

# 水平加速条件下矩形通道内 冷却剂温度与流场分析

罗磊, 陈文振, 陈志云, 郝建立

(海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**运用流体计算软件模拟计算和分析了处于船用反应堆某处的矩形冷却剂通道在随船体水平加速运动时冷却剂的温度和流场, 考虑了由于船体加速运动而引起的流量孔板流量分配的变化对矩形通道入口速度的影响。计算结果表明, 在船体的水平加速度较大时, 通道出口冷却剂的温度与流场的变化很大, 但持续时间较短。

**关键词:**下腔室; 矩形通道; 水平加速

**中图分类号:** TL334

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2011)06-0662-05

## Analysis on Coolant Temperature and Velocity Fields in Rectangular Channel With Horizontally Acceleration

LUO Lei, CHEN Wen-zhen, CHEN Zhi-yun, HAO Jian-li

(Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Coolant temperature and velocity fields of rectangular channel in a marine reactor were simulated and analyzed with computational fluid dynamic codes when the ship was moving with horizontal acceleration. Effect of the mass flow rate distribution variation by ship motion on channel inlet average velocity was taken into account. The result shows that the coolant temperature and velocity fields in the channel vary significantly when the horizontal acceleration is big, but the variation time is short.

**Key words:** lower plenum; rectangular channel; horizontal acceleration

反应堆压力容器下腔室内流体流动特性分析是进行堆内结构优化设计和堆芯热工水力设计的前提<sup>[1]</sup>, 反应堆下腔室的流场分布直接影响流量孔板和堆芯的流量分布特性。在船体运动过程中, 船用压水堆内下腔室内冷却剂流场将发生变化, 从而导致流量孔板和堆芯内流量分配的变化。

本工作采用三维数值模拟的方法计算和分析在船体水平加速运动过程中, 位于船用压水堆堆芯内不同位置处的矩形通道内冷却剂的温度和速度场的变化。

### 1 计算对象

本工作计算了两个燃料板之间的 1 个冷却

剂通道,其示意图如图1所示。以通道入口截面的几何中心作为坐标原点,冷却剂流动方向为 $z$ 方向,通道宽边和窄边方向分别为 $x$ 、 $y$ 方向建立直角坐标系。通道的尺寸为 $L \times a \times b = 700 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

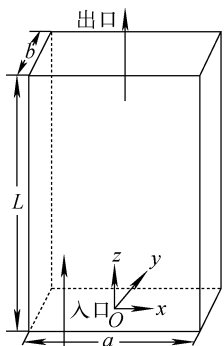


图1 计算模型示意图

Fig. 1 Scheme of physical problem

对于流道内冷却剂物理属性和加热壁面的壁面条件作出如下假设。

1) 反应堆堆芯内压差与其平均压力相差很大,因此,认为冷却剂的物理性质仅随通道内温度变化,而不随压力变化,计算公式用文献[2]数据拟合得出,其误差小于5%。

2) 通道壁面窄面(平行于 $yOz$ 面)绝热,宽面(平行于 $xOz$ 面)为板状燃料元件包壳外壁,沿 $x$ 方向发热均匀,沿 $z$ 方向(冷却剂流动方向)按照余弦规律分布,其计算公式为:

$$q''(z) = q''_{\max} \cos(\pi(z + (L_e - L)/2)/L_e) \quad (1)$$

式中: $q''(z)$ 和 $q''_{\max}$ 分别为壁面功率密度分布和壁面最大功率密度, $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $L_e$ 为包含外推高度的反应堆高度,m。

## 2 通道入口平均速度计算

为了得到加速运动条件下位于堆芯内不同位置处矩形通道入口流速的变化情况,对下腔室内流场进行计算。

### 2.1 下腔室计算模型

文献[1]建立的计算下腔室冷却剂流场计算模型为下腔室的一半,模型中包含了下腔室内的支撑柱、仪表导管等对流场的影响,所取得的结果与实验数据符合得很好。由文献[3]的

计算结果可见,由于支撑柱和仪表导管等的结构尺寸与下腔室本身的尺寸相比相差较大,因此,这些部件仅对其附近的小部分冷却剂流场影响较大,而对于流量孔板下方的冷却剂流场影响较小,因此,对通过流量孔板的冷却剂流量分配的影响也较小。根据上述分析,本工作取图2所示的下腔室区域进行计算,并对计算区域上方的流量通孔进行分组,如图3所示。对计算区域划分网格,选用标准 $k-\epsilon$ 模型计算,进行网格敏感性分析后选取网格数为60万的1组网格进行计算。

