

分群结构对 IHNI - 1 堆动态参数 计算结果的影响研究

张 良¹, 赵柱民¹, 江新标¹, 陈 伟¹, 周永茂²

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 中国核工业集团中原对外工程有限公司, 北京 100191)

[摘要] 基于 WIMS 和 CITATION 程序的计算结果, 编制了动态参数计算程序 CKPWC (calculating kinetic parameters based on WIMS and CITATION), 对医院中子照射器 I 型堆 (in-hospital neutron irradiator mark 1 reactor, IHNI - 1) 的动态参数计算进行了研究。首先使用 WIMS 计算出均匀化栅元截面以及 69 群通量, 再使用 CITATION 进行四群扩散计算, 最后编制动态参数计算程序, 计算了 IHNI - 1 动态参数 (缓发中子有效份额 β_{eff} 和中子代时间 Λ)。经过比较研究发现, 分群结构对动态参数的计算结果有很大的影响。给出了计算 IHNI - 1 缓发中子份额和中子代时间的最佳四群分群结构。使用文章中的最佳分群结构思想对西安脉冲堆动态参数进行了验证计算, 计算结果与设计值符合一致, 说明给出的 IHNI - 1 动态参数计算结果具有一定的可信性。

[关键词] 医院中子照射器 I 型堆; 动态参数; 缓发中子有效份额; 中子代时间

[中图分类号] TL329.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009 - 1742(2012)08 - 0047 - 04

1 前言

医院中子照射器是通过放出超热中子束, 利用硼中子俘获治疗恶性肿瘤的小型反应堆, 它主要布置在城市的医院中, 其安全性至关重要。动态参数 (缓发中子有效份额和中子代时间) 是反应堆动态方程的基本参数, 因此也是反应堆安全分析的关键参数。文章使用 CITATION 和 WIMS 的计算结果, 编制程序 CKPWC (calculating kinetic parameters based on WIMS and CITATION), 选择最佳分群结构, 计算出 IHNI - 1 (in-hospital neutron irradiator mark 1 reactor, 医院中子照射器 I 型堆) 的动态参数。

2 IHNI - 1 堆芯描述

IHNI - 1 的装置总体布局采用罐—池结构, 燃料元件采用烧结 UO_2 燃料芯体, 包壳采用锆 - 4, 包壳外径 5.1 mm, 芯体上、下端塞采用锆 - 4 材料; 燃料元件采用同心圆排列, 堆芯由中心控制棒栅元和

10 圈燃料栅元组成, 共有 351 个栅位, 中心控制棒栅元外围有锆 - 4 导管。

燃料元件由上、下栅板定位, 上、下栅板通过 5 根锆 - 4 拉杆组成燃料元件鸟笼架。采用金属铍作反射层, 轻水作慢化和冷却剂, 采用自然循环冷却方式; 反应堆燃料组件位于密闭的堆容器内; 堆容器悬挂在深水池内; 在堆芯的相对两侧分别引出热中子束流和超热中子束流用于硼中子俘获治疗。

3 缓发中子有效份额 β_{eff} 和中子代时间 Λ 的计算原理

文章采用 ENDF/B VII.0 软件^[1] 评价核数据库中的 6 组基本缓发中子数据, 首先计算出每一组缓发中子的有效份额, 之后累加, 得到总的 β_{eff} , 计算公式^[2] 为:

$$\beta_{\text{eff}, i} = \beta_i \sum_j \sum_g \varphi_{g,j}^* \chi_{dg,i} \sum_{g'} (v \Sigma_f)_{g',j} \varphi_{g',j} V_j / D \quad (1)$$

$$D = \sum_j \sum_g \varphi_{g,j}^* \chi_g \sum_{g'} (v \Sigma_f)_{g',j} \varphi_{g',j} V_j \quad (2)$$

总的缓发中子有效份额计算公式为:

[收稿日期] 2012 - 04 - 20

[作者简介] 张 良 (1989—), 男, 安徽怀远县人, 硕士研究生, 研究方向为核技术及应用; E-mail: winter@mail.ustc.edu.cn

$$\beta_{\text{eff}} = \sum_i \beta_{\text{eff},i} \quad (3)$$

中子代时间计算公式^[3]为:

$$\Lambda = \left(\sum_j \sum_g \varphi_{g,j}^* \varphi_{g,j} V_j / \nu_g \right) / D \quad (4)$$

