

TOPAZ- II 型反应堆堆芯 热工水力数值模拟

邹佳讯, 郭春秋, 赵守智

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

摘要:利用成熟的软件建立了 TOPAZ- II 型反应堆三维流动及换热的计算模型, 以结构化为主非结构化为辅相结合的方式进行了网格划分, 以符合实际的边界条件等作为输入参数, 对堆芯热工水力行为进行了数值模拟, 经过数值求解得到了三维流场和温度场结果, 并得到了冷却剂流量分配、压力分布、速度分布以及堆内慢化剂、端部及侧反射层等部件的温度分布。经比较, 数值模拟结果与俄方设计结果符合较好, 本研究为此类型研究堆热工水力设计优化积累了经验。

关键词: TOPAZ- II; 流场; 温度场; 计算流体动力学

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2014)S0-0302-06

doi: 10. 7538/yzk. 2014. 48. S0. 0302

Numerical Simulation of Thermal-hydraulic Behavior in TOPAZ- II Reactor Core

ZOU Jia-xun, GUO Chun-qi, ZHAO Shou-zhi

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-33, Beijing 102413, China)

Abstract: Three-dimensional flow and heat transfer model was established for TOPAZ- II type of reactor by mature tools. The mesh was mainly generated with structured grid method supplemented by unstructured mesh. The real conditions were adopted as the input parameters. The thermal-hydraulic behavior simulation was performed with mature computational fluid dynamics software. Through numerical simulation, the three-dimensional flow field and temperature field were obtained, as well as key parameters, such as coolant mass flow rate distribution, pressure distribution, velocity distribution, and temperature distributions of moderator and reflector, etc. Through comparison, the results show good agreement with those of Russian design. And rich experience was accumulated through this effort for further thermal-hydraulic optimization of this type of reactor.

Key words: TOPAZ- II; flow field; temperature field; CFD

TOPAZ- II 型反应堆是单节热离子空间电源系统的重要部分, 由俄罗斯库尔恰托夫研究

院在 1969—1989 年期间发展起来。TOPAZ- II 型反应堆堆芯热工水力计算主要包括堆芯热

电特性^[1-2](燃料元件温度和输出电特性)、冷却剂流场和温度场以及主要部件的温度场。热态下冷却剂流场和温度场以及主要部件的温度场计算是反应堆设计中必要的一环。堆芯冷却剂压力、流速和温度以及燃料元件温度等参量的分布(即流场和温度场)的计算分析,是反应堆堆芯设计的重要内容。要求这些参量的数值必须满足设计准则。从安全分析的角度来看,各种工况下,各部件温度状况要在设计限值之内,才能保证整体装置长期工作的能力。从反应堆力学分析来看,堆芯燃料元件和其部件不仅要受到流体流动的作用力和冲刷,还要因自身温度的分布而产生热应力。因而反应堆力学分析是以流场和温度场的计算分析为基础的。它们是反应堆热工设计和力学分析不可缺少的部分。一般,固体的应力分析和温度场计算分析可能是耦合的。但在许多情况下,热应力并不影响温度分布计算。因此在确定热应力之前,可单独进行温度场计算分析,以作为热应力分析的输入数据。

目前的商用 CFD 软件无论是在国外还是国内,已越来越多应用于反应堆热工水力问题的数值计算和研究中,本工作使用数值模拟 CFD 软件 FLUENT 研究堆芯流场和温度场的计算分析。

1 计算模型

TOPAZ-II 型反应堆堆芯内排布紧凑^[3],且部件较多,其中铀-235 富集度为 90%,设计寿命为 3 a,采用基于 3 根安全棒的反应性控制系统,活性区高度为 375 mm。堆芯主要部件有热离子燃料元件、安全棒、氦化锆慢化剂块、钠钾合金冷却剂通道、端部铍反射层、侧铍反射层以及控制转鼓。且通道内有发电管、冷却剂、内外套管、修补气体等,建模时均考虑势必会使模型复杂,网格数量增多,因此,有必要对模型进行一定地简化。在几何结构上,如图 1 所示,整体具有 1/3 旋转周期对称的特点,所以第 1 步选取 1/3 取代整体建模,燃料元件结构较为精细复杂(从内到外依次是燃料芯体、真空间隙、发射极、发射极涂层、铯气间隙、接收极、接收极涂层、氦气间隙),因此建立模型时,将燃料

