

不连续因子应用于高温气冷堆三维扩散计算

周旭华, 李 富, 王登营, 颜见秋, 韩 松

(清华大学 核能与新能源技术研究设计院, 北京 100084)

摘要: 高温气冷堆的三维燃耗计算、三维控制棒价值计算、堆芯功率重构以及芯外探测器响应分析都必须通过三维计算实现。由于高温气冷堆侧反射层中控制棒与吸收球区均为强吸收体, 因此, 在该区域无法直接用扩散方法计算, 而用输运方法实现三维计算又过于耗时。根据不连续因子理论, 利用二维 (R, θ) 几何下输运-扩散耦合计算, 实现控制棒与吸收球区的局部均匀化, 求得不连续因子和均匀化截面。在此基础上, 实现带不连续因子的三维扩散计算。计算结果表明: 常规的扩散计算会带来误差, 采用不连续因子修正的扩散计算, 不但对中子注量率分布改善明显, 对本征值、控制棒价值等的改善也很明显, 可逼近精细的输运方程的结果, 而计算量明显减少。带不连续因子修正的扩散计算是实现高温气冷堆三维计算的有效途径。

关键词: 高温气冷堆; 不连续因子; 三维; 控制棒; 均匀化

中图分类号: TL329

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)03-0237-05

Discontinuity Factor Applied in Three-Dimensional Diffusion Calculation for High-Temperature Gas-Cooled Reactor

ZHOU Xu-hua, LI Fu, WANG Deng-ying, YAN Jian-qiu, HAN Song

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

Abstract: Three-dimensional calculation is needed for high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) to realize three-dimensional burn-up calculation, three-dimensional control rod calculation, power distribution reconstruction and ex-core detectors response analysis and etc. Because of the strong absorber in control rods and absorber balls region, the diffusion method can not be used directly. But transport method for detailed 3D model is very time-consuming. This paper proposes the procedure to homogenize the control rod region based on discontinuity factor theory, to calculate homogenized cross section and discontinuity factor by coupling 2D transport and diffusion calculation, then to realize 3D full core calculation with diffusion method corrected by discontinuity factor. It is shown through verification calculation that normal diffusion calculation is impossible to get accurate solution, and diffusion calculation corrected by discontinuity factor can reproduce the detailed transport solution not only in the neutron flux distribution but also

in the eigenvalue and control rod worth, with much less computation time. Therefore the diffusion method with discontinuity factors is a nice solution to realize the three-dimensional calculation for HTGR.

Key words: high-temperature gas-cooled reactor; discontinuity factor; three-dimensional; control rod; homogenization

目前,用于球床式高温气冷堆(HTGR)物理计算的软件包 VSOP 只在 $R-z$ 圆柱几何下进行燃耗计算,计算得到的是堆芯二维燃耗分布。而在反应堆运行过程中,存在多种控制棒和吸收球的组合状态,所以,堆芯的功率分布在 θ 方向并不是对称、均匀的。计算结果表明,在有棒区和无棒区附近的功率分布的差别可达数倍。因此,为更加精细地计算堆芯燃耗,必须考虑 $(R-\theta-z)$ 坐标下的三维效应。欲进行三维计算,从计算速度角度考虑,采用三维扩散计算是一优先选择,但还存在很多困难。

1 三维扩散计算的难点与解决方案

在球床式高温气冷堆中,作为中子吸收体的控制棒和吸收球布置在堆芯活性区外侧的反射层中,呈环形排列。在某个高温气冷堆的设计方案中,在侧反射层中有 10 个控制棒区和 20 个吸收球区,均布于堆芯同半径圆环的 30 个扇区内(图 1)。由于控制棒的插入、拔出,吸收球的加入、卸出,均会在石墨侧反射层中形成强吸收体区或空洞区,无法直接使用扩散方程来处理强吸收体或空洞。一个解决方案是,将控制棒或吸收球与周围的石墨进行均匀化,之后即可采用扩散方程对全堆进行求解。

