

文章编号:1000-6931(2001)02-0147-06

NHR-200 堆芯旁通区三维流动传热数值分析

解 衡,高祖瑛

(清华大学 核能技术设计研究院,北京 100084)

摘要:应用三维 CFD 软件 PHOENICS-3.2,计算了 200 MW 低温供热堆(NHR-200)堆芯旁通区及上腔室的流场和温场。分析了在堆芯与围板间的乏燃料存放区上端不同挡板布置方案下的流场和温场,并考虑了旁通流量的影响。自然对流对流场和温场的影响不大,不会改变主流方向。在计算区域内,除主流外,还有由堆芯旁通区的下部流通面积突扩造成的一回流区及上腔室堆芯出口流通面积突扩和自然对流而形成的一大回流区。加挡板可阻挡上部大回流区对堆芯旁通区的影响,降低堆芯旁通区流体温度的变化。

关键词:低温供热堆;传热;流动;数值分析

中图分类号: TL334 **文献标识码:** A

200 MW 低温供热堆(NHR-200)采用自然循环运行方式,由堆芯与热交换器间的冷却剂温差引起的密度差形成压头,驱动冷却剂自然循环。自然循环的驱动力小,流速低,其堆芯旁通区和上腔室的流动与强迫循环有所不同,可能存在较大的横流。堆芯内燃料元件盒间存在旁通区,它与乏燃料存放区及堆芯上腔室相通。相通的这 3 个区域有两股冷却剂来源,一是堆芯旁通入口的冷流体,另一是堆芯出口的热流体^[1]。热流体与围板间以及燃料元件盒与围板间存在的温差可能引起自然对流。由于一回路采用自然循环方式,其驱动压头较小,流速较低,因而,这种自然对流可能影响一回路流速。另外,冷流体与热流体能否均匀混合也将对一回路自然循环的驱动压头产生影响。这些问题必须通过计算三维流场予以研究。本工作采用英国 CHAM 公司的 CFD 软件 PHOENICS-3.2^[2],计算不同挡板布置方式下上述区域的三维流场及温场,并比较分析不同布置方式的优劣,以为设计方案的改进提供依据。

1 数学及物理模型

由于堆芯沿横向和纵向对称,所以,取整个堆芯的 1/4 为计算区域。图 1 为计算区域的示意图。图中线 AL 平行于 z 轴,为方便表示流场而设。计算区域包括乏燃料存放区(区域 A)、

收稿日期:1999-12-13;修回日期:2000-01-28

作者简介:解 衡(1972—),男,江苏连云港人,助理研究员,博士,反应堆热工水力学专业

堆芯旁通区(区域B)和上腔室(区域C)。区域C内构件体积较小,对流动影响不大,为简化计算将其忽略。设定计算区域的流动边界条件如下:区域C上部为定压力边界条件,下部为定堆芯出口入流边界条件;区域B下部的旁通为定入口流速边界条件。传热边界条件为给定围板温度和燃料组件盒壁温度。燃料组件盒内工质流速大,换热能力比盒间工质大得多,盒内外工质间的热阻主要在盒外,因此,取盒壁温等于盒内工质温度。

PHOENICS 3.2 版本为 PHOENICS 程序最新版^[2],其三维模型的守恒方程通用形式如下:

$$\frac{\partial(\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\phi - \phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(v\phi - \phi \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(w\phi - \phi \frac{\partial \phi}{\partial z}) = S_\phi$$

紊流模型采用 $k-\epsilon$ 紊流模型。

对连续方程而言, $\phi = 1$; 动量方程, $\phi = u, v, w$; 能量方程, $\phi = T$ 。

紊流脉动动能方程, $\phi = k$; 紊流耗散率方程, $\phi = \epsilon$ 。每个控制体有 7 个控制方程。式中各项物理意义及经验系数值的详情参见文献[3]。

采用 SIMPLE 方法求解方程,采用的差分格式为迎风差分,压力变量 p 用线性松弛法迭代求解,其余变量用附加伪时间步法进行松弛迭代求解。计算工况中的非均匀温度场引起的自然对流使能量方程与动量方程耦合紧密,较难收敛,须采用较小的松弛因子。

2 计算结果及分析

为确定网格划分对计算精度的影响,计算了沿 x, y, z 轴分别取 (24, 24, 15), (48, 48, 15) 和 (24, 24, 30) 3 种网格划分情况。计算结果表明:网格密度加倍后,沿 z 轴方向的流场和温场基本不变;沿 x 和 y 轴方向加倍后温度变化小于 1%。因计算网格密度增大会导致计算时间过长,考虑到 3 种网格间的误差又可接受,故计算中采用 (24, 24, 15) 网格划分,既可保持精度,计算时间又不致过长。

