓和安全鼓的中子吸收体富集度与中子吸收层厚度之间的线性拟合, 提出空间核反应

堆的多目标优化设计方案,以满足空间核反应堆在不同意外事故下的安全需求。选取俄罗斯研制的 TOPAZ-II 热离子反应堆为研究对象,分别模拟 TOPAZ-II 在水浸入、湿沙浸入以及反射层脱落下三种意外事故。计算出意外事故时 TOPAZ-II 反应性控制系统中控制鼓和安全鼓对反应性的影响。同时针对意外事故下 TOPAZ-II 的反应性高于临界安全规定值的问题,对两种鼓进行优化改进,最终得到一套满足安全需求的优化方案。

## 2. TOPAZ-II 堆芯结构

TOPAZ-II 热离子反应堆是库尔恰托夫研究所开发的用于未来空间探索的空间核反应堆。1992~1993 年期间,库尔恰托夫研究所对反应堆进行了一系列的实验,实验相关结果收录于国际核临界安全手册[10]。TOPAZ-II 共有 37 根热离子燃料元件(TFE),每根 TFE 使用富集度为 96%的二氧化铀作为燃料。在二氧化铀的上下两端各有一个氧化铍制作的反射层,径向上二氧化铀被一层铝箔包裹。TFE 内安装有一个发射极和一个接收极,发射极外围有一层金属钨制成的涂层。发射极和接收极之间存在间隙,在正常工况下间隙填充低密度的铝。TFE 的最外层有一圈不锈钢管,用以容纳整个热离子燃料元件同时也作为冷却剂。不锈钢管与发射极之间也存在铝填充的间隙。TOPAZ-II 使用氢化锆作为慢化剂,慢化剂与 TFE 之间也存在间隙,正常工况下也填充低密度的铝。TFE 的径向结构如图 1 所示。此外整个 TFE 的上下两端各有一块管板。TFE 在堆芯内分成三圈排布,从最内圈至最外圈分别有 7 根、12 根和 18 根。堆芯内除 TFE 外,其余部分填充慢化剂。TOPAZ-II 热离子反应堆堆芯排布如图 2 所示。

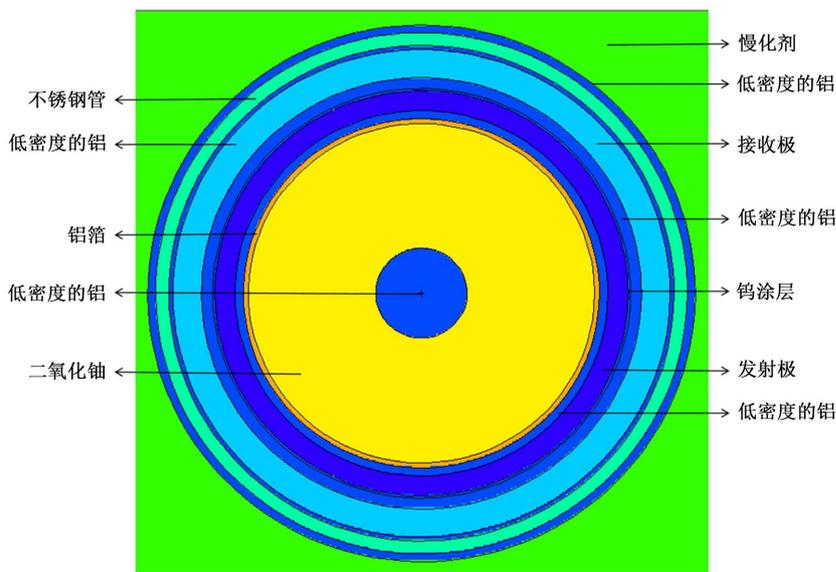


Figure 1. Radial structure diagram of TFE  
图 1. TFE 的径向结构示意图

堆芯中控制鼓和安全鼓各有 6 个,间隔排布且均匀地分布在堆芯外侧。两种鼓的材质和尺寸一致,内径为 6.7 cm,外径为 6.72 cm,内部有一个中心角为  $116^\circ$ ,厚度为 0.5 cm 的特殊凹槽,用以固定作为中子吸收层的含硼合金(BKS-7)。鼓内除 BKS-7 外其余部分为金属铍。鼓的最外侧结构为不锈钢环,鼓的示意图如图 3 所示。正常工况下,控制鼓和安全鼓处于初始状态且朝堆芯外侧,通过转动控制鼓实现对反应堆的反应性控制。发生意外事故时,必须使控制鼓和安全鼓协同转动保证堆芯安全。为方便统计,控制鼓用 CD 表示,安全鼓用 SD 表示,两种鼓的初始状态和分布如图 4 所示。

