

中国实验快堆单盒燃料组件 内冷却剂流场温度场数值模拟

刘一哲, 喻宏

(中国原子能科学研究院 中国实验快堆工程部, 北京 102413)

摘要:采用计算流体力学软件 CFX 对中国实验快堆单盒燃料组件活性段进行了三维数值模拟。计算得到了额定工况下单盒燃料组件内冷却剂的流速分布和温度分布情况。压降、轴向温升等计算结果与 ICRT 及 SUPERENERGY 程序结果进行了比较, 符合较好。

关键词:中国实验快堆; 单盒燃料组件; 流速分布; 数值模拟

中图分类号: TL33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2007)S0-0230-05

Numerical Simulation of Flow and Temperature Field of Fuel Subassembly for China Experimental Fast Reactor

LIU Yi-zhe, YU Hong

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-95, Beijing 102413, China)

Abstract: Numerical simulation of the flow field and temperature field of the fuel subassembly in China Experimental Fast Reactor was carried out by using computational fluid dynamics software CFX. The coolant velocity and temperature distribution in the fuel subassembly at the rated operating condition was obtained. The flow pressure drop and the temperature profile were compared with some other programs, and the results are in good agreement.

Key words: China Experimental Fast Reactor; fuel assembly; velocity distribution; numerical simulation

在钠冷快堆中,燃料元件通常按照三角形栅格的形式排列,采用金属绕丝定位,组装在 1 根六角形外套管内。金属绕丝有助于冷却剂在各子通道之间的混合。为了解冷却剂在燃料棒束中的流速分布和温度分布等问题,国外在 20 世纪 70 年代进行过大量的试验工作,并开发出了一批子通道计算程序^[1];进入 20 世纪 90 年代,

这些国家主要通过数值计算与实验相结合的方法进行研究,在该领域取得了新的进展^[2];在 2000 年召开的国际快堆热工流体力学会议上,各国专家指出三维计算程序是未来的研究和方向^[3]。但到目前为止,国内在快堆燃料组件热工流体力学方面开展的研究工作并不多。

中国实验快堆(CEFR)堆芯装有 81 盒燃

料组件(平衡换料状态),每盒燃料组件中装有 61 根燃料棒。燃料棒直径 6 mm,长 1 350 mm,节距 7 mm。金属绕丝直径 0.95 mm,螺距 100 mm。六角形外套管内对边距 56.6 mm。如图 1 所示,组件两端一头为操作头,一头为管

脚,组件总长度 2 592 mm^[4]。

为了解液态金属钠在快堆燃料组件中的流速分布和温度分布情况,研究金属绕丝对冷却剂的重要影响,本工作采用 CFX 对 CEFR 单盒燃料组件活性段进行三维数值模拟。

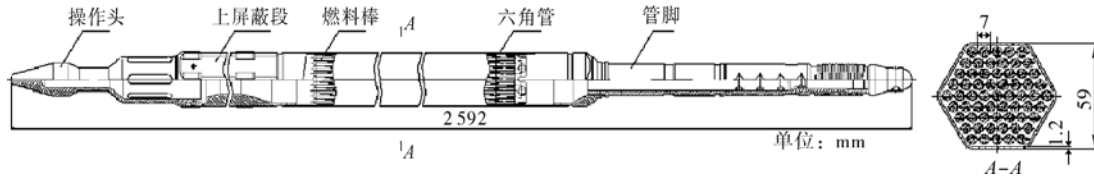


图 1 中国实验快堆单盒燃料组件

Fig. 1 Fuel subassembly of CEFR

1 几何建模

在金属绕丝定位结构中,金属丝以规定的螺距螺旋式地缠绕在燃料棒上。这种结构使得在每一横截面上,绕丝与燃料棒相切,同时,绕丝在轴向为螺旋状。如何处理相切和螺旋成为几何建模的难点与关键。经研究和比较后,确定如下的简化方法:

1) 为减少网格的数量,只对 450 mm 活性段流体区域进行模拟,盒功率按照热流密度的形式引入,活性段上部建立空腔以观察棒束出口的流动情况;

2) 相切无论对结构化网格还是对非结构化网格均为难点,所以,在保持燃料组件盒功率、冷却剂流量、子通道水力当量直径不变的基础上,增大绕丝直径,使其略微地嵌入燃料棒中(图 2);

