



·蒙特卡罗方法及其应用·

气冷微型堆可燃毒物研究*

张成龙, 袁媛, 堵树宏, 刘国明, 贺楷, 杨海峰, 霍小东

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 为分析气冷微型堆可燃毒物布置策略, 分别建立长寿期(15 MW-20 a)、短寿期(5 MW-1 a)、较长寿期(5 MW-3~10 a)不换料堆芯模型, 利用通用蒙特卡罗程序, 研究气冷堆中常用可燃毒物核素种类、可燃毒物布置方案对堆芯反应性、寿期等特性的影响。研究结果表明: 长寿期堆芯中, 整体型 Er_2O_3 可以有效控制堆芯剩余反应性, 但在寿期末会造成一定的反应性惩罚; 整体型 B_4C 可以较好地控制堆芯剩余反应性, 并在寿期末几乎不会造成反应性惩罚, 通过分区布置还可以优化功率分布; 分离型 B_4C 可以使燃耗特性曲线在寿期初和寿期中变化很平坦。短寿期堆芯中, 分离型 Gd_2O_3 毒物棒可以很好地控制剩余反应性且不会缩短堆芯寿期; 常见的 B_4C 布置方式并不合适, 但 B_4C 弥散在堆芯石墨内可以起到较好的毒物效果。较长寿期堆芯中, 分离型 Gd_2O_3 毒物棒不仅可以有效控制剩余反应性, 还可以保证堆芯具备仅依靠温度负反馈实现自动停堆的固有安全性。研究结果将为后续气冷微堆型号研发提供指导。

关键词: 气冷微型堆; 可燃毒物; 燃耗特性; 堆芯寿期; 反应性控制

中图分类号: TL424

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210264

Research on burnable poison in micro gas-cooled reactor

Zhang Chenglong, Yuan Yuan, Du Shuhong, Liu Guoming, He Kai, Yang Haifeng, Huo Xiaodong

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing 100840, China)

Abstract: To analyze the characteristics of burnable poisons used in the micro gas-cooled reactor, this paper investigates how the kinds and layout of burnable poisons influence the reactor characteristics, such as reactivity and lifetime, based on the long-lifetime core (15 MW-20 a) model, short-lifetime core (5 MW-1 a) model and longer-lifetime core (5 MW-3-10 a) model, using Monte Carlo procedure. The results show that, as for the long-lifetime core, the monolithic type Er_2O_3 can reduce the core excess reactivity effectively with a certain reactivity punishment at the end of lifetime, and the monolithic B_4C can reduce the core excess reactivity excellently with a better power distribution if an inhomogeneous distribution layout of B_4C is applied, and the separated type B_4C makes the characteristic curve of burn-up flatter. As for the short-lifetime core, the separated type Gd_2O_3 is an appropriate choice while the B_4C with usual layouts is not, but it has a good behavior if the B_4C disperses in the core graphite as the burnable poison. As for the longer-lifetime core, the separated type Gd_2O_3 not only can control the core excess reactivity effectively, but also can guarantee the core have the inherent safety of automatic shutdown only by the negative temperature feedback. These results will instruct the follow-up development of micro gas-cooled reactor devices.

Key words: micro gas-cooled reactor; burnable poison; burn-up characteristics; core lifetime; reactivity control

气冷微型堆^[1-2]是小型模块化棱柱式高温气冷堆,也是第四代核能系统先进堆型之一^[3]。耐高温且热容大的石墨堆芯、几乎完全包容裂变产物的陶瓷颗粒弥散燃料、较小的功率及功率密度使得该堆型具有优越的固有安全性^[4-5]。在事故条件下,即使所有控制棒不可用,没有任何应急措施,较强的温度负反馈可以使堆芯自动停堆,保证堆芯和燃料的结构完整性。但堆芯剩余反应性首先需要可燃毒物来控制,而高温气冷堆上传统的 B_4C 可燃毒物^[6-9]

* 收稿日期:2021-07-09; 修订日期:2021-12-21

基金项目:中核集团集中研发项目

联系方式:张成龙, yulongmymail@163.com。

通信作者:刘国明, liugma@cnpe.cc。

并不完全适用。

本文利用通用的蒙卡程序 RMC^[10], 基于热功率 15 MW-20 a 长寿期不换料堆芯、热功率 5 MW-1 a 短寿期不换料堆芯、热功率 5 MW-3~10 a 较长寿期不换料堆芯模型, 研究了常用可燃毒物的核素种类、布置方式对反应性、寿期等堆芯特性的影响, 初步确定了气冷微型堆的可燃毒物布置策略。

1 可燃毒物特性分析

气冷微型堆可燃毒物的主要作用是有效控制剩余反应性。可燃毒物的选择^[11]除了要求其消耗所释放的反应性与燃料燃耗所减少的反应性基本相等、寿期末不会产生过大的反应性惩罚, 还应满足: (1) 耐高温; (2) 不会对燃料、结构材料等造成物理化学反应、腐蚀等。合适的可燃毒物布置策略, 可以有效控制整个寿期内的剩余反应性, 保证堆芯具备仅依靠温度负反馈实现自动热停堆的固有安全性, 并保证功率分布、堆芯寿期等特性满足设计要求^[12~15]。