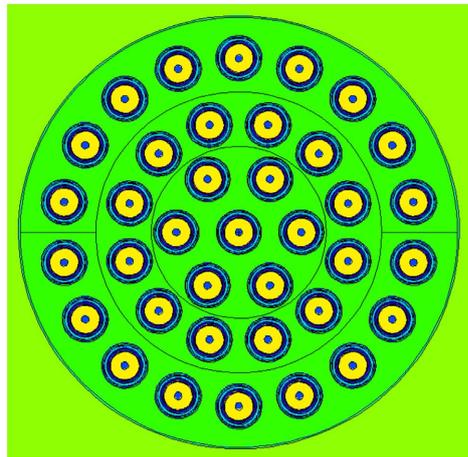


Figure 2. Schematic diagram of TFE in the reactor  
图 2. TFE 在堆内的排布示意图

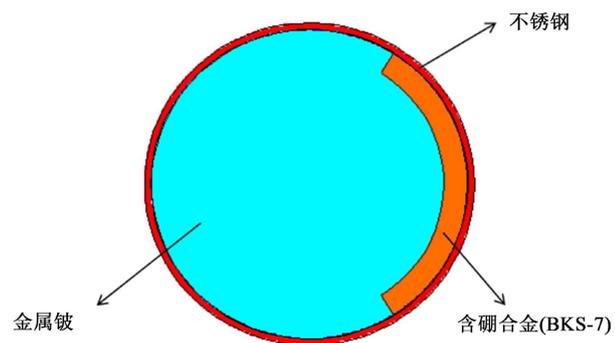


Figure 3. Diagram of control drum and safety drum  
图 3. 控制鼓和安全鼓示意图

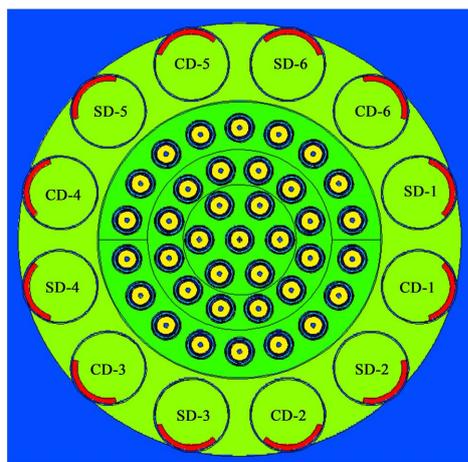


Figure 4. Distribution of control drums and safety drums  
图 4. 控制鼓和安全鼓的分布图

除了上述关键部件外，TOPAZ-II 热离子反应堆还包括包裹堆芯和鼓的径向反射层、水箱、一根中子源管等主要配件，具体参数[10]如表 1 所示。

**Table 1.** Basic parameters of TOPAZ-II  
**表 1.** TOPAZ-II 的基本参数

参数 Parameters	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value
堆芯直径 Reactor core diameter/cm	20.4	水箱高度 Water tank height/cm	48.5
堆芯高度 Reactor core height/cm	62.6	堆芯寿期 Lifetime of reactor core/a	1.5
热离子燃料元件直径 Thermionic fuel element diameter/cm	1.3435	电功率 Electric power/kW	6
热离子燃料元件高度 Thermionic fuel element height/cm	62.32	中子源管材料 Neutron source tube material	Fe、Ni、Cr、 Mn、Ti
慢化剂直径 Moderator diameter/cm	13	水箱材料 Water tank material	Fe、Ni、Cr、 Mn、Ti
慢化剂高度 Moderator height/cm	37.5	发射极材料 Emitter material	Mo、Nb
中子源管直径 Neutron source tube diameter/cm	1.75	接收极材料 Collectormaterial	Mo
中子源管高度 Neutron source tube height/cm	26.5	含硼组件材料 Boron-containing component material	B、C、Si
径向反射层直径 Radial reflector diameter/cm	20.5	顶部和底部管板材料 Top and bottom tube sheet material	铝合金 Aluminium alloy
水箱直径 Water tank diameter/cm	34.85		

### 3. MCNP 模型和计算验收准则

选用基准实验中使用的 Type 1 燃料，作为此次模拟计算的燃料，参数如表 2 所示。按照基准实验的计算要求，高于顶部管板的空隙填充密度为  $4.5048 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$  的铝，低于该高度的空隙，无论是水还是湿沙浸入的模拟计算，都填充密度为  $0.9982 \text{ g/cm}^3$  的水[10]。正常工况下进行的模拟计算，所有空隙部分全部填充低密度的铝。计算需设置 10,000 个粒子，1000 活跃代，100 非活跃代，使用评价核数据库 ENDF/B-VIII.0 [11]。根据给出的反应堆基本参数，通过 MCNP 程序建立实验所需的几何模型。

**Table 2.** Parameters of Type 1  
**表 2.** Type 1 燃料的参数

部件 Assembly unit	内径 Inner diameter/cm	外径 Outer diameter/cm	高度 Height/cm	材料 Material
顶端反射层 Top reflector	0.16	0.85	8.0	氧化铍 Beryllia
裂变材料 Fissile materials	0.225	0.85	32.5	二氧化铀 Uranium dioxide

续表

底端反射层 Bottom reflector	0.16	0.85	8.0	氧化铍 Beryllia
箔层 Foil layer	0.850	0.874	37.5	铝 Aluminum

