

快堆钠池三维稳态与非稳态 流动传热的数值研究*

邓保庆 席时桐 卢万成

(上海交通大学动力机械工程系, 200030)

采用 FASTOR-3D 程序对快堆钠池进行计算。该程序基于 SIMPLEC 算法和交错网格的三维流动传热模拟程序, 程序中应用多孔介质模型模拟流场中障碍物的影响。在稳态计算的基础上, 对温度小波动、停堆和停泵 3 种非稳态工况进行了模拟计算, 并对得到的流场和温度场数据进行了分析。结果表明: FASTOR-3D 程序具有良好的稳定性, 所采用的多孔介质模型的合理性由计算结果与钠池的几何结构相符得以证实。停堆和停泵事故工况下的计算结果符合低流速的基本特征。

关键词 FASTOR-3D 传热流动 快堆

中图法分类号 TL 333

安全与经济性是钠冷快堆的基本要求。对池式结构的钠冷快堆而言, 钠池内除有堆芯上部结构外, 还容有多个中间热交换器、主泵、屏蔽罩等设备。对于这样 1 个工作条件恶劣、区域呈复杂几何形状的池式结构, 设计上的任何一点变动都可能急剧地改变其内部的流动传热特性, 给快堆的工作性能带来重大影响^[1]。

本文应用自行开发的用以进行快堆钠池热工流场计算的 FASTOR-3D 程序^[2]对快堆钠池温度小波动、停堆和停泵 3 种典型非稳态工况进行计算, 为快堆钠池的设计提供数据。

1 物理和数学模型

快堆钠池的直径为 8.134 m, 2 个直径为 1.6 m 的主泵(PSP)和 4 个直径为 0.84 m 的中间热交换器(IHX)及其它设备在池内呈镜面对称布置。池外有厚度为 0.57 m 的复合保护层及 0.5 m 的空气通道组成的围护结构。池内存在多个流动障碍物, 既有完全不可流通的实体, 又有可部分流通的物体。从堆芯来的热钠经过池底部直径为 0.63 m 的圆孔进入主池。在直径 4.8 m 处布置着厚度为 20 mm 的屏蔽罩, 使罩内绝大部分流体只能经由 4 组出口流出。每组出口由 6 个直径为 0.5 m 的圆孔组成。这 4 组出口分别正对着每个中间热交换器的入口。

池外的围护结构由不锈钢、石棉绝热层、入口温度为 360 °C 的冷钠液体流经由 2 层不锈钢

* 中国原子能科学研究院委托的国家“863”计划研究课题

邓保庆: 男, 25 岁, 工程热物理专业, 在读博士生

收稿日期: 1997-01-27 收到修改稿日期: 1997-05-26

组成的夹套、封闭环腔内的氩气保护壳和空气冷却层组成。

根据以上结构采用多孔介质模型建立数学模型, 数学模型及边界条件见参考文献[2]。

2 计算结果和讨论

本文应用 FASTOR-3D 程序^[2]进行计算。

快堆钠池热工流场计算包括稳态计算和非稳态计算两部分, 前者是计算的关键, 它是非稳态计算过程的起点。与非稳态相比, 稳态求解易于发散、振荡及收敛缓慢, 非稳态问题则易出现解不真实、解不稳定等情况。解决上述问题可以试着采取如下方法。

1) 迭代求解的实质是从一初始场出发, 到达求解场, 若两者相差甚远, 则求解变得困难。此时, 应设法营造 1 个“较好”的初始场, 使其接近真解。这里提供的办法是: 一开始采用较简单的方程和边界条件, 使场的求解变得容易, 经过一定轮次的迭代后, 可以营造出 1 个基本上物理守恒的场, 之后通过对物理本质的分析可再使方程及边界条件细化, 达到求解的要求。

2) 适当变动边界条件, 使方程的累积误差解从某一边界中释放出去。边界条件特别是出口边界条件至关重要, 它关系着方程残差能否抵消, 解是否出现振荡和收敛性的好坏。

3) 求解中设法使求解场始终满足最基本的质量、能量守恒, 特别是质量守恒。采用 SIMPLEC 算法时, 由于压力本身没有控制方程, 而是通过连续性方程间接表达, 使动量求解与质量求解不能同步, 出现质量不守恒情况, 必需采取强制手段使其满足总体的质量、能量守恒。

