

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0211-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0211

# 三维离散纵标程序在 CAP1400 核电厂堆内 构件发热率计算中的应用

丁谦学, 王梦琪, 黎辉, 梅其良

上海核工程研究设计院, 上海, 200233

**摘要:** 采用三维离散纵标 (SN) 方法程序 TORT 计算了 CAP1400 核电厂堆内构件发热率, 并将计算结果与蒙特卡罗 (MC) 方法程序 MCNP 以及两维 SN 方法程序 DORT 计算结果进行比较。在针对反应堆模型进行屏蔽设计时, 需求解固定源问题, 应用西屋公司开发的 SORCERY 程序将 pin by pin 堆芯功率分布转换为三维源分布。由于 CAP1400 反应堆模型较大, 固定源的制作会消耗大量的计算机硬件资源, 同时也会超出 SORCERY 程序本身的计算规模限制, 为此开发了外源制作辅助程序 PSOR, 使 TORT 程序适用于 CAP1400 等大规模工程问题的计算。

**关键词:** 堆内构件发热率; 离散纵标方法; 蒙特卡罗方法

**中图分类号:** TL48 **文献标志码:** A

## Application of a 3D Discrete Ordinates Program in Heating Rate Calculation for CAP1400 Nuclear Power Plant Internals

Ding Qianxue, Wang Mengqi, Li Hui, Mei Qiliang

Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai, 200233, China

**Abstract:** The heating rate of CAP1400 reactor internals is calculated with 3D discrete coordinate (SN) program (TORT), and the results are compared and verified with the results of MCNP and DORT. The problem solved in the reactor shielding design is fixed-source problem, SORCERY (developed by the Westinghouse company) is used to transfer the core power distribution (pin by pin) to 3D source distribution. Because of the large CAP1400 reactor model, a great deal of computer resources will be expended in the production of 3D fixed source, and the limit of array dimensions in SORCERY will be exceeded, so, another auxiliary program PSOR is developed. And TORT could be used in the CAP1400 large scale problem.

**Key words:** Reactor internal heating rate, Discrete Ordinates method, Monte Carlo method

### 0 前言

反应堆堆内构件距离堆芯很近, 在电厂运行期间, 会受到较强的中子/ $\gamma$  射线照射, 尤其在电厂出现异常工况致使堆芯功率分布出现较大波动时, 堆内构件将会受到较大的热冲击, 进而产生损伤, 影响反应堆安全。而发热率分布则是进行堆内构件热应力分析等的重要参数之一。

进行发热率计算的程序主要包括确定论方法程序 (DORT/TORT<sup>[1]</sup>等) 和概率论方法程序 (MCNP 等)。目前, 在工程上应用较多的 MCNP 程序计算结果较为精确, 但计算效率低, 且由于计数卡片数量所限, 无法给出堆内构件任意部位的发热率分布; 两维离散纵标 (SN) 方法程序 DORT 无法针对几何结构复杂的堆内构件进行较

收稿日期: 2014-09-20; 修回日期: 2014-10-20

作者简介: 丁谦学 (1984—), 男, 工程师, 现从事反应堆源项与辐射屏蔽设计与研究工作

为精确的三维建模,在建模方面引入了较大近似;由于计算机性能限制,三维 SN 程序 TORT 在国内核电厂工程设计中的应用相对较少。

本文采用 TORT 程序对 CAP1400 核电厂进行堆内构件发热率计算分析。另外编制了辅助模块进行固定源的制作及结果的后处理,使其可以适应 CAP1400 大规模工程问题的计算。将计算结果与 MCNP 程序计算结果进行比较,可作为后续堆内构件热应力分析等的依据。

## 1 计算流程

使用三维 SN 方法进行堆内构件发热率分布的计算流程如图 1 所示。其中,BUGLE-96 数据库<sup>[2]</sup>是基于 ENDF/B- 制作的 47 群中子、20 群光子的 P5/P7 截面库,含有大部分核素的截面及响应函数;GIP 程序可以接受以核素组织的微观截面,并将其转换为以能群组织的混合物的宏观截面供 TORT 程序使用;SORCERY 程序可以将堆芯的 pin 功率分布转换为 TORT 程序计算所需的三维圆柱坐标或正交直角坐标网格分布的固定源分布,由于受程序数组容量及计算机内存限制,该程序无法处理大规模的三维问题,为此作相关处理:仅使用该程序计算堆芯活性区的固定源分布,并编制计算模块 PSOR,对计算得到的堆芯活性区外源分布进行进一步处理,并最终生成 CAP1400 计算所需的全模型外源分布。

