

CEFR 堆芯围桶开孔处温度场及流场分析

张亚勃, 杨红义

(中国原子能科学研究院 中国实验快堆工程部, 北京 102413)

摘要:应用 CFX 对堆芯围桶开孔处温度场及流场进行模拟计算并对结果进行分析。利用模型 I、II 分别计算得到堆芯围桶开孔处的温度场及流场, 并得到在正常工况下堆芯围桶开孔处钠的流动方向。计算验证了事故余热排出系统(CAPX)水台架的试验结果, 为 CEFR 堆芯围桶开孔的安全分析打下基础。

关键词:中国实验快堆; 堆芯围桶; 流场; 温度场

中图分类号: TL33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2008)10-0916-04

Analysis on Temperature Field and Flow Field of Reactor Core Barrel Openings for China Experiment Fast Reactor

ZHANG Ya-bo, YANG Hong-yi

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

Abstract: The paper gives analysis of the temperature and flow field around openings by software CFX, and figures out the flow direction around openings under CEFR normal condition. The calculation result is consistent with the test result of CAPX (the test-bed of decay heat removal system) and ground for the safety analysis later.

Key words: China Experiment Fast Reactor; core barrel; flow field; temperature field

1999年,俄罗斯对中国实验快堆(CEFR)失冷事故余热排出系统利用 RUBIN 程序^[1]进行估算时指出,CEFR 主流道的排热能力有限。事故停堆初期,中间热交换器将充满热钠,中间热交换器出入口温度相同,温差为零,因而失去自然循环压头。因此,俄方专家为保证 CEFR 在事故工况下的堆芯余热排出能力,便在事故余热排出系统(CAPX)台架^[2]的堆芯围桶部位开孔。由于中方接收俄方的 CAPX 水台架的试验结果是在围桶已开孔条件下获得的,因此,为进一步验证堆芯围桶开孔的安全性及可靠性,并验

证堆芯围桶开孔对 CEFR 正常工况下运行的影响,本研究就堆芯围桶开孔问题,利用三维热工流体计算软件 CFX 进行数值模拟。

1 计算目的及计算模型的选择

计算目的:1) 通过计算,对堆芯围桶开孔处的温度场及流场进行分析;2) 考察正常工况下堆芯围桶开孔处钠的流动方向。针对上述目的分别建立计算模型。模型 I 将重点放在开孔附近局部区域,对其进行模拟。假定钠的流动方向是通过堆芯围桶开孔由堆内向堆芯外流

动,通过变化开孔处钠的流量,计算堆芯围桶开孔处流入钠对整个堆芯温度场及流场的影响。模型Ⅱ将计算范围扩大至径向内屏蔽层及径向向外屏蔽层区域,且考虑燃料组件的热功率,计算模型区域内的流场及开孔处钠的流动方向。

2 计算模型描述

2.1 堆芯围桶开孔结构

堆芯围桶共开 14 个 $\phi 50$ mm 圆孔,结构较为复杂。提升斜通道外的 12 个圆孔以 30° 角均匀分布。开孔位置在距冷热池隔板 215 mm 处,开孔位置和开孔流道结构示于图 1。

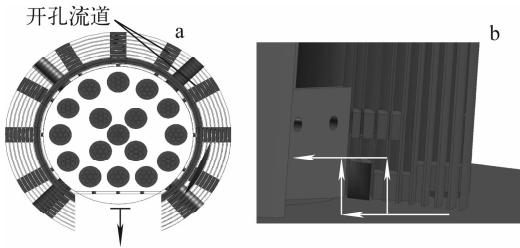


图 1 开孔位置俯视图(a)和开孔流道结构(b)
Fig.1 Planform (a) and framework(b) of opening

2.2 计算模型Ⅰ的结构及边界条件

用计算模型Ⅰ对开孔附近局部区域进行模拟。受计算网格数量的限制,且考虑到反应堆的结构和组件布置在周向对称,为减少网格数量,计算模型选定网格数为 300。模型示于图 2a。假定钠由堆芯外向堆芯内流动,因 CAPX 水台架试验表面开孔处钠流量总计约为 1 kg/s,温度约 403°C ,因此,计算中将进入每个开孔的流量取为 $1/14$ kg/s,同时为使结果更保守,又计算了开

