

文章编号: 0258-0926(2008)01-0053-04

快堆中不同核燃料类型的长寿期性能评价

胡 赞¹, 徐 铄²

(1. 清华大学, 北京, 100084; 2. 中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

摘要:建立了典型的快堆六角形栅元堆芯模型,研究了多种类型的燃料在快中子能谱辐照环境下经过较长时间辐照后的性能,对不同燃料堆芯在运行寿期末的乏燃料组成成分进行了分析。结果表明,在栅元结构完全一样且初始剩余反应性基本相同的情况下,燃料反应性损失从小到大的顺序是:金属燃料<氮化物燃料<碳化物燃料<氧化物燃料;在整个寿期中,使用 Pu 驱动的燃料比使用 ^{235}U 驱动的燃料反应性下降得慢;金属燃料寿期末乏燃料中按初始装载燃料质量平均后的超铀核素的质量最小,其他依次为氧化物<氮化物<碳化物;由于初始装载量的增多,使用 Pu 驱动的燃料寿期末乏燃料超铀核素的总量比使用 ^{235}U 驱动的燃料多,同时,乏燃料 Pu 中的易裂变同位素的份额比 ^{235}U 驱动燃料的少。从中子学角度考虑, UZr 燃料是比较理想的长寿命快堆堆芯燃料类型。

关键词:长寿命;快堆;燃耗反应性损失;乏燃料;成分

中图分类号:TL329 **文献标识码:**A

1 引 言

从 20 世纪 90 年代开始,中小型反应堆(SMRs)重新引起了人们的兴趣。2001 年,由国际原子能机构(IAEA)主持,在埃及开罗召开了一次中小型反应堆的国际研讨会,与会人员分别就各国设计的多个中小型反应堆发表了他们的评论^[1]。根据 IAEA 的分类规定,等价电功率小于 300 MW 的反应堆被称为小型堆,等价电功率在 300~700 MW 之间的反应堆被称为中等大小的堆,这两类反应堆合称中小型堆(SMRs)。一体化、模块化设计的 SMRs 由于其投资规模小、功率规模适当、建造周期较短、操作简单安全,对各国尤其是发展中国家有着很大的吸引力,在特殊的场合更是起着独特的作用。在设计中,长寿命中小型反应堆要求在较长的运行寿期中不倒料或换料,这样,便对堆芯剩余反应性随燃耗变化的大小提出了要求。一般情况下,堆芯燃耗反应性变化越小,在运行过程中需要控制的剩余反应性以及初始剩余反应性就越小,有利于反应堆的安全运行。本工作假定了一个适当大小的堆芯和适当的功率规模,研究了在初始剩余反应性基本相同的情况下不同燃料堆芯的反应性随燃耗的变化情况,分析

了不同燃料堆芯寿期末乏燃料的组成成分。

2 计算条件

计算中采用的堆芯模型的栅元参数和结构分别见表 1 和图 1。

为评价各种燃料的长时间燃耗性能,选择不同类型的燃料,包括:氧化物、金属、氮化物和碳化物燃料。根据驱动燃料的不同,这些燃料又被分为 ^{235}U 驱动的燃料和 Pu 驱动的燃料;冷却剂使用 Na;包壳使用 316 型不锈钢。

表 1 栅元参数

Table 1 Parameters of Lattice Cell

参数名称		数值
包壳外径/mm		8.64
包壳厚度/mm		0.63
直径间隙/mm		0.4
燃料芯块外径/mm		6.98
堆芯高度/cm		125
栅距/直径比		1.2
六角形栅元对边距/mm		10.368
体积分数/%	燃 料	41.1036
	冷却剂	41.8669
	包 壳	17.0295

收稿日期: 2006-12-20; 修回日期: 2007-12-03

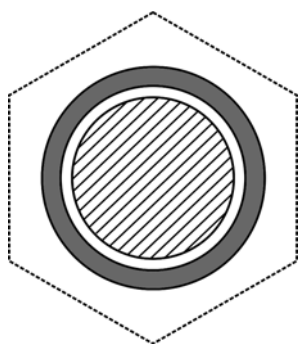


图 1 栅元示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Lattice Cell

假定堆芯由 96 排共 27 937 个六角形栅元重复组成。将栅元均匀化处理,堆芯按体积等效处理成圆柱,等效半径为 90.986 cm,高为 125 cm。反射层使用 316 型不锈钢,上、下反射层厚度均为 50 cm,径向反射层厚度为 59.014 cm;冷却剂温度假定为 460 ,密度取 0.842 g/cm³;包壳温度假定为 500 ,包壳密度取 7.735 g/cm³,包壳组成见文献[2]。