可燃毒物的布置分为整体型和分离型两种^[16]: (1) 整体型可燃毒物与燃料直接接触; 优点是, 布置不受空间限制, 毒物含量可以根据燃料位置分区布置, 进而优化堆芯特性; 缺点是, 提高了燃料芯块制造要求, 也可能对燃料的导热性能、辐照性能等造成不好的影响。(2) 分离型可燃毒物即自屏毒物, 毒物与燃料分离; 其布置形式多样, 如棒状、颗粒状、板状; 优点是, 毒物单独布置而不影响燃料性能, 通过合理设计来调整自屏效应可以实现反应性的平稳释放; 缺点是, 可能由于消耗过慢而在寿期末造成较大的反应性惩罚。

常见的可燃毒物核素的种类及特性^[17]如表 1 所示。

表 1 几种可燃毒物核素特性
Table 1 Properties of several burnable poison nuclides

material	absorber nuclide	natural abundance/%	0.0253 eV absorption cross-section/(10 ⁻²⁸ m ²)	melting point/°C	density/(g·cm ⁻³)
Gd ₂ O ₃ , Gd ₂ O ₃	¹⁵⁵ Gd, ¹⁵⁷ Gd	14.71, 15.68	60 799, 254 070	2350	7.40
B ₄ C	¹⁰ B	19.8	3839	2350	2.52
Er ₂ O ₃	¹⁶⁷ Er	22.87	646	2355	8.64
Sm ₂ O ₃	¹⁴⁹ Sm	13.83	40 719	2325	8.35
CdO	¹¹³ Cd	12.26	20 192	1427	8.15
Eu ₂ O ₃	¹⁵¹ Eu	52.18	9172	2050	7.30

Sm₂O₃ 和 Eu₂O₃, 与中子反应会产生吸收截面大、半衰期长的核素, 不是合适的可燃毒物。

CdO, 目前国内外对镉的研究较少, 其熔点仅 1427 °C, 低于陶瓷燃料颗粒温度限值(约 1600 °C), 也不是合适的可燃毒物。

Gd₂O₃, 应用广泛的可燃毒物, 工程经验丰富。在压水堆中, Gd₂O₃ 粉末常与 UO₂ 燃料混合, 烧结成燃料芯块。由于¹⁵⁵Gd, ¹⁵⁷Gd 热中子吸收截面很大, 可以考虑以分离型毒物形式应用在气冷微型堆。

Er₂O₃, 在压水堆、高温堆中也有应用。其吸收截面较小, 反应性释放较慢, 可以考虑以整体型毒物形式应用在长寿期堆芯。

B₄C, 作为典型的可燃毒物, 应用广泛, 工程经验丰富, 布置形式多样。¹⁰B 的中子吸收截面既没有¹⁵⁵Gd, ¹⁵⁷Gd 那么大, 又没有¹⁶⁷Er 那么小, 可以用作分离型或整体型毒物。硼的燃耗链条简单, ¹⁰B 与中子反应后只产生氦和锂。B₄C 与气冷微型堆的燃料和结构材料都有很好的相容性。

综上, 在气冷微型堆中, Gd₂O₃, Er₂O₃, B₄C 有可能作为可燃毒物。

2 长寿期气冷微型堆可燃毒物研究

热功率 15 MW-20 a 长寿期不换料堆芯由燃料组件、控制棒组件和反射层组成。燃料组件在径向上分 4 区布置(从内向外编号 zone1~zone4); 在轴向上分 6 层布置(从上向下编号 layer1~layer6); 燃料组件由陶瓷燃料颗粒弥散在碳化硅基体的燃料棒和冷却剂通道组成; 每个组件内有 54 根燃料棒。堆芯直径 280 cm, 高度 595 cm。燃料平均富集度 9%, 6 种富集度分区布置。堆芯寿期约 6800 d(等效满功率天)。图 1 是其堆芯布置图。

2.1 整体型可燃毒物

2.1.1 不同核素种类的影响

整体型可燃毒物布置在陶瓷燃料颗粒的 UO₂ 燃料核中。为分析 Gd₂O₃, B₄C, Er₂O₃ 特性, 分别布置质量分数

0.1%的 Gd_2O_3 , 质量分数 0.15% 的 B_4C , 质量分数 2.5% 的 Er_2O_3 , 质量分数 2.0% 的 Er_2O_3 , 图 2 是堆芯燃耗特性曲线计算结果。

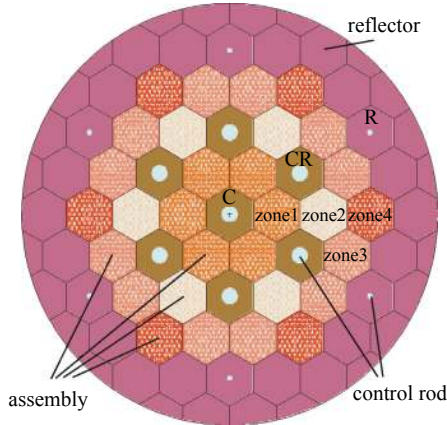


Fig. 1 Layout of long-lifetime gas-cooled core
图 1 长寿期气冷堆堆芯布置示意图

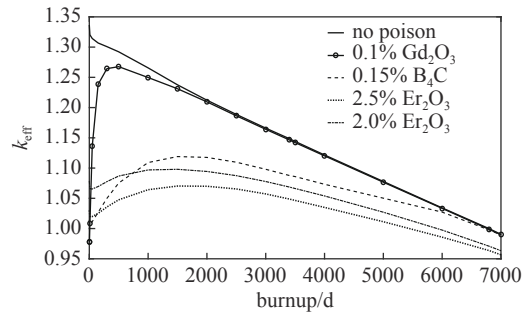


Fig. 2 k_{eff} as a function of burnup for long-lifetime core with different monolithic burnable poison nuclides

