文章编号:1673-0062(2009)01-0001-05

# 三束流驱动 ADS 次临界反应堆堆芯初步设计

# 于 涛,李小华,谢 芹

(南华大学 核科学技术学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:在"启明星-1"实验装置的设计基础上,设计了三束流驱动 ADS 次临界反应 堆堆芯的布置方案,计算并比较了三束流驱动和单束流驱动 ADS 次临界堆内径向与轴 向中子通量密度分布.结果表明,三束流驱动 ADS 的次临界反应堆的布置方案通过调 整源点位置能降低堆内轴向功率形状因子,能够有效的展平堆内功率径向分布. 关键词:三束流驱动;次临界反应堆堆芯;"启明星-1"实验装置;中子通量密度 中图分类号:TL328 文献标识码:B

# **Preliminary Design of Sub – critical Reactor Core for Accelerator Driven System with Three Proton Beams**

## YU Tao, LI Xiao-hua, XIE Qing

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Based on the design of China ADS "Venus -1" assembly, the sub - critical reactor core driven by three proton beams is designed and the compared result of radial and axial neutron flux density distribution driven by three and a single beam is given in this paper. Calculated result shows that this design can decrease the axial power shape factor by modulating source location and the core power distribution should be smoothed effective. Key words: three proton beams driven; sub - critical reactor core; "Venus -1" assembly; neutron flux density

ADS 是加速器驱动次临界反应堆系统的简称<sup>[1]</sup>,包括中能强流质子加速器、散裂靶和次临界反应堆.目前设计的(ADS)大多采用单管束驱动次临界反应堆.德国 Forschungszentrum Karlsruhe (FZK)研究院首先提出了三束流驱动次临界核能系统的概念<sup>[2]</sup>.以中国设计的 ADS 次临界系

统启明性 1#装置为研究对象,分别对三束流和单 束流驱动 ADS 次临界反应堆中子通量分布进行 了计算.结果表明三束流驱动次临界反应堆具有 展平堆内功率分布的特点,通过调整源区铅靶上 端顶点和源点的位置能减小堆内轴向功率偏移, 改善了由于单束流驱动所造成的 ADS 次临界反

收稿日期:2009-02-17

基金项目:国家"973"计划基金资助项目(2007CB209900)

作者简介:于 涛(1972-),男,山东乳山人,南华大学核科学技术学院副教授,博士后.主要研究方向;反应堆物理.

应堆功率分布不均匀的缺点.

## 1 三束流驱动次临界反应堆堆芯设计

### 1.1 堆芯设计方案

三束流驱动 ADS 次临界反应堆堆芯是对 Rubia C 等人提出来的能量放大器概念的进一步发 展.本研究所设计的三束流驱动系统由同一台加 速器引出三根质子束管并导入次临界反应堆堆 芯,其堆芯由三个 Pb 散裂靶区、快区、热区、反射 层和屏蔽层组成,轴向剖面图如图 1 所示.



 1. 屏蔽层 2. 源区束管真空部分 3. 热中子能谱区(简称热区)
 4. 快中子能谱区(简称快区) 5. 源区含铅靶束管 6. 反射层
 图 1 三束流驱动 ADS 堆芯轴向结构图
 Fig. 1 Axial schematic configuration of ADS by three proton beams

#### 1.2 堆芯设计参数

本设计的堆芯尺寸及材料参数取自启明星 – 1#<sup>[3]</sup>.取反应堆中心为坐标原点,在快区以*XY*平 面坐标(-10,0)、(-5,8.66)、(-5,-8.66) 为中心从三个位置各拔出7根燃料元件,放置一 个正六边形铝管作为质子束源区(单位为 cm). 源区的坐标原点上方从0 cm 到 90 cm 为质子束 管区,源区的坐标原点下方从0 cm 到 – 35 cm 为 铅靶区,铝管内层与外层内切圆直径  $d_{\rm h}$ 、 $d_{\rm h}$ 分别 为4.85 cm、5.83 cm.堆芯快区燃料棒栅距为 2.50 cm,燃料棒为 250 根.分别选取了选取 9、 10、10.8、11、12、13、15 mm 的热区栅距对  $k_{\rm eff}$ 进行 计算,结果如表1 所示.

