

文章编号: 1007-4627(2006)02-0105-06

加速器驱动快/热耦合次临界系统的概念设计*

蒋校丰¹, 谢仲生²

(1 上海交通大学核科学与系统工程系, 上海 200030;

2 西安交通大学核科学与技术系, 陕西 西安 710049)

摘要: 对加速器驱动快/热耦合次临界系统进行了概念设计研究。在该系统中, 内区的快包层和外区的热包层是相互独立的, 快、热包层之间为空腔和 B_4C 包层以实现单向耦合。快包层装以合金 $(MA + Pu)Zr$ 为燃料, 热包层初始循环装以氧化物 $(Th + Pu)O_2$ 为燃料, 平衡循环装以 $(Th + {}^{233}U + Pu)O_2$ 为燃料。 ${}^{99}Tc$, ${}^{129}I$ 和 ${}^{135}Cs$ 分别以单质、 NaI 和 $CsCl$ 的形式装入热包层。该系统具有较高的能量放大倍数、嬗变效率和燃料转换比: 系统能量放大系数不低于 320; 铀系元素 (MA) 和裂变产物 (FP) 的嬗变支持比分别为 1 个和 2 个压水堆; 热包层的燃料转换比为 0.715。

关键词: 快/热耦合; 嬗变; 能量放大; 增殖; 支持比

中图分类号: TL329+.2 **文献标识码:** A

1 引言

加速器驱动快/热耦合次临界系统 (ADFTS) 主要由加速器、散裂靶、快中子包层和热中子包层 4 部分组成, 其基本工作原理是: 加速器产生的高能

质子在散裂靶区发生散裂反应, 产生大量散裂中子驱动快包层, 使散裂中子倍增, 以产生更多的中子泄漏到次临界的热包层。因而快包层对散裂中子具有放大的作用, 相当于快中子倍增器。图 1 给出了该系统的示意图。

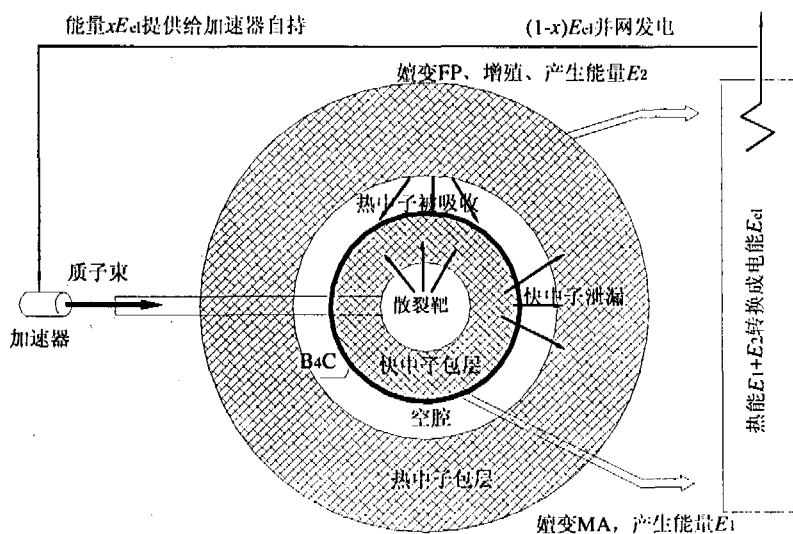


图 1 加速器驱动快/热耦合次临界系统示意图

在对 ADFTS 进行了初步性能研究^[1]的基础上, 本文提出了一种详细的概念设计方案, 即将 ADFTS

收稿日期: 2005-11-20; 修改日期: 2006-01-09

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10505014)

作者简介: 蒋校丰(1976-), 男(汉族), 浙江诸暨人, 讲师, 从事反应堆堆芯燃料管理工作; E-mail: jxf@sju.edu.cn

设计成为高效率的嬗变炉、高倍数的能量放大器和高转换比的钍-铀燃料反应堆。本文从散裂靶的设计、快包层的设计、热包层的设计以及快、热包层耦合设计 4 部分对 ADFTS 的概念设计进行详细的介绍。

2 散裂靶设计

在 ADFTS 中, 散裂靶将受到强流、高能质子束的连续轰击, 因此对散裂靶材料的要求是非常苛刻的。散裂靶分为固态和液态两种, 和固态靶相比, 液态靶在耐辐照、耐腐蚀、耐高温方面性能更为优良。本文选择熔融 Pb-Bi 合金作为散裂靶材料, 它具有优良的中子学性能, 并且可以在低温下工作, 是一种比较理想的散裂靶材料。