### 3.1. MCNP 模型以及计算步骤

水和湿沙浸入下的设计基准事故模型的主要描述如下：1) 事故下堆芯内进水并填满所有的空隙；2) 反应堆组件温度为 300 K；3) 控制鼓和安全鼓的初始旋转角度为  $0^\circ$ ，该角度下所有鼓朝外；4) 反应堆的径向反射层外不锈钢壁内的空间填满湿沙；5) 剩余其他组件与正常工况下的组件设置相同；6) 增设因湿沙浸入导致反射层脱落事故下的组件模型，即径向反射层替换成湿沙，控制鼓和安全鼓内的铍层也被湿沙代替，其它设置不变。

湿沙浸入和反射层脱落的两种模型中湿沙的密度相同，都由水、二氧化硅、低密度的硼和少量的铁、铝、钛构成，各元素的原子密度如表 3 所示。将模型建好后，分别计算正常工况和意外事故下的  $k_{\text{eff}}$ 。分析意外事故时控制鼓和安全鼓协同作用后  $k_{\text{eff}}$  的变化。

Table 3. Atomic density of each component element in wet sand

表 3. 湿沙中各组成元素的原子核密度

元素 Element	原子核密度 Nuclear density/(atoms/barn-cm)
Si	$1.6134 \times 10^{-2}$
O	$4.4980 \times 10^{-2}$
H	$2.5307 \times 10^{-2}$
B	$1.79862 \times 10^{-7}$
Al	$3.8143 \times 10^{-5}$
Fe	$6.9639 \times 10^{-6}$
Ti	$1.0153 \times 10^{-5}$

### 3.2. 验收准则

根据联合国在 1967 年签署的《外层空间条约》[12]和 1993 年 2 月 23 日发布的《关于在外层空间使用核动力源的原则》规定[13]，所有用于空间核反应堆的燃料只能使用高浓缩铀作为燃料[14]，同时出于对高功率、长寿期、尽可能小的质量和尺寸以及燃料补偿的考虑，反应堆燃料选择  $^{235}\text{U}$  浓缩度为 90%以上的高浓铀[15]。为保证安全，反应堆在设计建造时需要确保在进入工作轨道前，一切可能发生的事件都无法使反应堆进入临界状态，其中包括反应堆沉入水里或水进入堆芯[16]。中国对于空间热离子反应堆临界安全分析时，一般规定  $k_{\text{eff}}$  的值小于 0.98 作为意外掉落事故的临界安全验收准则[17]。因此将意外事故下，控制鼓和安全鼓协同作用使  $k_{\text{eff}}$  小于 0.98 作为此次模拟计算的验收准则。

## 4. 意外事故下反应性的变化以及对反应堆的优化

### 4.1. 计算值的准确性

为保证计算模型的准确性，将 ENDF/B-VIII.0 的计算值与基准实验内使用 ENDF/B-V.0 的计算值进

行比较, 比较结果如图 5 所示。其中编号为 HCM004 的基准实验是湿沙浸入(湿沙中的水未浸入堆芯)的相关实验, 编号为 HCM003 的基准实验是水浸入的相关实验。根据比较结果可知, 使用 ENDF/B-VIII.0 计算的  $k_{\text{eff}}$  与基准值的偏差大部分要比 ENDF/B-V.0 的偏差要小, 并且两个库之间的偏差都在 500 pcm 以下。因此可以保证此次计算的准确性和可靠性。

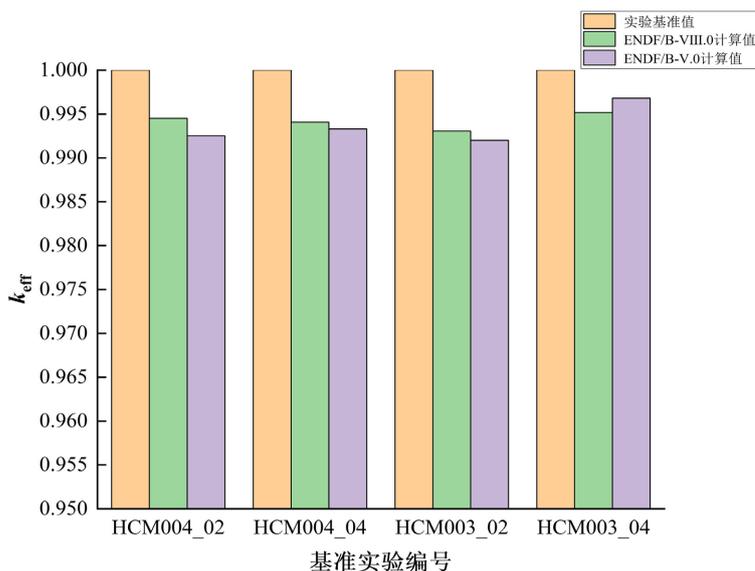


Figure 5. Results of calculation comparison between the two libraries  
图 5. 两库计算结果的比较