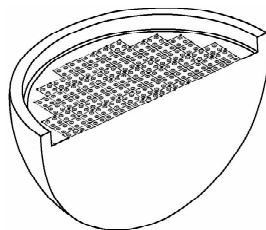


图2 下腔室计算区域示意图

Fig. 2 Computed region of lowercoming

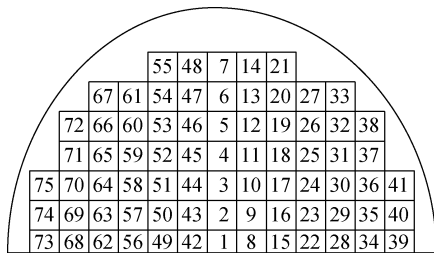


图3 流量孔板上的通孔分组

Fig. 3 Hole group numbers in flow plate

### 2.2 加速运动条件的引入

在采用流体计算软件 FLUENT 进行计算时,忽略了流体边界的法向速度<sup>[4]</sup>,而图2所示的下腔室内冷却剂的边界为半球型,反应堆加速运动时冷却剂的边界相对于冷却剂的运动是切向和法向运动的和,因此,对于下腔室的边界条件不能直接用 FLUENT 的边界条件选项进行定义。本工作采用文献[5]的方法,将由边界加速运动产生的表面力转化为冷却剂本身的体积力,并计算出由此体积力而产生的加速度,编制了相应的用户自定义函数载入 FLUENT 求解器中,修改冷却剂动量方程的源项,实现了下腔室冷却剂边界加速运动的模拟。通过分析其

量纲可知该源项的定义为:

$$S_{\text{user}} = \rho(-a) \quad (2)$$

式中: $S_{\text{user}}$ 为使用用户自定义函数定义的冷却剂动量的变化量, $\text{N}/\text{m}^3$ ;  $a$ 为船体运动的加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\rho$ 为冷却剂密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 2.3 不同位置处通道入口冷却剂速度的变化规律

本工作以冷却剂在流量孔板的流量分配变化规律作为堆芯入口流量分配变化规律,通道入口冷却剂的变化规律与相对应的通孔小组流量变化规律之间的关系为:

$$u(t) = u_0 G(t) / G_0 \quad (3)$$

式中: $u_0$ 和 $G_0$ 分别为静止条件下通道入口冷却剂平均速度和流量孔板通孔小组冷却剂流量; $u(t)$ 和 $G(t)$ 分别为通道入口冷却剂平均速度和流量孔板通孔小组冷却剂流量随时间的变化规律。

文献[5]计算了入口速度恒定的条件下,加速度为 $0.1$ 、 $1$ 和 $2 \text{ m}/\text{s}^2$ 时,矩形通道内冷却剂的温度和流场,根据其计算结果,加速度为 $2 \text{ m}/\text{s}^2$ 时对冷却剂的温度和流场影响最大,因此,本工作计算了加速度为 $2 \text{ m}/\text{s}^2$ 时下腔室内的流场,得出了在此条件下流量板通孔流量的变化规律。图4为图3所示的第1、4、22和56组通孔上方的冷却剂通道入口冷却剂平均速度的变化。

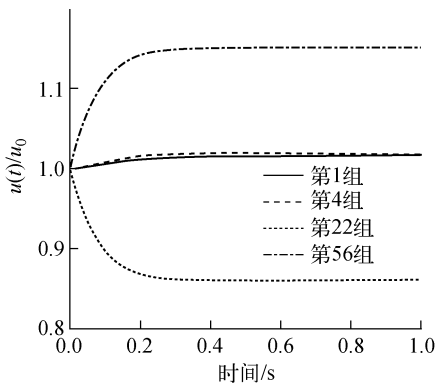


图4 通道入口平均流速的变化

Fig. 4 Variation of average inlet velocity with time

## 3 计算模型

### 3.1 网格模型

对图1所示计算区域划分网格,使用RSM

模型在静止条件下进行求解,当第1层网格厚度为 $0.04 \text{ mm}$ ,且总体网格数为 $16.8$ 万时,计算所得的壁面换热系数与由Dittus-Boelter公式[6]计算的结果相比较,相对偏差小于 $2\%$ ,因此用该网格模型进行计算。

### 3.2 边界条件

边界条件如下:壁面最大功率密度 $q''_{\text{max}}$ 为 $10^6 \text{ W}/\text{m}^2$ ;静止时流道入口平均速度 $u_0$ 为 $2 \text{ m}/\text{s}$ ;流道入口温度 $T_{\text{co}}$ 为 $500 \text{ K}$ ;流道平均压力 $p_{\text{cavg}}$ 为 $15 \text{ MPa}$ 。