在本文的设计方案中, 散裂靶直径为 40 cm, 高为 78 cm, 散裂中子产生率为 30 n/p(质子能量为 1 GeV)。散裂靶位于快包层中心, 高能质子通过导管自上而下入射到散裂靶。散裂靶之外为 Pb 缓冲区, 以减少高能散裂中子对快包层的辐照损伤。

3 快包层设计

快包层需要实现以下目标: (1) 利用该包层中子富裕度大、平均能量高和包层深度次临界等特点嬗变 MA, 嬗变支持比约为 1 压水堆(PWR); (2) 利用该包层中子倍增能力强的特点, 将它作为中子放大器, 中子放大系数约为 10; (3) 为了提高快包层的中子放大能力, 要求其结构紧凑、尺寸较小; (4) 具有较长的循环长度。

3.1 快包层燃料选择

ADFTS 快包层的最主要目的是嬗变 MA, 因此首选 MA 作为快包层的核燃料。但 MA 的中子倍增能力较弱, 全部装载 MA 将使快包层的中子放大作用大大降低。为此, 本文选择 Pu 和 MA 的混合物作为快包层的核燃料。由于锆基合金燃料在高温化学处理时有很好的相容性、能满足深燃耗的要求以及更硬的快中子通量能谱, 这样的能谱可以提高 MA 的嬗变效率, 因此本文选择快包层燃料的基本形式为: $x(\text{MA} + \text{Pu})_y\text{Zr}$ 合金。

在确定 MA 和 Pu 的比例时, 主要考虑两方面因素: (1) 快包层的 MA 装载量不得过低, 否则达

不到设计所要求的嬗变支持比; (2) MA 的装载量又应当有上限, 否则将达不到设计所要求的中子放大倍数(约 10)。通过计算表明, 在本文所设计的快包层中, 25% 的 MA 和 75% 的 Pu 能够实现这些设计目标。

3.2 快包层组件设计

在本方案中, 快包层的燃料栅元在组件中呈三角形布置, 并选择 Pb-Bi 作为冷却剂。但 Pb-Bi 冷却剂的流动性较差, 而提高 Pb-Bi 冷却剂流速会降低结构材料的寿命以及增加对泵的负荷, 因此 Pb-Bi 冷却剂的流速不宜过高。根据文献[2], Pb-Bi 冷却剂流速的上限为 2.0 m/s。本文中 Pb-Bi 冷却剂流速为约 2.0 m/s。为达到所需的功率密度, 低冷却剂流速就要求燃料组件采用稀疏栅格设计, 即要求 P/D 比较大(P 为栅距, D 为燃料直径; Na 冷快堆中, $P/D \approx 1.2$)。本文参考韩国 HYPER^[3] 的经验, P/D 取为 1.48。

在系统运行过程中, 由于 Pu 和锕系核素的消耗、裂变产物的积累, 快包层的反应性将随燃耗变化, 因此为了产生恒定的热功率, 加速器的束流、功率也要作相应的调节。大幅度调节加速器功率将会对系统的运行产生不利的影响, 因此在系统运行过程中, 为了尽可能减小加速器束流、功率的调节幅度, 在燃料组件中布置可燃毒物棒。快包层燃料组件示于图 2 中, 组件及栅元参数见文献[4]。

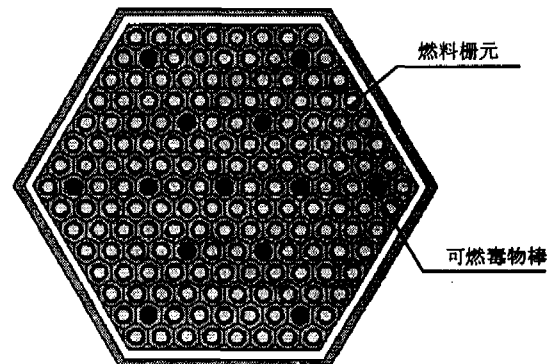


图 2 快包层组件布置图

3.3 快包层堆芯设计

由于散裂中子源的存在, 快包层的中子通量密度分布或功率分布完全不同于临界反应堆。如采取与临界反应堆相同的燃料装载方案将造成很大的功

率峰因子, 从而限制系统的功率输出, 因此需要选择合理的燃料装载方案降低快包层的功率峰因子。在本方案中, 快包层采取三区燃料布置方案, 利用改变燃料重量百分比的方法来降低功率峰因子。