孔处流量为 $5/14$ kg/s 时堆芯围桶处的温度场及流场。数学模型采用零方程湍流模型。钠的物理性质列于表 1。计算模型Ⅰ的边界条件为:壁面温度, 360°C ; 底部进口温度, 360°C ; 底部进口流速, 1.83 kg/s; 开孔处流体温度, 403°C ; 开孔处流速, $1/14$ 、 $5/14$ kg/s; 计算模型域压力, 0.52 MPa。模型结构参数为:计算模型高度, $1\ 000$ mm; 盒间隙, 5 mm; 模拟组件数量, 29 根; 模拟组件直径, 40 mm; 开孔直径, 50 mm。

2.3 计算模型Ⅱ的结构及边界条件

计算模型Ⅱ中开孔所连接的区域分别为反应堆堆芯和径向外生物屏蔽区域,通过开孔,钠可在堆芯与径向外生物屏蔽层间流动。开孔所在区域为堆芯套筒。建立模型Ⅱ的目的是考察在燃料组件带功率情况下开孔处钠的流动方向。为减少计算网格,模型中减少了燃料组件的数量(图 2b)。计算模型Ⅱ的边界条件为:每根模拟组件发热率, 1.23×10^7 W/m³; 底部进口温度, 403°C ; 底部进口流速, 1.83 kg/s; 壁面绝热。结构参数为:模拟组件根数, 4 根; 模拟组件直径, 50 mm; 盒间隙, 150 mm; 模型直径, $2\ 830$ mm。

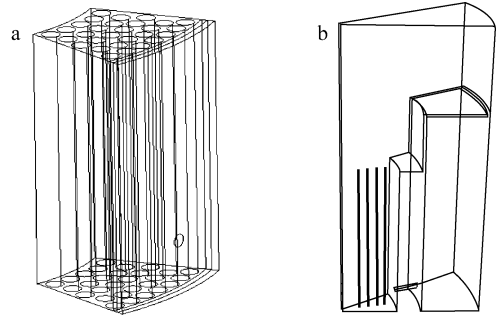


图 2 计算模型Ⅰ(a)和Ⅱ(b)
Fig.2 Calculation model I (a) and II (b)

表 1 钠的物理性质

Table 1 Physical property of sodium

名称	计算公式	单位
液态钠的导热系数	$\lambda = 92.95 - 0.058t + 1.17 \times 10^{-5}t^2$	W/(m · °C)
比定压热容	$c_p = 1\ 436.05 + (4.625 \times 10^{-5}t - 0.5802)t$	J/(kg · °C)
密度	$\rho = 16.0185 \times (59.566 - 7.9504 \times 10^{-3} \times (1.8 \times (T - 273.15) + 32) - 0.2872 \times 10^{-6} \times (1.8 \times (T - 273.15) + 32)^2 + 0.0603 \times 10^{-9} \times (1.8 \times (T - 273.15) + 32)^3)$	kg/m ³
粘性系数	$\nu = 0.003242e^{508.07/(t+273.15) - 0.4925 \ln(t+273.15)}$	kg/(m · s)
液态钠的体积热膨胀系数	$\beta = 2.418 \times 10^{-4}$	°C ⁻¹

3 计算结果及其分析

3.1 模型 I 的计算结果

为比较开孔处流量变化对堆芯内温度场及流场的影响,对开孔处流量 $1/14$ 和 $5/14$ kg/s 的情况进行了计算。根据对生物屏蔽与堆芯在正常运行下压差的估算,开孔处 $5/14$ kg/s 的流量是保守的。进行此流量下的计算是为了在保守的原则下了解开孔处钠流量对反应堆正常运行工况时的影响。流量为 $1/14$ 、 $5/14$ kg/s 时堆芯内的温度场及流场分别示于图 3、4。

由图 3、4 可见,从开孔流入的 403 $^{\circ}\text{C}$ 钠流在开孔处的很小区域内温度迅速降至 360 $^{\circ}\text{C}$ 。即使按估算的最大开孔钠流计算,其影响范围也不大,两种流量在数量上虽相差 4 倍,但比较图 3b 和 4c、3d 和 4a、3e 和 4b、3f 和 4d 不难看出,在变化开孔流量下,开孔处的热钠流及堆芯内的温度场和流场受影响的范围均较小。

