

文章编号: 0258-0926(2015)01-0127-05; doi:10.13832/j.jnpe.2015.01.0127

垂直管内含不可凝气体蒸汽的 冷凝换热 MELCOR 数值模拟

黄 政

中国核电工程有限公司, 北京, 100840

摘要: 采用 MELCOR 程序建模, 对垂直管内含有空气的冷凝传热过程进行模拟计算, 并将数值模拟结果与 Kuhn 的实验进行比较。结果表明, MELCOR 模拟结果基本与实验结果基本吻合, 验证了 MELCOR 模型的合理性。但是, MELCOR 模拟蒸汽传质和液膜累积过程偏大, 使得总换热系数偏大。通过对 MELCOR 模型参数进行修正, 调整后计算得到的液膜厚度和换热系数比调整前减小, 且结果与实验吻合得很好。

关键词: 冷凝; 不可凝气体; MELCOR; 数值模拟

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

Simulation of Steam Condensation Inside Vertical Tube with Noncondensable Gases Using MELCOR

Huang Zheng

China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing, 100840, China

Abstract: Using MELCOR, the numerical simulation of steam condensation inside vertical tube in the presence of noncondensable gases is carried out. Calculated results are compared with Kuhn's experimental results. Generally the agreement is satisfactory except that the heat transfer process and condensed film accumulation were overestimated, leading to the larger heat transfer coefficient. After modification of parameters of MELCOR model, the thickness of film and the overall heat transfer coefficient were decreased and agreed well with experiment data. Thus the MELCOR model is valid.

Key words: Condensation, Noncondensable gases, MELCOR, Numerical simulation

0 引言

在先进核电厂非能动安全壳冷却系统的设计过程中, 含不可凝气体蒸汽的冷凝换热是一个重要的工程问题。经典的 Nusselt 凝结换热模型只适用于纯蒸汽环境, 而当蒸汽中含有不可凝气体时, 即使是微量的, 也会在蒸汽与冷凝液膜之间形成气体边界层, 显著削弱凝结换热。工程实践证实, 如果水蒸汽中含有 1% 的空气, 就会使冷凝传热系数降低约 60%^[1]。

本研究针对垂直管内含有空气蒸汽的冷凝换热现象, 采用 MELCOR 一体化程序进行数值模

拟, 并将求解结果与 Kuhn 的实验^[2]进行比较。

1 冷凝实验介绍

Kuhn 的实验段如图 1 所示, 主要参数见表 1。该实验段主要包括 2 条循环环路, 分别是蒸汽-不可凝气体环路和冷却水环路。实验用到的不可凝气体成分有空气以及空气加氦气的 2 种组合。实验段设计为双套管形式, 其中直径较小的为冷凝管; 直径较大的外部冷却套管为冷却水流道, 外壁面起隔热作用。实验时, 蒸汽-不可凝气体混合物在冷凝管内自上而下流动; 冷却水则在内外

套管之间的环形区域自下而上流动，对管内气体进行冷却。

整个热量传递的过程可划分为 3 个关联部分：蒸汽-空气在管壁内侧的冷凝传热；管壁的导热；管壁外侧与冷却水的对流传热。

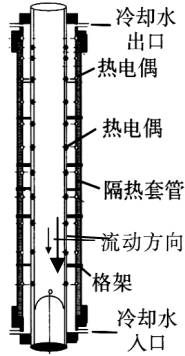


图 1 Kuhn 实验段示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Kuhn's Experiment Channel

表 1 Kuhn 实验段参数

Table 1 Parameters in Kuhn's Experiment Apparatus

设备	参数	参数值
冷凝管	长度/m	3.37
	有效冷凝长度/m	2.4
	入口绝热段长度/m	0.5
	内径/m	0.0475
	外径/m	0.0508
	流通面积/m ²	0.00177
	管壁材料	304 不锈钢
冷却套管	内径/m	0.0736
	流通面积/m ²	0.00223