图3给出了快包层和散裂靶的示意图, 表1给出了快包层各区燃料组件成分, 表2给出了快包层的堆芯参数。

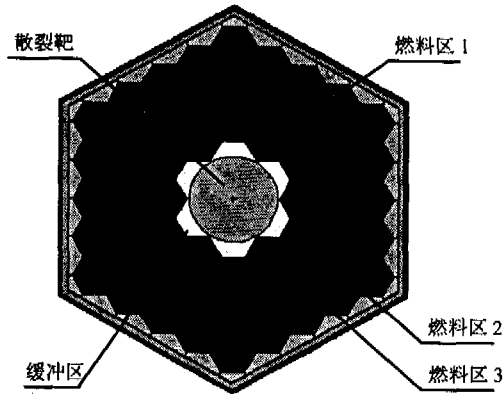


图3 快包层和散裂靶示意图

表1 快包层燃料组件成分、密度

组件类别	Zr 重量百分比(%)	MA + Pu 重量百分比(%)
1	65	35
2	60	40
3	46.7	53.3

表2 快包层堆芯参数

参数	参数值
有效增殖系数(BOL/EOL)	0.951/0.935
最大许可线功率密度/(kW/s)	~27.3
功率峰因子(BOL)	1.51
外径/高度/m	1.33/1.5
燃料组件数	54
循环长度/d	150
中子放大系数	~10
热功率/MW	~300
装载量(Pu/MA)/kg	852/284
MA 嬗变支持比/PWR	~1

注: BOL 循环初; EOL 循环末。

要载体; (2) 嬗变裂变产物, 嬗变支持比约为 2 PWRs; (3) 较高的转换比; (4) 具有比快包层更长的循环长度。

4.1 热包层组件设计

在 ADFTS 概念设计中, 在初始循环以 $(Pu + Th)O_2$ 作为热包层的燃料, 其中 Pu 为驱动燃料, 取燃料深度为 33 000 MWd/tU 的压水堆卸料中 Pu 的成分。以轻水为慢化剂和冷却剂, 为了提高热包层的转换比, 采用紧凑栅格设计, 燃料与慢化剂体积比为 1.0。在初始循环末, 热包层中有一定数量的 ^{233}U 产生, 将它回收后在平衡循环中加以利用。经过几个初始循环的 ^{233}U 的积累, 热包层可达到平衡循环, 平衡循环中以 $(Pu + ^{233}U + Th)O_2$ 为燃料。表3和图4分别给出了组件参数和组件布置图。

表3 热包层的组件及栅元参数

参数	参数值
组件对边距/cm	17.8
套管材料	HT-9
套管厚度/cm	0.3
燃料棒数	156
组件间隙/cm	0.1
可燃毒物棒数	13
燃料包壳内径/cm	0.872
燃料包壳外径/cm	1.08
包壳厚度/cm	0.068
包壳材料	Zr-4
燃料直径/cm	0.86
栅元间距/cm	1.27
冷却剂进出口平均温度(°C)	310

4.2 FP 嬗变靶组件设计

FP 嬗变靶组件是根据 FP 的核物理性质和压水堆的年产额所设计的。 ^{99}Tc 为金属单质形式并做成片状布置在嬗变靶组件的外层, 该区域具有较高的中子平均能量; NaI 布置在组件的外圈, 该区域中子平均能量有所降低; CsCl 布置在内区, 该区域中子平均能量最低; 这样设计的目的是让这 3 种裂变产物在各自的最佳能谱下嬗变。在组件中布置燃料棒是为了提高 FP 嬗变区的中子通量密度; 而水洞