3.2 模型 II 的计算结果

为比较堆芯内温度场对开孔处钠流动方向及整个计算区域流动的影响,分别针对燃料组件不带功率和带功率两种情况进行计算。

燃料组件不带功率下堆芯的流场示于图 5,开孔处流场示于图 6a。计算结果表明,在燃料组件不带功率情况下,开孔处流动方向是由堆芯向外流动,由于此时计算区域内无温度场变化,钠在进口压力的作用下自然由堆芯通过

围桶开孔向径向外屏蔽区域流动,部分区域出现涡旋。燃料燃料组件带功率下的流场示于图 6b,开孔处流场示于图 6c。

当 CEFR 在正常工况下运行时,燃料组件的热功率在堆芯内造成了不同部位温度场的差异,导致在开孔处径向外屏蔽区域的压力高于堆芯内压力,致使开孔处的钠流动方向由径向外屏蔽区域向堆芯内流动,这符合正常工况下堆芯内的实际情况^[3]。由于通过开孔流入的钠温度较堆芯内平均温度低很多,因此,这部分钠不会导致堆芯内温度升高,相反,开孔处钠流还能对堆芯起到一定的冷却作用。

4 结论

1) 在 CEFR 正常工况运行下,堆芯围桶开孔处钠流量较小,进入堆芯后迅速被小栅板联箱漏流钠冷却,它不足以对堆芯温度场以及流场产生较大影响。

2) 在 CEFR 正常工况运行下,燃料组件带功率导致开孔处的钠流动方向由径向外屏蔽区域向堆芯内流动,保证了堆芯内的钠不会流失,堆芯内的传热不会恶化。

3) 开孔位置在距离冷热池隔板 215 mm 处,热钠流与小栅板联箱漏流冷钠不会直接对冲搅混,同时考虑到开孔流入的热钠流在较小区域内温度下降很快,温度振荡只能发生在最

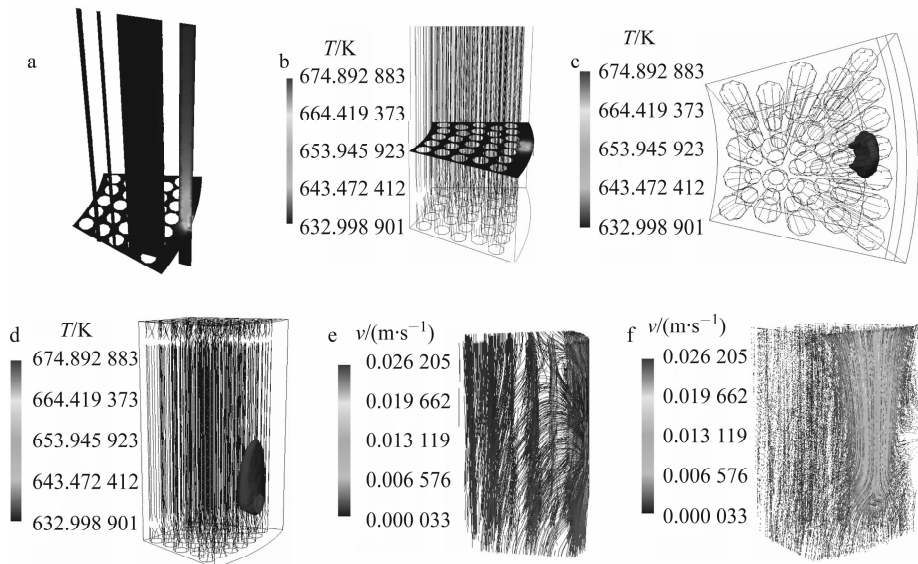


图 3 开孔处流量为 $1/14$ kg/s 下的堆芯内温度场及流场

Fig. 3 Temperature and flow fields at flux of $1/14$ kg/s near openings

a——开孔处切面图 1; b——开孔处温度场 2; c—— 362 $^{\circ}\text{C}$ 等温面 1; d—— 362 $^{\circ}\text{C}$ 等温面 2; e——流场 1; f——流场 2