### 3.3 时间步长的设定

由文献[7]可知,在使用FLUENT进行非稳态计算时,时间步长 $\Delta t$ 应小于冷却剂流过每个网格的时间,即:

$$\Delta t < \Delta L / |u_{\text{max}}| \quad (4)$$

式中: $\Delta t$ 为非稳态计算的时间步长, $\text{s}$ ;  $\Delta L$ 为网格的最小尺寸, $\text{m}$ ;  $u_{\text{max}}$ 为最小网格处冷却剂的最大流动速度, $\text{m}/\text{s}$ 。根据静止条件时的计算结果, $\Delta t$ 取 $0.001 \text{ s}$ 时,式(4)成立。

## 4 计算结果与分析

文献[8]计算和分析了船体在横摇和纵摇时,矩形通道内流体的湍流流动特性,计算过程中分别以图1所示的 $y$ 轴和 $x$ 轴为转动轴摇摆模拟船体的横摇和纵摇,根据其计算结果,横摇对于通道内冷却剂流动的影响远大于纵摇,因此,本工作计算了通道随船体沿 $x$ 轴正方向水平加速时,通道内冷却剂的温度和速度场。

图5示出各位置的通道出口冷却剂最高温

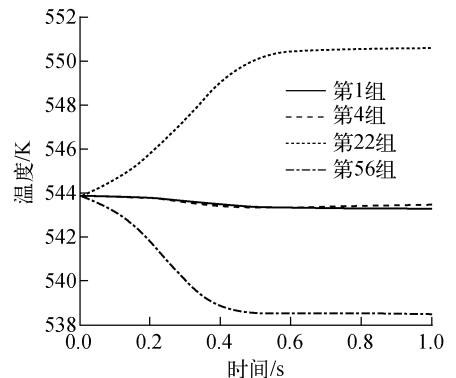


图5 出口最高温度随时间的变化

Fig. 5 Variation of maximum outlet temperature with time

度的变化。与其入口流速的变化相对应,入口流速增加的通道出口最高温度减小,入口流速降低的通道出口最高温度升高。在通道加速的过程中,出口最高温度也仅在加速度引入后的一小段时间内发生变化,且出口最高温度的变化略微滞后于入口速度的变化。处于两侧的两个通孔小组上方的通道出口最高温度的最大变化约为 6 K。

在矩形通道水平加速运动过程中,冷却剂由其入口流向出口,通道的形状无变化,冷却剂重力势能不变,因此,摩擦力即为通道压降变化的主要原因。本工作考察了冷却剂与相对加速度方向垂直的壁面之间的剪切力  $F$  在通道运动过程中的变化情况,式(5)为壁面剪切力的计算式:

$$F = \rho \nu \frac{du}{dn} \quad (5)$$

式中: $n$  为壁面的法线方向坐标; $\nu$  为冷却剂的动力粘度系数,Pa·s。

图 6 示出两个绝热壁面与冷却剂之间归一化平均壁面剪切力随时间的变化。两绝热壁面剪切力的变化与入口速度的变化是同步的,当速度不再变化时,壁面剪切力也保持不变,处于两侧位置上的两个通道壁面剪切力的最大变化率约为 25%。通道加速度对于壁面剪切力的影响较流量变化的影响小得多,但仍可发现在加速度的影响下,加速度所指向的一壁平均壁面剪切力略有减小,加速度所背向的一壁平均壁面剪切力略有增加。

为了分析冷却剂在通道内的横向流动状况,定义横向速度  $v_{Tc}$  为:

$$v_{Tc} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (6)$$

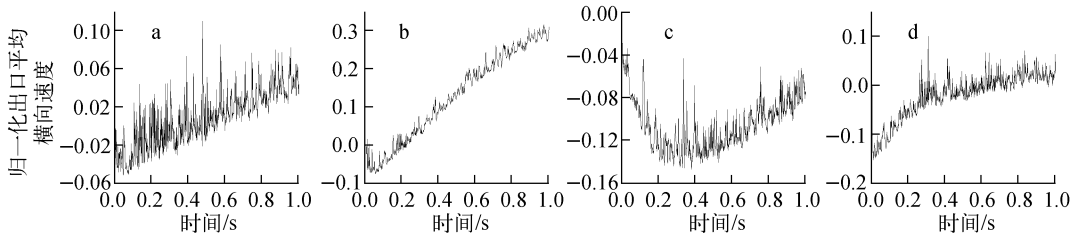


图 7 归一化出口平均横向速度随时间的变化

Fig. 7 Variation of normalized average  $v_{Tc}$  with time

a—第 1 组;b—第 4 组;c—第 22 组;d—第 56 组

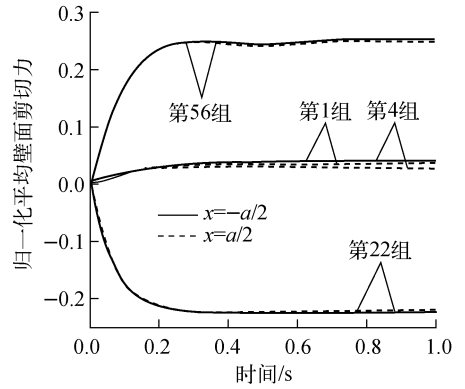


图 6 归一化平均壁面剪切力随时间的变化

Fig. 6 Variation of normalized average wall shear stress with time

式中: $u_1$  和  $u_2$  分别为冷却剂沿  $x$  和  $y$  方向的速度分量,m/s。

由定义可知  $v_{Tc}$  为标量,与速度具有相同的量纲。图 7 示出 4 个位置上通道出口平均横向速度的变化。由图 7 可见,当入口速度开始变化时,出口平均横向速度先减小到稳态值的 95%左右,然后随入口速度变化,入口速度增加则出口平均横向速度也增加,反之亦然。

图 8 示出归一化出口最小横向速度随时间的变化。由图 8 可见,在入口速度变化开始后,处于各位置处通道的出口最小横向速度也开始变化,且变化趋势与入口速度的变化趋势相同,入口速度升高则出口最小横向速度升高,反之亦然;出口最小横向速度的最大变化率与通道入口速度的变化率相对应,通道入口速度的最大变化率越大,则出口最小横向速度的最大变化率越大。

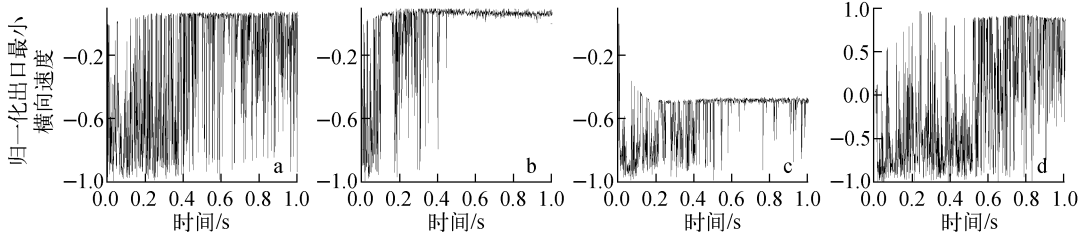


图8 归一化出口最小横向速度随时间的变化

Fig. 8 Variation of normalized minimum  $v_{Tc}$  with time

a——第1组;b——第4组;c——第22组;d——第56组

## 5 结论

本工作采用三维数值模拟的方法计算了船体水平加速运动过程中下腔室内冷却剂的流场,得出了流量孔板不同位置处通孔流量的变化情况,并以此为边界条件,计算和分析了位于船用压水堆堆芯内不同位置处的矩形通道内冷却剂的温度和速度场的变化情况。发现在通道水平加速运动条件下,通道出口的最高温度仅在加速运动开始的一小段时间内受到影响,并且其变化滞后于通道入口平均速度的变化,由入口速度变化引起的两绝热壁面剪切力的变化较由通道加速运动引起的两壁面剪切力的变化大得多,而出口的平均横向速度和最小横向速度均会受加速运动的影响。

## 参考文献:

- [1] 蒋晓华. 反应堆压力容器下封头三维流场计算[J]. 核动力工程, 2002, 23(5): 49-53.  
JIANG Xiaohua. Three dimensional numerical simulation in lower header of reactor pressure vessel[J]. Nuclear Power Engineer, 2002, 23(5): 49-53(in Chinese).
- [2] 赵兆颐. 国际单位制的水和水蒸气性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.

- [3] JEONG J H, HAN B S. Coolant flow field in a real geometry of PWR downcomer and lower plenum[J]. Annals of Nuclear Energy, 2008, 35: 610-619.
- [4] ANSYS fluent 12 user's tutorial guide[M]. USA: ANSYS Fluent Inc., 2009.
- [5] LUO L, CHEN W Z, CHEN Z Y. Analysis of single phase flow and temperature fields in rectangular channel with translation in width[C]// 18th International Conference on Nuclear Engineering. Xi'an, China; [s. n.], 2010.
- [6] DITTUS F W, BOELTER L M K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type[M]. USA: University of California Publications in Engineers, 1930: 443-461.
- [7] SMETS N, DAMME S V, WILDE D D. Time averaged temperature calculations in pulse electrochemical machining, Part II: Numerical simulation [J]. J Appl Electrochem, 2008, 38: 551-560.
- [8] YAN B H, GU H Y, YANG Y H. Theoretical research of flowing characteristics of turbulent flow in rectangular channels in ocean environment [C]// 18th International Conference on Nuclear Engineering. Xi'an, China; [s. n.], 2010.