

核电厂管线中的热分层现象

郭德朋^{1,2}, 陆道纲¹, 冯预恒³

(1. 华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206;
2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004; 3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 由于阀门渗漏使核电厂安注系统冷水注入到充满热水的连接安注系统与主管道的支管中, 而发生的热分层和温度振荡现象的研究对于确保核电厂的安全和可靠运行具有重要意义。运用计算流体力学软件 CFX, 采用 $k-\epsilon$ 湍流模型, 以研究某核电厂安注系统支管中热分层现象的实验为对象, 模拟了阀门渗漏冷水进入含有高温水的支管以后所发生的热分层现象, 数值模拟的结果与实验测量结果吻合。在此基础上, 通过改变阀门渗漏冷水的流量、支管的结构等参数, 进一步研究支管中热分层现象与这些参数的内在关系, 从而得出了影响热分层现象的主要原因及热分层现象发生的一些规律。

关键词: 热分层; 安注系统支管; 湍流模型; 数值模拟; 核电厂

中图分类号: TL331 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2007)05-0570-05

Thermal Stratification Phenomenon in Pipelines of Nuclear Power Plant

GUO De-peng^{1,2}, LU Dao-gang¹, FENG Yu-heng³

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China;
3. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: It is very important for the safety operation of a nuclear power plant to research the thermal stratification and temperature fluctuation phenomena which are caused by the cold water injecting into the branch pipe connected the emergency core cooling system(ECCS) with the main pipe. The thermal stratification phenomena in the ECCS branch pipe was simulated using the CFD code CFX with $k-\epsilon$ model. The numerical results are in good agreement with that from experiments. By changing the flow rate of the leaked cold water and the structure of the branch pipe, the inherent relations between these parameters and the thermal stratification phenomena were further researched. Therefore, the main cause and some characteristics of the phenomena were obtained.

Key words: thermal stratification; ECCS branch pipe; turbulence model; numerical simulation; nuclear power plant

核电厂的安全注入系统属于核反应堆的专设安全措施,通常情况下处于待机状态。一回路冷却剂管道的压力恒定,核电厂安全运行时间越长,安全注入系统闲置的时间也越长,但持续时间太长,连接硼水箱和一回路主管道支管的阀门可能会出现微量的渗漏,冷水将进入高温水侧的管道。冷水经阀门进入热侧后,冷热水相互交混,产生热分层现象,进而发生热疲劳,严重时可导致支管的断裂^[1],造成核电厂一回路失水事故。此外,由于冷热流体的搅混,核电厂的其它部位也会产生热分层或热疲劳现象^[2]。为此,本文采用计算流体力学软件 CFX 对此类现象进行数值模拟,并与实验数据进行对比,以期得到现象发生的规律。

1 实验描述

图 1 为 Nobuo Nakamori^[3]实验时支管连接示意图。实验边界条件如下:压力 15.5 MPa;一回路主管道流速 16 m/s;一回路主管道热流体温度 563 K;支管漏流流量 10 kg/h;支管漏流冷流体温度 290~300 K。

实验得到安注系统水平支管某剖面高度与温度分布的无量纲关系(图 2),图 2 中 5 个圆点是实验的实测点。可看到,在支管的底部,温度梯度非常大,随高度升高,温度趋于平缓。图 2 中, H 为竖直方向高度; D 为支管直径; T 为剖面上某点的温度; T_{\min} 为剖面上的最低温度;

$$T_{\max} \text{ 为剖面上的最高温度; } T^* = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}。$$

