

快堆钠池三维稳态流场和温度场的研究*

邓保庆 席时桐 卢万成

(上海交通大学动力机械工程系, 200030)

采用基于多孔介质模型的 FASTOR-3D 程序研究快堆钠池稳态流场和温度场。对该程序采用的 $K-\epsilon$ 两方程湍流模型和常粘度系数模型进行了讨论。计算结果表明: 导热系数和比定压热容对钠池内部温度场没有影响, 仅在钠池边界附近对温度场有微小影响; 2 种模型的计算结果相近, 但采用常粘度系数模型计算易于收敛且计算时间较短。

关键词 快堆钠池 流动传热 FASTOR-3D

中图法分类号 TL 334

能源一直是世界各国经济发展的制约因素, 发展核能是缓解能源供求矛盾的主要途径之一。目前, 世界上实用的核反应堆均以 ^{235}U 为裂变材料, 其缺点是只能利用天然铀潜在能力的 1%—2%。提高铀的利用率, 发展 1 种新的堆型是必须的。快中子增殖反应堆可利用占天然铀储量 99.2% 的 ^{238}U , 且具有燃料循环成本低、效率高及可建造大型电厂的优点。

对池式结构的快堆而言, 快堆钠池内液钠流动传热特性的好坏直接关系到快堆设计的成败。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, 任何一点设计上的变动都可能急剧地改变其内部的流动传热特性, 给整个快堆的工作性能带来严重影响^[1]。

1 湍流模型

快堆钠池中的流动处于湍流状态。因此, 必须引入湍流模型来封闭控制方程组。 $K-\epsilon$ 两方程湍流模型是当前广为使用的湍流模型。FASTOR-3D 程序采用该模型并在壁面处采用壁面函数^[2,3]。由于主池内部存在大量的障碍物, 若要考虑湍流方程在所有障碍物处的壁面效应(壁面函数), 计算十分复杂, 且影响程序的变通能力。另一方面, 考虑到下列因素, 内部障碍物的壁面效应并不重要:

- 1) 流道形状变化对流动传热的影响远大于湍流状态的作用;
- 2) 内部温度场较为均匀, 温度梯度主要分布在池的外壁处;

* 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: 1997-08-12

- 3) 主池外壁附近的流动状态直接影响钠池整体的传热量;
- 4) 主池外壁附近高度和切向上流动状态的非均匀性较强。

因此, 只在主池外壁附近考虑壁面效应能较好地模拟实际的传热流动状态。以此为前提, 采用 $17\text{ mm} \times 23\text{ mm} \times 29\text{ mm}$ (高 \times 半径 \times 半圆周) 网格, 采用 $K-\epsilon$ 双方程湍流模型和常粘度系数模型对快堆钠池进行模拟计算, 并将其在典型位置的计算结果作了比较 (图 1 和 2)。

图 1 为周向位置 $K = 8$ 处的池壁温度分布。2 种模型所得的温度分布较为接近。前者略小于后者是由于常粘度模型采用的有效粘度较大的缘故。

图 2(a) 为在周向位置 $K = 10$ 和高度位置 $I = 12$ 处的速度分布。在大部分区域两者十分接近, 半径较大时两者差别扩大, 原因是大半径时两者的有效粘度差别较大。