2.1 不加挡板工况

在该工况中,区域 A、B、C 三区完全相通。取旁通流量为额定循环流量的 6%。图 2a 和 b 分别为沿 $x = 1$ 面的温场和流场图。从图 2a 可看出:温度变化主要发生在堆芯出口段,是回流的堆芯出口的高温流体与旁通的低温流体混合的结果;在区域 C,混合后的流体因流通面积突扩产生的回流及因围板壁冷却引起的在临近围板的区域向下流动,将区域 A、B 上部的流体向中间挤压,它们的渗入使该区域流体温度明显升高,影响区域约为区域 A、B 的 20%;区域 B 的入口流体为旁通流体,温度低,在区域 B 内主流向上流动;由于区域 A 的流通面积大,致使区域 B 邻近区域 A 的一部分受到流通面积突扩的影响而向外流动,从而在区域 A 的下部形成

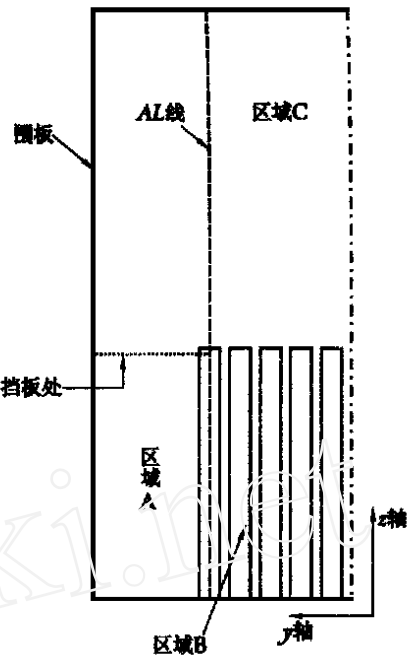


图 1 计算区域主视图

Fig. 1 Schematic diagram of calculated area

一回流区,此时,旁通流体与围板壁温差很小,这一回流区自然对流的影响也很小。为证实这一点,在不考虑温度密度变化的影响情况下计算了以上工况,所得流场示于图3。计算结果表明:区域A、B下部流场与图2的基本相同。这说明区域A、B下部的回流区不是自然对流作用的结果。在区域A、B上部,图3与图2b则有一些差别,原因在于区域C内流体与围板间温差大,自然对流的作用加大了回流区,在区域B的上部增大了对旁通流体的挤压。综上所述:与主流相比,自然对流的流速低,无论是旁通区的旁通入流还是上腔室的堆芯出流,主流方向均未因自然对流而改变,流速变化也不大。值得注意的是:上腔室的大回流区体积大,它对下部区域的影响较大。为了减少由它带来的动量及热量损失,尝试在乏燃料存放区的上端加挡板,以阻挡上部大回流区的回流,减少其作用区域。

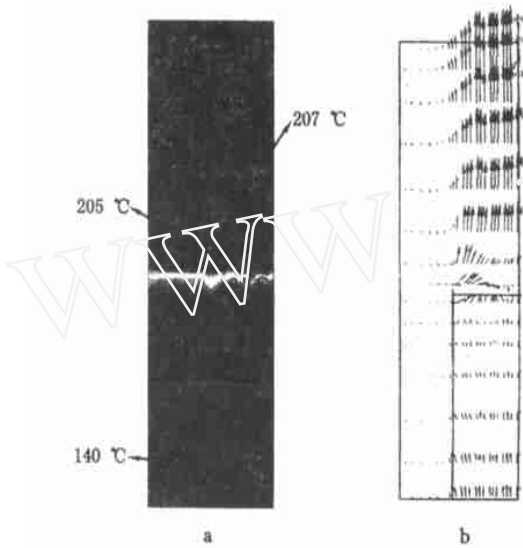


图2 无挡板工况下的温场(a)和流场(b)

Fig.2 Temperature(a) and flow(b) fields without baffle

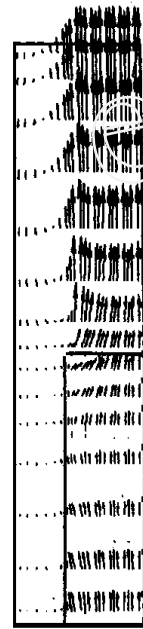


图3 无挡板工况下的流场
(不考虑温度变化)

Fig.3 Flow field without baffle
(no consider the change of temperature)