式(1)~(4)中: β_i 为第 i 组缓发中子的基本份额; $\varphi_{g,j}^*$ 为第 j 个体积块第 g 群的中子价值; $\varphi_{g',j}$ 为第 j 个体积块第 g' 群的中子通量密度; $(\nu \Sigma_f)_{g',j}$ 为第 j 个体积块第 g' 群的产生截面; $\chi_{dg,i}$ 为缓发中子裂变谱; χ_g 为瞬发中子裂变谱; V_j 为第 j 个体积块的体积; ν_g 为第 g 群平均速度; D 为所有中子总价值; $\varphi_{g,j}$ 为第 g 群第 j 个体积块的中子通量密度。

4 不同分群结构对计算结果的影响

4.1 IHNI-1 的缓发中子有效份额计算

计算缓发中子有效份额对分群有以下要求^[3]:

1) 需要准确计算出中子通量和中子价值,要求在快区、共振区、热区都有分群。

2) 在缓发中子份额大的区域要单独分群。

因此在快区分两群,共振区和热区各分一群,选用以下两种分群方法。方法一: 0.821 ~ 10 MeV、0.009 118 ~ 0.821 MeV、4 eV ~ 0.009 118 MeV、0 ~ 4 eV。方法二: 1.353 ~ 10 MeV、0.009 118 ~ 1.353 MeV、4 eV ~ 0.009 118 MeV、0 ~ 4 eV。作为对比,再使用第三种分群方法。方法三: 9 118 eV ~ 10 MeV、4 ~ 9 118 eV、0.625 ~ 4 eV、0 ~ 0.625 eV。

3 种方法中缓发中子和瞬发中子在各能区份额分别见表 1 和表 2,方法一和方法二的缓发中子主要在第二能群,瞬发中子主要在第一能群和第二能群,方法三的缓发和瞬发中子均主要在第一能群。

表 1 缓发中子在各能群份额

Table 1 Delayed neutron fraction in every energy group

分群方法	第一能群 份额	第二能群 份额	第三能群 份额	第四能群 份额
方法一	0.184 613 6	0.810 189 6	0.005 194 48	0.000 002 28
方法二	0.044 568 6	0.950 234 7	0.005 194 48	0.000 002 28
方法三	0.994 803 28	0.005 194 5	0.000 001 92	0.000 000 36

表 2 瞬发中子在各能群份额

Table 2 Prompt neutron fraction in every energy group

分群方法	第一能群 份额	第二能群 份额	第三能群 份额	第四能群 份额
方法一	0.753 074 87	0.246 653 6	0.000 395 9	3.6×10^{-9}
方法二	0.572 737 28	0.426 990 3	0.000 395 9	3.6×10^{-9}
方法三	0.999 727 72	0.000 395 9	3.4×10^{-9}	2.3×10^{-10}

IHNI-1 中 3 种分群方法的计算结果分别见表 3、

表 4 和表 5。由表 3 ~ 表 5 可知,分群方法三的缓发中子有效份额计算结果相对基本份额变化很小。缓发中子有效份额是缓发中子总价值与所有中子总价值的比值再乘以缓发中子基本份额。在热堆中,能量越高,中子裂变截面越低,泄漏越多,中子价值越低。缓发中子具有相对低的能量,因此它的价值比瞬发中子大。分群方法三中,第一群的缓发中子份额占到了 99.5%,缓发中子几乎全部分到第一能群,即价值最低的能群,没有考虑缓发中子能量低、价值大的特点,因此,这种方法的计算结果和它的基本份额差别应当是很小的,文章的计算结果验证了这一点。相比之下,方法一和方法二的缓发中子有效份额相对于基本份额有较大的修正。方法一和方法二都充分考虑了缓发中子价值大的特点,它们的计算结果仅有 0.8% 的差别。由于方法二中第一群的缓发中子过少,文章推荐方法一的计算结果。