图 2 布置不同整体型可燃毒物的长寿期堆芯燃耗特性曲线

由上可知, Gd_2O_3 的热中子吸收截面很大, 消耗很快, k_{eff} 在 500 d 之前随着燃耗迅速增大, 之后, 毒物几乎消耗完, 不能很好地控制反应性。

Er_2O_3 的热中子吸收截面较小, 毒物的消耗可以缓慢释放反应性; 质量分数 2.5% 时, 整个寿期内最大 k_{eff} 为 1.070 31, 但是寿期末反应性惩罚较大, 寿期为 5440 d, 缩短了 1360 d; 质量分数 2.0% 时, 寿期内最大 k_{eff} 增大为 1.097 96, 寿期为 5915 d, 缩短了 885 d。

B_4C 作为整体型毒物, 寿期内最大 k_{eff} 为 1.119 02, 可有效控制剩余反应性, 6000 d 时基本消耗完, 寿期末几乎没有反应性惩罚, 不会减少堆芯寿命。

因此, 对于 15 MW-20 a 长寿期堆芯, 整体型 B_4C 是合适的可燃毒物选择。整体型 Er_2O_3 也可以选择, 可以使寿期内最大 k_{eff} 更小, 但可能会在寿期末产生较大的反应性惩罚。

2.1.2 B_4C 毒物含量的影响

整体型 B_4C 在所有燃料组件内均匀布置, 质量分数分别是 0.1% 和 0.15%, 图 3 是燃耗特性曲线计算结果。

由图 3 可知, 虽然 B_4C 毒物含量不同, 但基本都是在 6000 d 左右消耗完。 B_4C 含量增加, 寿期初和寿期中的 k_{eff} 明显减小。

2.1.3 B_4C 毒物分区布置的影响

根据燃料组件在轴向分 6 层布置的特点, 整体型 B_4C 毒物在轴向分区布置: 轴向第 1, 2 层组件的燃料颗粒内 B_4C 质量分数 0.17%, 轴向第 3, 4 层为 0.13%, 轴向第 5, 6 层为 0.10%。图 4 是分区布置 B_4C 的长寿期堆芯燃耗特性曲线, 与均匀布置质量分数 0.15% B_4C 相比, 燃耗特性曲线变化较小, 寿期内最大 k_{eff} 从 1.12 增为 1.13。

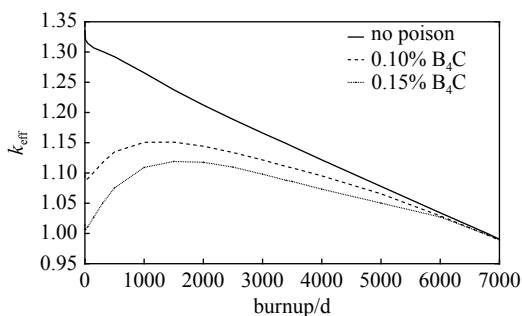


Fig. 3 k_{eff} as a function of burnup for long-lifetime core with different contents of B_4C

图 3 布置不同整体型 B_4C 含量时长寿期堆芯燃耗特性曲线

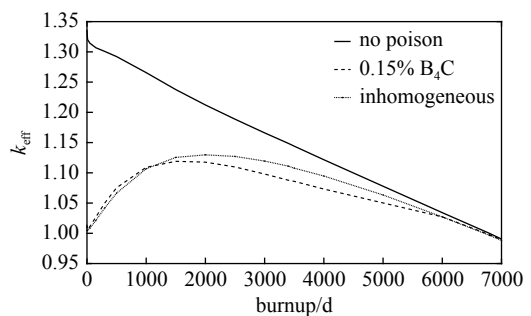


Fig. 4 k_{eff} as a function of burnup for long-lifetime core with inhomogeneous distribution of B_4C

图 4 分区布置 B_4C 时长寿期堆芯燃耗特性曲线

毒物分区布置可以优化功率分布, 图 5 是长寿期堆芯零燃耗功率分布。当未布置毒物时, 考虑冷却剂流向, 为使燃料最高温度尽量小且富集度种类不能过多, 通过 6 种燃料富集度分区分层布置, 将径向功率展平, 径向功率峰

