

加速器驱动系统的燃料选择

杨永伟, 李浩泉, 经荣清

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:对装载不同增殖材料的现实加速器驱动系统(ADS)的安全及嬗变超铀核素特性进行研究。分别以(U, TRU)O₂和(Th, TRU)O₂作为堆芯燃料,先用LAHET和MCNP程序对ADS进行稳态模拟计算,再耦合MCNP和ORIGEN2程序计算燃耗过程中的核素密度变化。结果显示,装载钍基燃料的ADS对超铀核素的嬗变效果较好,且在燃耗过程中其反应性和质子流强波动较小;装载铀基燃料的ADS则具有更安全的多普勒效应和缓发中子有效份额。总体来看,如果需要堆长时间安全嬗变超铀核素,装载钍基燃料会取得更好的效果。

关键词:加速器驱动系统;安全;反应性;超铀核素嬗变

中图分类号:TL329 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6931(2005)02-0149-05

Fuel Choice of Accelerator Driven Systems

YANG Yong-wei, LI Hao-quan, JING Xing-qing

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The safety and transmutation characteristics of realistic designs of accelerator-driven sub-critical systems(ADS) with various fertile materials were investigated. Either (U, TRU)O₂ or (Th, TRU)O₂ was loaded in the core. Then the reactor calculations of ADS in steady state were studied using LAHET and MCNP programs, and the coupling system of MCNP and ORIGEN2 was used to calculate the nuclide density evolution with burnup. The results show that ADS loaded with thorium based fuel has the superiority in terms of TRU burning capability, beam current fluctuation, reactivity swing while the other one loaded with uranium based fuel does in terms of the effective delayed neutron fraction and the Doppler effect. From the overall comparison, a core loaded with thorium based fuel is concluded to be better in achieving a long life while maintaining safety and minimizing waste.

Key words: accelerator-driven sub-critical system; safety; reactivity; transmutation

加速器驱动系统(ADS)由于具有较强的嬗变(P&T)计划的研究重点。我国也将加速器变核废料能力,近年来,在国际上成为分离与嬗变驱动洁净核能系统的物理及技术基础研究列入

收稿日期:2003-09-09;修回日期:2004-04-28

基金项目:国家“973”基础研究项目(G1999022601)

作者简介:杨永伟(1963—),男,四川古蔺人,副研究员,博士,核反应堆工程专业

了国家重点基础研究发展规划项目(973项目)。

ADS是一个由外源驱动的次临界装置,它的嬗变效果与燃料类型有着密切联系。如果燃料中不加入增殖材料,而只加入稀释物,如铈等,嬗变效果最佳,但这会带来安全性能变差和燃料循环长度过短的问题。所以,从工程方面考虑,应当在燃料中加入适量的增殖材料以改善系统的安全性和效益。

^{232}Th 和 ^{238}U 虽是可供选用的增殖材料,但现有快堆只应用 ^{238}U 作为增殖材料,对在次临界堆芯中用 ^{232}Th 代替 ^{238}U 可能带来的影响,需进行比较深入的研究。本文分别计算以 ^{232}Th 和 ^{238}U 作为增殖材料的ADS中的物理学参数,以对加速器驱动系统的燃料选择进行综合评价。

1 计算模型与方法

1.1 计算模型

为使系统计算结果更具工程现实性,参考超凤凰快堆的燃料组件设计参数建立ADS模型。图1、2为ADS的结构示意图,具体的设计参数列于表1。因为对卸料中待嬗变的超铀核素(TRU)不进行铀的分离可降低废料处理成本,所以,本文直接采用未分离铀的超铀核素,往其中添加钍或贫铀作为ADS的燃料。又假设燃料中的待嬗变的超铀核素来自冷却时间10 a、燃耗33 GW·d/t的PWR卸料,其超铀核素成分列于表2。