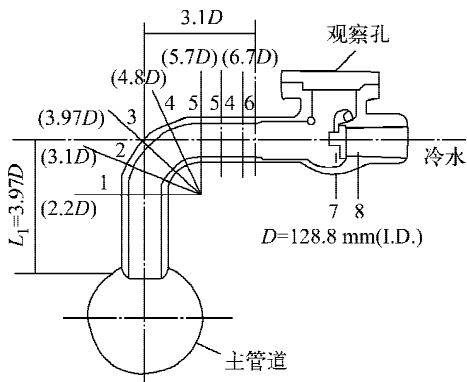


图 1 主管道和支管的连接示意图

Fig. 1 Scheme of main pipe and branch pipe

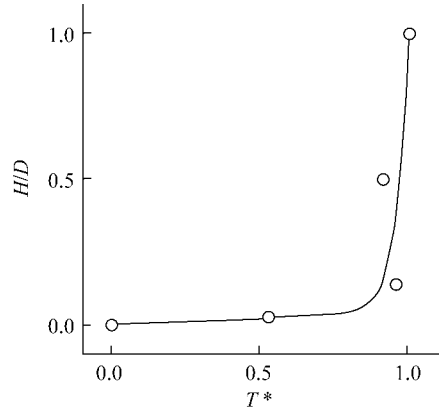


图 2 某剖面上温度与高度的无量纲关系

Fig. 2 No-dimensional relation of temperature and height in section plane

2 数值模拟

流体密度随温度而变化,根据线性关系,近似得到温度与密度间的如下关系:

$$\rho = 1\,000(1 - 0.275 \frac{T - 277}{296})(\text{kg/m}^3)$$

流体的粘度也随温度变化。水的粘度与温度的关系通常可用以下经验式计算:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.033\,68t + 0.000\,221t^2}(\text{Pa} \cdot \text{s})$$

式中: t 为水的温度, $^{\circ}\text{C}$; μ_0 为水在 0°C 时的动力粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ 为水在温度为 t 时的动力粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在 CFX 的前处理模块 ICEM 中,构造研究对象的模型,并划分结构化网格。图 3 为冷流体渗入孔所在截面的网格图,图 4 为整体结构网格图。

首先,用总网格数为 164 546 的模型进行计算。对渗漏孔位置处的网格进行加密,指定下方 4 个网格为渗漏冷流体的进口。

然后,对一回路主管道,支管的水平、垂直部分及渗漏孔所在的圆面进行局部加密,将网格数增到 196 564 进行计算。



图 3 阀门渗漏孔所在面的网格

Fig. 3 Test grids of section plane for leakage located

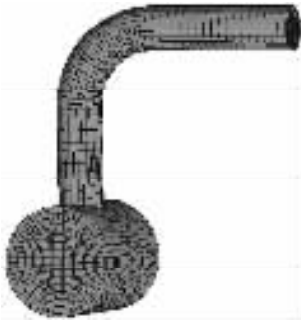


图4 整体结构的网格

Fig. 4 Test grids of whole structure

将两次计算出的水平支管上垂直高度与温度的无量纲关系进行对比(图5)后可看出,网格加密后,计算结果有所变化,但变化的幅度较小,最大相对偏差约5%。说明两个模型的网格精度达到了计算要求,加密后的网格模型会使计算结果更为精确些。所以,在下一步的研究中,使用加密后的网格模型。

图6示出了使用加密后网格模型求得的垂直高度与温度间的无量纲关系。图6显示,数值模拟结果和实验结果吻合得非常好。图7示出中间剖面的温度分布。由图7可见,温度由底部向顶部逐渐升高,且有明显的分层现象。为便于进行进一步研究,在 $x=0.45, 0.52, 0.60, 0.65$ m 处截取 1-1、2-2、3-3、4-4 4 个截面,并标识于图7。