3) 为模拟绕丝形状,在建模时选择双螺线对两底面圆弧同时引导的方法,在这里,忽略所有几何公差。

2 物理模型

CFX 程序的通用性很好,可模拟复杂几何结构。程序在数值求解方法上采用有限体积法

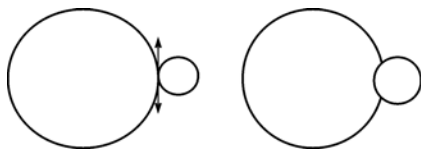


图 2 对模型的简化

Fig. 2 Simplification of model

将 Navier-Stokes 方程进行偏微分方程离散化处理,将偏微分方程转换成线性代数方程组,并建立连续方程、状态方程、能量方程和粘度物性关系式进行求解。采用全隐式多方程耦合求解线性代数方程组。

选择 CEFR 第 1 流量区最热组件,该组件盒功率 $N=968.9$ kW,以热流密度的形式输入;冷却剂入口流速 $u=4.5$ m/s,温度 $t=360$ °C。同时,在 CFX 的程序编辑器中写入钠物性。以此求解稳态、不可压缩流体在棒束中的流动情况。

选取标准 $k-\epsilon$ 模型作为湍流模型进行求解。

边界条件输入:控制体进口输入流速,出口输入压力,其余为无滑移壁面。

3 数值模拟结果与分析

在靠近壁面的区域存在周期性绕流,平均绕流速度约 0.28 m/s,是从绕丝角预测的 1.08 倍(图 3);冷却剂温度分布如图 4 所示,可观察到冷却剂在各子通道间的交混情况(图 5、6);内子通道中流动情况较为复杂,流速周期性变化不明显(图 7);边子通道中轴向流速出现明显的周期性变化,是平均轴向流速的 1.01 至 1.14 倍(图 8);边子通道与内子通道的平均轴向流速比值约 1.102,CRT 模型^[5]的计算值为 1.096,两者相对偏差 0.5%。

图 9、10 示出子通道轴向温升与 SUPE-RENERGY 程序进行的比较,计算值之间的相对偏差列于表 1。图 11 示出冷却剂轴向温升的整个过程。

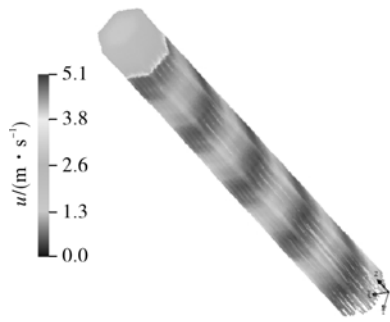


图3 流速分布

Fig. 3 Velocity distribution

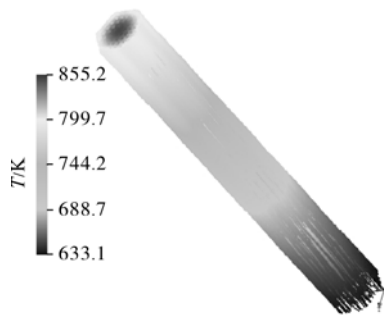


图4 温度分布

Fig. 4 Temperature distribution

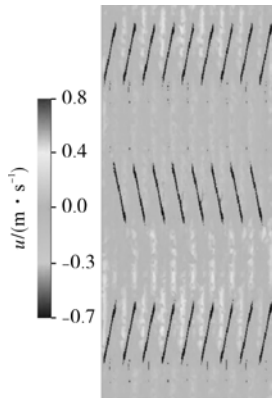


图5 内子通道间的流动交混

Fig. 5 Flow mixing in inner subchannels

表1 子通道轴向温升计算结果对比
Table 1 Temperature profile in subchannels

子通道编号	子通道轴向温升/°C		相对偏差/%
	CFX	SUPERENERGY	
内子通道(编号2)	221.7	240.0	-7.6
边子通道(编号106)	165.0	164.0	0.6