图 2(b) 为周向位置 $K = 8$ 和径向位置 $J = 8$ 处的垂直方向速度分布。曲线右部差异比左部大, 说明障碍物对流动的影响大于模型差别的影响。

采用双方程湍流模型与常粘度模型计算的总体传热量分别为 1.076 和 1.101 MW , 表明 2 种模型导致的差别可以接受。

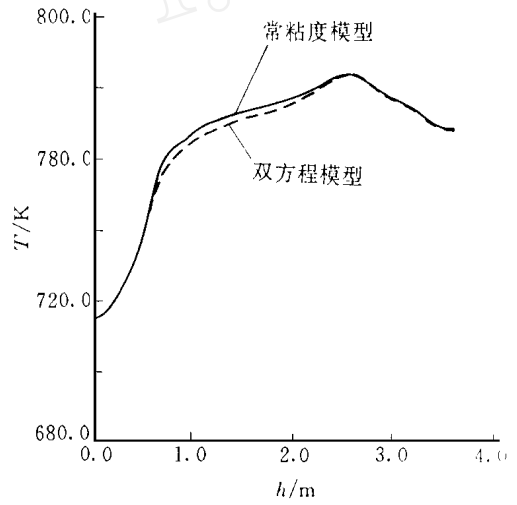


图 1 壁面温度

Fig 1 Temperature of the wall surface

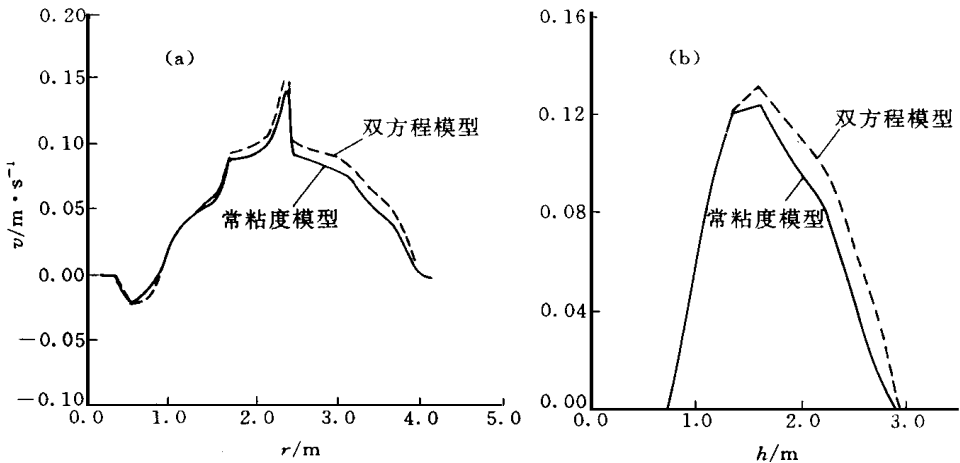


图 2 速度分布

Fig 2 Velocity distribution

(a): 周向位置 $K = 10$ 高度位置 $I = 12$ 处; (b): 周向位置 $K = 8$ 径向位置 $J = 8$ 处

通过上述计算和比较分析, 针对目前的计算对象, 以常粘度模型代替 $K-\epsilon$ 双方程湍流模

型, 所得出的计算结果是可以接受的。相应地, 计算代价却成倍降低。因此, 对于非稳态计算亦可采用这种简化计算方法。

2 物性参数

在快堆钠池三维流动传热计算中, 导热系数 k 和比定压热容 c_p 均被视为常数: $k=57$; $c_p=1273$ 。实际上, 导热系数和比定压热容都是温度的函数。考虑到变导热系数和变比定压热容对钠池内部温度场的影响, 认为钠的导热系数和比定压热容满足以下公式^[1]:

$$k = (0.0918 - 4.9 \times 10^{-5} t) \times 10^3$$

$$c_p = (1.4371 - 5.8063 \times 10^{-4} t + 4.6239 \times 10^{-7} t^2) \times 10^3$$

上述各式中的单位为: k —— $W/(m \cdot ^\circ C)$; c_p —— $J/(kg \cdot ^\circ C)$; t —— $^\circ C$ 。

计算针对快堆正常运行工况。为精确地考虑导热系数和比定压热容的影响, 整个计算共分为 4 组:

- 方案 A —— 导热系数为常数, 比定压热容为常数;
- 方案 B —— 导热系数为常数, 比定压热容为变量;
- 方案 C —— 导热系数为变量, 比定压热容为常数;
- 方案 D —— 导热系数为变量, 比定压热容为变量。