另外, 考虑到湍流方程有比较强的非线性特性, 可先不求解湍流方程, 只求解层流方程, 达到收敛指标后, 再求解湍流方程。如此反复数次后再回到整个方程组的联合求解体系中^[3,4]。

为防止发散, 除对速度和压力进行亚松弛外, 对粘度也采用亚松弛。为较贴切地描述该方案中的大量障碍物, 又考虑到计算机的实际能力, 将网格结构定为 $17 \times 23 \times 29$ (高 \times 半径 \times 半圆周), 即 11339 个节点。围护结构网格结构定为 17×23 (高 \times 半径), 即 391 个节点。

在稳态和非稳态计算中, 当相对进口流量残差小于 1×10^{-4} 时, 即认为计算已经收敛。

2.1 稳态计算结果

稳态计算结果是 3 种非稳态工况计算的初始条件, 是 3 种工况共有的特征。这里选择 2 个典型水平截面和 2 个典型竖直截面分析计算结果。所选 2 个水平截面 A、B 及 2 个竖直截面 C、D 相继对应于池下部 IHX 入口、IHX 对称面和 PSP 对称面。

IHX 和 PSP 是钠池中的关键设备, 它们的运行正常与否对快堆的安全至关重要; 钠池下部是钠池中温度变化最快的部分。计算结果表明: 截面 A 上在入口区域有一微弱的右旋涡(图 1), 这是由提棒区的阻碍作用造成的。屏蔽罩内温度分布均匀, 与入口温度基本相等; 屏蔽罩外温度梯度较大, 呈现固体径向导热的特征。截面 B 上左侧屏蔽罩外壁与钠池壁之间的区域也存在一较弱的右旋涡。截面 C 上存在以下 2 个旋涡: 入口附近的底部区域的顺时针旋涡和堆芯上部结构侧壁面附近的逆时针旋涡(图 2), 它们分别是由于池底部围护结构的轴向折流和堆芯上部结构的径向折流作用造成的。在该截面上, 温度梯度主要出现在钠池壁面处, 其原因在于钠池内部无热源且壁面绝热良好, 池底部近壁面处为固体区域, 导热情况较差。截面 D 上流体在屏蔽罩内侧附近折流向下并在上部形成一顺时针的旋涡。

