

密度锁内流体稳态传热模型的建立

王升飞¹, 阎昌琪¹, 谷海峰¹, 方红宇²

(1. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041)

摘要:根据温度场的特点,将密度锁分为混合区、导热区和恒温区,并分别进行建模。用该模型对密度锁进行稳态传热计算,并与实验结果进行对比。结果表明:本工作建立的稳态传热模型能较好地计算出密度锁内的温度场。研究建立了密度锁的热损失量计算式,并对热损失量最小值的情况进行了讨论。

关键词:密度锁;稳态;传热模型

中图分类号:TL364

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2010)02-0183-05

Development of Steady-State Heat Transfer Model in Density Lock

WANG Sheng-fei¹, YAN Chang-qi¹, GU Hai-feng¹, FANG Hong-yu²

(1. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: According to the characteristic of temperature field, density lock can be divided into mixing zone, conductive zone and constant zone, and heat transfer model was established in each zone. The steady-state heat transfer models were evaluated by comparing with the experimental results. It is showed that the temperature field in density lock can be well predicted by the heat transfer model at steady-state. The correlation for calculating the heat loss in density lock was deduced. The minimization of heat loss was also discussed in the paper.

Key words: density lock; steady-state; heat transfer model

为进一步提高核电站的安全性,国外在新一代核电站设计中采用了非能动安全的概念^[1]。其中一些新型核电站的概念设计中采用了密度锁技术^[2-4]。密度锁是安装在反应堆主冷却剂系统与事故冷却系统边界上的1个设备。在反应堆正常工作时,密度锁内存在一密度分界面。通过主冷却剂在穿过堆芯上升的过

程中产生的压降与上下密度锁中两个界面之间的静压差相等,保证分界面在密度锁内,从而将主冷却剂与高含硼水隔离。一旦发生事故,密度锁将自动开启,高含硼水注入主冷却剂系统,使反应堆停堆,并通过自然循环将堆芯热量带走,保证了反应堆安全停堆。

目前,国外学者对于密度锁的研究已开展

了一些积极的探索^[5-6],但主要集中在界面的控制和反应堆概念设计上。对于密度锁的机理研究,尤其是密度锁设计方面的研究很少。本工作对密度锁稳态传热工况进行分析,建立数学模型并与实验相对比。

1 物理描述

密度锁正常工作的前提是在密度锁内能维持一稳定的密度分层界面。分层界面是由热的主冷却剂与冷的高含硼水间的密度差形成的,所以,密度锁内需要维持一定的温度梯度,即需要高、低温热源来维持温差。界面之上的工质由于主回路的扰动导致工质发生剧烈的搅混,温度与主回路温度相同,作为密度锁的高温热源。密度锁出口与冷的、静止的高含硼水相连,作为密度锁的低温热源。为维持低温热源,需将来自主回路的热量导出。一种方案是通过密度锁外布置换热器或直接向环境散热导出热量;另一种方案是在密度锁内布置换热器将热量导出。此外,为了提高反应堆的经济性,要求从主回路通过密度锁损失的热量尽可能小。

2 数学模型

图1示出密度锁达到稳态时的温度分布。根据密度锁内温度场的特点,划分为3个区域:混合区、导热区和恒温区。分层界面位于混合区和导热区之间,界面之上的工质由于主回路的扰动发生剧烈的搅混,温度与主回路温度(T_H)相同,即为混合区;界面之下传热方式以导热为主,温度从 T_H 降低到高含硼水温度 T_L ,即为导热区;导热区之下温度保持不变,为恒温区。