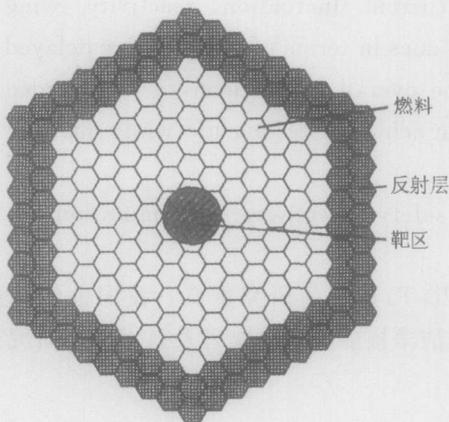


图1 轴向中平面处的堆芯布局
Fig.1 Core layout in axial midplane

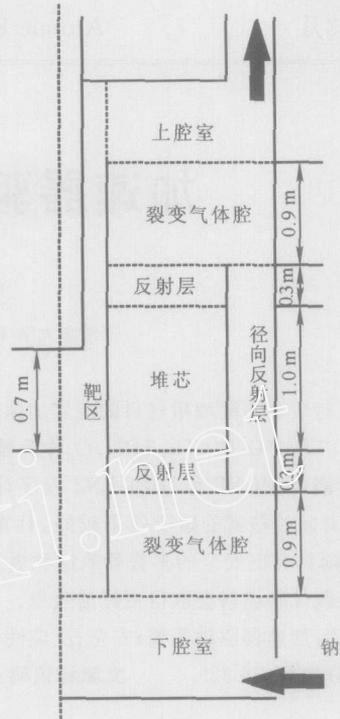


图2 堆芯的轴向截面示意图
Fig.2 Axial cross sections of the core

表1 堆芯设计参数

Table 1 Parameters of the core design

钠冷 ADS	设计参数
总功率	600 MW
靶模块	液态铅-铋共熔体
靶半径	20 cm
靶壁厚	0.6 cm
燃料棒	混合氧化物燃料
等效密度	82.6%理论密度
芯块内直径	2.0 mm
芯块外直径	7.14 mm
隙宽	0.115 mm
包壳厚度	0.565 mm
包壳材料	HT9 钢
活性长度	100 cm
燃料组件	六角形
组件栅距	17.9 cm
组件中棒数	271
燃料组件数	120

1.2 计算程序系统

ADS的中子学计算与常规反应堆相比有其固有特点:首先,由于散裂源中子集中在堆中心靶区内,反应堆处于次临界状态,所以,堆芯中子通量密度梯度大,且各向异性极为显著,为

表 2 燃料中超铀核素的组成

Table 2 Composition of TRU in the fuel

核素	ω/%	核素	ω/%
²³⁸ Pu	1.435	²³⁷ Np	4.863
²³⁹ Pu	53.367	²⁴¹ Am	5.153
²⁴⁰ Pu	21.544	²⁴² Am ^m	0.015
²⁴¹ Pu	7.809	²⁴³ Am	0.93
²⁴² Pu	4.699	²⁴⁴ Cm	0.185

了提高计算精度,必须应用精确的输运理论;其次,散裂源中子具有很高的能量(部分高于 20 MeV),而大多可直接应用的数据库能量上限为 20 MeV,计算 ADS 的中子输运时,不可避免地遇到核数据库不全的问题,这样,在研究 ADS 时,不得不把散裂中子源的模拟计算和堆芯的中子输运计算分开进行。

在本工作的物理分析中,先用 LAHET^[1] 和 MCNP^[2] 程序对 ADS 进行稳态模拟计算,再耦合 MCNP 和 ORIGEN2^[3] 程序计算燃耗过程中的核素密度变化(计算过程详情参见文献[4])。

2 计算结果

2.1 初态中子学特性

分别对以 ²³²Th 和 ²³⁸U 作为增殖材料的 ADS 进行计算。得到的初态计算结果列于表 3,而图 3 则是堆芯的中子通量密度能谱分布图。

²³²Th 在快谱下的裂变截面比 ²³⁸U 的低,钍基燃料中 TRU 富集度相对较高,次锕系核素(MA)含量也相应较大。MA 在低能区具较大的吸收截面,钍基燃料低能部分的中子通量密度较低,从而表现为更硬的能谱。又因在 6.7 eV 附近 ²³⁸U 有较强的吸收共振,所以,在此能量段钍基燃料中的中子能量密度却比铀基燃料中的大。

表 3 中的各种反应性参数通过 MCNP 的 KCODE 模式运算得到。可以看到,使用不同的增殖材料会得到不同的系统反应性参数。

1) 钍基燃料总的缓发中子份额比铀基燃料的小。这是 ²³²Th 极小的裂变中子份额使得其缓发中子总贡献不大的缘故(表 4)。从表 3 中又可看到,缓发中子平均能量比瞬发中子的低,而在快谱中,重金属在 0.5 MeV 能量附近的吸收与裂变比大于在 2 MeV 能量附近的吸

收与裂变比,于是出现缓发中子有效份额比缓发中子份额小的情况。

表 3 堆芯装载不同增殖材料时的特性变化

Table 3 Variation of the core characteristics loaded with various fertile materials loading