元件省去,通道内仅保留内套管、冷却剂、外套管及修补气体,以内套管的温度分布为壁面热边界条件。实际的慢化剂块为 5 块尺寸一致的慢化剂圆盘紧紧叠放在一起,在建模的过程中将它们作为一整体慢化剂考虑而不是分割成 5 块,利用 GAMBIT 建模如图 2 所示。

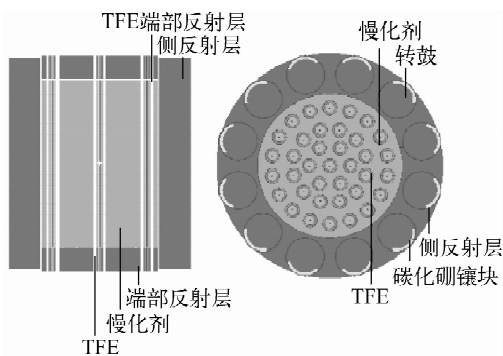


图 1 TOPAZ-II 型反应堆堆芯结构示意图

Fig. 1 Scheme of TOPAZ-II reactor core

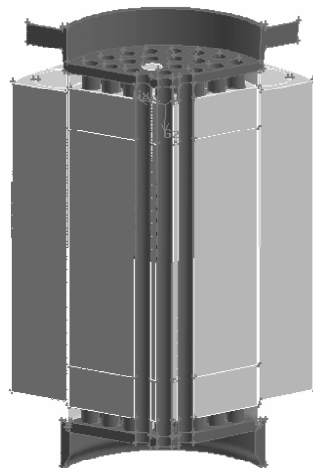


图 2 整体模型 1/3 视图

Fig. 2 1/3 section view of whole model

网格划分是一复杂的过程,在数值模拟的过程中要占据 80% 左右的时间,是整个数值模拟过程的重点,也是难点。利用 GAMBIT 软件采取结构化和非结构化相结合的网格划分方法,一方面使数值模拟结果的精度达到一定的要求,同时又能将网格数量限值在计算机能承受的合理限值内。经初步计算,最后生成的网格数在 1 877 670 以上时,数值结果具有网格无关性,如图 3~5 所示。

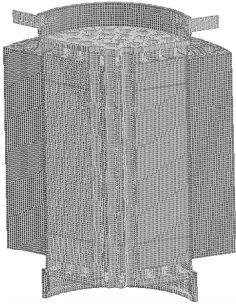


图3 整体模型及网格划分

Fig. 3 Calculation model and grid

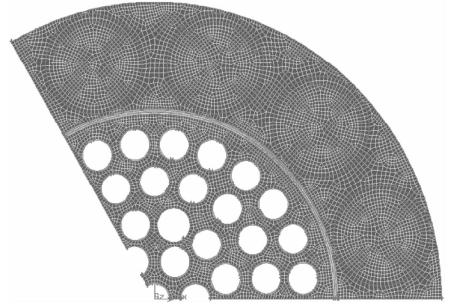


图4 网格横切面示意图

Fig. 4 Scheme of cross section view of grid

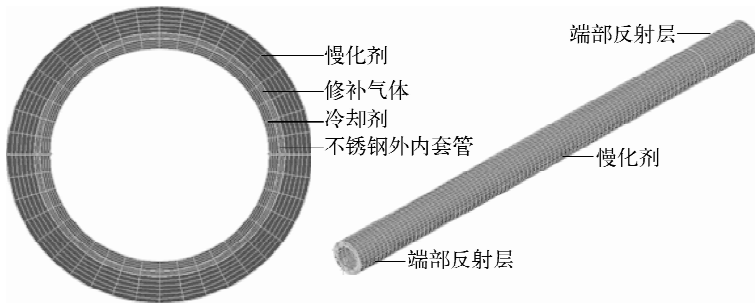


图5 窄缝冷却剂通道网格示意图

Fig. 5 Grid scheme of narrow coolant channel

2 计算条件及数学模型

网格划分完毕后需在 GAMBIT 中设置各控制体,即流域部分及固体部分的属性,本模型涉及的 Fluid 区域主要有钠钾合金冷却剂、二氧化碳修补气体。主要的固体区域有慢化剂块、上下端部铍反射层、侧铍反射层、控制转鼓、碳化硼吸收体。