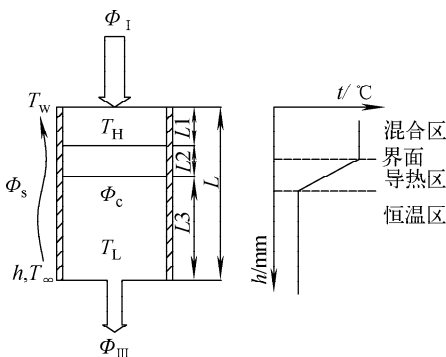


图1 密度锁稳态温度场

Fig. 1 Temperature field at steady-state in density lock

以密度锁为控制体,稳态下控制体内增量为0,则能量方程为:

$$\Phi_I = \Phi_s + \Phi_c + \Phi_{III} \quad (1)$$

$$\Phi_s = \Phi_{Is} + \Phi_{II_s} + \Phi_{III_s} \quad (2)$$

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (3)$$

其: Φ_I 为传入密度锁的热流量,W; Φ_s 为密度锁向外界散热热流量,W; Φ_c 为密度锁内换热器热流量,W; Φ_{III} 为恒温区向下传出的热流量,W; Φ_{Is} 为混合区向外界散热热流量,W; Φ_{II_s} 为导热区向外界散热热流量,W; Φ_{III_s} 为恒温区向外界散热热流量,W; L 为密度锁长度,m; L_1 为混合区长度(与扰动和密度锁结构有关,目前只能通过实验确定),m; L_2 为导热区长度,m; L_3 为恒温区长度,m。

3 模型分析及验证

3.1 实验装置及方法

实验装置示于图2。通过温控器使上水箱保持恒温,为密度锁提供入口处的恒温热源(T_H)。水循环回路,水由上水箱抽出,经过涡轮流量计和水泵后,返回上水箱,为密度锁提供扰动。实验段通过管壁向空气散热(Φ_s),管外换热系数 h ;实验段内无换热器($\Phi_c=0$)。密度锁实验管段内布置格架作为密度锁结构。下水箱为密度锁出口处冷源(T_L),实验中等于室温(T_∞)。实验段的温度通过布置于实验段中心位置的热电偶进行监测。

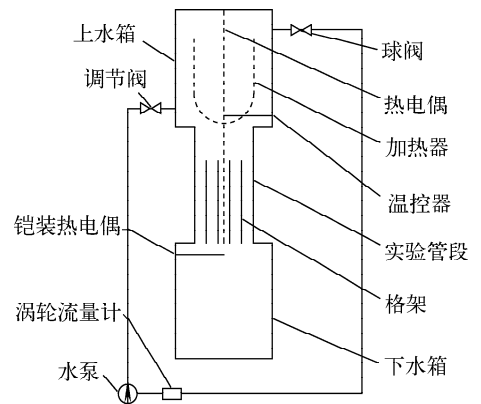


图2 实验装置简图

Fig. 2 Scheme of experimental apparatus

首先向实验装置加水,调节温控器温度至设定值,随后开启水泵,调节流量至设定值,打

开加热器,并用IMP板采集热电偶温度。分层形成后,向上水箱添加染料,观察界面位置(L_1)。当热电偶温度不再随时间改变时,认为实验段达到稳态。

3.2 理论计算

为简化分析,作如下假设:1) 实验段任一截面上温度均匀;2) 水的导热系数 λ 及实验管壁表面传热系数 h 均为常数。

以下分别对混合区、导热区和恒温区逐一进行计算。

1) 混合区

以混合区为控制体,能量平衡图示于图3。

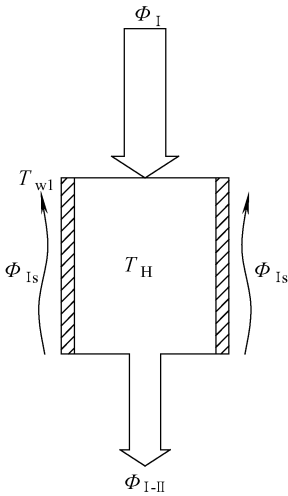


图3 混合区能量平衡图

Fig. 3 Balance of energy in mixing zone

能量方程为:

$$\Phi_I = \Phi_{Is} + \Phi_{I-II} \quad (4)$$

其中, Φ_{I-II} 为混合区向导热区传热热流量,W。

由传热学和能量守恒可得混合区散热量,为:

$$\Phi_{Is} = hPL_1(T_{w1} - T_{\infty}) = \lambda_w PL_1(T_H - T_{w1})/\delta \quad (5)$$