参数	量值	
	(U, TRU)O ₂	(Th, TRU)O ₂
TRU 富集度	19.1%	24%
有效增殖系数	0.972 1	0.966 6
通量权重的中子能量	450 keV	461 keV
缓发中子份额 β	0.042 2	0.031 0
缓发中子有效份额 β _{eff} ¹⁾	0.039 3	0.025 4
缓发中子平均能量	0.435 MeV	0.419 MeV
瞬发中子平均能量	2.098 MeV	2.109 MeV
多普勒效应 ²⁾	0.038 9	0.019 2
钠空泡效应 ³⁾	0.137 4	0.129 6

注:1) $(k - k_p)/k$, k_p 为只用瞬发中子进行计算而得到的有效增殖系数^[5]

2) $[k(1\ 200k) - k(1\ 800k)]/[k(1\ 200k) \cdot k(1\ 800k)]$

3) $[k(\text{void}) - k]/k$

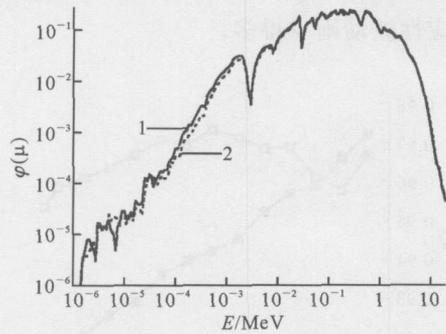


图 3 堆芯中归一化单位勒宽的中子通量密度

Fig. 3 Normalized neutron flux per lethargy in the core

1—U+19.1%TRU; 2—Th+24%TRU

表 4 ²³⁸U 和 ²³²Th 的缓发中子份额

Table 4 Delayed neutron fraction of ²³⁸U and ²³²Th

核素	每次裂变的缓发中子份额 Y	裂变中子份额 F	缓发中子份额 β=YF
²³⁸ U	0.156 0	0.115 8	0.001 81
²³² Th	0.209 0	0.021 9	0.000 46

2) 铀基燃料的多普勒效应为 0.038 9,这与采用相同燃料类型的超凤凰快堆的多普勒效应(0.036 5)十分接近。钍基燃料中的情况则有所不同,因 ²³²Th 在超热区的共振吸收比 ²³⁸U 的少, ²³²Th 含量又比 ²³⁸U 的低,所以,钍基燃料

的多普勒负效应较小,只为 0.019 2,这不利于反应性控制。

3) 表 3 列出了堆芯冷却剂全部丧失时的空泡效应。一般来说,MA 的存在将使空泡出现时的吸收放大(正效应),钍基燃料中的 MA 含量较高,其由 MA 引起的正效应会比铀基燃料中的大,但因²³²Th 在快谱下的裂变截面比²³⁸U 的低,²³²Th 所产生的空泡效应相应较²³⁸U 的低,上述因素的综合使得两种不同燃料下的总空泡效应差异不大。

2.2 燃耗变化

ADS 中的燃耗变化通过 MCNP 和 ORIGEN2 的耦合计算而得到。

²³⁸U 和 ²³²Th 都可通过俘获反应转换成易裂变材料,从而补偿燃耗过程中的反应性损失。从系统的有效增殖系数变化图(图 4)可看到,在铀基燃料中,²³⁵U 所产生的²³⁹Pu 不能完全补偿²³⁹Pu 和²⁴¹Pu 的净消耗,整个燃耗循环段的反应性损失稳定下降。相对而言,钍基燃料中的反应性波动则少得多。

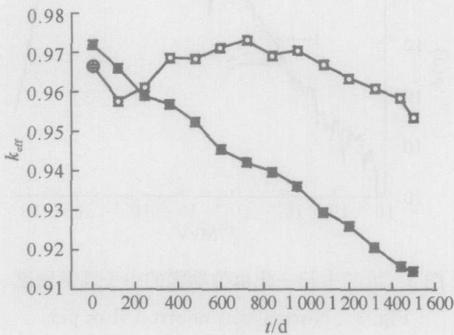


图 4 k_{eff} 随燃耗的变化

Fig. 4 Variation of k_{eff} with burnup

●—U+19.1%TRU; ○—Th+24%TRU

图 5 是钍基燃料中²³³Pa 和²³³U 的质量变化图。反应堆运行后,²³²Th 吸收中子产生大量²³³Pa,²³³Pa 过长的半衰期(27 d)和较大的吸收截面使得堆运行前 120 d 中的反应性明显下降,在²³³Pa 浓度达到平衡后,由于²³³U 的增加,系统反应性有所回升。到 720 d 后,²³³U 引起的反应性的增加抵不上裂变产物有害吸收的累积,使得总体反应性逐渐下降。总体来看,应用钍基燃料的堆芯的反应性及质子流强的波动较小,有利于堆芯不停堆长期稳定运行。