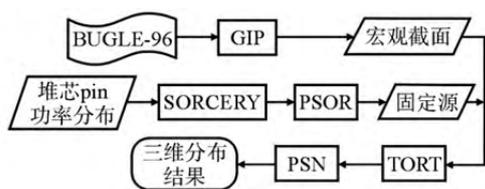


图1 三维离散纵标程序计算流程

Fig. 1 Flow Chart of 3D Discrete Coordinate Program

基于以上工作,使用 TORT 程序进行三维离散纵标中子/光子输运计算,得到几何系统内按网格分布的各能群中子/光子注量率分布。

实际工程模型计算时,结果文件非常大(达到 1 Gb 左右),并造成后续结果处理困难且容易出错。为此,编制后处理模块 PSN,针对 TORT 程序输出的二进制注量率分布文件 fort.16 进行处理,可以输出关注位置的中子/光子注量率及关注的响应函数分布。

## 2 计算模型及参数

针对 CAP1400 堆芯进行三维建模,模型由内及外依次为堆芯、围板、半环板、旁通水、吊篮、下降段水、反应堆压力容器(RPV)内衬及本体,模型由下及上依次为 RPV 底部结构区、堆芯支撑下板、燃料组件下管座等下部结构区、堆芯活性区、燃料组件上管座等上部结构区、堆芯上板、堆芯出口联腔等。

考虑到反应堆对称性,计算时采用三维圆柱坐标模型建立 1/8 几何模型,堆芯径向网格划分则按照由内及外逐步细化的原则进行。计算时共划分 3520 个子区,径向网格数为 169,周向网格数为 88,轴向网格数为 187。

模型右侧及顶部、底部采用真空边界条件,其余各面均采用反射边界条件。反应截面的 Legendre 展开阶数选取  $P_3$  阶,选用 S8 高斯全对称求积组求解。计算采用固定源模式,堆芯裂变源分布可以通过考虑燃耗深度后的堆芯平均 pin 功率分布进行计算,其计算各燃料棒各能群源强的公式如下:

$$S(k,i,j) = \frac{PCP_{rod}(i,j)B(i,j)}{K(i,j)} \times \sum_n f(i,j,n)v(n)\chi(k,n) \quad (1)$$

式中  $S(k,i,j)$  为棒  $(i,j)$  在第  $k$  能群的源强  $\mu\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $P$  为功率密度,  $\text{W}/\text{cm}^3$ ;  $C=6.241508 \times 10^{12}$   $\text{MeV}/(\text{s}\cdot\text{W})$ ;  $P_{rod}(i,j)$  为棒  $(i,j)$  的相对功率分布;  $B(i,j)$  为棒  $(i,j)$  的偏倚因子;  $K(i,j)$  为棒  $(i,j)$  每次裂变产生的能量,  $\text{MeV}$ ;  $f(i,j,n)$  为棒  $(i,j)$  中核素  $n$  的裂变分数;  $v(n)$  为核素  $n$  每次裂变产生的粒子数;  $\chi(k,n)$  为核素  $n$  裂变产生的粒子在第  $k$  能群的相对能量分布。根据堆芯燃料棒实际坐标,将计算得到的源强转换为三维圆柱坐标分布的固定源。

## 3 计算结果对比

### 3.1 计算结果校核

使用 TORT 程序计算了 RPV 内表面快中子 ( $E>1.0$   $\text{MeV}$ ) 注量率以及吊篮内表面  $\gamma$  射线发热率沿方位角的分布(图 2、图 3);同时,使用 DORT 和 MCNP 程序进行了同样的计算,以对 TORT 程序的计算结果进行校核。