其中: h 为实验段表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; P 为实验段截面周长,m; T_{w1} 为混合区外壁面温度,K; T_H 为混合区温度,K; T_{∞} 为环境温度,K; λ_w 为实验段管壁导热系数, $W/(m \cdot K)$; δ 为实验段管壁厚度,m。

消去 T_{w1} ,得:

$$\Phi_{Is} = hPL_1 \frac{\lambda_w}{\delta h + \lambda_w} (T_H - T_{\infty}) \quad (6)$$

2) 导热区

以导热区为控制体,能量平衡图示于图4。

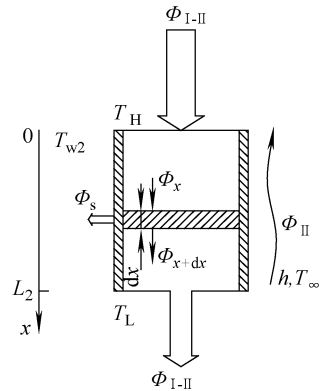


图4 导热区能量平衡图

Fig. 4 Balance of energy in conductive zone

能量方程为:

$$\Phi_{I-II} = \Phi_{II-s} + \Phi_{II-III} \quad (7)$$

应用微元法计算。取长度为 dx 的微元段进行分析。微元内能量方程为:

$$\phi_x = \phi_{x+dx} + \phi_s \quad (8)$$

由传热学可得:

$$\phi_x = -\lambda A_c dt/dx \quad (9)$$

$$\phi_{x+dx} = \phi_x + \frac{\partial}{\partial x}(-\lambda A_c dt/dx) dx \quad (10)$$

$$\phi_s = hP dx (T_{w2} - T_{\infty}) = \lambda_w P dx (T - T_{w2})/\delta \quad (11)$$

其中: Φ_{II-III} 为导热区向恒温区传热热流量,W; λ 为密度锁内工质导热系数, $W/(m \cdot K)$; A_c 为实验段截面积, m^2 ; T_{w2} 为导热区外壁面温度,K。

消去 T_{w2} ,得:

$$\phi_s = hP \frac{\lambda_w}{\delta h + \lambda_w} (T - T_{\infty}) dx \quad (12)$$

其中,管外对流换热系数 h 按照大空间自然对流计算。

将式(9)~(12)代入式(8)并整理,得:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{hP}{\lambda A_c} \cdot \frac{\lambda_w}{\delta h + \lambda_w} (T - T_{\infty}) = 0 \quad (13)$$

为求解方便,引入过剩温度 $\theta = T - T_{\infty}$,使式(13)成为齐次方程,完整数学描述为:

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} = m^2 \theta \quad (14)$$

$$x = 0, \theta = \theta_0 = T_H - T_{\infty} \quad (15)$$

$$x = L_2, \theta = \theta_{L_2} = T_L - T_\infty \quad (16)$$

式中, $m = \sqrt{h\lambda_w P / (\lambda A_c (\delta h + \lambda_w))}$ 为一常量。

式(14)为2阶线性齐次微分方程,其通解为:

$$\theta = c_1 e^{mx} + c_2 e^{-mx} \quad (17)$$

其中, c_1, c_2 由边界条件式(15)和(16)确定,分别为:

$$c_1 = \frac{e^{mL_2} \theta_{L_2} - \theta_0}{e^{2mL_2} - 1} \quad (18)$$

$$c_2 = \frac{e^{2mL_2} \theta_0 - e^{mL_2} \theta_{L_2}}{e^{2mL_2} - 1} \quad (19)$$

最后,可得导热区内温度分布为:

$$\theta = \frac{(e^{mL_2} \theta_{L_2} - \theta_0) e^{mx} + (e^{2mL_2} \theta_0 - e^{mL_2} \theta_{L_2}) e^{-mx}}{e^{2mL_2} - 1} \quad (20)$$