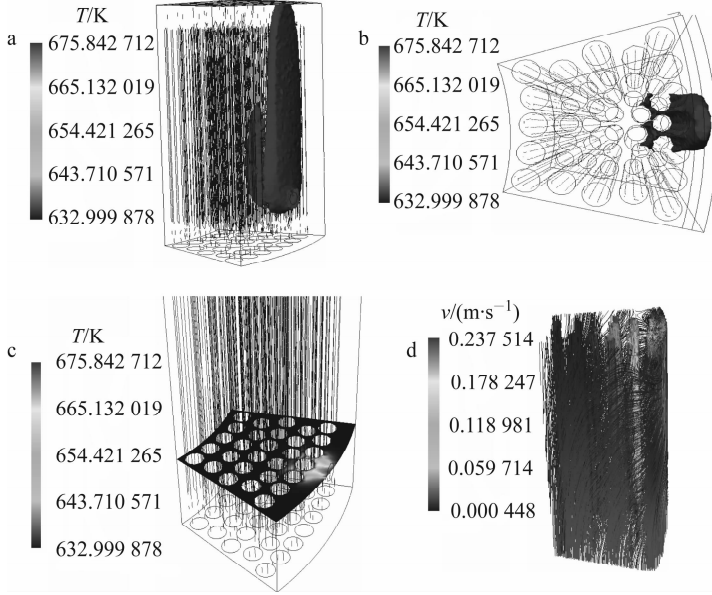


图4 开孔处流量为 5/14 kg/s 下的堆芯内温度场及流场

Fig. 4 Temperature and flow fields at flux of 5/14 kg/s near openings

a——362 °C等温面 1;b——362 °C等温面 2;c——开孔处温度场;d——流场

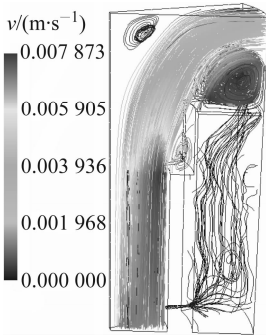


图5 燃料组件不发热时堆芯内流场

Fig. 5 Flow field without fuel power

外几层反射层组件和堆芯围桶之上,而温度振荡部位不在组件的受力区,因此,开孔流入的钠不会使组件支撑发生疲劳。

4) 通过开孔处不同流量的计算可看出,堆芯围桶开孔的钠流不能对堆芯内流场及温度场产生较大影响。

5) 堆芯出口平均温度为 530 °C,通过开孔处流入的钠仍能起到一定冷却作用,只是相对于从底部高压联箱来的 360 °C 冷钠,反应堆总体冷却效率有所降低,但不会使堆芯冷却恶化。

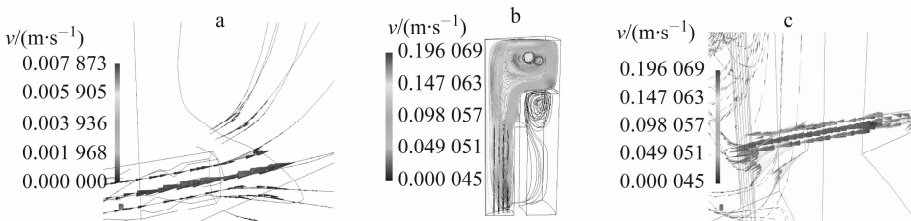


图6 燃料组件流场

Fig. 6 Flow field of fuel subassembly

a——不带功率时开孔处;b——带功率时堆芯;c——带功率时开孔处

参考文献:

[1] 杨红义. 中国实验快堆设计中的热工流体力学问题及其对策[C]//第九届全国反应堆热工流体会议论文集. 西安:反应堆热工流体委员会,2005:431-439.

[2] 杨福昌. 在 CAPX 台架上和 TBC 模拟件试验台

架上的试验研究[R]. 北京:中国原子能科学研究院中国实验快堆工程组,2001.

[3] 杨红义. 一次钠泵吸入腔稳态三维数值模拟[C]//第九届全国反应堆热工流体会议论文集. 西安:反应堆热工流体委员会,2005:204-211.