图 6 示出了 Pu 和 MA 的燃耗计算结果。可见,两条 MA 归一化存量曲线近乎重合,意味着增殖材料的选择对 MA 的嬗变影响不大,且 MA 在铀基燃料中嬗变率略好一些。但因钍基燃料中 MA 的含量高,所表现出的 MA 比消耗却是钍基燃料中的稍大。

采用不同增殖材料所引起的最大不同点在于钷的消耗,在 ADS 中,大量富余中子的存在使得²³⁸U 的增殖较大,铀基燃料的卸料中的 Pu 含量仍相当高。如果把超铀核素整体看作是废料,那么,利用钍作为增殖燃料的 ADS 对 TRU 的嬗变效果会更好。

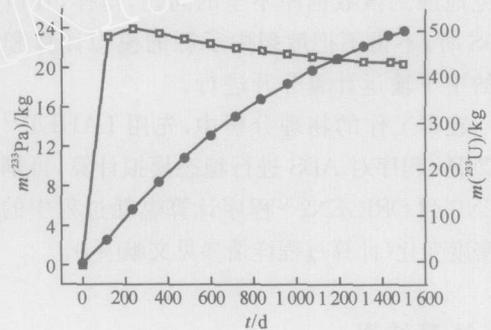


图 5 (Th,TRU)O₂ 堆芯中²³³Pa 和²³³U 的累积

Fig. 5 Build-up of ²³³Pa and ²³³U for the (Th,TRU)O₂ core

□—²³³Pa 质量; ●—²³³U 质量

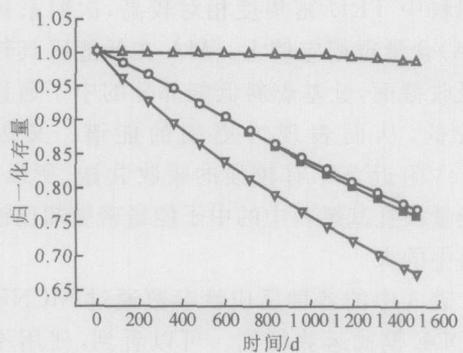


图 6 堆芯中 MA 和 Pu 归一化存量的变化

Fig. 6 Normalized inventory variation of MA and Pu in the core

■—MA(U+19.1%TRU);
○—MA(Th+24%TRU);
△—Pu(U+19.1%TRU);
▽—Pu(Th+24%TRU)

3 结论

以上结果表明,ADS 采用不同的增殖材料时安全和嬗变特性会有一些的差别。相对而言,装载钚基燃料的 ADS 对超铀核素的嬗变效果较好,且在燃耗过程中的反应性和质子流强波动较小,而装载铀基燃料的 ADS 则具有更安全的多普勒效应和缓发中子有效份额。总体来看,如果需要堆芯长时间安全嬗变超铀核素,那么装载钚基燃料会更有效。

参考文献:

- [1] Prael RE, Lichtenstein H. User Guide to LCS: The LAHET Code System; LA-UR-89-3014[R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1989.
- [2] Briesmeister JF. MCNP—A General Monte-Carlo N-Particle Transport Code; LA-13709-M, Version 4C[R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [3] Croff AG. A User's Manual for ORIGEN2 Computer Code; ORNL/TM-7157[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 1980.
- [4] 李浩泉. 加速器驱动系统的中子物理学分析[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [5] Bretscher MM. Evaluation of Reactor Kinetic Parameters Without the Need for Perturbation Codes[A]. The 1997 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors[C]. Wyoming, USA: Jackson Hole, 1997. 285~295.

采用用于激励的聚焦光学器件和用于收集的聚焦单色器的 波长色散 X 射线荧光分析(XRF)系统

【公开日】2004. 11. 03 【分类号】G21K1/06 【公开号】1543653

【申请号】02816193. 9 【申请日】2002. 06. 18 【申请人】X 射线光学系统公司

【文摘】本发明提供 X 射线荧光(XRF)光谱测定系统和方法。XRF 系统包括 X 射线辐射源、布置在 X 射线辐射源和试样之间的激励光学器件,以便收集来自所述辐射源的 X 射线辐射,并将 X 射线辐射聚焦到试样上的一个焦点,以引起试样中至少一种被分析物发出荧光。该系统还包括 X 射线探测仪和收集光学器件。收集光学器件包括至少一个双曲衍射光学器件,该双曲衍射光学器件布置在试样和 X 射线探测仪之间,以便收集来自试样上的焦点处的 X 射线荧光,并将荧光 X 射线导向至少一个 X 射线探测仪。

摘自中国原子能科学研究院《核科技信息》