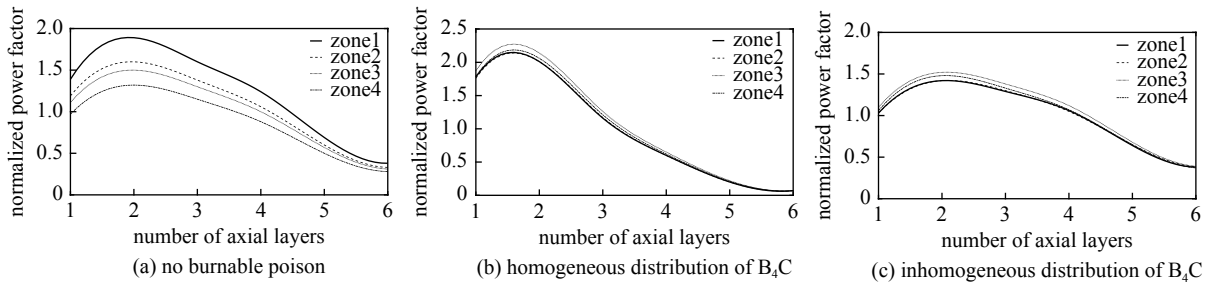


Fig. 5 Power distribution of long-lifetime core for zero-power

图 5 长寿期堆芯零燃耗功率分布图

因子约 1.18, 轴向功率在冷却剂入口处较高而在出口处较低。当均匀布置 B_4C 时, 径向功率分布得到优化, 但是轴向功率分布畸变严重, 轴向第 2 层燃料组件的功率因子约是第 6 层的 30 倍。当分区布置 B_4C 时, 径向功率分布得到优化, 径向功率峰因子减小到 1.03; 轴向功率分布近似保持未布置毒物时的形状, 没有产生畸变, 仍满足燃料富集度分区布置优化功率分布的目的。

2.2 分离型可燃毒物

气冷堆内分离型 B_4C 毒物常见布置形式是 BP 棒, 材料是 B_4C 和 C, 图 6 是布置有 3 根 BP 棒的燃料组件模型, 由于 BP 棒占据燃料棒位置, 组件内燃料棒数目减少为 51 根, 无毒物堆芯寿命为 6350 d。

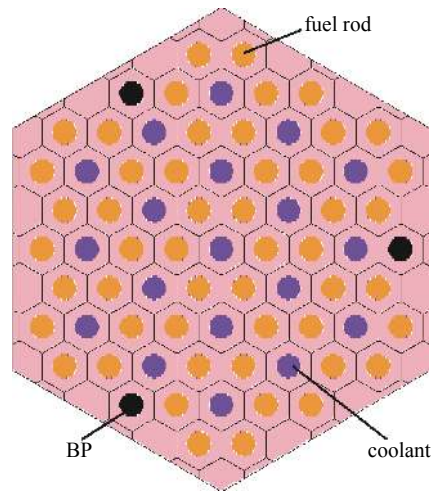


Fig. 6 Layout of B_4C rod

图 6 B_4C 毒物棒布置示意图

2.2.1 毒物含量的影响

每个组件布置 3 根半径 0.7 cm 的 B_4C 毒物棒, 研究天然硼质量分数为 2.5%, 3.5%, 4.5% 时长寿期堆芯的燃耗特性, 结果见图 7。

分离型 B_4C 依靠自屏效应应将反应性缓慢释放, 寿期初和寿期中的燃耗特性曲线变化幅度较小。随着硼含量增加, 燃耗特性曲线近乎向下平移, 即寿期初和寿期中的 k_{eff} 更小, 寿期末的反应性惩罚更大。与无毒物堆芯相比, 质量分数 2.5% 时, 寿命缩短 300 d; 质量分数 4.5% 时, 寿命缩短 1300 d。

2.2.2 毒物棒直径的影响

每个组件布置 3 根天然硼质量分数 2.5% 的 B_4C 毒物棒, 研究棒半径为 0.7, 0.8, 0.9 cm 时长寿期堆芯的燃耗特性, 结果见图 8。

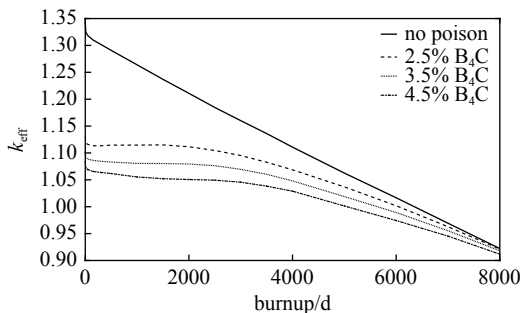


Fig. 7 k_{eff} as a function of burnup for long-lifetime core with different contents of B_4C rod

图 7 布置不同分离型 B_4C 含量时长寿期堆芯燃耗特性曲线

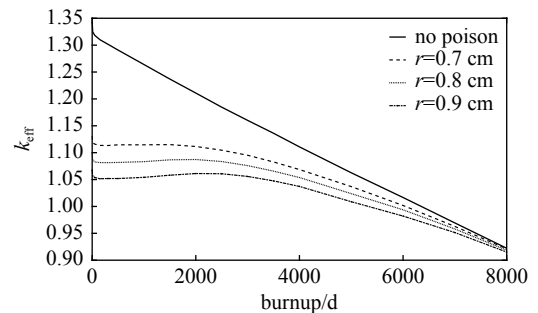


Fig. 8 k_{eff} as a function of burnup for long-lifetime core with different diameter of B_4C rod

图 8 不同分离型 B_4C 棒径时长寿期堆芯燃耗特性曲线

随着棒半径增大, 寿期初和寿期中, 堆芯 k_{eff} 更小, 燃耗特性曲线更平坦, 棒半径为 0.7 cm 和 0.9 cm 时, 0~3000 d 的 k_{eff} 对应的反应性变化分别是 3.200×10^{-2} 和 1.500×10^{-2} ; 另一方面, 棒半径增大, 寿期末的反应性惩罚也更大, 棒半径为 0.7 cm 和 0.9 cm 时, 与无毒物堆芯相比, 寿命分别缩短 300 d 和 1000 d。