#### 4.2. 意外事故下反应性的变化

模拟计算得到正常工况下  $k_{\text{eff}}$  为 0.99531。根据《关于在外层空间使用核动力源的原则》中规定, 空间反应堆在发射到预定轨道前, 都不能处于临界状态。因此反应堆在进入轨道后要达到临界, 必须在反应堆中加入额外的中子源。前文在描述反应堆结构时, 提到 TOPAZ-II 热离子反应堆内有一根中子源管, 在进行模拟计算时, 中子源管被设置成内部为空腔且填充低密度铝的不锈钢管, 该设置是按照基准实验的设置要求进行的, 故得出正常工况下  $k_{\text{eff}}$  小于 1。

在发生意外事故后, 水浸入堆芯同时填满堆芯内部各燃料元件之间的空隙, 导致中子的慢化效果增强, 进而引入正反应性。此时 TOPAZ-II 的控制鼓和安全鼓需要协同作用降低反应性。根据模拟计算结果, TOPAZ-II 在发生水和湿沙浸入的意外事故以及反射层脱落事故下,  $k_{\text{eff}}$  分别为 1.04128、1.04440 和 0.98037, 此时控制鼓和安全鼓处于初始状态。按照 TOPAZ-II 的最初设计, 控制鼓和安全鼓间隔排布, 发生意外事故后控制鼓首先响应, 开始旋转。当所有控制鼓旋转完毕后, 安全鼓发挥协同作用, 开始逐个旋转, 直到反应堆的反应性降到临界安全范围内。所有鼓旋转的最大角度均为  $180^\circ$ , 完全旋转后鼓朝内。根据每次旋转鼓后 MCNP 计算的  $k_{\text{eff}}$ , 如表 4~6 所示, 作出  $k_{\text{eff}}$  随控制鼓和安全鼓转动的数值变化图, 如图 6 所示。从图 6 可知,  $k_{\text{eff}}$  随鼓的转动不断减小。在水浸入的意外事故中, 鼓的总价值为 4337 pcm。湿沙浸入时, 鼓的总价值为 4423 pcm。反射层脱落事故下, 鼓的总价值为 2099 pcm。根据三种意外事故计算的  $k_{\text{eff}}$  结果可知, 湿沙浸入反应堆后的  $k_{\text{eff}}$  最大, 反射层脱落事故中的  $k_{\text{eff}}$  最小。因为沙子对中子的反射能力要强于水, 导致湿沙浸入反应堆后中子泄漏要低于水浸入后的中子泄漏。反射层脱落事故中, 考虑最极端的状况, 即沙子的浸入导致堆芯外的铍反射层以及控制鼓内的铍层脱落, 而铍反射层对中子的反射能力要强于沙子和水[18], 所以中子的泄漏增加, 模拟计算出的  $k_{\text{eff}}$  反而最小。

**Table 4.** The value of  $k_{\text{eff}}$  after water immersion rotates the control drum and the safety drum  
**表 4.** 水浸入后旋转控制鼓和安全鼓后的  $k_{\text{eff}}$

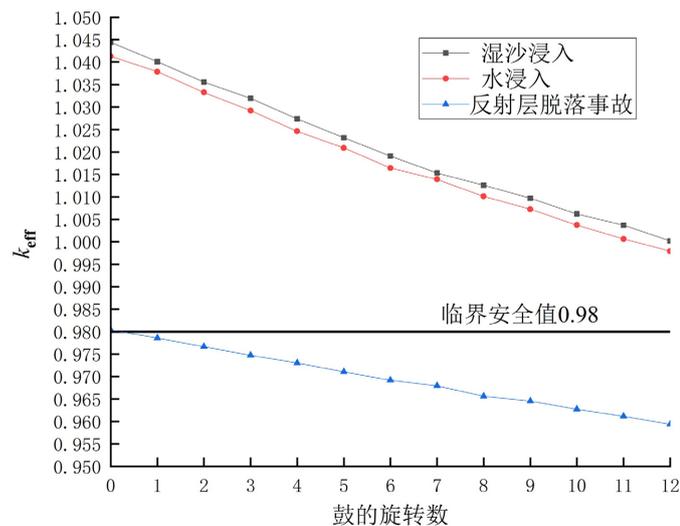
旋转数 Rotation number	鼓的编号 Drum number	$k_{\text{eff}}$	反应性的变化 Changes in reactivity/pcm
0	/	$1.04128 \pm 0.00027$	/
1	CD-1	$1.03786 \pm 0.00027$	342
2	CD-1~2	$1.03325 \pm 0.00026$	803
3	CD-1~3	$1.02921 \pm 0.00026$	1207
4	CD-1~4	$1.02458 \pm 0.00026$	1670
5	CD-1~5	$1.02089 \pm 0.00026$	2039
6	CD-1~6	$1.01642 \pm 0.00027$	2486
7	CD-1~6、SD-1	$1.01388 \pm 0.00026$	2740
8	CD-1~6、SD-1~2	$1.01010 \pm 0.00027$	3118
9	CD-1~6、SD-1~3	$1.00723 \pm 0.00027$	3405
10	CD-1~6、SD-1~4	$1.00372 \pm 0.00026$	3756
11	CD-1~6、SD-1~5	$1.00062 \pm 0.00026$	4066
12	CD-1~6、SD-1~6	$0.99791 \pm 0.00028$	4337