2.2 加挡板工况

该工况用挡板将区域A上部封闭,取旁通流量为额定循环流量的6%。图4a、b分别是沿 $x=1$ 面的温场和流场。与不加挡板时相同的是:由于流通面积突扩,区域B外侧的流体在区域A的下部形成一个回流区;由于堆芯出口流体的流通面积突扩及自然对流的影响,在区域C的外侧形成一大回流区。不同的是:挡板的阻挡使区域C的大回流区比不加挡板时小得多;回流区的减小使主流出口流场和温场趋于均匀;区域A的出口因被挡板完全封闭,区域C的回流流体对区域B的影响主要表现在对其出口流体的挤压上而无法进入区域内部,所以,区域B上部的流体温度比不加挡板时约低20。

将区域A上部出口全部封闭所需挡板较宽,为此,将挡板宽度缩短。设定如下两种挡板布置方案:一是在原挡板处放置一宽20 cm的挡板;另一是在原挡板处放置一宽40 cm挡板,

并在其上 1.4 m 高处放置另一宽 20 cm 挡板。计算了这两种方案下的流场及温场,研究较短挡板能否阻止区域 C 上部回流对堆芯旁通区 B 的影响。为便于对比不同方案下流场、温场的差别,将不加挡板、加宽挡板以及两种加较窄挡板工况下临近堆芯出口区域沿图 1 中 AL 线的温度分布绘于图 5。因受上部回流影响,区域温度将迅速升高,AL 线位于区域 B 外侧,最先受到影响。从它的温度分布可以看出上部回流区影响的大小。从图 5 可见:在堆芯旁通区 B 的 2.6 m 高度范围内,在 2.5 m 以下,两种加窄挡板工况与加宽挡板工况的温度完全相同,在 2.5 m 以上则与不加挡板时相同。这说明,加窄挡板后,上部回流区的影响区可大为缩小,由 0.4 m 减到 0.1 m,但不能完全消失;在 2.6 m 以上的上腔室区域 C,加 20 cm 窄挡板与不加挡板时相似,加 2 块窄挡板与加宽挡板时相似,这说明多加挡板可有效减少上部大回流的作用区域。温度分布的相似意味着流场的相似。

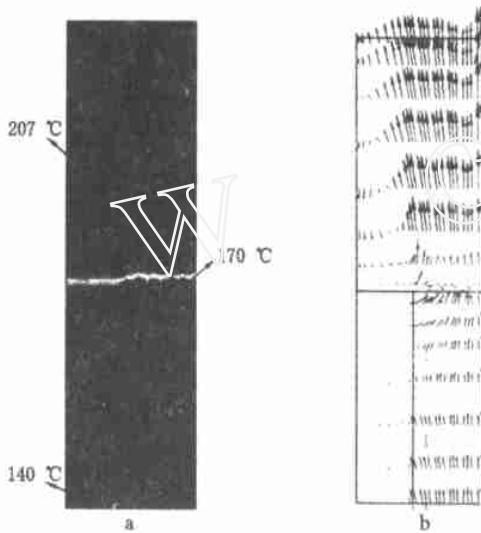


图 4 有挡板工况下的温场(a)和流场(b)

Fig. 4 Temperature (a) and flow (b) fields with baffle

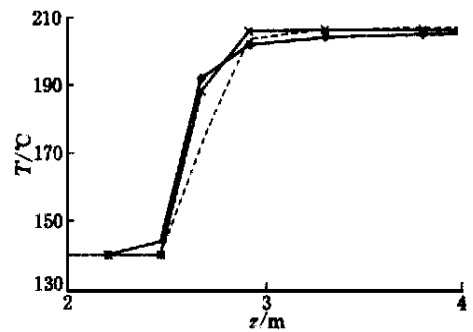


图 5 沿 AL 线温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along the line AL

实线——不加挡板;虚线——加宽挡板;
——加一块窄挡板; x——加两块窄挡板

由此可见:用挡板将堆芯与围板间乏燃料存放区上部完全封闭可阻止上部大回流区对堆芯旁通区的影响,并缩小大回流区的范围,减少它所带来的动量及热量损失。窄挡板可降低上部大回流区对堆芯旁通区的影响,但对上腔室中的流动作用不大。

2.3 旁通流量的影响

图 6 为加宽挡板和不加挡板两种布置方式下旁通流量分别为 6 %和 3 %时沿 AL 线 y 轴方向速度 v 的分布图。图示高度为堆芯从入口到出口之间的高度。 v 的正负值的转化可反映流动方向的转换,从而反映流场的变化。在不加挡板工况下(图 6a),下部流通面积突扩使流体向外流动, v 为正值;在区域 A、B 上部,因上部大回流区的带动转为向内流动, v 变为负值。两种旁通流量下的流动趋势相同,且旁通流量对流场影响不大。旁通流量的变化使区域上部参与混合的高温与低温流体的比例改变,温度变化程度随之改变。旁通流量小,则区域 A、B 上部温度变化大。在加宽挡板将区域 A 出口完全封闭的工况下(图 6b),下部流通面积突