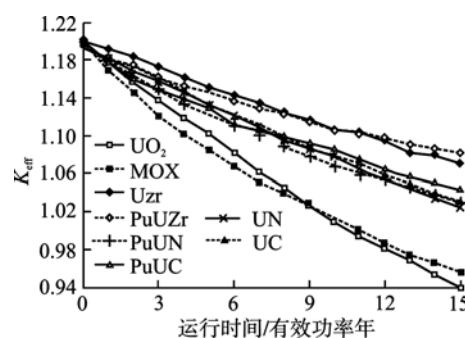
3 计算结果

为使计算结果更具可比性,在使用不同燃料时,改变 ²³⁵U 富集度或 Pu 的质量分数,使堆芯的有效增殖因数 k_{eff} 达到相同值。计算中使用燃耗为 50 GW·d/t (HM) 的压水堆乏燃料;经过 10 a 冷却后的反应堆 Pu,其同位素质量分数为:²³⁸Pu (3.18%)、²³⁹Pu (56.35%)、²⁴⁰Pu (26.6%)、²⁴¹Pu (8.02%)、²⁴²Pu (5.83%)^[3]。

经过简单的迭代,得到不同燃料的初始成分组成(表 2)。

3.1 有效增殖系数随燃耗的变化

假定堆芯热功率为 350 MW,平均线功率为

图 2 k_{eff} 随运行时间的变化Fig. 2 Changes of k_{eff} with Operating Time

100 W/cm。经过 15 a 的运行,采用不同燃料的堆芯的 k_{eff} 随运行时间的变化如图 2 所示。

长寿堆芯的设计中,要求其在整个寿期内的反应性随燃耗的损失 ρ 尽可能小。根据图 2,在初始剩余反应性基本相同的情况下,经过相同的运行时间后,金属燃料的反应性损失 ρ 最小;氧化物燃料的 ρ 最大。本次计算使用的模型运行 10 a 后,使用氧化物燃料堆芯的 k_{eff} 便开始小于 1.0;氮化物燃料和碳化物燃料的 k_{eff} 变化曲线十分相似,但碳化物燃料中对应驱动燃料的富集度或质量分数比氮化物燃料中的稍低,因此,碳化物的临界性能稍强。在栅元结构相同的前提下,按燃料种类来分, ρ 从小到大的顺序为:金属<碳化物<氮化物<氧化物。

从驱动燃料来看,在整个 15 a 寿期内,Pu 驱动燃料的 ρ 比 ²³⁵U 驱动燃料的 ρ 小。但由于在初始剩余反应性相当的条件下,Pu 驱动堆芯中 Pu 含量比 ²³⁵U 驱动堆芯的 ²³⁵U 含量小,因此,在开始运行的一段时间内,Pu 驱动堆芯的 k_{eff} 下降较快。运行一段时间后,随着 ²³⁸U 的大量增殖, k_{eff} 的下降开始减缓,最终,Pu 驱动燃料的燃耗

表 2 不同燃料的初始成分

Table 2 Initial Composition of Different Fuels

燃料类型		驱动燃料		增殖材料		k_{eff}	密度 /g·cm ⁻³
		成分	质量分数/%	成分	质量分数/%		
氧化物	UO ₂	²³⁵ U	21.797	²³⁸ U	78.203	1.19753±0.00113	9.873
	MOX	PuO ₂	20.900	UO ₂	79.100	1.19567±0.00141	9.962
金属	UZr	²³⁵ U	15.468	²³⁸ U	74.522	1.20006±0.00124	14.337
	PuUZr	Pu	13.300	天然 U	76.700	1.19700±0.00123	14.409
氮化物	UN	²³⁵ U	19.341	²³⁸ U	80.659	1.19283±0.00134	12.870
	PuUN	PuN	17.700	UN	82.300	1.19792±0.00147	12.854
碳化物	UC	²³⁵ U	19.302	²³⁸ U	81.698	1.19237±0.00135	12.240
	PuUC	PuC	17.100	UC	82.900	1.19221±0.00103	12.240