由图 2 和图 3 可知, TORT 程序和 DORT 程序计算结果符合较好,RPV 内表面快中子注量率

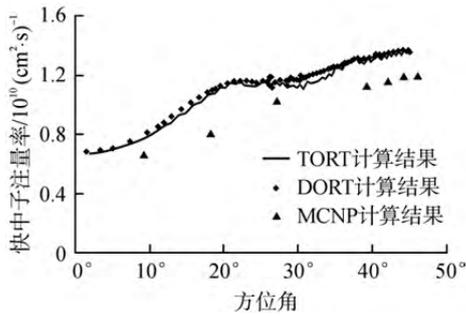


图2 RPV内表面快中子注量率分布

Fig. 2 Distribution of Fast Neutron Fluence on Inner RPV

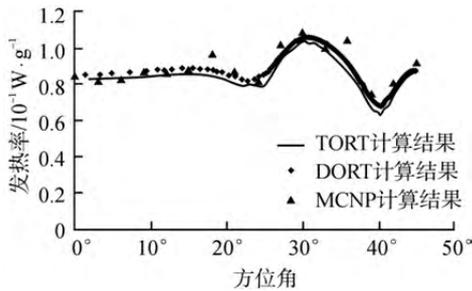


图3 吊篮内表面的γ射线发热率分布

Fig. 3 Distribution of  $\gamma$  Ray Heating Rate on Inner Barrel

的最大值偏差约为 1%，吊篮内表面  $\gamma$  射线发热率的最大值偏差约为 3%。

对于 RPV 内表面快中子注量率, MCNP 计算结果偏小, 最大值偏差约为 15%。除由于计算方法不同造成的偏差外, 另一个主要原因即是在 MCNP 计算过程中, 计算外源分布时, 没有考虑燃料组件燃耗的影响, 近似使用  $^{235}\text{U}$  裂变谱进行计算, 而 TORT/DORT 程序计算时, 考虑了燃耗修正, 后者的能谱更硬, 从而使 MCNP 计算结果偏小; 另外, 由于 TORT/DORT 计算基于 BUGLE-96 数据库, 而 MCNP 计算基于 ENDF 基础库, 数据库的差别也是造成两者偏差的主要原因之一。

对于吊篮内表面  $\gamma$  射线发热率, MCNP 计算结果与 TORT/DORT 结果整体趋势符合较好, 但在个别角度存在一定的偏差, 考虑到计算方法的差异, 这种偏差是可以接受的。

另外, 由图 2 和图 3 可知, DORT 和 TORT 的计算结果符合非常好, 这是因为本文计算中 DORT 采用的是二维平面极坐标几何模型, TORT 采用的是三维圆柱坐标几何模型, 对于堆芯中平面附近的径向结构及方位角结构, 两者的几何结

构一致, 结果非常接近。对于堆芯活性区范围或轴向结构一致的部分, DORT 程序可以保证对三维结果处理的精度; 但是, 对于轴向结构比较复杂的活性区上下部的堆内构件等部位, 则必须采用三维 TORT 程序才可保证计算精度。

### 3.2 堆内构件发热率

根据上节分析, 使用 TORT 程序计算得到堆内构件  $\gamma$  射线发热率是合理且正确的。本节给出典型堆内构件在反应堆正常运行期间的  $\gamma$  射线发热率, 见图 4、图 5。

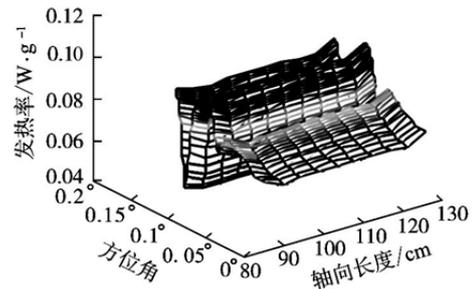


图4 半环板2内表面γ射线发热率分布

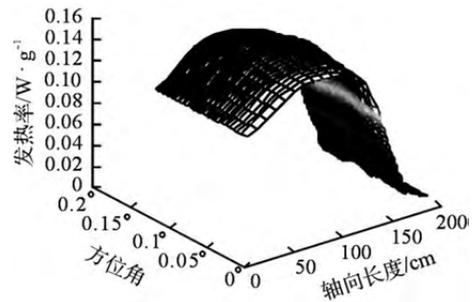
Fig. 4  $\gamma$  Ray Heating Rate Distribution of Half Ring Segment 2

图5 堆芯围筒底板上表面γ射线发热率分布

Fig. 5  $\gamma$  Ray Heating Rate Distribution of Core Shroud Bottom Plate

由图 4、图 5 可知, 堆内构件发热率与堆芯功率分布及堆芯活性区布置密切相关。由于堆芯活性区边缘为锯齿形结构, 致使围绕堆芯活性区的半环板与堆芯活性区边缘距离不等, 从而导致其内表面  $\gamma$  射线发热率沿方位角存在较大差别。由于堆芯径向功率分布的不同, 致使堆芯围筒底板等下部堆内构件的  $\gamma$  射线发热率在径向上存在一定的差别。

## 4 结论

通过开发固定源前处理及结果后处理模块,

使TORT程序可以适应CAP1400大模型结构堆芯的屏蔽设计。基于BUGLE-96数据库,使用TORT程序计算得到的堆内构件发热率与使用其他方法程序计算结果符合较好。不考虑裂变谱及数据库的影响,TORT程序计算得到的RPV内表面快中子注量率与MCNP程序计算结果符合较好。与DORT程序相比,TORT程序可以进行更加精确的三维建模,与MCNP程序相比,使用TORT程序计算堆内构件发热率可以直接给出堆内构件不同网格位置处的发热率分布,更适应于后续的计算应用。因此,对于几何结构相对较为规则的反应堆堆芯(CAP1400压水反应堆堆芯),使用

TORT程序进行计算具有较大的优势。

本文分析结果可以为CAP1400反应堆堆内构件的热应力分析等提供参考。

参考文献:

- [1] TORT. A Three-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code[R]. ORNL/TM-13221.
- [2] BUGLE-96. Coupled 47 neutron, 20 Gamma-Ray Group Cross Section Library Derived from ENDF/B-VI for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications [R]. DLC-185, 1996.

(责任编辑:王中强)