另外重要的是 GAMBIT 程序中边界条件的设置, TOPAZ-II 型反应堆中面边界条件主要有冷却剂出入口、热边界、周期性边界、冷边界、绝热边界等。

1) 上腔室的冷却剂入口管,采用质量流量入口类型的边界条件(额定工况 2.2 kg/s , 加强工况 2.42 kg/s),入口温度为 773 K ,出口设置为压力出口,出口压力为 0.165 MPa 。

2) 热边界主要有以下几种:主要部件的释热率,核设计计算表明,慢化剂释热份额约占 3.64% ,端部反射层和侧反射层释热份额分别为 0.08% 和 0.22% ,在固体温度场模拟方面均不可忽略;计算中用到的氢化锆慢化剂块的释热率、端部铍反射层的释热率、侧铍反射层的释热率;另外重要的就是冷却剂内套管的轴向温

度分布,由专用的热电特性程序计算给。释热率和温度的分布可用自定义函数描述热边界,载入求解器。

3) 周期性边界:本文模型结构呈周期性变化,在稳态工况下,流动与换热已经进入充分发展阶段,速度、压力梯度以及温度都呈现对称性,因而计算的区域原则上只要 1 个周期即可。由于采取模型的 1 个周期即 $1/3$ 建模,涉及到旋转周期性对称的边界条件。

4) 冷边界:模型最外侧是侧铍反射层外表面,采用辐射模型时与周围环境温度进行辐射换热设为辐射边界条件,环境温度设为 300 K 。

计算中用到的材料物性参数以温度的函数作为输入。求解器 FLUENT 计算模型选择 $k-\epsilon$ 湍流模型,由于涉及到辐射换热,因此开启辐射模型。FLUENT 程序主要对质量守恒、动量守恒方程以及能量守恒方程进行离散数值求解。

3 计算结果与分析

3.1 流场

由于主要用冷却剂的质量和动量守恒方程

来计算其流场,而在这两种方程中包括冷却剂的物性量,物性量又主要取决于冷却剂的温度,所以必须同时联立求解冷却剂的质量、动量、能量守恒方程以及状态方程。加强工况和额定工

况下,堆芯冷却剂压力和流速分布趋势类似,只是数值上有所差别,这里只列出 1 种工况(加强工况)下流场的结果,压力和速度云图如图 6 所示。

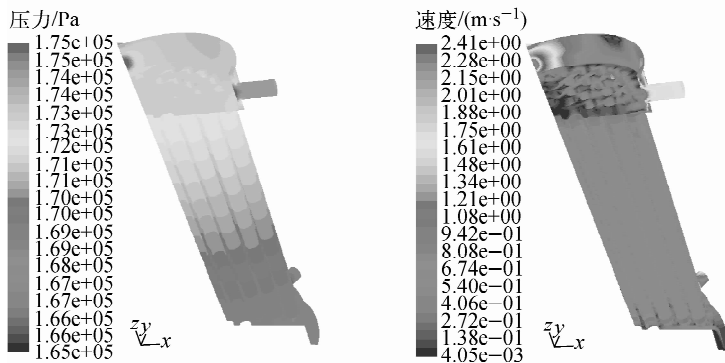


图 6 冷却剂压力和速度云图

Fig. 6 Pressure and velocity contours of coolant

从图 6 可看出,尽管冷却剂从入口管进入上腔室这段流程流场较复杂,但经分配后,各冷却剂管道内的冷却剂达到一相对均匀的状态。在额定工况下,冷却剂总流量为 2.34 kg/s,平均每个冷却剂通道的质量流量为 0.038 36 kg/s。图 7 示出了冷却剂通道由内至外的编号,其中编号 1 为中心第 0 组,编号 2~4 为第 1 组,5~8 为第 2 组,9~14 为第 3 组,15~22 为第 4 组,各组冷却剂通道平均质量流量径向归一化(通道流量与平均流量之比)情况如图 8 所示。从图 8 可看出,最大不均匀性为 1.03,即小于 3%,满足流量分配均匀性的要求,数值模拟结