上述典型截面的分析表明: 稳态计算结果符合钠池的几何特征, 钠池的温度场和钠池的流场相对应。这一结果为钠池的非稳态计算提供了较为合理的初始条件。

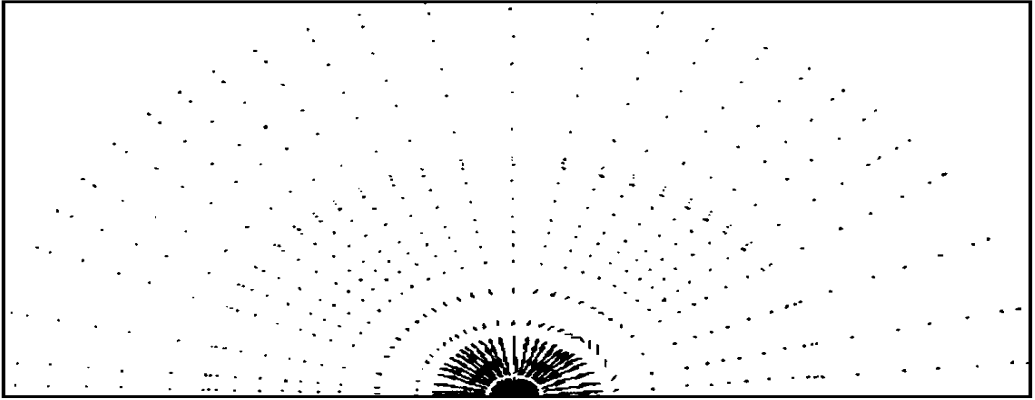


图1 截面A上的速度分布

Fig 1 Velocity distribution on section A

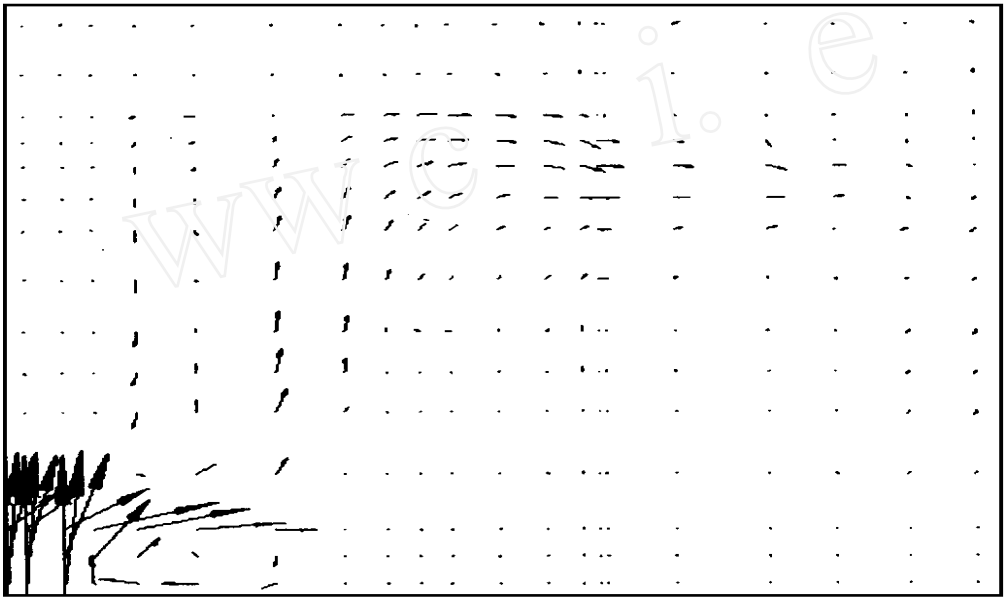


图2 截面C上的速度分布

Fig 2 Velocity distribution on section C

2.3 非稳态计算结果

非稳态计算包括温度小波动、停堆和停泵3种工况。计算均以稳态计算结果作为初始条件。其中,温度小波动工况为正常运行工况,后两者为事故工况。在这3种工况下,特别是事故工况下钠池的流场和温度场分布状况尤为重要。

1) 温度小波动工况

本算例在保持入口流量稳定在稳态流量水平时,入口温度有小幅度迁升:与零时刻相比,15 s后入口温度升高13;50 s时比15 s时高2;在50—100 s之间入口温度不再变化。

考虑到温度变化幅度较小,密度的相应变化也不大,计算时引入Boussinesq(波辛涅斯克)假设,因此,不同时刻的流场情况与稳态流场情况几乎相同。该算例在0—100 s时间间隔内计算出的流场基本保持不变,这说明了计算程序的数值稳定性较好。

温度场在初始时刻呈现与稳态计算相同的分布。随着时间的推移,约在15 s时,截面A上核心区升温明显,温度梯度主要出现在底部旋涡界面附近,即主流与旋涡界面及旋涡与固体界面。旋涡中心区温度比其边缘处约低2℃。截面B上的温度分布与截面A相似,主流区温度有明显变化。与稳态情况相比,截面C主要是热流体前锋在主流区有较大扩展。这一现象与该工况的大流量持续作用相一致。截面D上热流体在屏蔽罩内发展较快,这与该处上部的左旋涡有关。屏蔽罩外温度无明显变化,说明热流体前峰尚未到达边缘区域。时间进一步推移到50 s以后,截面A和B上温度变化波及全部可流通区域和周边地区,这是大流量持续作用的结果。这时,截面C和D上热流体前峰明显扩大,屏蔽罩温度从无明显变化到开始有所变化。

上述分析充分表明了该工况的大流量特征。

2) 停堆工况

本算例模拟停堆工况。在0—30 s以内,钠池入口及HX出口的流量均骤然降低。30 s时,上述两处的流量仅为0 s时的1/2。在30—100 s内,钠池的进出口流量保持不变。