4 热包层设计

热包层的设计目标是: (1) 系统能量输出的主

则起到了软化中子谱的作用。嬗变靶组件布置图如图 5 所示, 组件参数见文献[4]。

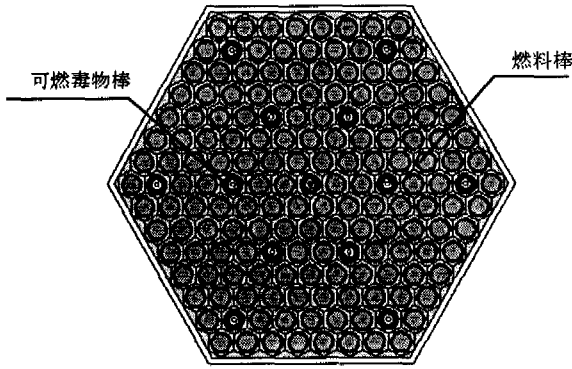


图 4 热包层燃料组件

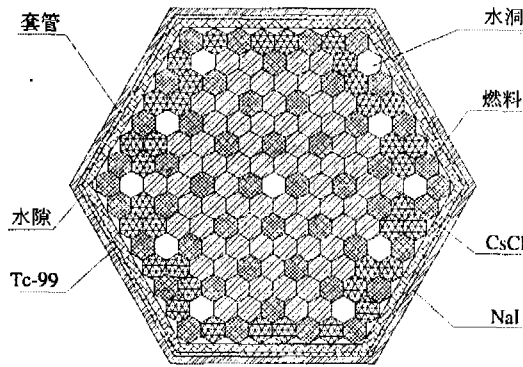


图 5 FP 嬗变靶组件的布置

4.3 热包层堆芯设计

对处于次临界状态的热中子包层来说, 快中子包层的中子泄漏提供了外中子源, 因此它的中子通量密度分布、功率分布也不同于临界热中子堆。

为了展平功率峰因子, 本文根据概念设计方案中子通量密度分布的特点, 热包层采用四区布料方案, 燃料富集度由内向外递增, 热中子包层的全局功率峰因子 $F_1 \leq 2.19$ 。表 4 给出了热包层初始循环各区燃料的富集度和密度。

表 4 热包层初始循环中各区燃料的富集度和密度

组件类别	$e(\text{Pu})(\%)$	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$
1	7.75	10.11
2	8.60	10.19
3	9.90	10.28
4	11.35	10.40

由于 FP 的嬗变效率和中子通量密度成正比, 因此 FP 嬗变靶组件布置在热包层第一区使其具有最高的嬗变效率。但计算表明, 这样的布置会降低热包层的热功率, 故选择 FP 嬗变靶组件布置在热包层的第二区。FP 嬗变靶组件共 4 个, 对称布置在热包层中(见图 6)。表 5 给出了热包层堆芯参数。

表 5 热包层的堆芯参数

系统参数	数值
有效增殖系数(BOL/EOL)	0.965/0.961
最大许可线功率密度/(kW/s)	~15
功率峰因子(BOL)	2.19
外径/高度/m	3.9/3.6
燃料组件数	248
嬗变靶组件数	4
循环长度/d	1 080
热功率/MW	~1 500
^{99}Tc 装载量/kg	305.34
^{129}I 装载量/kg	84.85
^{135}Cs 装载量/kg	130.1

为了确定热包层在平衡循环时的燃料装载方案, 首先对初始循环和平衡循环进行了计算。计算表明: 运行三个初始循环后, 将积累 ^{233}U 2 013 kg, 已经达到平衡循环中 ^{233}U 的总装载量。以下给出了热包层平衡循环方案:

燃料类型: $(^{235}\text{U} + ^{233}\text{U} + \text{Th})\text{O}_2$;

堆芯总装载量: Pu 同位素约 1 140 kg; ^{233}U 约 1 745 kg;