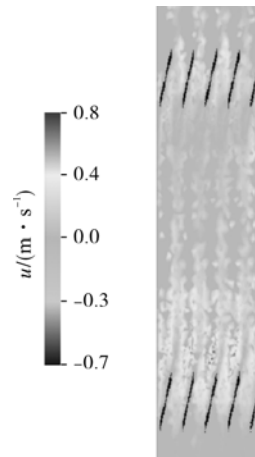


图6 边子通道间的流动交混

Fig. 6 Flow mixing in edge subchannels

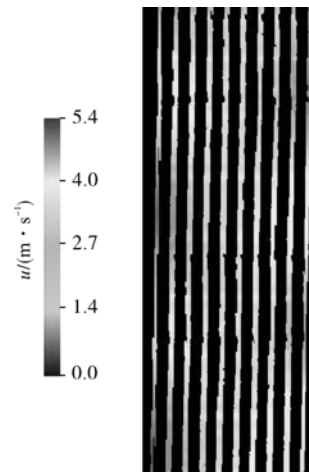


图7 内子通道中的流速分布

Fig. 7 Velocity distribution in inner subchannels

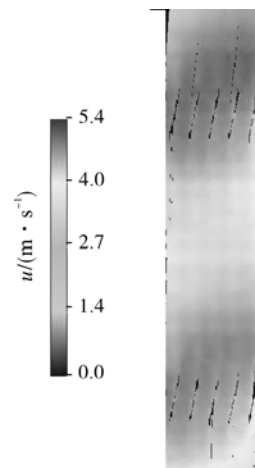


图8 边子通道中的流速分布

Fig. 8 Velocity distribution in edge subchannels

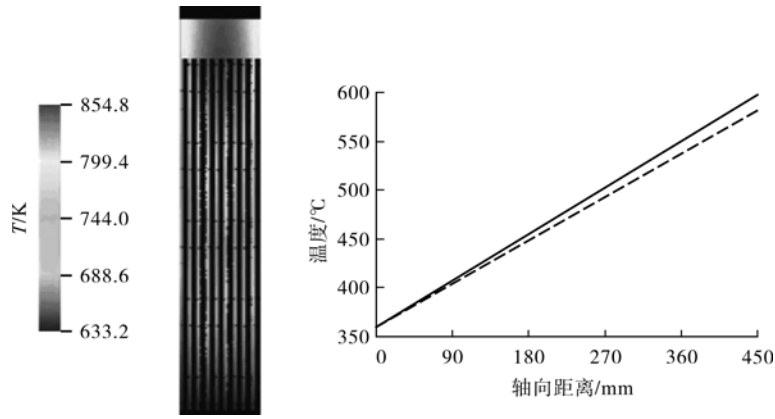


图9 最热子通道轴向温升对比计算

Fig. 9 Temperature profile in inner subchannels

实线——SE 计算值;虚线——三维计算值

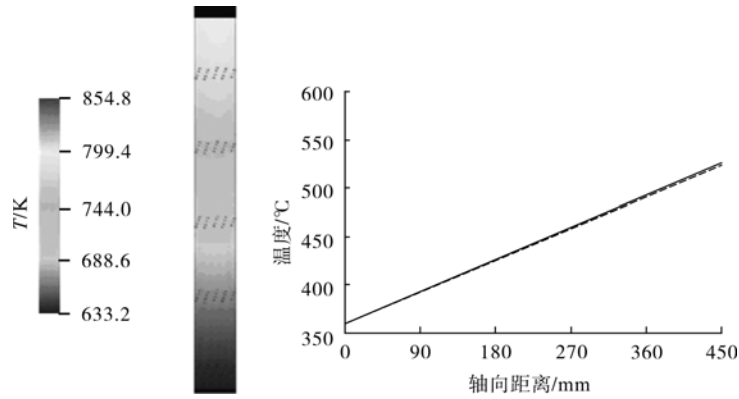


图10 典型边子通道轴向温升对比计算

Fig. 10 Temperature profile in edge subchannels

实线——SE 计算值;虚线——三维计算值

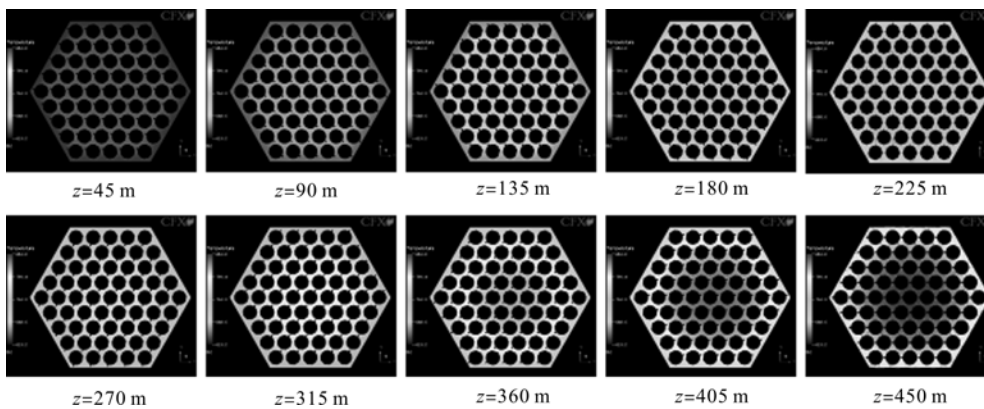


图11 横截面上的温度分布

Fig. 11 Temperature distribution in cross sections

在额定流量下,轴向压降的计算结果与 ICRT 程序进行了比较(图 12),符合较好,计算值之间的相对偏差列于表 2。

4 结论

通过对 CEFR 单盒燃料组件活性段的数值模拟,得出如下结论:

表 2 轴向压降计算结果对比

区域	轴向压降/kPa		相对偏差/%
	CFX	ICRT	
450 mm 活性段	45.0	46.6	-3.4

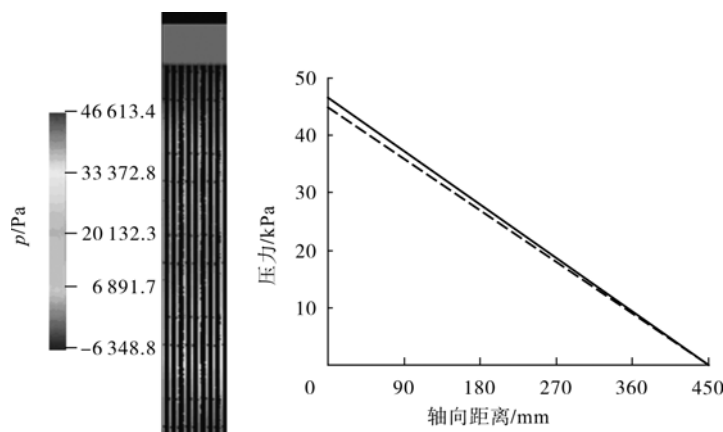


图 12 轴向压降对比计算

Fig. 12 Flow pressure drop