2 计算模型

2.1 程序模型

MELCOR 是高度一体化的严重事故分析程序^[3]。对于含不可凝气体的冷凝传热，采用的是 Collier 模型和 Chilton-Colburn 传质传热类比 (HMTA) 关系式。程序中计算冷凝质量流密度的表达式为：

$$\begin{aligned} \dot{m}_c &= h_D \rho_v \ln \left(\frac{P_{tot} - P_{srf}}{P_{tot} - P_{stm}} \right) \\ &= \rho_v \frac{Sh D_m}{L_c} \ln \left(\frac{P_{tot} - P_{srf}}{P_{tot} - P_{stm}} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Sh 采用 HMTA 的方法计算式为：

$$Sh = C Nu^a Sc^b Pr^d \quad (2)$$

式中，常数 C, a, b 和 d 根据不同的传热关系式相应选取。

另一方面，为了模拟冷凝液膜在壁面上的积累和流动特性，还需采用 MELCOR 的液膜跟踪模型。使用该模型后，用于模拟管壁传热的热构件就能组成一个相互关联的网络，从而使液膜能在不同的热构件间流动和分配。其中液膜厚度是由式 (3) ~ 式 (5) 迭代求解确定：

$$Re_f = 2(\dot{m}_{in} + \dot{m}_{out}) / (p_w \mu_f) \quad (3)$$

$$\delta_f = C [(\mu_f / \rho_f) / (g \sin \theta)]^{1/3} Re_f^a \quad (4)$$

$$\delta_f = [\dot{m}_{f,0} + (\dot{m}_{in} + \dot{m}_c - \dot{m}_{out}) \Delta t] / (\rho_f A_{srf}) \quad (5)$$

式 (4) 中，常数 C 和 a 对于层流和湍流的取值有所不同。

2.2 几何模型和节点划分

MELCOR 模型的节点划分如图 2 所示。控制体 CV001 ~ CV013 对应气体混合物流动的冷凝管，CV101 ~ CV113 对应冷却水流动的外侧套管。CV801 和 CV802 分别为蒸汽-空气混合物的源和阱；CV902 和 CV901 分别为冷却水的源和阱。上述源和阱均采用恒定参量的控制体进行模拟。

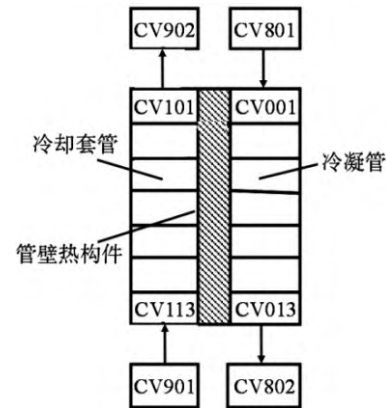


图 2 MELCOR 节点划分示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of MELCOR Model Nodalization

在实验段的特定标高位置上共分布有 8 个 J 形热电偶，用于测量气体混合物和冷却水温度。节点划分时，控制体中心标高与之相对应(表 2)。

3 模型验证

为了与 MELCOR 模拟结果进行对比，根据入口不可凝气体的质量分数高低，选取 Kuhn 的实验作为参考。实验参数为：蒸汽入口温度为

表 2 MELCOR 建模参数

Table 2 Parameters of MELCOR Modeling

控制体编号	底标高/m	高度/m	流道长度/m
CV001/CV101	2.38	0.04	—
CV002/CV102	2.28	0.10	0.07
CV003/CV103	2.22	0.06	0.08
CV004/CV104	2.01	0.21	0.13
CV005/CV105	1.94	0.08	0.14
CV006/CV106	1.67	0.26	0.17
CV007/CV107	1.57	0.10	0.18
CV008/CV108	1.28	0.29	0.20
CV009/CV109	1.14	0.14	0.22
V010/CV110	0.80	0.33	0.24
CV011/CV111	0.61	0.19	0.26
CV012/CV112	0.20	0.41	0.30
CV013/CV113	0.00	0.20	0.30

140.7 ; 空气流量为 $8.6 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$; 空气质量分数为 0.1473 ; 冷却水入口温度为 28.4 ; 冷却水流量为 $925.4 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 。图 3 ~ 图 6 给出了主要参数的计算值与实验值的比较结果。图中的轴向位置的原点设在顶部, 向下为正方向。

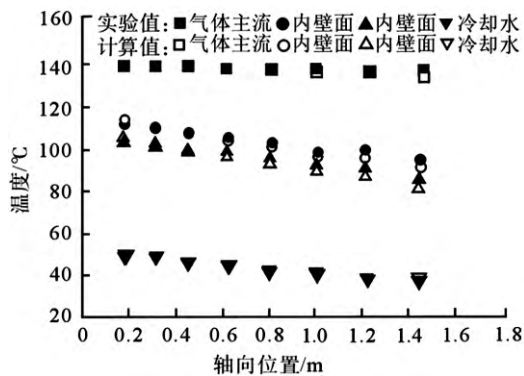


图 3 蒸汽-空气主流、管壁内外侧和冷却水的温度计算值与实验值的比较

Fig. 3 Comparison of Calculated Temperatures of Vapor-Air Mixture, Inner and Outer Wall, Cooling Water with Experimental Results