每个循环消耗 Pu 同位素约 815 kg, 其中易裂变同位素约 554 kg。

系统总功率的 79.8% 由 ^{233}U 产生, 20.2% 由 Pu 同位素产生。表 6 给出了平衡循环的燃料装载方案。

表 6 热包层平衡循环燃料装载量

燃料区	^{233}U 装载量/kg	Pu 同位素装载量/kg
1	307	206
2	365	237
3	465	302
4	608	395

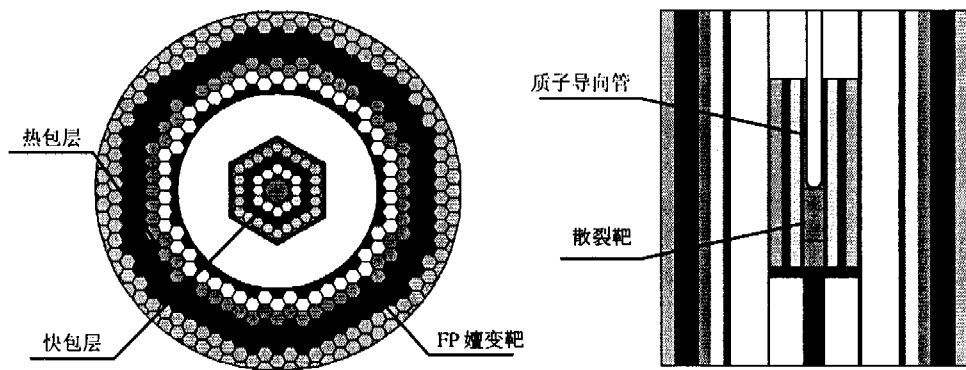


图 6 ADFTS 系统布置图
左边为 R 方向视图, 右边为 z 方向视图。

5 快、热包层耦合设计

在对 ADFTS 进行概念设计时, 从系统的安全性、经济性和设计目标出发, 必须考虑以下几点: (1) 整个系统的有效增殖系数 K_{eff} 必须小于 1, 以保证系统处于次临界状态, 这是 ADFTS 核设计中最基本的要求。但为了保证设计的安全裕度, 系统运行中, 最大的 K_{eff} 限制在 0.98 左右; (2) 快、热包层要尽量满足单向耦合条件, 以保证快包层高的 MA

嬗变效率; (3) 快包层应当具有较大的中子放大能力, 即快包层的中子放大系数不能过低; (4) 快、热包层的热功率尽可能同时达到设计许可的上限, 从而使系统具有较大的热功率输出。针对这些问题, 需要对系统的快、热包层进行耦合设计。在耦合设计中, 需要考虑中子耦合系数、中子放大系数以及快、热包层功率分配系数等参数, 限于篇幅, 本文不再赘述, 详见文献[4]。表 7 给出了耦合设计后 ADFTS 的堆芯参数, 图 6 给出了系统布置图。

表 7 ADFTS 的主要参数

	快中子包层	热中子包层	耦合包层
有效增殖系数 K_{eff} (BOL/EOL)	0.951/0.935	0.965—0.961	0.982/0.975
实际最大功率密度 (BOL)/(kW/m)	25.9	14.3	
设计最大许可功率密度/(kW/m)	~27.3	~15.0	
功率分配系数			0.2
功率峰因子 (BOL)	~1.51	~2.19	
中子放大系数 (BOL)	10.2		
热功率/MW	~300	~1 500	1 800

6 结论

本文提出了一种详细的加速器驱动快、热耦合次临界系统概念设计方案, 并进行了平衡循环方案中子学计算。计算表明, 该系统具有较高的能量放大倍数、嬗变效率和燃料转换比。系统总功率为 1 800 MW, 加速器的功率为 3.3—5.5 MW, 系统的

能量放大系数不低于 320; 系统每年可嬗变 MA 36.1 kg、嬗变支持比约为 1 PWR, 可嬗变 FP 85.7 kg、嬗变支持比约为 2 PWRs; 热包层的转换比为 0.715。因此该系统能够较好地解决核能利用中所面临的安全性、核废物处置和可持续发展等主要问题。

参 考 文 献:

- [1] 蒋校丰, 谢仲生. 加速器驱动快-热耦合次临界系统的性能研究. 核动力工程, 已录用. 34: 42.
- [2] Adamov E, *et al.* Nuclear Engineering and Design, 1997, 173: 143.
- [3] Won S Park, *et al.* Journal of the Korean Nuclear Society, 2002, 2005.
- [4] 蒋校丰. 加速器驱动次临界系统中子学计算方法的研究及快-热耦合系统的概念设计. 西安: 西安交通大学博士学位论文, 2005.

Conceptual Design of Accelerator Driven Fast/Thermal Spectrum Subcritical System*

JIANG Xiao-feng¹, XIE Zhong-sheng²

(1 Department of Nuclear Science and System Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2 Department of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Accelerator driven coupled fast/thermal subcritical system is conceptually designed. In the system, the inner/fast blanket and the outer/thermal blanket are separated each other by large vacuum and B₄C coating for one-direction coupling. The metal type fuel (MA + Pu)Zr is loaded into the fast blanket. The oxide type fuels (Th + Pu)O₂ and (Th + ²³³U + Pu)O₂ are loaded into the thermal blanket during the initial cycle and the equilibrium cycle, respectively. ⁹⁹Tc, ¹²⁹I and ¹³⁵Cs are loaded respectively in the form of pure technetium metal, sodium iodide and cesium chlorine into the thermal blanket. The system has good transmutation efficiency, high energy amplification factor and good fuel conversion ability: the energy amplification factor is above 320; the transmutation support ratios of MA and FP are about 1.0 and 2.0 PWRs respectively; the fuel conversion ratio in the thermal blanket is about 0.715.

Key words: coupled fast/thermal spectrum; transmutation; energy amplification; multiplication; support ratio

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10505014)