**Table 5.** The value of  $k_{\text{eff}}$  after wet sand immersion rotates the control drum and the safety drum  
**表 5.** 湿沙浸入后旋转控制鼓和安全鼓后的  $k_{\text{eff}}$

旋转数 Rotation number	鼓的编号 Drum number	$k_{\text{eff}}$	反应性的变化 Changes in reactivity/pcm
0	/	$1.04440 \pm 0.00026$	/
1	CD-1	$1.04011 \pm 0.00026$	429
2	CD-1~2	$1.03553 \pm 0.00026$	887
3	CD-1~3	$1.03196 \pm 0.00026$	1244
4	CD-1~4	$1.02737 \pm 0.00026$	1703
5	CD-1~5	$1.02314 \pm 0.00025$	2126
6	CD-1~6	$1.01908 \pm 0.00026$	2532
7	CD-1~6、SD-1	$1.01531 \pm 0.00027$	2909
8	CD-1~6、SD-1~2	$1.01259 \pm 0.00027$	3181
9	CD-1~6、SD-1~3	$1.00969 \pm 0.00027$	3471
10	CD-1~6、SD-1~4	$1.00620 \pm 0.00027$	3820
11	CD-1~6、SD-1~5	$1.00367 \pm 0.00025$	4073
12	CD-1~6、SD-1~6	$1.00017 \pm 0.00026$	4423

**Table 6.** The  $k_{\text{eff}}$  value of after rotating the control drum and the safety drum when the reflector falls off accident  
**表 6.** 反射层脱落事故时旋转控制鼓和安全鼓后的  $k_{\text{eff}}$

旋转数 Rotation number	鼓的编号 Drum number	$k_{\text{eff}}$	反应性的变化 Changes in reactivity/pcm
0	/	$0.98037 \pm 0.00026$	/
1	CD-1	$0.97859 \pm 0.00027$	178
2	CD-1~2	$0.97663 \pm 0.00026$	374
3	CD-1~3	$0.97472 \pm 0.00026$	565
4	CD-1~4	$0.97300 \pm 0.00026$	737
5	CD-1~5	$0.97105 \pm 0.00026$	932
6	CD-1~6	$0.96915 \pm 0.00027$	1122
7	CD-1~6、SD-1	$0.96790 \pm 0.00026$	1247
8	CD-1~6、SD-1~2	$0.96563 \pm 0.00027$	1474
9	CD-1~6、SD-1~3	$0.96452 \pm 0.00026$	1585
10	CD-1~6、SD-1~4	$0.96270 \pm 0.00027$	1767
11	CD-1~6、SD-1~5	$0.96114 \pm 0.00026$	1923
12	CD-1~6、SD-1~6	$0.95938 \pm 0.00026$	2099



**Figure 6.**  $k_{\text{eff}}$  change with control drum and safety drum rotation  
**图 6.**  $k_{\text{eff}}$  随控制鼓和安全鼓转动的变化

### 4.3. 控制鼓和安全鼓的优化

根据对鼓完全旋转后的模拟计算可知，在反射层脱落事故时，控制鼓和安全鼓的协同旋转可以满足临界安全验收准则。水和湿沙浸入堆芯事故下，控制鼓和安全鼓无法将  $k_{\text{eff}}$  降至临界安全值以下，故需要对鼓的设计进行优化，优化的方式主要有两种：1) 在不影响其它结构组件的前提下，增加鼓内的含硼组件 BKS-7 厚度；2) 提高 BKS-7 内  $^{10}\text{B}$  的富集度。

在原设计中, 控制鼓和安全鼓内含硼组件为 BKS-7 合金, 厚度为 0.5 cm, 各组成核素的原子密度如下表 7 所示。BKS-7 主要通过  $^{10}\text{B}$  吸收中子降低反应堆的反应性, 因此对于 BKS-7 中的其他核素不作分析[19]。根据表 7 的数据, 计算出  $^{10}\text{B}$  与( $^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$ )的核子数之比为 0.198, 记为  $c_{10}$ , 根据富集度计算公式:

$$\varepsilon = 10 \times c_{10} / [10 \times c_{10} + 11 \times (1 - c_{10})] \quad (1)$$

计算出  $^{10}\text{B}$  富集度  $\varepsilon = 18.42\%$ 。保持 BKS-7 厚度为 0.5 cm 不变, 逐步倍增  $^{10}\text{B}$  富集度至 36.84%、55.26%、73.68%、92.10%, 分别计算水浸入和湿浸入的情况下  $k_{\text{eff}}$  的值, 结果如表 8 所示。

**Table 7.** Atomic density of each nuclide in BKS-7

**表 7.** BKS-7 中各核素的原子密度

核素 Nuclide	原子密度 Atomic density/atoms/barn-cm
$^{10}\text{B}$	$1.3465 \times 10^{-2}$
$^{11}\text{B}$	$5.4542 \times 10^{-2}$
$^{12}\text{C}$	$2.2261 \times 10^{-2}$
$^{28}\text{Si}$	$3.6583 \times 10^{-3}$
$^{29}\text{Si}$	$1.8584 \times 10^{-4}$
$^{30}\text{Si}$	$1.2265 \times 10^{-4}$