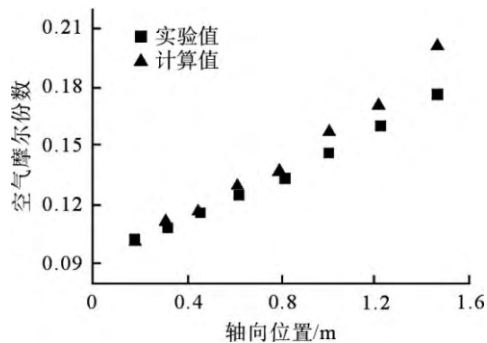


图 4 空气摩尔分数计算值与实验值比较

Fig. 4 Comparison of Calculated Air Mole Fractions with Experimental Results

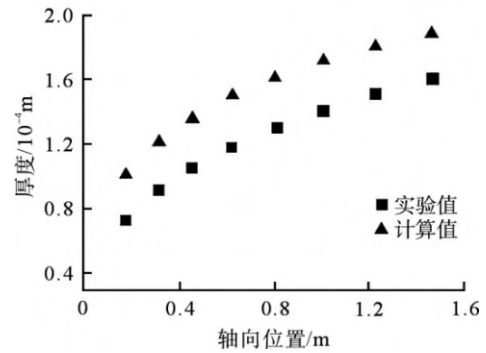


图 5 冷凝液膜厚度计算值与实验值的比较

Fig. 5 Comparison of Calculated Film Thicknesses with Experimental Results

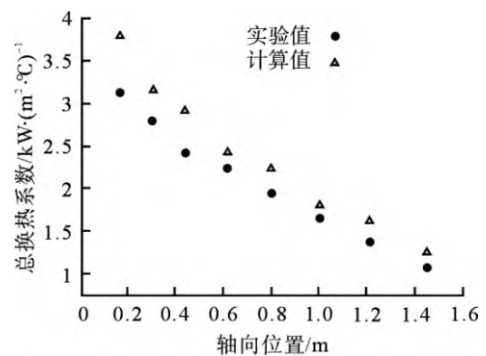


图 6 冷凝总传热系数计算值与实验值比较

Fig. 6 Comparison of Calculated Total Condensation Heat Transfer Coefficients with Experimental Results

从图 3 中可以看出, 沿着蒸汽-空气混合物的流动方向, 随着蒸汽的不断消耗和不可凝气体的积累, 主流温度逐渐降低; 冷却水则是沿着流动方向逐渐加热, 温度逐渐升高。壁面温度与蒸汽-空气主流和冷却水之间的温度差体现了两侧传热热阻的变化趋势。可以看出沿着管径方向, 内侧热阻是逐渐增大的, 这与图 6 给出的冷凝总换热系数的变化趋势一致。图 4 显示了随着蒸汽的不断凝结, 空气浓度沿轴向逐渐升高的趋势。图 5 表明, 液膜随着轴向方向不断地积累。图 6 表明, 冷凝换热系数沿轴向是逐渐降低的。这是因为一方面气体入口处蒸汽浓度较高, 另一方面冷却水虽然是逆流, 但总体升温不显著, 因此气体入口处的换热系数是最高的。此外, 通过与计算结果的比较可知, 对于轴向高度同一位置, 入口空气浓度越高, 换热系数也相对越低。

从图 3 ~ 图 6 可以看出, MELCOR 模拟的计算结果与实验结果基本吻合, 表明了 MELCOR 模型是合理的及正确的。但是液膜厚度和冷凝总

换热系数结果与实验相比总体偏大。特别是液膜厚度，最大偏差约为 35%，表明 MELCOR 在计算冷凝传质质量流量和液膜厚度时采用的关系式偏大，直接应用于工程设计计算时不够保守。因此，需要对 MELCOR 的相应模型进行修正调整。