果与俄方研究结果进行了比较,径向归一化流量趋势基本一致,从中心到外侧流量逐渐增大,主要是由于出入口分布在最外侧,流量的分配和汇聚均起于此。

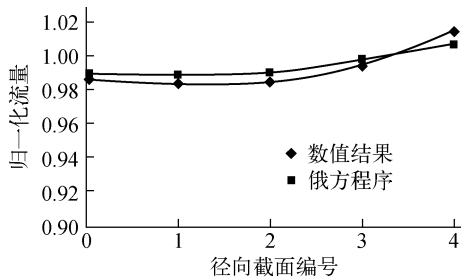


图 8 径向归一化流量趋势

Fig. 8 Radial normalized mass flow rate

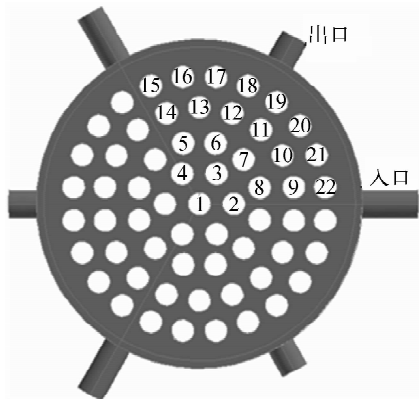


图 7 冷却剂通道编号示意图

Fig. 7 Scheme of coolant channel number

3.2 温度场

在温度场计算结果方面,加强工况额定工况温度场在数值上有所差别,但温度场的整体分布情况类似,所以此处只列出 1 种工况(加强工况)对应的温度场分布云图,图 9 为整体模型及慢化剂温度云图,图 10 为各圈冷却剂通道内钠钾合金冷却剂沿轴向(活性区+端部反射层)的温度分布,图 11 为出口腔室侧反射层温度云图,图 12 为侧铍反射层及控制鼓温度云图。