**Table 8.** The  $k_{\text{eff}}$  value of BKS-7 with a thickness of 0.5 cm and increasing enrichment

**表 8.** BKS-7 厚度为 0.5 cm 富集度不断提高时的  $k_{\text{eff}}$

富集度 Enrichment	水浸入 water immersion/ $k_{\text{eff}}$	湿沙浸入 wet sand immersion/ $k_{\text{eff}}$
36.84%	$0.99214 \pm 0.00026$	$0.99377 \pm 0.00026$
55.26%	$0.98858 \pm 0.00027$	$0.99023 \pm 0.00026$
73.68%	$0.98603 \pm 0.00026$	$0.98746 \pm 0.00027$
92.10%	$0.98392 \pm 0.00026$	$0.98509 \pm 0.00027$

由表 8 可知, BKS-7 的厚度为 0.5 cm 时, 将  $^{10}\text{B}$  富集度提高到 92.10% 也无法满足安全需求。因此为找出足够多满足安全需求的方案, 将最低富集度设置为 18.42%, BKS-7 的最低厚度设置为 0.785 cm。最低厚度设置为 0.785 cm 是因为组件能设置的最大厚度为 3.35 cm, 最小厚度是 0.5 cm, 在 0.5~3.35 的范围内取 10 个区间, 最小的厚度即为 0.785 cm。在所有鼓朝内时, 逐步提高  $^{10}\text{B}$  的富集度和 BKS-7 的厚度, 记录下每次提高后  $k_{\text{eff}}$  的值。不同富集度和厚度下  $k_{\text{eff}}$  的变化如下图 7 和图 8 所示。

根据图 7 和图 8 中  $k_{\text{eff}}$  变化结果可知, 两种意外事故下  $^{10}\text{B}$  富集度对  $k_{\text{eff}}$  的影响要大于 BKS-7 厚度的影响。两种意外事故各自对应一个最低  $^{10}\text{B}$  富集度, 低于该富集度, 即使将 BKS-7 的厚度增加至最大, 也无法将  $k_{\text{eff}}$  降至 0.98 以下。水浸入对应的最低富集度在 36.84%~46.05% 之间, 湿沙浸入对应的最低富集度在 46.05%~55.26% 之间。为同时满足两种情况下的安全要求, 舍弃 46.05% 富集度以上的  $k_{\text{eff}}$  计算值, 同时为保证计算的准确性, 在 46.05%~82.89% 之间再分别插入 4 组新的计算数据, 结果如图 9 和图 10 所示。

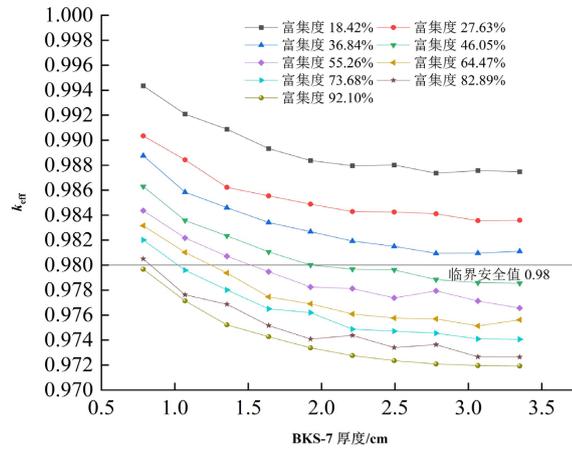


Figure 7. The value of  $k_{\text{eff}}$  under different enrichment and thickness of water immersion accident

图 7. 水浸入事故不同富集度和厚度下的  $k_{\text{eff}}$

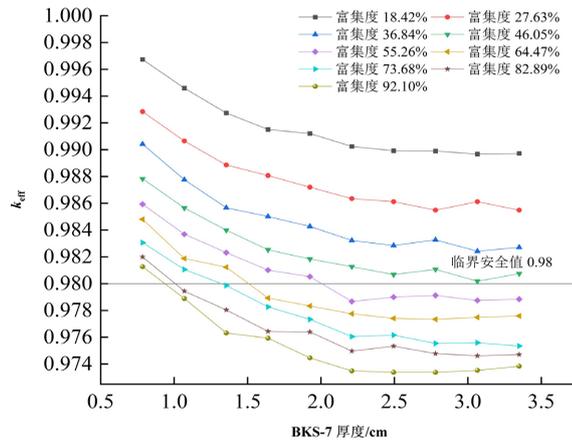


Figure 8. The value of  $k_{\text{eff}}$  under different enrichment and thickness of wet sand immersion accident