以输运计算为基准,为控制扩散计算误差,

应确保扩散计算时各区材料的截面差别不大,故以往的均匀化方法^[1-2]是对控制棒与吸收球所在的整个圆环区域进行整体均匀化。但验算表明,这样处理得到的反应性的计算精度可接受,但计算不出堆芯功率在 θ 方向的分布;同时,针对控制棒与吸收球多种组合,整环平均的处理过程很复杂。因此,这种方法并不合适。

为此,本工作采用不连续因子理论^[3]来改善控制棒区局部均匀化的结果,并发展出一套基于不连续因子理论修正的三维扩散计算流程,可准确、方便地计算高温气冷堆的三维功率分布和控制棒的三维效应。可发现,控制棒和吸收球的多种组合可由以下 4 种状态排列组合描述:有棒,无棒,有吸收球,无吸收球。因此,建议的高温气冷堆三维计算流程如下:针对图 1 所示的堆芯布置,分别选取包含半个控制棒区域或半个吸收球区域的 $1/60$ 扇区堆芯作为均匀化模型, θ 方向的两个边界近似为反射边界。通过输运计算得到有、无控制棒,有、无吸收球 4 种状态下的控制棒区和吸收球区的均匀化截面和不连续因子。在三维扩散模型中,各种控制棒与吸收球的组合状态使用这 4 种均匀化参数来表达,以实现不连续因子修正的三维扩散计算。图 2 示出带不连续因子修正的三维扩散计算的流程。

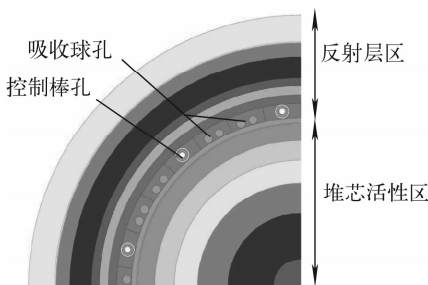


图 1 (R, θ) 几何下某高温气冷堆的 $1/4$ 堆芯模型

Fig. 1 (R, θ) model of $1/4$ core for one HTGR configuration

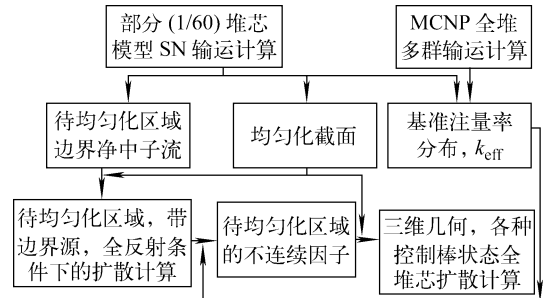


图 2 带不连续因子的三维扩散计算过程

Fig. 2 Procedure of three-dimensional calculation with discontinuity factor

2 二维全堆模型验算

在二维 $R-\theta$ 几何全堆模型下,计算了以下 10 种控制棒、吸收球组合状态反应堆的有效增值系数、控制棒与吸收球的价值及堆芯中子注量率分布。计算状态包括:1) 无控制棒,无吸收球;2) 无控制棒,1 个吸收球区有吸收球;3) 无控制棒,20 个吸收球区均有吸收球;4) 有 1 组控制棒插入,无吸收球;5) 有 4 组控制棒插入,且与其相邻的控制棒区均无控制棒,无吸收球;6) 有 5 组控制棒对称插入,无吸收球;7) 有 9 组控制棒插入,无吸收球;8) 有 9 组控制棒插入,20 个吸收球区均有吸收球;9) 有 10 组控制棒插入,无吸收球;10) 10 组控制棒全部插入,20 个吸收球区均有吸收球。

计算方案包括:方案 SN,在控制棒与吸收球区用非均匀的材料描述,用离散纵标法程序 SN2D 进行输运求解;方案 CIT1,在控制棒与吸收球区用整环平均的截面,用 CITATION^[4-5] 程序进行扩散求解;方案 CIT2,在控制棒与吸收球区,由 4 组均匀化截面表达,但不采用不连续因子,利用 CITATION 程序扩散求解;方案 CIT-DIS,在方案 CIT2 的基础上,实现带不连续因子修正的扩散计算;方案 MCNP,在控制棒与吸收球区域采用非均匀的材料描述,利用 MCNP 程序进行蒙特卡罗多群输运计算,使用的多群截面由 SN2D 模型转换而来。

