

中国先进研究堆导流箱流场的数值模拟

徐长江

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究所, 北京 102413)

摘要:采用目前国内普遍使用的计算流体力学(CFD)软件 PHOENICS 3.2 对中国先进研究堆不同结构的导流箱的三维流场进行数值模拟计算。结果表明:导流箱入口导流板和导流筒能显著改善导流箱入口冷却剂的流动状况,获得入口冷却剂沿周向均匀分流的效果,达到显著减缓入口冷却剂对垂直辐照孔道导管及安全棒导管直接的横向水力冲刷的设计目的。

关键词:中国先进研究堆;导流箱;流场;计算流体力学;流致振动

中图分类号: TL333; TL351.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2002)02-0117-04

Numerical Simulation of Flow Field in the China Advanced Research Reactor Flow-guide Tank

XU Chang-jiang

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-59, Beijing 102413, China)

Abstract: The flow-guide tank in China advanced research reactor (CARR) acts as a reactor inlet coolant distributor and play an important role in reducing the flow-induced vibration of the internal components of the reactor core. Numerical simulations of the flow field in the flow-guide tank under different conceptual designing configurations are carried out using the PHOENICS3.2. It is seen that the inlet coolant is well distributed circumferentially into the flow-guide tank with the inlet buffer plate and the flow distributor barrel. The maximum cross-flow velocity within the flow-guide tank is reduced significantly, and the reduction of flow-induced vibration of reactor internals is expected.

Key words: China advanced research reactor; flow-guide tank; flow field; computational fluid dynamics; flow-induced vibration

导流箱是设计中的中国先进研究堆(CARR)堆本体的重要组成部分,位于堆芯容器顶部并与冷却剂进口管(单根,水平方向布置)直接相连接。导流箱上下两端固定有19根垂直辐照孔道导管及2根停堆安全棒导管。进

口冷却剂的流速较高,如何使进口高速流体以较低流速均匀分配到导流箱筒体内,从而避免或减缓对垂直辐照孔道导管及安全棒导管直接的横向水力冲刷,这是导流箱设计的关键。为此,提出导流箱入口冷却剂挡板(导流板)和分

收稿日期:2001-05-22;修回日期:2001-07-12

作者简介:(1978—),男,浙江诸暨人,助理工程师,核工程与核技术专业

配腔内壁(导流筒)的设计,以期获得入口冷却剂沿周向均匀分流的效果。然而,如何设计入口导流板和导流筒,使得导流效果最佳,这是关注的焦点。

本工作采用 PHOENICS 3.2 程序对不同结构的导流箱的三维流场进行数值模拟计算,以期为 CARR 导流箱优化设计及全堆芯流致振动工程性试验方案设计提供参考数据。

1 CARR堆本体

CARR 堆本体主要由堆芯容器、重水箱和导流箱组件、衰变箱、水平孔道、堆本体结构支撑件、乏燃料暂存架及堆水池冷却系统管道等组成。这些部件绝大多数浸没在静止的堆水池中,其中,堆芯容器、重水箱和导流箱组件及衰变箱构成了堆水池内冷却剂系统压力边界。

导流箱(图 1)为圆柱形筒体结构,是堆本体结构的重要部件。为使进入堆内的冷却剂沿周向均匀分流到导流箱筒体中,导流箱入口处将设置导流板和导流筒。垂直孔道导管和安全棒导管分别靠导流箱下封头和导流箱上盖板安装定位。重水箱是重水反射层容器,箱内径向分布着 9 根水平试验孔道导管和经导流箱引入的 19 根垂直辐照孔道导管及 2 根停堆安全棒导管。堆芯容器竖直贯穿重水箱中央,容器上下法兰分别与重水箱上盖板和重水箱底部螺栓连接。衰变箱安装在堆水池的底部并与堆水池由螺栓联结构成一体,具有反应堆冷却剂衰变功能,该箱体作为反应堆的支承部件支承着重水箱、导流箱、堆芯部件等的全部重量。相对而言,堆芯容器和衰变箱内流体的流动较为简单,而导流箱内的流动则比较复杂。

2 数值模拟方法

2.1 PHOENICS 3.2 程序

PHOENICS 程序主要应用于动力、化工、制冷、航空、核能等工业领域的流体流动与传热过程的数值模拟,是目前世界上最流行的计算流体力学(CFD)软件之一。

最新版本的 PHOENICS 3.2 程序主要由 3 个模块组成^[1](图 2)。预处理模块的功能是通过虚拟现实编辑器或直接编辑数据文件建立几何数学模型、设定物理参数及边界条件、选取计