根据以上分析和模拟结果的验证可认为,采用 $k-\epsilon$ 湍流模型及本文的分析手段对研究水平支管中的热分层现象是可行的。

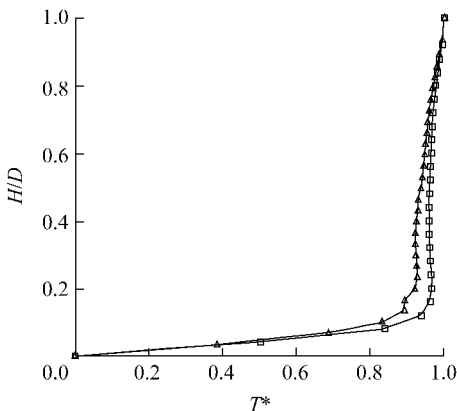


图5 两种网格模型的计算结果

Fig. 5 Simulation results at various test grids

总网格数: □——196 564; △——164 546

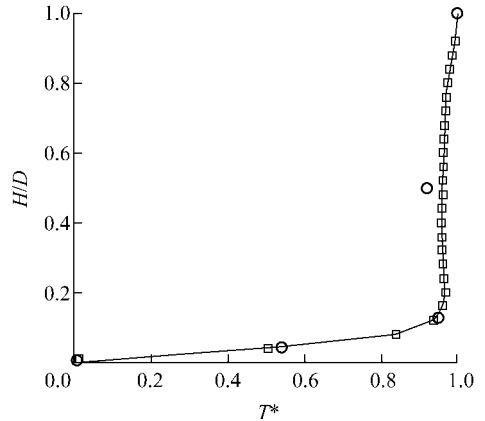


图6 计算结果和试验结果的对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experiment results

□——模拟结果;○——实验结果

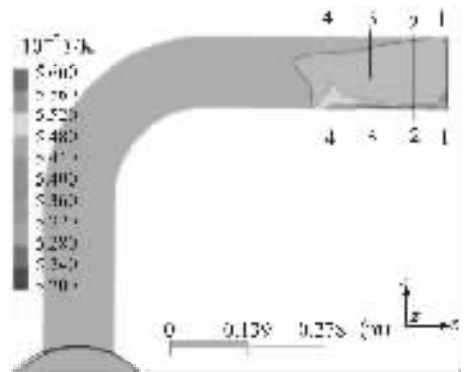


图7 中间剖面的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution at center section plane

3 影响热分层的主要参数

3.1 渗入流体流量

1) 对支管竖直方向上的影响

为研究冷流体的渗入量对支管内热分层现象的影响,分别设定渗入流量为 5、10、20 kg/h。

由图8可明显看出,随冷流体渗入量的增加,管内某一固定点的温度降低;随流量增加,管内竖直方向上的温度梯度急剧增大。

2) 对支管长度方向温度梯度的影响

图9示出了支管在 x 方向的空间距离与温度的关系。图9显示,从远端到接近渗漏孔,温度逐渐降低。在 10 kg/h 冷水渗入情况下,冷流体对水平支管的影响区域几乎占该水平支管长度的 1/2,影响了支管较大的长度范围。流量为 5 kg/h 时,冷流体影响的范围约为支管长度的 1/4。

3) 穿透作用对温度分布的影响

一回路热流体的穿透作用也是影响热分层

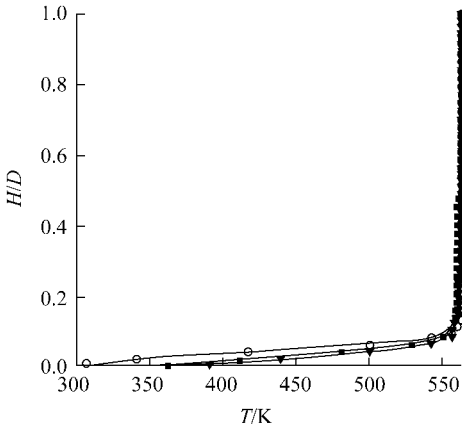


图 8 不同流量下的温度-高度关系
Fig. 8 Relation of temperature and height in various leakages
■—10 kg/h; ▼—5 kg/h; ○—20 kg/h