2.2.3 毒物棒含量分区布置的影响

每个组件布置3根半径0.9 cm的 B_4C 毒物棒,对比(1)不分区布置:天然硼质量分数均为2.5%;(2)分区布置:轴向第1~4层的质量分数为3.0%,轴向第5~6层为1.5%时,长寿命堆芯的燃耗特性和功率分布,结果见图9。

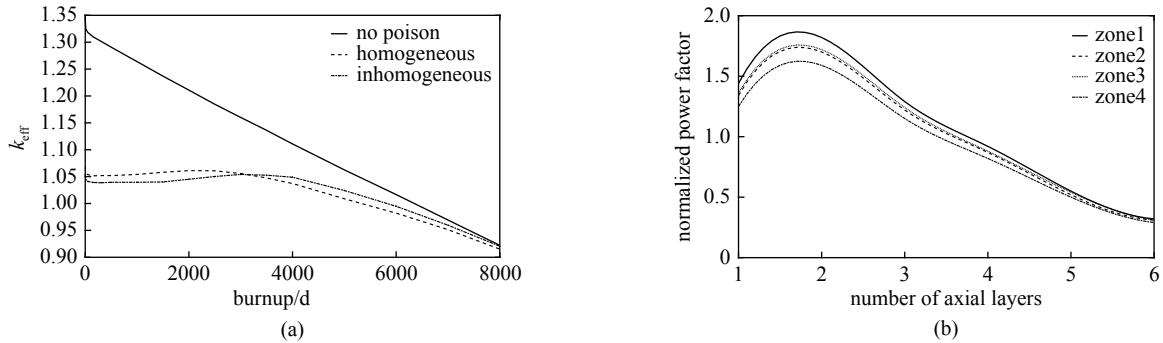


Fig. 9 k_{eff} as a function of burnup (a) and power distribution at zero-power (b) for long-lifetime core with inhomogeneous content distribution of B_4C rod

图9 B_4C 棒含量分区布置时长寿命堆芯燃耗特性曲线(a)和零燃耗功率分布图(b)

毒物棒含量分区布置有明显优势:(1)寿期内最大 k_{eff} 更小,为1.0542;不分区布置时为1.0676。(2)堆芯 k_{eff} 对应的反应性变化幅度小,0~4500 d内为 1.49×10^{-2} ;不分区布置时,0~3000 d时在 1.50×10^{-2} 以内,但之后变化幅度较大。(3)寿期末反应性惩罚更小,比无毒物堆芯寿命缩短500 d;不分区布置时,寿命缩短1000 d。(4)功率分布得到优化,毒物棒含量分区布置时零燃耗堆芯的径向功率峰因子仅1.05,轴向功率近似保持未布置毒物时的形状。

3 短寿命气冷微型堆可燃毒物研究

热功率5 MW-1 a短寿命堆芯,其燃料组件在径向分4区、轴向分6层布置;每个组件内有24根燃料棒。堆芯直径228 cm,高度250 cm。燃料富集度8.5%,堆芯寿命480 d。图10是堆芯布置示意图。

3.1 B_4C 毒物布置研究

为分析 B_4C 在低功率、短寿命堆芯中的适用性,研究以下4种方案:

(1) BP棒形式,在径向zone1区域(最靠中心的6组)燃料组件边缘位置各布置3根 B_4C 毒物棒,半径0.5 cm,质量分数0.5%。

(2)极细BP棒形式,为减弱自屏效应,在所有燃料组件边缘位置各布置6根纯 B_4C 毒物棒,其中 ^{10}B 富集度80%,棒半径0.01 cm;

(3)涂层形式,在燃料芯块外表面涂纯 B_4C 材料,硼为天然硼,涂层厚度0.000 02 cm;

(4)整体型 B_4C ,将 B_4C 布置在燃料颗粒的燃料核内,质量分数0.015%。

图11是不同 B_4C 毒物方案下短寿命堆芯的燃耗特性曲线,可以看出,不同方案在寿期末都会造成很大的反应性惩罚,这是因为对于低功率、短寿命堆芯, ^{10}B 的热中子吸收截面相对较小。若减少上述各方案中毒物含量,虽然寿期末的反应性惩罚有所减弱,但将无法有效控制寿期初的剩余反应性。

为增快 ^{10}B 消耗速度,类比压水堆含硼水的布置,将 B_4C 弥散在堆芯石墨中,含量为 1.0×10^{-5} ,图12是堆芯燃耗特性曲线。由图可知,该布置可以有效控制短寿命堆芯的剩余反应性且不会在寿期末造成反应性惩罚,寿命528 d,比无毒物堆芯增加48 d,这是因为堆芯石墨材料所含有的 1.0×10^{-6} 杂质硼当量被当作可燃毒物消耗了。当堆芯石墨材料不考虑杂质硼当量时,无毒物堆芯的寿命为526 d。

3.2 Gd_2O_3 毒物布置研究

在5 MW-1 a短寿命堆芯内,将 Gd_2O_3 与基体材料烧结成可燃毒物棒,布置在径向zone1区燃料组件的边缘位置,每个燃料组件布置3根毒物棒,半径0.5 cm, Gd_2O_3 质量分数1.0%。图13是 Gd_2O_3 毒物棒布置示意图及堆芯燃