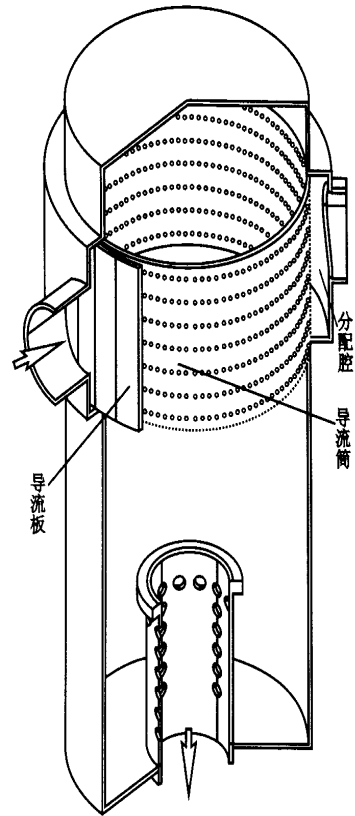


图 1 CARR 导流箱结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of flow-guide tank for China advanced research reactor

算模型和划分网格等,从而将实际所要求解的问题转化为运算模块所能接受的数据文件;运算模块的功能是针对前者的数据文件进行数值模拟;后处理模块的功能是把数值模拟结果用数据或图象方式输出。

2.2 数学建模及网格划分

PHOENICS 3.2 提供了直角坐标、柱坐标和贴体坐标(Body-fitted Coordinates) 3 种坐标系。贴体坐标虽可提供最经济的网格,但无法处理 CARR 导流箱这种复杂结构;柱坐标则

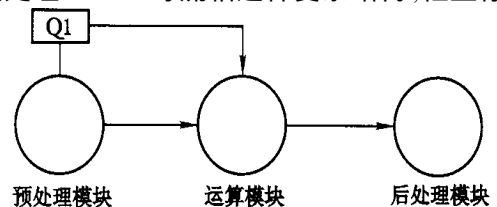


图 2 PHOENICS 3.2 程序结构
Fig. 2 Structure of PHOENICS 3.2

不能正确导入 CAD 模型(由 PHOENICS 3.2 本身的缺陷所致),因而,只能在直角坐标下通过调用 CAD 图形建立导流箱的几何数学模型。实践证明:只要网格划分足够细,由此建立的几何数学模型能较真实地模拟导流箱的实际结构及形状。

网格划分直接影响模拟结果。细密的网格可较好模拟实际情况,但受计算机的硬件所限,所能划分的实际网格数目是有限的。为此,在流场变化剧烈处将网格划细,其余地方则粗划。导流箱入口分配腔及导流板附近的流体速度变化很大,这些部位的网格相应划细,将导流箱划分为 $96(x \text{ 方向}) \times 85(y \text{ 方向}) \times 56(z \text{ 方向}) = 456\ 960$ 个网格。

3 计算结果与分析

用 PHOENICS 3.2 程序对 3 种结构导流箱内的流场进行计算:1) 导流箱内无入口导流板和导流筒;2) 导流箱内有入口导流筒,无导流板;3) 导流箱内有入口导流板和导流筒。

计算中的主要假设为:导流箱入口流速为均匀分布,流速为 1 m/s 。3 种不同结构的导流箱内流场的计算结果分别示于图 3、4 和 5。

从计算结果可看出:当无导流筒和导流板时,入口流体象一股强劲的射流沿水平方向冲进导流箱(图 3),箱内正对入口的垂直导管将受很大的水力冲击,直接导致导管的水力冲蚀,诱发水力振动,造成导管的疲劳损坏。显然,这种结构不能采用。导流筒对入口流体起了较好的分流作用,但正对入口处,入口流体经导流筒侧孔流入导流箱内依然形成一股射流(图 4)。尽管这股射流较前者小得多,但流速仍较高,进口流体的高强度水力冲击易造成导流筒损坏。进口导流板防止了导流筒承受直接的水力冲击,同时,又起到了分流和消除入口射流的作用(图 5)。导流板体积小,加工方便,因此,导流箱内设入口导流板和导流筒是较为理想的设计方案。

4 结论

导流箱的设计与优化是 CARR 设计的重要内容,它关系到 CARR 的安全可靠运行。合理的流场分析是确保导流箱优化设计成败的关

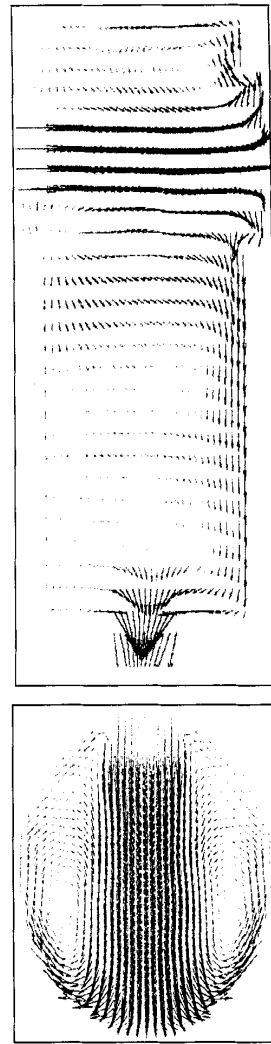


图 3 无入口导流板和导流筒的导流箱内流场
Fig. 3 Flow field of flow-guide tank
without inlet flow distributor barrel and buffer plate