扩致使流体向外流动, v 为正值; 因区域 A 上部无出口, 受区域 A 内流体推动转为向内流动, v 变为负值。旁通流量对流动趋势的影响不大, 温度也未发生变化。

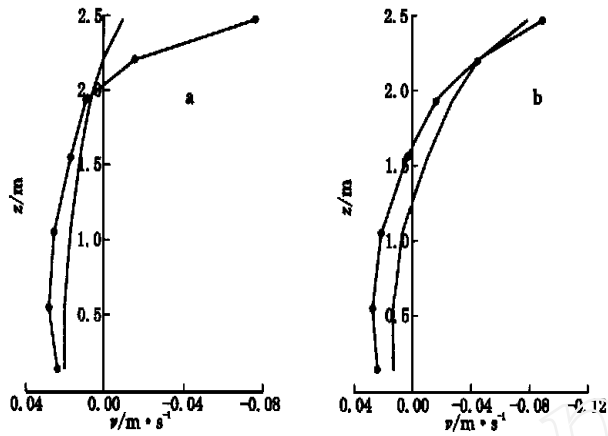


图 6 沿 AL 线的速度分布

Fig. 6 Velocity distribution along the AL line
——旁通流量为 6 %; 实线 ——旁通流量为 3 %

从以上分析可见: 在有一定旁通流量的情况下, 旁通流量的变化对流动趋势影响不大, 对温场有一定的影响。究其原因, 正如前面所说, 区域 A、B 下部的回流区不是自然对流作用造成的, 而是由区域 A、B 之间流通面积突扩所致。因此, 即使旁通流量出现改变, 因作为流动主要驱动力来源的流通面积突扩不变, 流场将基本不变。

在无旁通流量的工况下, 情况则完全不同。在不加挡板和无旁通流量情况下, 因区域 B 无入口流量, 在区域 A、B 下部, 自然对流起主要作用。从流场图可以看到: 在区域 A、B 下部沿 z 轴方向存在两个回流区, 上部受到区域 C 大回流区的影响。由于无外来流体加入, 流速低, 区域 B 内流体升温很快, 温度比有旁通流量时明显升高。因此, 存在一定的旁通流量是必要的。

3 结论

1) 相对于主流, 自然对流的流速很低。主流方向未因自然对流而改变, 流速变化不大。

2) 除主流外, 在堆芯旁通区的下部还有因流通面积突扩造成的下部回流区和上部受上腔室堆芯出口流通面积突扩及自然对流的影响形成的大回流区。用挡板将堆芯与围板间乏燃料存放区上部完全封闭可阻止上部大回流区对堆芯旁通区的影响, 还可缩小大回流区的范围, 减少它所带来的动量及热量损失, 并使上腔室出口流场和温场更趋于均匀。使用窄挡板可以减少上部大回流区对堆芯旁通区的影响, 对上腔室流动影响较小。

3) 旁通流量的变化对流动趋势影响不大, 对温场有一定影响。

参考文献:

[1] 清华大学核能技术设计研究院. 大庆油田 200 MW 核供热示范工程堆芯热工水力设计说明书[R]. 北

京:清华大学核能技术设计研究院,1995.

[2] Ludwig J.C. PHOENICS Manual[Z]. Britain: CHAM, 1999.

[3] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988. 431 ~ 438.

Numerical Analysis of Three-dimensional Convective Heat Transfer in the Core Bypass of the Nuclear Heating Reactor NHR-200

XIE Heng, GAO Zurying

(*Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: PHOENICS-3.2, a three dimension CFD code, is used to simulate the heat transfer and flow in the bypass and the upper plenum of the core of 200 MW nuclear heating reactor (NHR-200). In order to guide the convective flow, several schemes with and without the baffle are calculated, and the impact of the mass flowrate of the core bypass is considered. The effect of natural convection on the calculated region is so small that it can't change the direction of main flow. The important flows in the calculated region except the main flow are a recirculating flow which occurs in the bottom of the bypass of core due to the change of flow area and another big recirculating flow which occurs in the upper plenum due to the change of flow area and natural convection. Laying the baffle on the top of spent fuel zone can suppress the impact of the recirculating flow on the upper plenum and decrease the change of the temperature on the bypass of core.

Key words: nuclear heating reactor; heat transfer; flow; numerical analysis