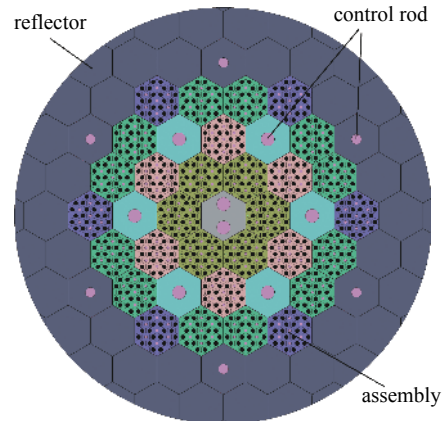


Fig. 10 Layout of short-lifetime gas-cooled core

图10 短寿命气冷堆堆芯布置示意图

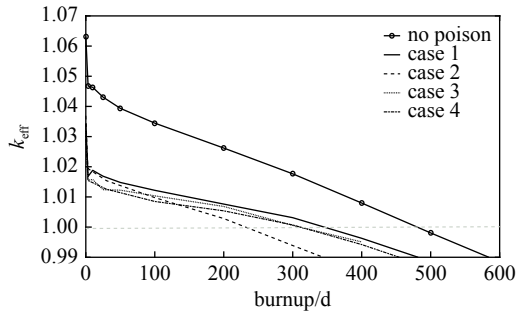


Fig. 11 k_{eff} as a function of burnup for short-lifetime core with different B_4C layouts

图 11 不同 B_4C 毒物布置方案下短寿期堆芯燃耗特性曲线

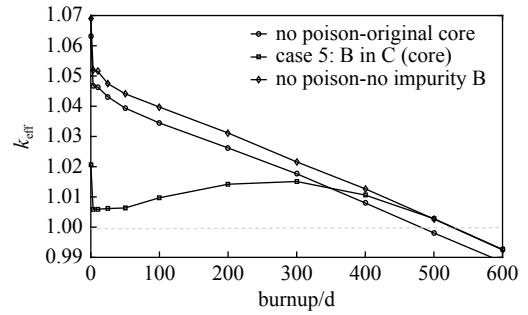


Fig. 12 k_{eff} as a function of burnup for short-lifetime core when B_4C in core graphite

图 12 B_4C 毒物弥散在堆芯石墨时短寿期堆芯燃耗特性曲线

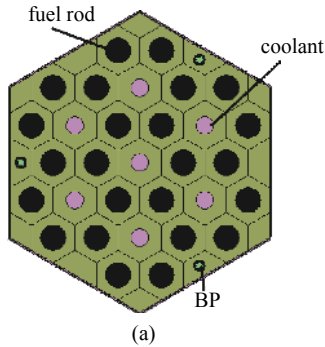
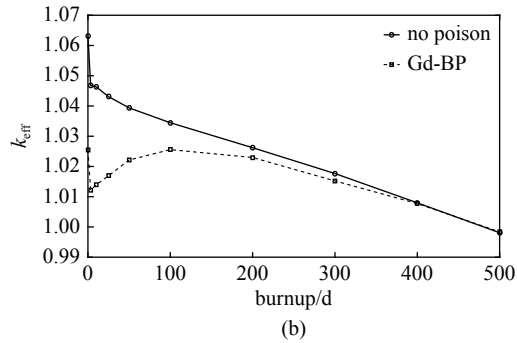


Fig. 13 Layout of Gd_2O_3 rod (a) and k_{eff} as a function of burnup (b) for short-lifetime core

图 13 短寿期堆芯 Gd_2O_3 毒物棒布置示意图(a)及燃耗特性曲线图(b)



耗特性曲线图。

由图 13 可知,分离型 Gd_2O_3 毒物棒的布置,可以有效控制堆芯剩余反应性,在寿期末几乎不产生反应性惩罚。1 a 寿期内,堆芯最大 k_{eff} 为 1.025 57,最小为 1.012 19,既便于后续使用控制棒控制反应性,又便于堆芯仅依靠温度负反馈实现自动热停堆的固有安全性的实现。

4 较长寿期气冷微型堆可燃毒物研究

基于 5 MW-3 a 和 5 MW-10 a 较长寿期堆芯,研究 Gd_2O_3 毒物棒布置,方案如下:(1)5 MW-3 a 堆芯 A,堆芯直径 210 cm,长度 220 cm,燃料富集度 17%; Gd_2O_3 毒物棒布置在径向靠内的 36 个六边形燃料组件的中心位置。(2)5 MW-3 a 堆芯 B,堆芯直径 155 cm,长度 160 cm,燃料富集度 30%; Gd_2O_3 毒物棒布置在径向靠内的 12 个六边形燃料组件的 3 个角落位置。(3)5 MW-10 a 堆芯 C,堆芯直径 170 cm,长度 220 cm,燃料富集度 19.75%; Gd_2O_3 毒物棒布置在径向靠内的 20 个方形燃料组件的 4 个边缘位置。图 14 是堆芯模型图,图 15 是燃耗计算结果。