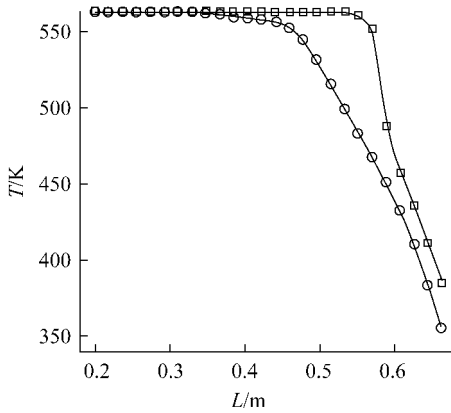


图 9 支管水平方向的温度分布
Fig. 9 Temperature distribution
□—5 kg/h; ○—10 kg/h

现象的主要因素,它造成支管中冷流体对壁面的冲刷,使在接近一回路主管道剖面 and 远离主管道剖面上的温度分层有很大差异。

仍以渗入冷水量 10 kg/h 的模型为例,分别截取剖面 1-1 和剖面 2-2,其温度分布示于图 10,以说明穿透作用对不同管段热分层的影响。

由图 10 可知,在剖面 2-2 上,当 10 kg 的冷水渗入后,出现了偏向于一侧的温度分层现象,说明此处受到的主管道热流体穿透作用较强,此处的流体具有环向速度;剖面 1-1 上的温度分层相对平整,几乎没有受到热流体穿透作用的影响。

3.2 支管结构

为研究支管结构对热分层现象的影响,进

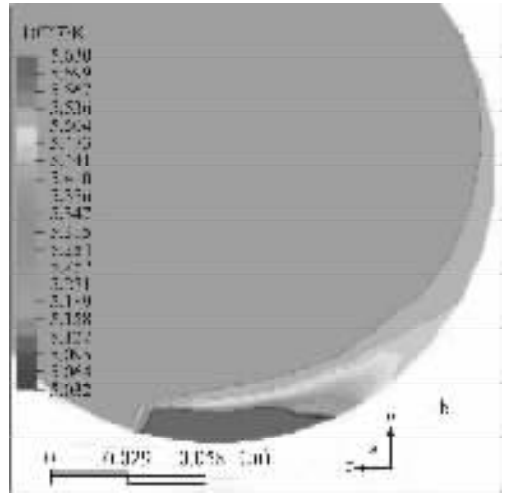
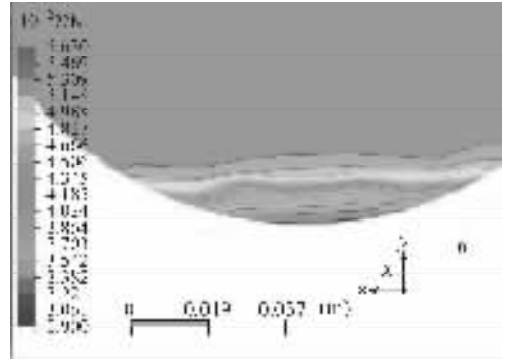


图 10 温度分层现象
Fig. 10 Temperature fluctuation phenomena
a——剖面 1-1; b——剖面 2-2

一步改变模型,增加弯头数量和水平支管长度,减弱一回路主管道高速流动的流体对阀门渗漏处的穿透作用,从而分析热分层现象。研究双弯头结构影响的模型示于图 11。水平支管的高度低于一回路主管道,冷水渗入量和一回路管道的边界条件不变。

图 12 显示 1 个弯头和 2 个弯头两种结构

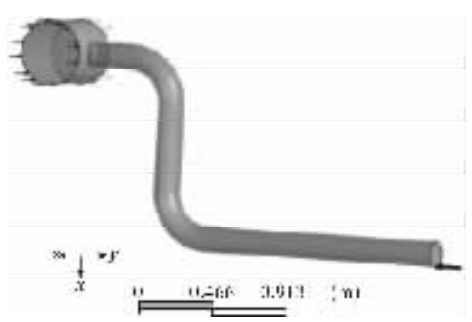


图 11 双弯头结构模型
Fig. 11 2-elbows structure model

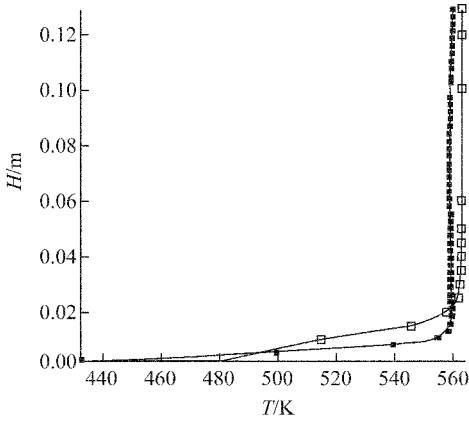


图 12 两种结构中温度-竖直高度关系

Fig. 12 Temperature-height relations at two structures

■——1 个弯头; □——2 个弯头

下温度与竖直高度间的变化关系。从支管底部起, 竖直高度增加 0.035 m, 温度从 467.578 K 升到 562.998 K, 平均温度梯度为:

$$T_g = \frac{562.998 - 467.578}{0.035} = 2726.3 \text{ K/m}$$

该温度梯度和图 12 中单弯头结构支管在水平支管竖直方向上的温度梯度相比, 减小了很多。

3.3 渗漏孔的位置

分别把渗漏孔的位置设在支管末端的顶部和中部。当渗漏孔的位置处于阀门顶端时, 水平支管中间剖面上的温度分布示于图 13a。此时, 冷水流入支管, 由于冷水密度大于热水密度, 渗进的冷水因重力作用向下流动产生自然对流, 流动速度和热流体的穿透环向速度迭加, 这对支管的温度分布影响很大, 但仍可看到图 13a 的右上角冷水渗漏孔处的温度最低, 剖面 1-1 处的温度整体低于剖面 2-2 的温度, 并无热分层现象产生。

当渗漏孔的位置处于阀门中间时, 水平支管中间剖面上的温度分布示于图 13b。此时, 因初始阶段渗入的冷流体的密度大于热流体, 将产生向下的自然对流, 流动的速度和热流体的穿透速度迭加, 形成的环向于支管的速度大于渗漏孔在底部时的环向速度, 冷流体与周围热流体搅混, 并未形成冷流体处于下方、热流体处于上方的热分层现象。

4 总结

1) 渗入的冷流体流量是影响热分层现象

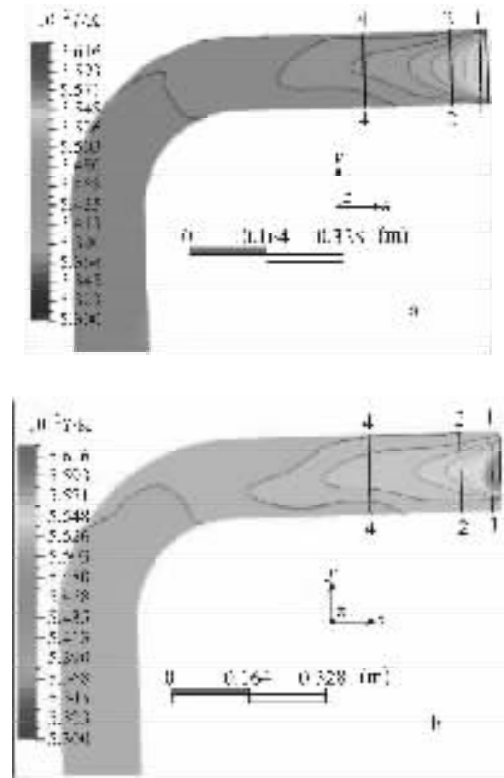


图 13 渗漏孔的温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of leakage hole located a——在顶端时; b——在中间时

的主要因素, 流量增大时, 支管竖直方向和水平方向的温度梯度均大幅增加;

2) 一回路主管道热流体的穿透作用对支管中热分层的分布影响很大;

3) 支管的结构也是影响热分层现象的主要因素, 弯头数量的增多会减弱一回路主管道热流体对支管的穿透作用;

4) 当渗漏孔的位置处于支管的上部或中部时, 不会产生冷流体在下方、热流体浮于上方的热分层现象。

参考文献:

- [1] KIM J H. Thermal stratification in nuclear reactor piping system, ICON-1 [R]. Tokyo: ICON, 1991.
- [2] 資源エネルギー庁. 日本原子力発電(株) 敦賀発電所 2 号機再生熱交換機連絡配管からの一次冷却材漏えいについて[R]. 东京: 資源エネルギー庁, 1999.
- [3] NOBUO N. Thermal stratification in branch pipe, NURETH-6[R]. Grenoble: [s. n.], 1993.