注: Pu 驱动时使用天然 U 作增殖材料; 90.0%理论密度; 金属燃料中 Zr 的质量分数为 10%。

表 3 各种燃料在寿期初、末的转换比
Table 3 CR of Different Fuels at BOL & EOL

时间	UO ₂	MOX	UZr	PuUZr	UN	PuUN	UC	PuUC
寿期初	0.401	0.719	0.487	0.896	0.441	0.791	0.486	0.851
寿期末	0.613	0.872	0.712	0.928	0.673	0.900	0.725	0.916

注：氧化物燃料 k_{eff} 下降较快，故寿期选为 11 a，其余燃料的寿期选为 15 a。

表 4 不同燃料的乏燃料组成成分
Table 4 Spent Fuel Composition of Different Fuels

燃料	TRUs 质量/kg·t ⁻¹	按初始装载燃料质量平均后的 Pu 质量/kg·t ⁻¹	Pu 同位素所占质量分数/%				
			²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu
UO ₂	54.409	51.623	1.42	87.5	10.42	0.61	0.05
MOX	159.832	153.429	1.44	54.85	33.03	4.30	6.38
UZr	52.230	50.107	1.01	90.22	8.37	0.37	0.03
PuUZr	123.330	118.442	1.20	61.89	28.56	2.73	5.62
UN	57.068	54.367	1.26	88.16	10.00	0.54	0.04
PuUN	148.532	141.879	1.31	57.80	31.38	3.56	5.95
UC	63.668	60.720	1.39	86.76	11.15	0.65	0.06
PuUC	149.596	143.014	1.22	58.31	31.20	3.52	5.75
UO ₂ -PWR 乏燃料 ^[4]	—	—	2.40	54.20	22.30	14.90	6.20
武器级 Pu ^[4]	—	—	0.012	93.80	5.80	0.35	0.022

反应性损失较小。

3.2 转换比的比较

转换比是指每消耗一个易裂变材料原子所产生的新的易裂变材料的原子数。在 U-Pu 循环中，转换比 CR 的计算公式为：

$$CR = \frac{(\Sigma_{c,238} + \Sigma_{c,240})\phi}{(\Sigma_{a,235} + \Sigma_{a,239} + \Sigma_{a,241})\phi} \quad (1)$$

式中， Σ_c 表示某材料的宏观俘获截面； Σ_a 表示某材料的宏观吸收截面； ϕ 为中子注量率；下标 238、240、235、239 和 241 分别代表核素 ²³⁸U、²⁴⁰Pu、²³⁵U、²³⁹Pu 和 ²⁴¹Pu。转换比的计算结果见表 3。

结果表明，金属燃料的转换比最大，增殖性能最好；其次是碳化物和氮化物；氧化物燃料堆芯的转换比最小。该结果与 Hejzlar 等人得出的结论一致^[4,5]。金属燃料较强的增殖性能主要得益于其较硬的中子能谱及较大的燃料单位体积中的重金属核密度。能谱越硬，增殖性能越好。一般情况下，能谱的软硬依赖于堆芯燃料的类型及堆芯几何布置。通常，金属材料的能谱最硬，其次是碳化物(氮化物类似)，氧化物的能谱最软。从驱动材料来看，由于 Pu 驱动燃料中增殖材料较多，其转换比远远大于 ²³⁵U 驱动燃料。在快中子能谱下，Pu 作为驱动材料具有非常好的增殖性能。

3.3 各种燃料的乏燃料组成特点

假定堆芯热功率为 350 MW，平均线功率密度为 100 W/cm，运行 15 有效功率年后，乏燃料的组成成分见表 4。

对于不同燃料堆芯，其乏燃料中锕系核素的组成大不一样。乏燃料中按初始装载燃料质量平均后的超铀核素质量 TRUs 和 Pu 质量从小到大的顺序为：金属燃料<氧化物<氮化物<碳化物燃料。由于初始 Pu 装载量的原因，使用 Pu 驱动或 ²³⁸U 增殖的燃料比使用 ²³⁵U 驱动、²³⁸U 增殖的燃料产出更多的乏燃料中的 TRUs 和 Pu。TRUs 的总量越多，乏燃料的放射性和毒性越强，对后处理不利。