由图 15 可知,对于 5 MW-3~10 a 的气冷微型堆,含 Gd 可燃毒物棒可以很好地控制堆芯剩余反应性。堆芯

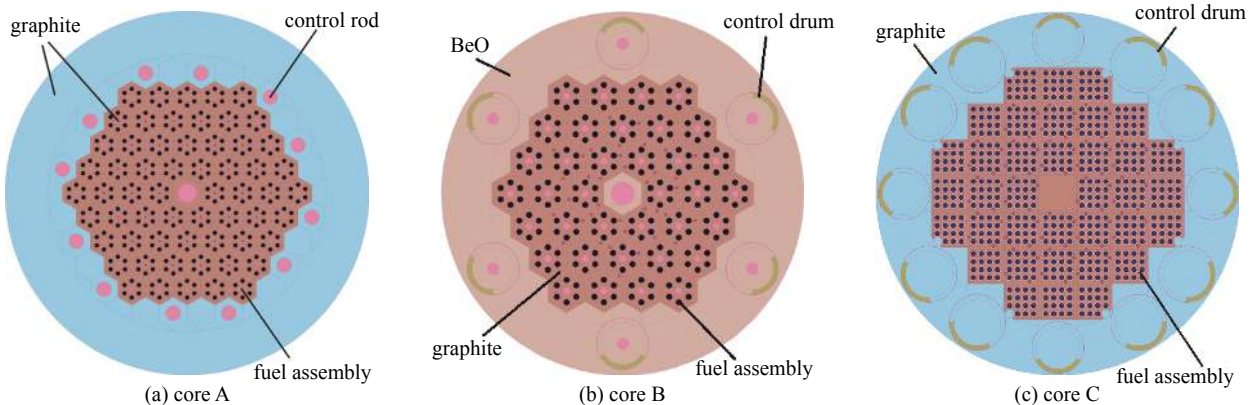
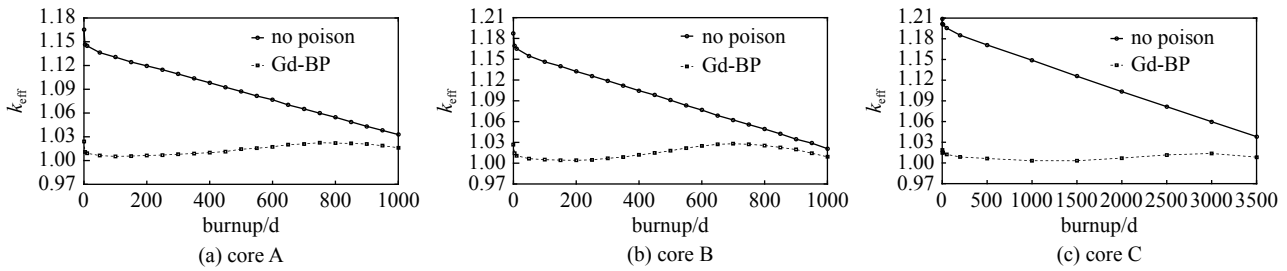


Fig. 14 Layouts of longer-lifetime gas-cooled core

图 14 较长寿期气冷堆堆芯布置示意图

Fig. 15 k_{eff} as a function of burnup for longer-lifetime core with Gd_2O_3 rod图 15 布置 Gd_2O_3 毒物棒的较长寿命堆芯燃耗特性曲线

A 在 0~1000 d 寿期内 k_{eff} 最大为 1.023 97, 最小为 1.005 29, 反应性变化在 1.841×10^{-2} 以内; 堆芯 B 在 0~1000 d 寿期内 k_{eff} 最大为 1.028 05, 最小为 1.004 11, 反应性变化在 2.356×10^{-2} 以内; 堆芯 C 在 0~3500 d 寿期内 k_{eff} 最大为 1.018 87, 最小为 1.003 19, 反应性变化在 1.551×10^{-2} 以内。含 Gd 可燃毒物棒可以将燃耗特性曲线显著展平, 减少功率运行时控制棒的操作幅度和频次。

以堆芯 A 为例, 在事故条件下、所有控制棒完全抽出堆芯时, 最大 k_{eff} 对应反应性为 2.369×10^{-2} , 而 1000~1600 K 间堆芯总温度系数为 $-4.69 \times 10^{-5}/\text{K}$, 堆芯温度大约上升至 1505 K (即 1232 °C) 时可以实现自动热停堆, 距离温度限值 (1600 °C) 仍有较大裕量, 因此堆芯具备仅依靠温度负反馈实现自动热停堆的固有安全性。

5 结 论

(1) 通过分析常见可燃毒物核素的特性, 初步判断 B_4C , Gd_2O_3 , Er_2O_3 比较适合应用在气冷微型堆。整体型 Er_2O_3 、分离型或整体型 B_4C 可以应用在长寿期堆芯 (如 15 MW-20 a 堆), 分离型 Gd_2O_3 可以应用在短寿期或较长寿命堆芯 (如 5 MW-1~10 a 堆)。

(2) 在 15 MW-20 a 长寿期堆芯中, 整体型 Er_2O_3 可以有效控制剩余反应性, 但在寿期末可能会造成一定的反应性惩罚, 导致寿期缩短。整体型 B_4C 可以有效控制剩余反应性且在寿期末几乎不产生反应性惩罚, 还可以通过毒物含量分区布置来优化功率分布。分离型 B_4C 可以使燃耗特性曲线在寿期初和寿期中变化更平坦, 并通过分区布置进一步优化, 但也会在寿期末造成一定的反应性惩罚。

(3) 在 5 MW-1 a 短寿期堆芯中, 涂层、毒物棒等常见的 B_4C 布置方式并不合适; 将 B_4C 弥散在堆芯石墨内可有效控制剩余反应性且不会产生反应性惩罚, 但需要考虑石墨材料杂质硼当量的问题。分离型 Gd_2O_3 毒物棒是很好的选择, 可有效控制剩余反应性, 几乎不会产生反应性惩罚, 有利于堆芯反应性控制和固有安全性的实现。