2.1 堆芯有效增值系数,控制棒与吸收球的价值

表 1 列出了 $R-\theta$ 几何、全堆芯模型、10 种控制棒与吸收球组合下,各计算方案的有效增值系数 k_{eff} 。由于 SN2D 方法对于堆芯状态 2、4、5、6、7、8 计算不收敛,故在表 1 中未给出相应 k_{eff} 。MCNP 多群计算得到的 k_{eff} 是统计值,具有一定的不确定性,但在 99% 的置信区间内,相对理论真值的正负偏差不超过 0.001。

表 2 列出相对于无控制棒、无吸收球堆芯,其他 9 种组合的控制棒与吸收球的价值。由表 2 可见,方案 CIT-DIS 与方案 SN、方案 MCNP 符合较好,绝对偏差在 0.001 以内,而方案 CIT2 与方案 SN、方案 MCNP 计算得到的价值的绝对偏差可达 0.006,这说明使用不连续因子对于价值计算有明显改善,可达到与输运解相当的精度。若以蒙特卡罗输运解为基准,各方案计算得到的 9 种控制棒与吸收球组合的反应性价值的误差列于表 3。其中,方案 SN 的相对偏差在 1% 以内,说明离散纵标法与蒙特卡罗法两种输运解法的结果符合很好;方案 CIT1 的相对偏差比方案 CIT2 的小,这说明,对于有效增值系数和价值计算,在不使用不连续因子的前提下,整体均匀化的效果优于部分均匀化,但最大相对偏差仍可达 9.1%;同样采用部分均匀化,无不连续因子修正方案 CIT2 的最大相对偏差可达 14.1%;而带不连续因子修正方案 CIT-DIS 的最大相对偏差为 5.3%,除组合 2 与组合 4(在这两种组合下,价值已很小,只有总价值的 5% 左右)外,其他组合的控制棒与吸收球的价值相对偏差均小于 1%。

通过上述讨论可知,不连续因子修正的扩散方法应用于高温气冷堆的控制棒与吸收球的价值计算是合理可行的,相对于输运法得到的基准解,计算得到的控制棒与吸收球的价值绝对误差在 0.001(约为控制棒与吸收球最大总价值的 1%) 以内,相对偏差的最大值控制在 5% 左右。

2.2 堆芯的中子注量率分布

图 3 示出全堆模型、活性区外边界处,热群中子注量率沿 θ 方向的分布。曲线 1、2、3 表示控制棒全部插入堆芯且无吸收球(组合 9)的状态下,方案 SN、CIT2、CIT-DIS 计算得到的热

表 1 各计算方案的有效增值系数 k_{eff}

Table 1 k_{eff} of each calculation case

计算方案	不同计算状态下的 k_{eff}									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SN	1.081 9		0.984 0						1.026 5	0.970 4
CIT1	1.083 3	1.076 9	0.986 2	1.077 4	1.059 3	1.052 9	1.032 1	0.972 6	1.026 6	0.971 2
CIT2	1.083 2	1.076 3	0.983 8	1.077 2	1.057 3	1.050 0	1.027 4	0.973 3	1.021 2	0.972 2
CIT-DIS	1.081 8	1.075 3	0.983 5	1.076 3	1.058 8	1.052 4	1.031 9	0.971 7	1.026 2	0.970 3
MCNP	1.082 0	1.075 8	0.983 7	1.076 6	1.059 2	1.052 9	1.032 2	0.972 1	1.026 3	0.971 0