表 3 分群方法一计算结果

Table 3 Calculated result of energy group structure 1

缓发中子组	基本份额	有效份额	衰变常数/ s^{-1}
1	0.000 207 97	0.000 245 36	0.012 490 56
2	0.001 082 19	0.001 267 77	0.031 824 06
3	0.001 049 28	0.001 247 45	0.109 375 3
4	0.002 989 86	0.003 451 01	0.316 989 8
5	0.000 868 37	0.001 011 92	1.353 983
6	0.000 307 02	0.000 356 67	8.636 377
总份额	0.006 504 69	0.007 580 18	—

表 4 分群方法二计算结果

Table 4 Calculated result of energy group structure 2

缓发中子组	基本份额	有效份额	衰变常数/ s^{-1}
1	0.000 207 97	0.000 242 33	0.012 490 56
2	0.001 082 19	0.001 261 73	0.031 824 06
3	0.001 049 28	0.001 221 54	0.109 375 3
4	0.002 989 86	0.003 440 46	0.316 989 8
5	0.000 868 37	0.000 999 22	1.353 983
6	0.000 307 02	0.000 351 99	8.636 377
总份额	0.006 504 69	0.007 507 86	—

表 5 分群方法三计算结果

Table 5 Calculated result of energy group structure 3

缓发中子组	基本份额	有效份额	衰变常数/ s^{-1}
1	0.000 207 97	0.000 208 08	0.012 490 56
2	0.001 082 19	0.001 085 69	0.031 824 06
3	0.001 049 28	0.001 051 57	0.109 375 3
4	0.002 989 86	0.002 993 73	0.316 989 8
5	0.000 868 37	0.000 869 05	1.353 983
6	0.000 307 02	0.000 307 18	8.636 377
总份额	0.006 504 69	0.006 515 29	—

4.2 IHNI-1 中子代时间计算

计算中子代时间对分群有以下要求^[3]:

1)需要准确计算出中子通量和中子价值,在快区、共振区、热区都有分群。

2)在对中子代时间贡献大的热区,要多分群。

分群方法为快群和共振区各分一群,热区分两群,采用以下两种分群方法。方法一:0.009 118 ~ 10 MeV、4 eV ~ 0.009 118 MeV、0.625 ~ 4 eV、0 ~ 0.625 eV;方法二:0.001 425 ~ 10 MeV、1.15 eV ~ 0.001 425 MeV、0.14 ~ 1.15 eV、0 ~ 0.14 eV。

中子代时间计算结果见表6。

表6 中子代时间计算结果

Table 6 Calculated result of neutron generation time

分群方法	中子代时间/s
方法一	$4.788\ 463\ 70 \times 10^{-5}$
方法二	$5.004\ 008\ 96 \times 10^{-5}$

由表6可知,两种分群方法的结果有约4%的差别。分群方法一是一般的热堆四群分群方法,方法二是针对IHNI-1的能谱分布(见图1)划分的。文章推荐分群方法二,选择方法二的原因如下。

1)两种方法中,第一群由于速度非常大,对中子代时间的贡献可以忽略不计,为了在后面三群中划分得尽可能详细,第一群在快群范围内应尽可能朝下划分,因此,方法二将第一群的下边界从方法一的9 118 eV扩展到1 425.1 eV。应注意, ^{235}U 的共振区主要在1 000 eV以下,划分到1 425.1 eV不影响共振区的计算。

2)第二群对中子代时间的贡献也很小,如果第二群按方法一只划分到WIMS第27群,由于第三群中WIMS第33群以后的通量非常低(见图1),速度的计算是由通量和伴随通量作权重的,这就就会导致第三群的速度主要由WIMS的28~32群决定,33群以后对计算结果的贡献就很小。实际上,由于33群以后的速度低,它对中子代时间的贡献是比较大的,这样划分不合理。因此,在方法二中将第二群和第三群分别划分为19~33、34~55。

3)方法一中将第四群划分为45~69。由图1可知44~55群的通量很小,但是由于它们的速度比56~69群的大,它们会使第四群计算出的平均速度变大,中子代时间减小。因此,应将第四群划分为56~69。