考虑到减轻加速器负担和反应堆运行安全两 方面的问题,选取最佳的热区燃料栅距为 1.08 cm,对应的热区燃料棒根数为2700根,热

表 l kett 计算结果					
Table 1      Keff calculation result					
栅距 /mm	燃料棒 根数/根	热区与反射层边界 的内切圆直径/cm	k <sub>eff</sub> 值		
9	3 060	64.70	0.768 09		
10	2 880	69.00	0.904 94		
10.8	2 700	71.60	0.965 03		
11	2 700	72.20	0.982 27		
12	2 520	74.00	1.020 71		
13	2 340	75.40	1.038 19		
14	2 250	80.00	1.054 05		
15	2 160	83.00	1.054 92		

### 1.3 堆芯模型计算

区厚度为15.00 cm.

MCNP 程序中的重复结构具有用一次描述在 几何中出现多次的任意结构的栅元,实现对出现 多次的任意结构栅元进行描述,减少用户输人数 据量和由于大量重复结构问题所需的计算机内 存.利用 MCNP 程序的 universe 和 fill 重复结构卡 对整个反应堆堆芯进行了具体描述,堆芯整体径 向置、源区束管及快区、热区燃料元件的布置如图 2 所示.

#### 1.4 堆内燃料坐标的确定

表 2 为所设计的次临界反应堆堆芯快区所有 燃料棒中心在 XY 平面的坐标与燃料所处行、列 的关系.

表 2 快区燃料棒坐标与行、列数的关系

Table 2	Relationship of	thermal fuel r	ow and tier
r <sub>n</sub>	$y_n/cm$	$x_m/cm$	$x_k/cm$
1	2.16	2.5	1.25
2	4.33	5	3.75
3	6.95	7.5	5.25
4	8.66	10	7.75
5	10.83	12.5	10.25
6	12.99	15	12.75
7	15.16	17.5	15.25
8	17.32	20	17.75
9	19.49	22.5	20.25
10	21.65	25	22.75

表 2 中  $r_n$  为快区燃料距反应堆中心的行列 数; $y_n$  为燃料沿 y 方向离开中心行数为 n 时的纵 坐标值; $x_m$  和  $x_k$  为当燃料沿 y 方向离开中心行数 n 为偶数和奇数时, 且沿 x 方向离开中心列数为 n 的横坐标值. 采用同样的原理得出热区 2 700 根 燃

燃料棒的坐标值.



a. 堆芯整体径向布置图 b. 快区燃料及束管布置图 c. 快、热区及快热交界处布置图 d. 源区含铅靶束管图
 1. 屏蔽层 2. 热区 3. 反射层 4. 快区 5. 源区 6. 热区燃料 7. 快热交界处圆柱形计数区
 8. 快区燃料 9. 源区六角形铝框 10. 源区铅靶

图 2 三束流 ADS 堆芯径向结构图

#### Fig. 2 Radial schematic configuration of ADS driven by three proton beams

# 2 三束流驱动次临界反应堆中子通 量分布计算与分析

### 2.1 中子通量径向分布计算与分析

用重复栅元计数卡对中子通量进行计数,格 式为  $F4: N((c_1, c_2) < c_3[I_1 \cdots I_2] < c_4)$ . 式中:  $(c_1c_2)$ 代表燃料棒与包壳, $c_3[I_1 \cdots I_2]$ 代表燃料与 包壳在六棱柱栅元中的填充顺序, $c_4$ 代表堆芯. 将 三个束管源区作为单独的计数区域来进行计数, 在快热交界处,设置了 120 个半径为 5.83 cm 的 圆柱形计数栅元,此栅元内的材料与快热交界处 的材料均为聚乙烯.

取单束流驱动 ADS 堆芯的源点位置在(0,0, 0),三束流驱动 ADS 堆芯的三个源点在坐标为 (-10,0,0)、(-5,8.66,0)、(-5,-8.66,0)处 (单位为 cm).将燃料坐标和对应的中子通量归 一化数据输入到 origin7.5 软件,得到单束流与三 束流驱动堆芯中子通量径向分布分别为如图 3 和 图 4 所示.







radial normalization neutron flux distribution in ADS driven by a single proton beam

图 4 三束流驱动 ADS 堆内中子通量归一化分布图 Fig. 4 Unitary neutron distribution sketch of ADS core driven by three proton beams

从计算结果显示:单束流 ADS 堆内中子通量 归一化分布最大值为9.71E-03,三束流 ADS 堆 内最大中子通量归一化分布值为5.36E-03.三 束流 ADS 的最大中子通量 $\phi_{max3}$ 比单束流 ADS 的 板,面本1要小,而平均中子通量 $\phi_3$ 比单束流 ADS 的 板,要大,三束流驱动的 ADS 堆芯展平了堆内的中 子通量分布.可见,与单束流驱动相比,三束流驱 动 ADS 堆芯设计具有展平反应堆内功率分布,降 低反应堆内热点因子  $F_p^N = \frac{P_{max}}{p} = \frac{\phi_{max}}{\phi}$ ,提高了 ADS 堆芯安全性的优点.