表2 各方案的控制棒与吸收球价值 $\Delta\rho$ Table 2 $\Delta\rho$ of each calculation case

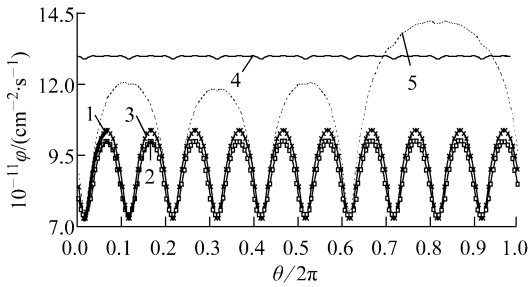
计算方案	不同计算状态下 $\Delta\rho$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SN			0.092 0						0.049 9	0.106 2
CIT1		0.005 5	0.090 9	0.005 0	0.020 9	0.026 7	0.045 8	0.105 0	0.051 0	0.106 6
CIT2		0.006 0	0.093 3	0.005 2	0.022 6	0.029 2	0.050 1	0.104 2	0.056 1	0.105 5
CIT-DIS		0.005 6	0.092 4	0.004 7	0.020 1	0.025 8	0.044 7	0.104 8	0.050 1	0.106 2
MCNP		0.005 3	0.092 4	0.004 6	0.019 9	0.025 6	0.044 6	0.104 5	0.050 2	0.105 6

注: $\Delta\rho$ 为相对无控制棒、无吸收球堆芯的价值

表3 $\Delta\rho$ 相对基准值的相对偏差Table 3 Error of $\Delta\rho$ compared to benchmark

计算方案	不同计算状态下的相对偏差/%									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SN			-0.41						-0.50	0.53
CIT1		3.77	-1.62	8.70	5.03	4.30	2.69	0.48	1.59	0.95
CIT2		13.21	0.97	13.04	13.57	14.06	12.33	-0.29	11.75	-0.09
CIT-DIS		5.66	0.00	2.17	1.01	0.78	0.22	0.29	-0.20	0.57

注:以蒙特卡罗多群运输解为基准

图3 堆芯活性区外边界处($R=150$ cm)

热群中子注量率沿 θ 方向的分布

Fig. 3 Thermal neutron flux rate distribution along θ direction on fuel region boundary ($R=150$ cm)

1——SN,组合9;2——CIT2,组合9;3——CIT-DIS,组合9;
4——CIT-DIS,组合1;5——CIT-DIS,组合5

群中子注量率沿堆芯活性区外边界的分布,可看到曲线1和曲线3完全重合,和曲线2有明显差别。若以方案SN求得的运输解为基准,方案CIT2、CIT-DIS的堆芯中子注量率分布的相对偏差列于表4,这说明在全堆扩散计算中,使用不连续因子修正堆芯中子注量率分布是必要和有效的。

曲线3、4、5表示3种不同的控制棒与吸收

球组合状态下,堆芯总功率保持不变,热群中子注量率沿堆芯燃料区外边界的分布,可看出3条曲线的差别很大,在有控制棒插入的情况下,功率分布不再是均匀分布,将发生严重畸变,所以,必须考虑功率分布在 θ 方向的非均匀性,进一步说明将高温气冷堆的物理计算从二维 $R-z$ 几何扩展到三维 $R-\theta-z$ 几何是必要的。

3 三维模型验算

在球床高温气冷堆中,控制棒系统用来实现热停堆,吸收球系统实现冷停堆。建立如下两种三维几何下的计算方案:无不连续因子修正的计算方案CIT3D和带不连续因子修正的计算方案CIT3D-DIS。

采用如上方法,10组控制棒同步插入堆芯11步,然后向20组吸收球孔道中加入吸收球后,计算得到反应堆的 k_{eff} 和 $\Delta\rho$ (相对于无吸收球,无控制棒的堆芯)列于表5。可见,是否采用不连续因子,计算的 k_{eff} 和 $\Delta\rho$ 存在较大的差别。若以方案CIT3D-DIS的解为基准,方案CIT3D计算得到的控制棒价值最大相对偏差可达10%左右。

表4 方案 CIT2 与方案 CIT-DIS 的热群中子注量率分布相对基准分布的相对偏差

Table 4 Comparison with benchmark distribution errors of fluence rate distribution at case CIT2 and CIT-DIS

计算方案	堆芯活性区相对偏差/%		均匀化区域左边界相对偏差/%		均匀化区域右边界相对偏差/%	
	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
CIT2	6.56	-6.08	44.59	-18.29	-22.15	-49.37
CIT-DIS	0.70	-1.17	2.42	-5.81	4.07	-6.52