初始时刻流场分布与稳态相同。随着时间的推移,截面A上的流场具有与稳态基本相同的分布,这表明截面A上的流动基本上是由该截面上的几何条件决定的。由于入口流量减少,速度相应较小。截面B上出现了比较复杂的情况。左右两侧屏蔽罩出口区域的旋涡强度加大,且在左侧屏蔽罩出口又分裂出1个左旋涡,同时壁面附近的切向速度增加。这一切都可归结为出入口流量骤然减小后流动惯性的作用。截面C上的旋涡继续存在,在HX汇流处显示了较强的惯性作用,流体穿越汇流区后撞击钠池侧壁,继而在上下两区域分别形成一顺时针和逆时针旋涡。与稳态相比,截面D在屏蔽罩内侧壁则显示了更加明显的折流效果。

初始时刻温度场分布与稳态相同。在0—30 s内,入口温度迅速下降,温度从530 K降为426 K,由于流量随之大幅度降低,因此温度变化的影响区域较小,主要集中在入口区域附近。在约30 s时,截面A中心区温度大幅度下降,外围区域温度则基本不变,主流区与底部回流区的温差较大,这说明局部回流影响了传热。相对于截面A,截面B温度变化更小。截面C和D上冷流体前峰仅限于入口的圆柱形区域中,温度变化对其它部分影响甚微。在30—100 s之间入口温度重新升高,从426 K升到450 K,同样因流量较小而使得温度波动仅局限于入口区。此外,前一阶段进入的冷流体在惯性作用下继续前进。截面A和B上温度梯度主要存在于旋涡与主流界面以及流体与固体界面。在截面C和D上,冷流体前峰逐渐扩大,入口附近区域温度有小幅度回升。

3) 停泵工况

本算例模拟停泵工况。在0—40 s内,钠池入口和HX汇流出口的流量逐渐降低,同时钠池入口的温度逐渐上升。与停堆工况相比,两者在前40 s内流量基本相同,该工况的流场分布几乎与停堆工况的流场分布相同。

初始时刻温度场分布与稳态的相同。随着时间的推移,截面A和B上入口附近的区域温度迅速升高,其它区域基本保持不变,这是因为流量小的缘故。截面C和D上,在钠池入口处和钠池外壁处出现了陡峭的温度梯度,随着时间的推移,温度梯度进一步增大。

快堆钠池3种典型工况的计算证明了池式快堆在安全方面的固有优越性。尽管钠池入口

温度不断变化,钠池内部温度场则变化得较慢,变化幅度亦小。这种情况在停泵工况中尤为明显。其根本原因在于钠池的巨大热容量。

3 结论

快堆钠池稳态和非稳态计算结果与钠池的几何结构相符,由此证明了 FASTOR-3D 程序所使用的空隙率概念的合理性。温度小波动工况的计算表明 FASTOR-3D 程序具有良好的稳定性。停堆和停泵工况的计算与复杂几何结构中低流速的一些特征基本相符。池内实际过程的计算结果基本可信。

由于条件所限,不能采用更加细密的网格进行计算,这是后续研究的方向之一。

参 考 文 献

- 1 赵兆颐,朱瑞安 反应堆热工流体力学 北京:清华大学出版社,1992 269—277.
- 2 席时桐,卢万成 快堆钠池热工流体数学模型及计算 中国原子能科学研究院反应堆工程技术研究设计所委托研究项目总结报告 1996
- 3 陶文铨 数值传热学 西安:西安交通大学出版社,1988 433—438
- 4 周力行. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟 北京:清华大学出版社,1991. 175—183

NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER AND FLOW WITH THREE-DIMENSIONAL STEADY AND TRANSIENT STATES IN SODIUM POOL OF FAST BREEDER REACTOR

Deng Baoqing Xi Shitong Lu Wancheng

(Department of Power Machinery Engineering, Shanghai Jiaotong University, 200030)

ABSTRACT

Three-dimensional computer code FASTOR-3D, based on SIMPLEC algorithm and staggered grid scheme, is used to simulate heat transfer and flows in sodium pool of fast breeder reactor. Porosity model is used to simulate the effects of obstacles in the fluid domain. On the basis of computation and analysis for flow line and temperature distributions of steady state three kinds of transient situations, temperature fluctuating, pump stopping and shut down are computed. The data of flow line and temperature are analyzed. It is found that FASTOR-3D has good stability and the porosity model is reasonable by accordance between numerical results and geometrical conditions. Numerical results of two accident situations, pump stopping and shut down, conform to the basic features of low velocity.

Key words FASTOR-3D Flow and heat transfer Fast breeder reactor