实线——压降程序计算值;虚线——三维计算值

1) 计算得到的轴向温升与 SUPERENERGY 程序的计算值符合较好,轴向压降与 ICRT 程序的计算值也能较好地符合;

2) 从 CFX 后处理的图像中可以观察到冷却剂的详细速度分布情况以及温度上升的整个过程;

3) 绕丝的存在加强了冷却剂在子通道间的交混,作用明显。

对 CEFR 单盒燃料组件中冷却剂流场温度场进行的三维数值模拟,解决了几何建模的问题,探讨了绕丝的重要作用,表明了这一方法可以作为研究钠冷快堆单盒燃料组件中热工流体力学问题的重要手段,为下一步工作的开展提供了数据和思路。

参考文献:

[1] TANG Y S, COFFIELD R K, MARKLEY R A.

Thermal analysis of liquid metal fast breeder reactors[R]. USA: American Nuclear Society, 1978.

[2] CHUANG M C, CARELLI M D, BACH C W, et al. Three-dimensional thermal-hydraulic analysis of wire-wrapped rods in liquid-metal fast breeder reactor core assemblies[J]. Nuclear Science and Engineering, 1977, 64:244-257.

[3] Anon. LMFBR core thermohydraulics: Status and prospects[R]. Vienna: IAEA, 2000.

[4] 杨福昌. 平衡态氧化铀堆芯稳态热工设计[R]. 北京:中国原子能科学研究院, 2002.

[5] CHIU C, ROSENOW W M, TODREAS N E. Flow split model for LMFBR wire wrapped assemblies[R]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1978.