图 8. 湿沙浸入事故不同富集度和厚度下的  $k_{\text{eff}}$

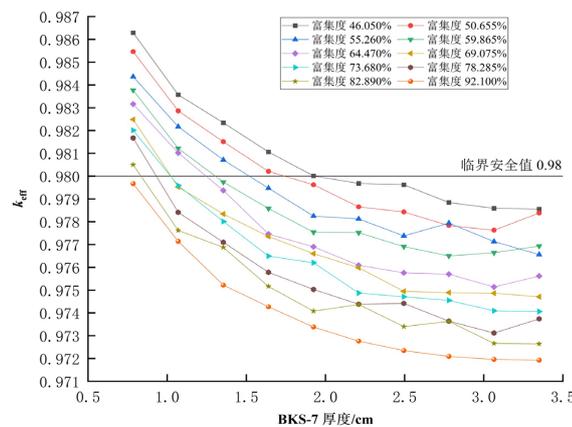
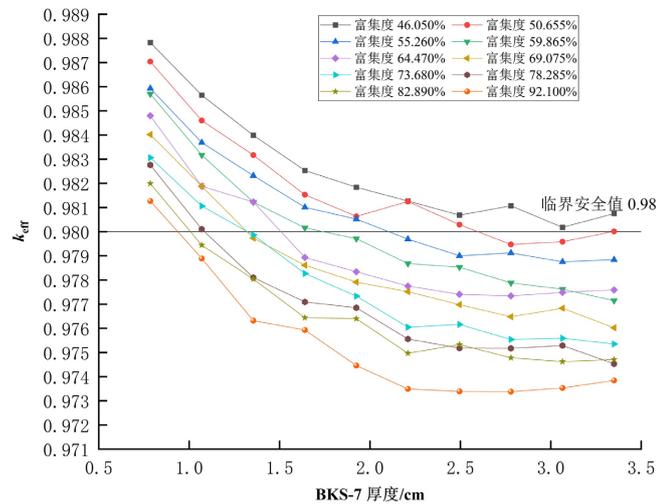


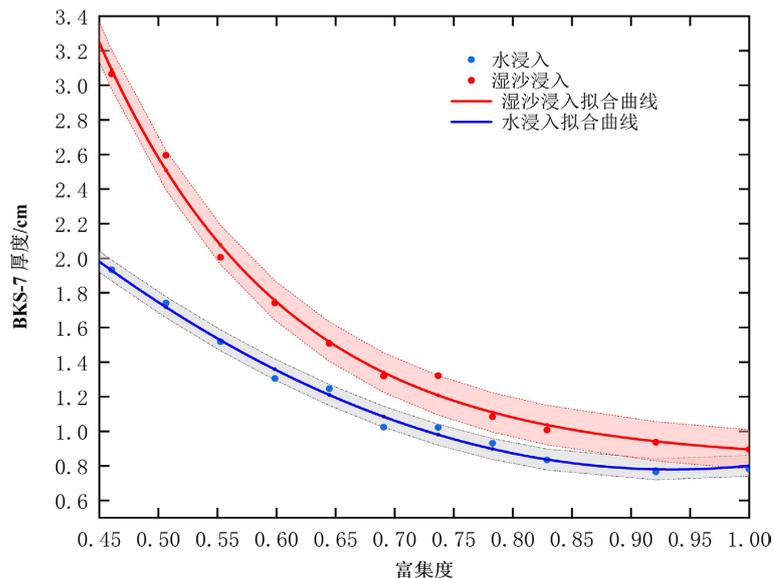
Figure 9. The change of  $k_{\text{eff}}$  after interpolation-water immersion

图 9. 插值后的  $k_{\text{eff}}$ -水浸入



**Figure 10.** The change of  $k_{\text{eff}}$  after interpolation-wet sand immersion  
**图 10.** 插值后的  $k_{\text{eff}}$ -湿沙浸入

根据图 9 和图 10 中  $k_{\text{eff}}$  计算值, 将每一种富集度下对应的  $k_{\text{eff}}$  随厚度的变化值进行拟合, 将 0.98 代入每一条拟合曲线, 找出  $k_{\text{eff}}$  为 0.98 时 BKS-7 的厚度。再根据该厚度值, 拟合出富集度和厚度在  $k_{\text{eff}}$  为 0.98 时的关系曲线, 同时将实际计算值与拟合值之间的最大差值作为误差边界并作出误差带, 如图 11 所示。根据图 11 的拟合结果, 高于湿沙浸入拟合曲线对应的误差带以上区域的 BKS-7 厚度和  $^{10}\text{B}$  富集度, 可以同时满足水和湿沙浸入下的临界安全需求。基于图 11 中的拟合结果并结合富集度和厚度的规定范围, 可以界定所有满足需求的优化方案。另外, 根据  $k_{\text{eff}}$  的变化曲线和拟合曲线可知, 在富集度不变的情况下, 厚度对  $k_{\text{eff}}$  的影响越来越不显著。因此在选择实施方案时, 应尽量选择富集度适中, 厚度偏小的方案。具体厚度和富集度大小的选取, 可以根据实际需求进行选择, 只要使控制鼓和安全鼓按照上述界定范围内的 BKS-7 厚度和  $^{10}\text{B}$  富集度进行设计, 即可满足实际的安全要求。