由混合区进入导热区的全部热流量均须通过 $x=0$ 处的截面,即:

$$\begin{aligned} \Phi_{I-II} = & -\lambda A_c \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=0} = \\ & -\lambda A_c \frac{(m+1)e^{mL_2} \theta_{L_2} - m\theta_0(1+e^{2mL_2})}{e^{2mL_2} - 1} \end{aligned} \quad (21)$$

3) 恒温区

恒温区的能量平衡与混合区的类似。参照图3,恒温区能量方程为:

$$\Phi_{II-III} = \Phi_{III,s} + \Phi_{III} \quad (22)$$

恒温区散热量为:

$$\Phi_{III,s} = hPL_3 \frac{\lambda_w}{\delta h + \lambda_w} (T_L - T_\infty) \quad (23)$$

实验中, $T_L \approx T_\infty$, 即向环境散热量可忽略不计。实验过程中,实验段出口温度等于下水箱温度,且不随时间而改变,即 $\Phi_{III} = 0$ 。

联立式(4)、(6)、(21),可得通过密度锁损失的热流量为:

$$\begin{aligned} \Phi_I = & hPL_1 \lambda_w (T_H - T_\infty) / (\delta h + \lambda_w) - \\ & \lambda A_c \frac{(m+1)e^{mL_2} \theta_{L_2} - m\theta_0(1+e^{2mL_2})}{e^{2mL_2} - 1} \end{aligned} \quad (24)$$

3.3 结果对比

实验中的各参数值为: $T_H = 307.5 \text{ K}$, $T_L = 289.7 \text{ K}$, $T_\infty = 288.8 \text{ K}$, $P = 0.659 \text{ m}$, $A_c = 0.0346 \text{ m}^2$, $L_1 = 0.068 \text{ m}$, $L_2 = 0.16 \text{ m}$ 。代入式(20),计算出导热区温度场,与实验值进行对比,结果示于图5。可看出,计算值比实验

值略高。原因在于,计算值中的 $h(4.31 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$ 采用大空间自然对流经验公式进行计算,而实验中,由于空气有一定的流动性,增大了 h ,导致计算值 h 小于实验值。对 h 进行修正后为 $h^*(8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$,计算值则与实验值吻合较好。将各参数代入式(21)和(24),计算得: $\Phi_{I-II} = 5.73 \text{ W}$, $\Phi_I = 10.99 \text{ W}$ 。

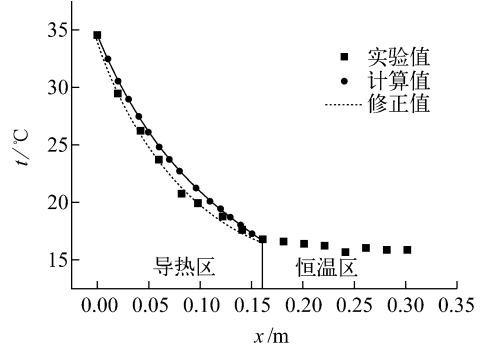


图5 实验值与计算值对比

Fig. 5 Comparison of experimental and calculated results

4 讨论

为提高反应堆的经济性,要求通过密度锁的热量 Φ_I 尽可能小。由式(4)可知, Φ_I 由以下两项组成。

第1项为混合区散热量。对式(6)进行变换,得:

$$\Phi_{I,s} = \frac{T_H - T_\infty}{\delta/\lambda_w + 1/h} PL_1 \quad (25)$$

其中: $T_H - T_\infty$ 为已知量;当 PL_1 取最小值、 $\delta/\lambda_w + 1/h$ 取最大值时, $\Phi_{I,s}$ 最小; PL_1 是扰动(已知量)与密度锁结构的函数,可通过改进密度锁结构使其减小; δ/λ_w 和 $1/h$ 为导热热阻和对流换热热阻, $\Phi_{I,s}$ 随 λ_w 和 h 的减小而减小,当 $\delta/\lambda_w \rightarrow \infty$, 即管壁绝热时, $\Phi_{I,s} \rightarrow 0$ 。

综上所述,在混合区,外加保温层使其趋于绝热,可使混合区散热量趋于零。

第2项为混合区向导热区的散热量。在 $T_L \approx T_\infty$ 时,导热区向恒温区传热量为0,即 $x=L_2$ 处可认为是绝热的,即:

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L_2} = & (m(e^{mL_2} \theta_{L_2} - \theta_0) e^{-mx} - \\ & m(e^{2mL_2} \theta_0 - e^{mL_2} \theta_{L_2}) e^{-mx}) / (e^{2mL_2} - 1) = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

化简得:

$$e^{2mL_2} - 2e^{mL_2} \frac{\theta_0}{\theta_{L_2}} + 1 = 0 \quad (27)$$

解得:

$$L_2 = \left[\ln \left(\sqrt{\left(\frac{\theta_0}{\theta_{L_2}} \right)^2 - 1} + \frac{\theta_0}{\theta_{L_2}} \right) \right] / m \quad (28)$$

将式(28)代入式(21),化简得:

$$\Phi_1 = \Phi_{1-II} = 0.93545 \sqrt{\frac{1}{0.18/h + 0.005}} - 0.00046 \quad (29)$$

代入实验参数,可得 Φ_1 随 h 变化的关系曲线(图6)。

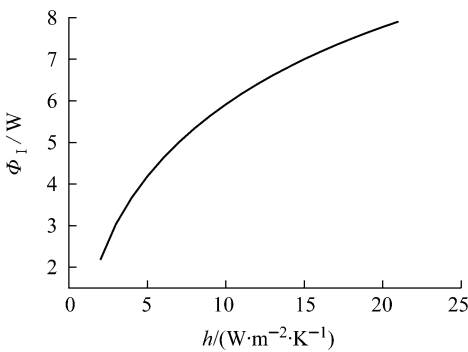


图6 Φ_1 - h 函数关系

Fig. 6 Φ_1 - h function

由图6可知, Φ_1 随着 h 的减小而减小。在不考虑其它因素时, $\{h\}_{\min} = 1$,即 $\{\Phi_1\}_{\min} = 2.17 \text{ W}$ 。由于 L_2 随 h 减小而增大,而 L_2 增大一方面使温度梯度减小,分层变弱,另一方面又增大了密度锁整体尺寸。所以,只有在满足分层强度和密度锁尺寸前提下,才能确定 h 最小值,从而使 Φ_1 最小。

本实验中,密度锁内无换热器。若有换热器,则可将换热器折合成内冷源进行计算。此外,还需考虑换热器周围的自然对流是否会破坏分层及换热器对密度锁内温度场的影响等因素。

5 结论

本工作研究给出了密度锁稳态传热下的数学模型,并利用该模型与实验结果进行比较分析,验证了所建模型的正确性。此外,通过在模型的基础上的进一步分析发现,通过密度锁的热损失量是换热系数的单调增函数,并给出了关系式,得到理论情况下热损失量最小值。在实际应用中,换热系数还与导热区长度有关,当其最大长度确定时,即可计算出换热系数的最小值,使密度锁热损失量最小。

参考文献:

- [1] JOHN P E, KUPITZ J, CLEVELAND J, et al. IAEA activities on passive safety systems and overview of international development [J]. Nucl Eng Des, 2000, 201: 49-54.
- [2] HIROAKI W. Response of the ISER for a beyond-design-basis hypothetical accident [J]. Nucl Eng Des, 1995, 158: 133-147.
- [3] MEHEDINTEANU S. An application of the new way to prevent core melting in pressure tube reactor (CANDU type) [J]. Annals of Nucl Energy, 2001, 28: 79-88.
- [4] CARELLI M D, CONWAY L E, ORIANI L, et al. The design and safety features of IRIS reactor [J]. Nucl Eng Des, 2004, 230: 151-167.
- [5] HAGA K, TASAKA K, KUKITA Y. The simulation test to start up the PIUS-type reactor from isothermal fluid condition [J]. J Nucl Sci Technol, 1995, 32(9): 345-352.
- [6] TASAKA K, IMAI S, MASAOKA H, et al. Feedback control of a primary pump for safe and stable operation of a PIUS-type reactor [J]. Nucl Eng Des, 1993, 144: 345-352.