5 最优分群方法的验证

文献[3]中给出了西安脉冲堆的能谱分布^[3],它和IHNI-1的WIMS69群能谱分布十分相似,因

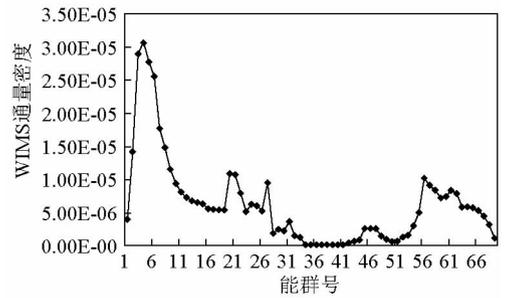


图1 IHNI-1堆芯WIMS 69群中子通量密度(对能量归一化)

Fig. 1 WIMS 69-group flux density of IHNI-1 core (normalization based on energy)

此文章使用IHNI-1的各种分群方法计算西安脉冲堆的动态参数,以验证分群方法是否准确。计算结果见表7和表8。

表7 西安脉冲堆缓发中子有效份额计算结果

Table 7 Result of effective delayed neutron fraction of Xi'an Pulsed Reactor

分群方法	缓发中子有效份额	文献值 ^[4]	相对误差/%
方法一	0.007 190 62	0.007 194	0.047
方法二	0.007 137 27	0.007 194	0.714
方法三	0.006 511 69	0.007 194	9.484

表8 西安脉冲堆中子代时间计算结果

Table 8 Result of neutron generation time of Xi'an Pulsed Reactor

分群方法	缓发中子有效份额	文献值 ^[4]	相对误差/%
方法一	$3.145\ 311\ 25 \times 10^{-5}$	3.5×10^{-5}	10.134
方法二	$3.522\ 824\ 82 \times 10^{-5}$	3.5×10^{-5}	0.652

由表7和表8可见,使用文章推荐的分群方法(表7分群方法一,表8分群方法二)计算出的西安脉冲堆的缓发中子有效份额和中子代时间与设计值符合一致,证明了推荐方法的合理性。

6 结语

使用WIMS程序计算IHNI-1均匀化栅元截面和69群通量,使用CITATION程序计算四群通量和伴随通量。利用WIMS和CITATION程序的计算结果以及ENDF/B VII.0库中的缓发中子数据,编制动态参数计算程序CKPWC,计算医院中子照射器I型堆的动态参数。给出了计算IHNI-1动态参数的最佳四群分群方法,并在西安脉冲堆中加以验证,结果表明,采用推荐分群方法的计算结果和脉冲堆设计值符合一致。

参考文献

- [1] Members of the Cross Sections Evaluation Working Group. ENDF-6 formats manual[R]. Upton, New York, USA: Brookhaven National Laboratory, 2009.
- [2] 李泽华. 应用三维节块法程序计算动态参数[J]. 核科学与工程, 1997, 17(3):277.
- [3] 赵柱民, 张良, 江新标, 等. 基于 WIMS 和 CITATION 程序的西安脉冲堆动态参数计算[R]. 西安: 西北核技术研究所, 2011.
- [4] 袁建新, 魏加祥, 赵柱民, 等. 西安脉冲反应堆最终安全分析报告[R]. 西安: 西北核技术研究所, 2006.

The effect of group structure on calculation of kinetic parameters of in-hospital neutron irradiator mark 1 reactor

Zhang Liang¹, Zhao Zhumin¹, Jiang Xinbiao¹,
Chen Wei¹, Zhou Yongmao²

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 2. China Zhongyuan Engineering Corporation, China National Nuclear Corporation, Beijing 100191, China)

[Abstract] The kinetic parameters of in-hospital neutron irradiator mark 1 (IHNI-1) reactor, effective delayed neutron fraction and neutron generation time are calculated by CKPWC (calculating kinetic parameters based on WIMS and CITATION) program based on the calculated results of WIMS and CITATION. The cell homogenized cross section and 69-group flux density are calculated by WIMS. Flux density and adjoint flux density are obtained based on 4-group diffusion calculation using CITATION. The kinetic parameters are calculated by CKPWC based on the results of WIMS and CITATION. The analysis based on the calculation indicates that the energy group structure has a significant effect on the result of kinetic parameter. An appropriate energy group structure is given in this paper. To verify the accuracy of the method, Xi'an Pulsed Reactor is benchmarked and the result is corresponded to its design value.

[Key words] IHNI-1 reactor; kinetic parameter; effective delayed neutron fraction; neutron generation time