**Figure 11.**  $^{10}\text{B}$  enrichment vs BKS-7 thickness fit curve  
**图 11.**  $^{10}\text{B}$  富集度与 BKS-7 厚度拟合曲线

## 5. 结论

本文基于俄罗斯库尔恰托夫研究所进行临界计算的 TOPAZ-II 热离子反应堆, 模拟计算了该反应堆的控制鼓和安全鼓在意外水浸入、湿沙浸入以及因湿沙浸入导致的反射层脱落事故下两种鼓对反应性的影响大小, 得到两种鼓在水浸入后对反应性的总价值为 4337 pcm, 湿沙浸入后的总价值为 4423 pcm, 发生反射层脱落事故时的总价值为 2099 pcm。由于两种鼓无法满足意外水和湿沙浸入事故下的临界安全要求, 故针对鼓的 BKS-7 厚度以及  $^{10}\text{B}$  富集度进行优化, 得到厚度和富集度在  $k_{\text{eff}}$  为 0.98 时的拟合曲线。按照富集度和厚度规定的实际范围以及位于拟合曲线的误差带以上的富集度和厚度大小, 即可得到满足安全需求的 BKS-7 厚度和  $^{10}\text{B}$  富集度。根据上述范围内的富集度和厚度进行优化的模型, 可通过控制鼓与安全鼓的协同作用使反应堆维持在临界安全范围内。因此, 本文的计算和优化工作可为其他具有类似结构的空热离子反应堆的设计提供一定的参考。

## 基金项目

国家自然科学基金(11875128)。

## 参考文献

- [1] 张一帆, 屈伸, 曹良志, 郑友琦. 空间核反应堆安全分析[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 121-125. <https://doi.org/10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.06.017>
- [2] 朱安文, 刘磊, 马世俊, 李明. 空间核动力在深空探测中的应用及发展综述[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 397-404. <https://doi.org/10.15982/j.issn.2095-7777.2017.05.001>
- [3] Voss, S.S. (2022) Nuclear Security Considerations for Space Nuclear Power: A Review of Past Programs with Recommendations for Future Criteria. *Nuclear Technology*, **206**, 1097-1108. <https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1706378>
- [4] 闫锋哲, 陈章隆. 空间核反应堆电源发展及应用[J]. 科技创新导报, 2019, 16(12): 21-22+24. <https://doi.org/10.16660/j.cnki.1674-098X.2019.12.021>
- [5] 胡文军, 陈红永, 陈军红, 等. 空间核动力源的安全性研究进展[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 453-465. <https://doi.org/10.15982/j.issn.2095-7777.2017.05.006>
- [6] Marshall, C.A., Standley, V., Voss, S.S., et al. (2008) Topaz II Preliminary Safety Assessment. *AIP Conference Proceedings*, **271**, 439 p.
- [7] Zakirov, V. and Pavshook, V. (2011) Feasibility of the Recent Russian Nuclear Electric Propulsion Concept: 2010. *Nuclear Engineering and Design*, **241**, 1529-1537. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.02.010>
- [8] 刘黎丽, 孙征, 付子明. SPACE-R 意外掉落事故的临界安全分析[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(9): 1624-1628.
- [9] 安伟健, 郭键, 葛攀和, 高剑. Kilopower 空间堆掉落事故临界安全问题研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(3): 447-453.
- [10] Glushkov, Y.S., Ponomarev-Stepnoi, N.N., Maiorov, L.V. and Atkinson, C.A. (1995) Intermediate Heterogeneous Assembly with Highly Enriched Uranium Dioxide (96%  $^{235}\text{U}$ ) and Zirconium Hydride Moderator, NEA/NSC/DOC(95)03/II. Kurchatov Institute, Moscow.
- [11] Brown, D., Chadwick, M., Capote, R., et al. (2018) ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data. *Nuclear Data Sheets*, **148**, 1-142.
- [12] (1966) Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, Including the Moon and Other Celestial Bodies. United Nations, New York.
- [13] (1992) Principles Relevant to the Use of Nuclear Sources in Outer Space. United Nations, Vienna.
- [14] 陈荫. 空间核反应堆技术[J]. 国外科技动态, 1996(2): 3-5.
- [15] 彭磊, 谢奇林, 范晓强, 梁文峰, 任保国. 星球表面探测用核反应堆电源初步研究[J]. 载人航天, 2015, 21(3): 237-242. <https://doi.org/10.16329/j.cnki.zrht.2015.03.006>
- [16] 郝鹏飞. 基于 OpenMC 的空间核反应堆临界及安全分析[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 东华理工大学, 2022. <https://doi.org/10.27145/d.cnki.ghdcc.2022.000507>

- 
- [17] 孙征, 赵守智, 解家春, 刘兴民. EJ/T 20034-2012. 空间热离子反应堆核动力装置核设计准则[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2013.
- [18] 姚成志, 赵守智, 胡古, 解家春. 星球表面用核反应堆临界安全分析[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(12): 2176-2180.
- [19] Ma, Q., Sun, P.W., Wei, X.Y. and Jia, Y.W. (2022) Dynamic Model Construction of a Space Thermionic Nuclear Reactor. *Applied Thermal Engineering*, **212**, Article ID: 118644. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118644>