2.2 中子通量轴向分布的计算

MCNP 程序中的 FS 卡允许用户把一个栅元或 曲面分成若干段来记数,其优点在于不必专为记数 设置额外的栅元.本设计在高度为 70 cm 的活性区 域内沿轴向方向引入与 z 轴垂直的 69 个平面 s<sub>1</sub>s<sub>2</sub> …s<sub>69</sub>,在输入文件计数卡 F4: n c 后面写上 Fs4 s<sub>1</sub>s<sub>2</sub>…s<sub>69</sub>,在栅元 C 上的记数将被 Fs4 卡分成 70 段,再选取每一段的中心为轴向坐标值.

取堆芯高度方向为坐标横轴 Z,反应堆中心 为 Z 坐标的原点,正方向向上;堆芯中子通量轴 向归一化数据作为纵坐标轴,得到次临界反应堆 芯中子通量的轴向分布如图 5 所示.





图 5 源点位于中心的 ADS 堆内中子通量轴向归一化分布图 Fig. 5 Axial unitary neutron distribution sketch of ADS with centric source

从计算结果可以看出,三束流驱动 ADS 堆芯 中子通量轴向分布情况与与单束流相似,但由于 三束流 ADS 堆芯含有三处散裂中子源,单束流 ADS 只含有一处散裂中子源,中子通量轴向分布 在数值上略大一些.

设计初源点的位置均置于 Z = 0 cm 处,其下方 为铅靶,上方为真空区域,加速器质子打到铅靶后 发生的散裂反应产生的高能中子大部分均在 Z = 0 cm的下方,因此,堆芯中子通量的轴向分布情况 并不对称,而是沿堆芯高度方向向下偏移了约5 cm 的距离.这种中子通量分布的不对称性,会导致堆 内出现较大的轴向功率分布形状因子<sup>[4]</sup>(轴向偏 移) $AO = \frac{P_v - P_p}{P_v + P_p} \times 100\%$ ,式中  $P_v$ 堆芯上半部功 率/W, $P_p$ 堆芯下半部功率/W.所以对初始方案进 行适当调整,即将束管中铅靶顶端位置由 Z = 0 cm 上移至 Z = 5 cm 处.如图 6 所示,单束流驱动 ADS 堆芯源点位置上移置至(0,0,5)(单位 cm),三束流



图 6 调整源点后的 ADS 堆内中子通量轴向归一化分布图 Fig. 6 Axial unitary neutron distribution sketch of ADS with modulated source

驱动 ADS 堆芯三个源点取坐标为(-10,0,5)、 (-5,-8.66,5)、(-5,8.66,5)(单位 cm)处的 堆内中子通量轴向分布见图 6,这样设计降低反 应堆内轴向功率分布轴向偏移 AO.

## 3 结论

以现有"启明星——1#"次临界反应堆原理 验证装置为设计参数,设计了三束流驱动 ADS 次 临界系统堆芯;并对单束流与三束流驱动 ADS 堆 内的中子通量径向和轴向分布进行了计算与比较 分析.计算结果表明,该三束流驱动 ADS 堆芯可 以具有展平功率分布,降低堆内热点因子;同时通 过对堆芯中的靶上端顶点及源点位置的调整,减 小轴向功率分布因子 AO,提高 ADS 次临界反应 堆的运行安全性.

#### 参考文献:

- [1] Schikorr W M. Assessments of the kinetic and dynamic transient behavior of sub critical systems (ADS) in comparison to critical reactor systems Institute for Reactor Safety[J]. Nuclear engineering and design, 2001, 210 (29).95 123.
- [2]于 涛.加速器驱动次临界系统(ADS)束流瞬变动 态响应的微机仿真研究[D].北京:中国原子能科学 研究院,2005.
- [3] 史永谦,夏 普,罗璋琳,等. ADS 次临界实验装置——启明星 1#[J]. 原子能科学技术,2005,39
  (5):447-450.
- [4] 桑维良,张建民. 压水堆控制与保护监测[M]. 北京: 原子能出版社,1993.