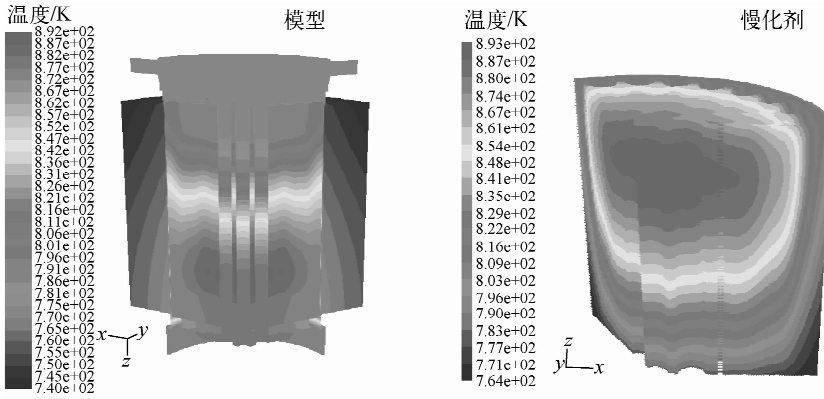


图9 模型和慢化剂温度云图

Fig. 9 Temperature contours of model and moderator

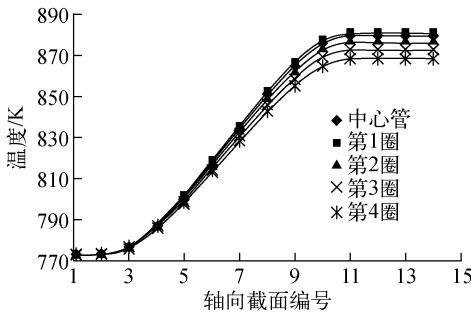


图10 冷却剂轴向温度分布

Fig. 10 Axial temperature distribution of coolant

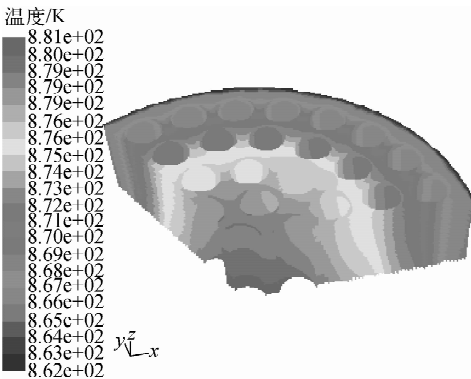


图11 出口腔室侧铍反射层温度云图

Fig. 11 Temperature contour of beryllium reflector in outlet side

值模拟和俄方程序结果比较。从图13可看出,两组曲线趋势较为一致,局部偏差不大,表现出较好的一致性。

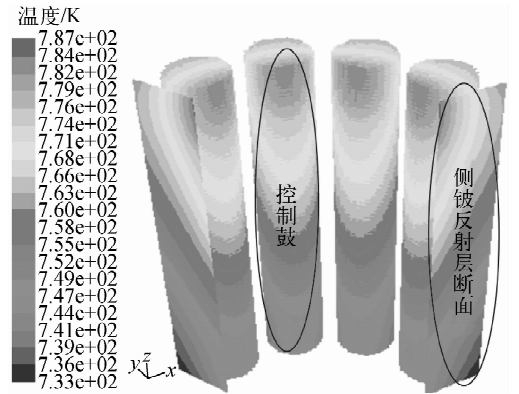


图12 侧铍反射层和控制鼓温度云图

Fig. 12 Temperature contour of side beryllium reflector and control drums

4 结论

本文利用数值模拟软件 FLUENT 进行了 CFD 应用于 TOPAZ-II 型研究堆热工水力数值模拟方面的研究。建立了三维模型,通过物理模型的分析选取,得到适用于数值模拟的 CFD 模型,选择了适用于传热模拟的两方程标准 $k-\epsilon$ 模型和辐射模型,通过流场与温度场耦合数值模拟计算,获得了慢化剂、上下端部铍反射层、侧铍反射层的温度场、上下腔室以及全堆芯冷却剂流场,并针对流场与温度场(尤其是温度场)进行了比较详细的可视化后处理,最后借助俄方数据进行了验证比较。经过分析得出慢

在上述温度云图中,上端部铍反射层最高温度为 881 K(俄方为 880 K),慢化剂最高温度为 893 K(俄方为 892 K),侧铍反射层最高温度为 787 K(俄方为 790 K),均小于相应的设计限值。图13为某圈冷却剂孔道对应的慢化剂及端部反射层轴向温度分布趋势,图中给出了数

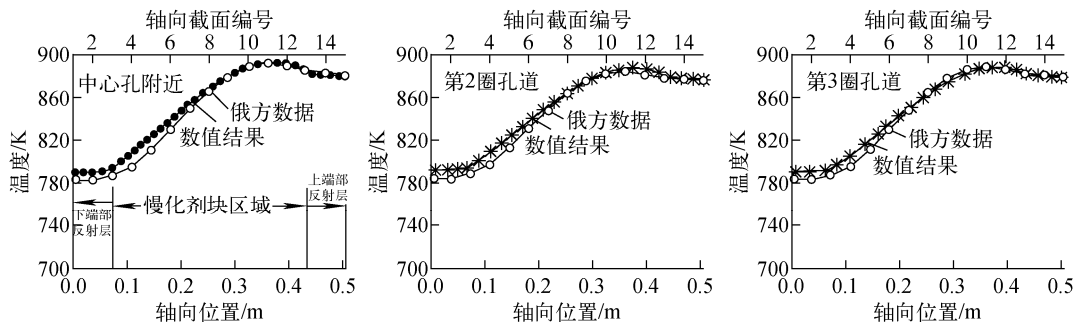


图 13 各圈慢化剂及端部反射层轴向温度分布

Fig. 13 Axial temperature distribution of moderator and end reflector

化剂温度场结果与俄方数据吻合较好,反射层(端部以及侧反射层)温度场结果也是合理的,并且在限值之内。三维数值模拟提供了更多更详尽的反应堆热工水力信息,为设计的进一步优化提供了参考依据,可为结构和力学分析提供输入数据。本研究所建立的分析方法为 CFD 技术进一步应用于 TOPAZ-II 型反应堆堆芯热工水力方面的研究积累了经验和参考。

参考文献:

[1] PARAMONOV D V, EL-GENK M S. Development and comparison of a TOPAZ-II system model with experimental data[J]. Nuclear Tech-

nology, 1994, 108(2): 157-170.

[2] HU Gu, ZHAO Shouzhi, RUAN Keqiang. A transient analytic method of thermionic reactor: TOPAZ-II [C]// 18th International Conference on Nuclear Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2010: 881-892.

[3] 解家春,赵守智,贾宝山,等. TOPAZ-II 反应堆慢化剂温度效应分析[J]. 原子能科学技术, 2011,45(1):48-53.

XIE Jiachun, ZHAO Shouzhi, JIA Baoshan, et al. Analysis of moderator temperature effect for TOPAZ-II reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(1): 48-53 (in Chinese).