键。采用 PHOENICS 3.2 对导流箱内三维流场进行的数值模拟计算结果表明:导流箱内设置导流板和导流筒能够显著改善导流箱入口冷却剂的流动状况,可获得将入口冷却剂沿周向均匀分流的效果,从而显著减缓对垂直辐照孔道导管及安全棒导管直接的横向水力冲刷。

这一研究结果为 CARR 导流箱设计优化提供了初步计算依据,但有关导流板的形状、大小及布放位置对流场的影响,还需进行进一步深入仔细的研究。

此项工作在陈海燕老师的指导下完成,得到了中国先进研究堆工程部的经费支持和设计部的协助,在此表示感谢。

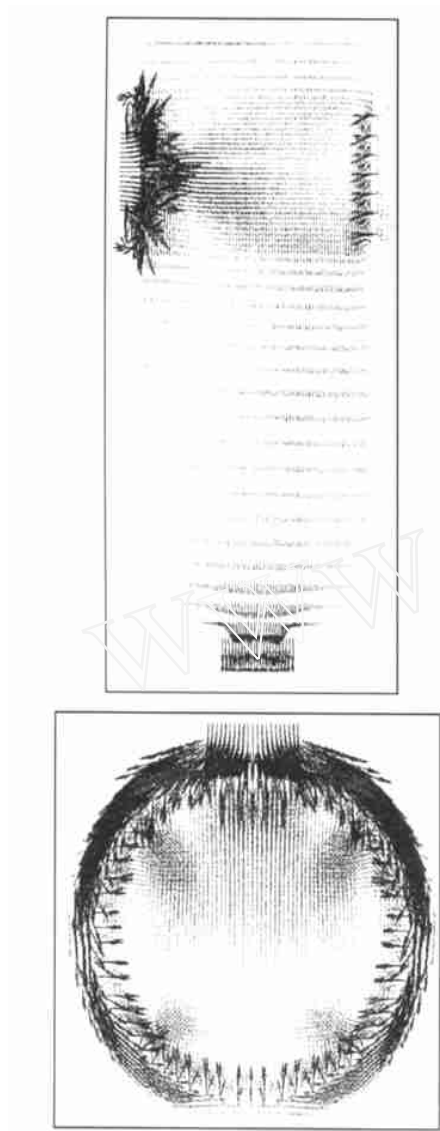


图4 有导流筒和无导流板的导流箱内流场

Fig. 4 Flow field of flow-guide tank
without inlet buffer plate

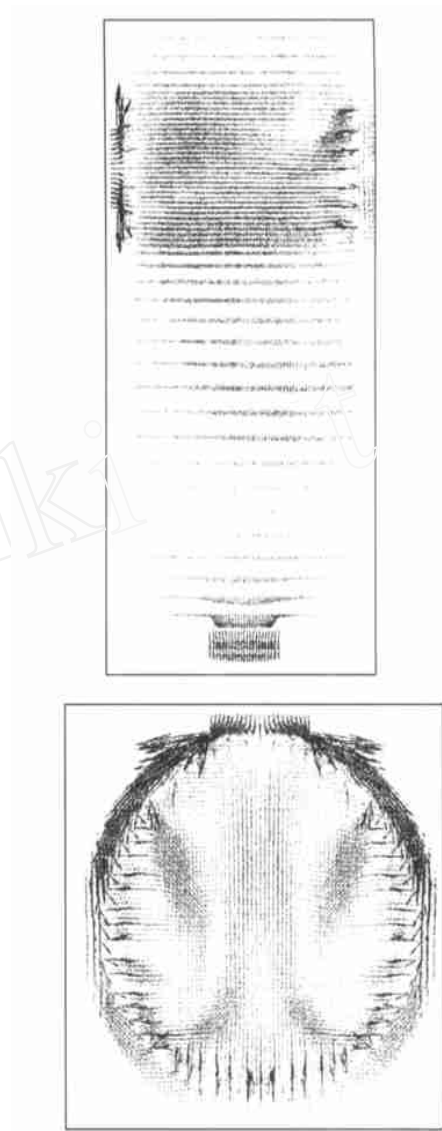


图5 有导流筒和导流板的导流箱内流场

Fig. 5 Flow field of flow-guide tank
with inlet flow distributor barrel and buffer plate

参考文献:

- [1] Rosten HI, Spalding DB. PHOENICS 3.2 User Manual TR300[Z]. [s.l.]:CHAM, 1999.