(4) 在 5 MW-3~10 a 较长寿命气冷堆中, 分离型 Gd_2O_3 毒物棒是很好的可燃毒物方案, 可有效控制剩余反应性, 保证事故条件下、所有控制棒不可用时, 堆芯具备仅依靠温度负反馈实现自动停堆的固有安全性。

参考文献:

- [1] 张成龙, 堵树宏, 刘国明, 等. 小型模块化超级安全气冷堆中子学特性研究[J]. 核动力工程, 2019, 40(6): 13-19. (Zhang Chenglong, Du Shuhong, Liu Guoming, et al. Research on neutronics characteristics of small modular super-safe gas-cooled reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(6): 13-19)
- [2] 张成龙, 刘国明, 贺楷, 等. 气冷微堆燃料设计的中子学特性影响研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(11): 2062-2069. (Zhang Chenglong, Liu Guoming, He Kai, et al. Research on influence of neutronics characteristics in fuel design of micro gas-cooled reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(11): 2062-2069)
- [3] 吴宗鑫, 张作义. 先进核能系统和高温气冷堆[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (Wu Zongxin, Zhang Zuoyi. Advanced nuclear power system and high temperature gas cooled reactor[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004)
- [4] 符晓铭, 王捷. 高温气冷堆在我国的发展综述[J]. 现代电力, 2006, 23(5): 70-75. (Fu Xiaoming, Wang Jie. Development of high temperature gas cooled reactor in China[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(5): 70-75)
- [5] 李志容, 陈立强, 徐校飞, 等. 模块式高温气冷堆的固有安全特性[J]. 核安全, 2013, 12(3): 1-4. (Li Zhirong, Chen Liqiang, Xu Xiaofei, et al. Inherent safety features of the modular HTGR[J]. Nuclear Safety, 2013, 12(3): 1-4)
- [6] Bess J D, Fujimoto N, Dolphin B H, et al. Evaluation of the start-up core physics tests at Japan's high temperature engineering test reactor (fully-loaded core)[R]. INL/EXT-08-14767, 2010.
- [7] Kunitomi K, Katanishi S, Takada S, et al. Japan's future HTR – the GTHTR300[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 233(1/3): 309-327.
- [8] Department of Energy. Preliminary safety information document for the standard MHTGR[R]. DOE/HTGR-86-024-Vol. 3, 1986.
- [9] Sterbentz J W, Bayless P D, Nelson L, et al. High-temperature gas-cooled test reactor point design: summary report[R]. INL/EXT-16-37661, 2016.

- [10] 清华大学工物系反应堆工程计算分析实验室. 堆用蒙特卡程序RMC用户使用手册[M]. 北京: 清华大学, 2013. (Reactor Engineering Analysis Lab, Department of Engineering Physics, Tsinghua University. User manual of RMC Monte Carlo procedure used in reactors[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013)
- [11] 黄华伟, 王晓敏, 杨静, 等. 可燃毒物现状[J]. *材料开发与应用*, 2010, 25(4): 87-91,104. (Huang Huawei, Wang Xiaomin, Yang Jing, et al. Research progress in burnable poison process[J]. *Development and Application of Materials*, 2010, 25(4): 87-91,104)
- [12] 刘思佳, 朱贵凤, 严睿, 等. 小型模块化氟盐冷却高温堆可燃毒物布置方案[J]. *核技术*, 2020, 43(5): 61-66. (Liu Sijia, Zhu Guifeng, Yan Rui, et al. Placement scheme of burnable poisons in a small modular fluoride-cooled high temperature reactor[J]. *Nuclear Techniques*, 2020, 43(5): 61-66)
- [13] 徐士坤, 于涛, 谢金森, 等. 可燃毒物布置方式的反应性波动特性研究[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(4): 20-26. (Xu Shikun, Yu Tao, Xie Jinsen, et al. Research on reactive fluctuation characteristics of burnable poison arrangement[J]. *Journal of University of South China (Science & Technology)*, 2020, 34(4): 20-26)
- [14] 夏羿, 徐士坤, 谢金森, 等. 压水堆棒状燃料组件弥散型可燃毒物燃耗特性研究[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(4): 34-41. (Xia Yi, Xu Shikun, Xie Jinsen, et al. The research on burnup characteristic of homogeneous mixing burnable poison for PWR rod fuel assembly[J]. *Journal of University of South China (Science & Technology)*, 2020, 34(4): 34-41)
- [15] 魏春琳, 张剑, 单文志, 等. 球床高温气冷堆使用可燃毒物的方案探讨[J]. *原子能科学技术*, 2013, 47(s1): 156-159. (Wei Chunlin, Zhang Jian, Shan Wenzhi, et al. Research on application of burnable poison in pebble bed HTR[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(s1): 156-159)
- [16] 黄世恩, 杨平, 汪量子, 等. 长寿期堆芯可燃毒物选型研究[J]. *核动力工程*, 2017, 38(2): 6-10. (Huang Shien, Yang Ping, Wang Liangzi, et al. Research on selection of burnable poisons for long-life reactor core[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2017, 38(2): 6-10)
- [17] 魏书华. 板型先进高温堆的可燃毒物优化设计研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海应用物理研究所), 2015. (Wei Shuhua. Optimal design and research of burnable poisons for the plate-type advanced high-temperature reactor[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015)