注:MAX 为各方案求得的中子注量率分布相对基准分布的相对偏差的最大值,MIN 为最小值

表5 方案 CIT3D 和方案 CIT3D-DIS

计算得到的 k_{eff} 、 $\Delta\rho$ 的比较

Table 5 Comparison of k_{eff} , $\Delta\rho$ obtained respectively by case CIT3D and case CIT3D-DIS

H/cm	k_{eff}		$\Delta\rho$		相对偏差/%
	CIT3D	CIT3D-DIS	CIT3D	CIT3D-DIS	
1 100	0.974 6	0.973 4	0.102 0	0.102 0	0.00
990	0.976 1	0.975 0	0.100 4	0.100 3	0.10
880	0.986 1	0.987 0	0.090 1	0.087 9	2.50
770	1.000 5	1.003 5	0.075 5	0.071 2	6.04
660	1.009 9	1.013 7	0.066 2	0.061 1	8.35
550	1.015 3	1.019 6	0.060 9	0.055 5	9.73
440	1.016 9	1.020 9	0.059 3	0.054 2	9.41
330	1.028 9	1.031 9	0.047 9	0.043 8	9.36
220	1.041 2	1.042 3	0.036 3	0.034 1	6.45
110	1.051 5	1.051 5	0.027 0	0.025 7	5.06
0	1.058 8	1.058 2	0.020 4	0.019 7	3.55

注:H 为吸收球孔道中含吸收球段的高度

4 结论

1) 在高温气冷堆中,控制棒、吸收球的插入、拔出可引起堆芯功率分布在 θ 方向的严重畸变,实现三维计算是必要的;采用不连续因子修正的扩散计算可实现三维计算。

2) 在进行带不连续因子修正的扩散计算时,控制棒与吸收球的多种组合可由几种均匀化截面和不连续因子的组合表示;均匀化截面和不连续因子可在部分堆芯模型下,通过运输扩散耦合计算得到。

3) 计算结果表明,常规的扩散计算会带来误差,采用不连续因子修正的扩散计算有必要,不但对于中子注量率分布改善明显,对本征值、控制棒价值计算等的改善也很明显,可逼近精细的运输方程的结果,计算量明显减少。

参考文献:

- [1] 许云林,经荣清,王德安. 10 MW 高温气冷堆反应性当量计算[J]. 核动力工程,1997,18(6): 500-504.
XU Yunlin, JING Xingqing, WANG De'an. Reactivity worth calculation for control rods of high-temperature gas-cooled reactor[J]. Nucl Power Eng, 1997, 18(6): 500-504(in Chinese).
- [2] 许云林,经荣清,王德安. HTR-10 各运行阶段控制棒反应性当量计算[J]. 清华大学学报:自然科学版,1998,38(4):22-24.
XU Yunlin, JING Xingqing, WANG Dean. Reactivity worth calculation for control rods of HTR-10 at each phase[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 1998, 38(4): 22-24(in Chinese).
- [3] SMITH K S. Assembly homogenization techniques for light water reactor analysis[J]. Prog Nucl Energy, 1986, 17(3): 303-335.
- [4] VONDY D R, CUNNINGHAM G W, FOWLER T B. Nuclear reactor core analysis, CITATION, ORNL2TM22496 [R]. USA: ORNL, 1971.
- [5] 李富,胡永明,罗征培. 不连续因子理论在扩散差分方程上的实现[J]. 核动力工程,1995,16(2): 115-120.
LI Fu, HU Yongming, LUO Zhengpei. Discontinuity-factor theory and its realization on diffusion-difference equation[J]. Nucl Power Eng, 1995, 16(2): 115-120(in Chinese).
- [6] JUDITH F B. MCNP—A general Monte Carlo N-particle transport code [R]. USA: LANL, 2000.
- [7] WAGNER J C, REDMOND E L, PALMTAG S P, et al. MCNP: Multigroup/adjoint capabilities, LA-12704[R]. USA: LANL, 1993.