从乏燃料中 Pu 的同位素组成来看，以 ²³⁵U 驱动、²³⁸U 增殖的燃料其寿期末乏燃料中易裂变 Pu(²³⁹Pu 和 ²⁴¹Pu)同位素的含量占了相当大的比例，尤其是 UZr 金属燃料，易裂变 Pu 的质量分数达到 90.59%；以 Pu 驱动的燃料，其乏燃料 Pu 中易裂变 Pu 同位素的份额减小很多。

4 结 论

(1)通过对选取不同燃料类型的一个假定快堆堆芯进行较长寿期(15 有效功率年)的燃耗计算，结果表明，在栅元结构完全一样且初始剩余反应性基本相同的情况下，燃料反应性损失从小

到大的顺序是：金属燃料<氮化物<碳化物<氧化物燃料；同时，在整个寿期中，使用 Pu 驱动的燃料比使用 ^{235}U 驱动的燃料反应性下降得要慢。

(2)从寿期末的乏燃料组成成分来看，金属燃料按初始装载燃料质量平均后的乏燃料中 TRUs 的质量最小，其他依次为氧化物<氮化物<碳化物；同时，使用 Pu 驱动的燃料寿期末乏燃料中 TRUs 的总量比使用 ^{235}U 驱动的燃料多，乏燃料中 Pu 中的易裂变同位素的份额比 ^{235}U 驱动燃料的少。

(3)UZr 燃料的燃耗反应性损失相比其他类型燃料小，乏燃料中 TRUs 的质量也是最少的。单从中子学角度考虑，这种燃料的长寿命燃耗性能非常好。但是，需要使用富集 U 驱动，而且其乏

燃料中易裂变 Pu 同位素的质量分数达到 90%以上，对防止核材料扩散不利。

参考文献：

- [1] IAEA. Small and Medium Sized Reactors: Statues and Prospects[C]. Cairo, Egypt, 2001.
- [2] 长谷川正义. 核反应堆材料手册[M]. 孙守仁等译. 北京：原子能出版社, 1987. 492.
- [3] Ser Gihong, Ehud Greenspan, Yeong Il Kim. The Encapsulated Nuclear Heat Source (ENHS) Reactor Core Design [J]. Nuclear Technology, 2005, 149(1): 26.
- [4] Hejzlar P, Driscoll M J, Kazimi M S. Consequences of Fuel Choice for Spent Fuel Characteristics for Once-Through Heavy Metal Cooled Fast Reactors [J]. Trans Am Nucl Soc, 2001, 83: 39~41.
- [5] Hejzlar P, Driscoll M J, Todreas N E. Impact of Fuel Choices on Spent Fuel Characteristics for Once-through Heavy Metal Cooled Reactors[R]. AEA-TECDOC-1356: 168~185.

Performance Evaluation of Different Types of Nuclear Fuels Loaded in Fast Reactor Core for A Long Time Operation

HU Yun¹, XU Mi²

(1. Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413, China)

Abstract: By using a typical fast reactor core model formed by hexagonal lattice cell, this paper studied the performance of different types of nuclear fuels, which are loaded respectively as fuel in this fast reactor core model for a long time operation, and analyzed the spent fuel compositions of different fuel types at EOL. The results indicated that, in the case of same lattice cell and similar initial reactivity, the burnup reactivity loss of metallic fuel is the smallest, followed by nitride fuel, carbide fuel and finally oxide fuel, while within same chemical form, fuels driven by Pu provide smaller reactivity loss compared to fuels driven by ^{235}U . Analysis of spent fuel composition shows that metallic fuel also exhibits smallest TRUs mass (averaged by initial fuel mass) of spent fuel, and then followed by oxide fuel, nitride fuel and carbide fuel, while at the same time, compared to fuels driven by ^{235}U , Pu based fuels were found to discharge more TRUs mass because of the increase of initial Pu loading mass, and thus lower percent of fissile materials in spent fuel. In terms of neutronics UZr fuel is an ideal fuel for long life fast reactor core.

Key words: Long life, Fast reactor, Burnup reactivity loss, Spent Fuel, Composition

作者简介：

胡 贇(1982—)，男，在读博士。2004年毕业于清华大学工程物理系，获学士学位。

徐 铎(1937—)，男，研究员，中国原子能科学研究院快堆工程部总工程师。1961年毕业于清华大学工程物理系。现从事快中子增殖反应堆的研究工作。

(责任编辑：尚作燕)