图 3 为计算结果, 它们分别表示钠池壁面上的温度分布和屏蔽罩上的温度分布。每张图上边的曲线是屏蔽罩上的温度分布, 下边的曲线是壁面上的温度分布。

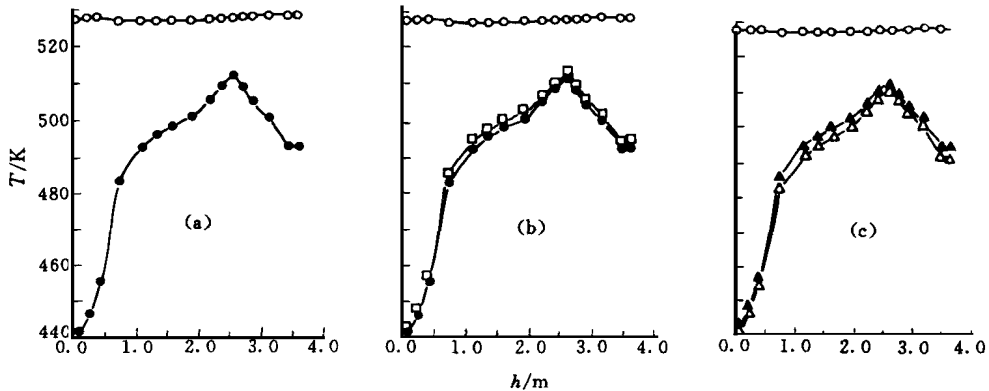


图 3 高度方向温度分布

Fig 3 Temperature distribution along the height

(a): 方案 A 和 B; (b): 方案 A 和 C, 表示 k 为常数, 表示 k 为变量;

(c): 方案 A 和 D, 表示 k 为常数, 表示 k 为变量

由图 3 可以看出, 在 4 种情况下, 屏蔽罩上的温度分布都相同, 表明变导热系数和变比定压热容对钠池内部温度场没有影响。由于液态钠导热率很高, 其 Pr 数一般只有十分之几。低 Pr 数使靠分子导热从发热面传出的热量比涡流传热量要大得多^[4]。只有在很高的 Re 数下, 这种差别才有所减少。所以, 这种情况说明钠池内部湍流作用相当强, 掩盖了变导热系数和变比定压热容的作用。从屏蔽罩上的温度分布可以进一步推测, 由于比较强的湍流作用, 变导热系

数和变比定压热容对钠池内部的温度分布几乎没有影响。在壁面上, 由于湍流作用比较弱, 分子导热处于主导地位, 温度分布显示出差别。在图 3(a) 中, 壁面上的温度分布亦相同, 其原因是在所研究的温度范围内比定压热容近似保持为常数。在图 3(b) 和图 3(c) 中, 导热系数为常数时的温度要比导热系数为变量时的温度低, 造成这一现象的原因是由于钠的导热系数随着温度的降低而升高。不过, 这一差值很小, 与钠池壁面本身温度相比, 其影响可以忽略不计。

3 结论

采用 FA STOR-3D 程序研究快堆钠池稳态流场和温度场, 用 $K-\epsilon$ 两方程湍流模型和常粘度系数模型对快堆钠池稳态流场和温度场进行了计算, 两者之间符合较好。根据这一结论, 用常粘度系数模型来代替 $K-\epsilon$ 双方程湍流模型, 可以大幅度降低计算成本, 在非稳态计算中更是如此。采用文献[1]所推荐的导热系数和比定压热容公式, 研究了变导热系数和变比定压热容对快堆钠池温度场的影响。计算结果表明: 在钠池内部, 两者对温度场没有影响; 在钠池壁面附近, 采用变导热系数和变比定压热容时的温度分布虽比两者为常数时的温度分布稍偏高, 但两者差异很小, 可以忽略不计。

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
- 2 陶文铨 数值传热学 西安: 交通大学出版社, 1988
- 3 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.
- 4 杨世铭 传热学 北京: 高等教育出版社, 1990

DISCUSSION OF THE STEADY STATE VELOCITY FIELD AND TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE SODIUM POOL OF A FAST BREEDER REACTOR

Deng Baoqing Xi Shitong Lu Wancheng

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

ABSTRACT

Based on SIMPLEC algorithm and staggered grid scheme, a three-dimensional flow and heat transfer computer code, FA STOR-3D, is developed to investigate the flow and heat transfer in a sodium pool of a fast breeder reactor. Two equation $K-\epsilon$ turbulence model and constant viscosity model are compared. It is found that the numerical results are almost same and the constant viscosity model is easy to converge and saves the CPU processing time.

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