通过对与计算传质质量流量相关的式(2)和计算液膜厚度的式(4)中的系数进行调整，可以减小蒸汽扩散传质的能力和液膜的累积效应。调整参数后的计算结果如图 7~图 10 所示。图 7 和图 8 表明，参数调整后对于温度和空气浓度沿轴向分布的影响并不明显，程序计算值与实验值仍能很好吻合。从图 9 和图 10 中可以看出，调整参数后的液膜厚度和冷凝总换热系数能够与实验值较好吻合，与调整前的结果相比较降低较为明显，能够更好满足工程设计的要求。

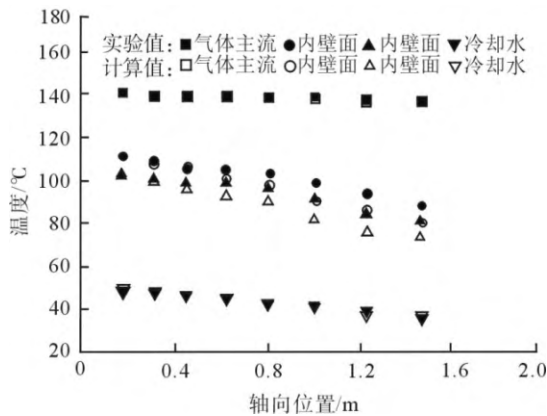


图 7 参数调整后蒸汽-空气主流、管壁内外侧和冷却水的温度比较

Fig. 7 Comparison of Calculated Temperatures of Vapor-air Mixture, Inner and Outer Wall, Cooling Water with the Experimental Results of after Modification

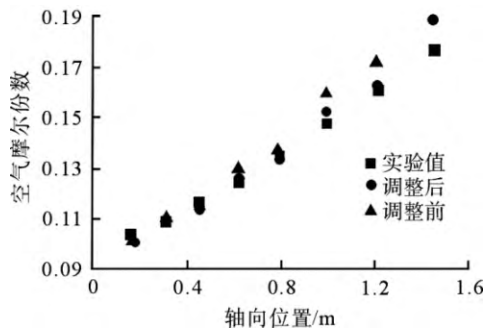


图 8 参数调整后的空气摩尔份数比较

Fig. 8 Comparison of Calculated Air Mole Fractions with Experimental Results of after Modification

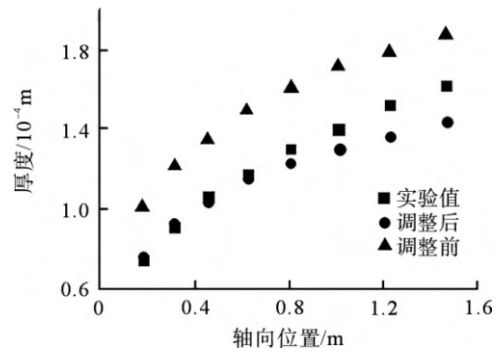


图 9 参数调整后的冷凝液膜厚度比较

Fig. 9 Comparison of Calculated Film Thicknesses with Experimental Results of after Modification

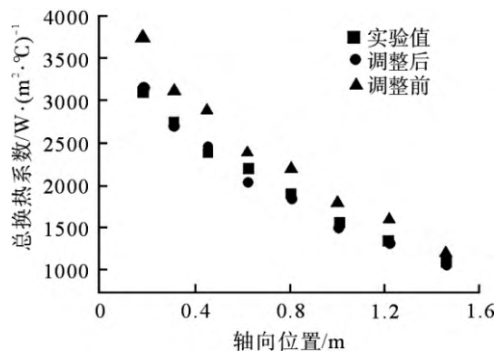


图 10 参数调整后冷凝总传热系数比较

Fig. 10 Comparison of Calculated Total Condensation Heat Transfer Coefficients with Experimental Results after Modification

4 结束语

总体而言，MELCOR 对于垂直管内含空气的冷凝现象模拟较好，模拟结果基本与实验结果吻合，验证了 MELCOR 模型的合理性。但是，MELCOR 模拟蒸汽传质和液膜累积过程偏大，使得总换热系数偏大。通过对 MELCOR 模型参数进行修正，调整后计算得到的液膜厚度和换热系数比调整前减小，结果与实验吻合得很好。

符号表：

- g : 重力加速度, m/s^2
- \dot{m} : 质量流密度, $kg/(m^2 \cdot s)$
- h_D : 对流传质系数, m/s
- D_m : 扩散系数, m^2/s
- ρ : 密度, kg/m^3
- P : 压力, Pa
- L_c : 特征长度, m
- p_w : 湿润周长, m
- A : 传热面积, m^2

μ : 动力粘度, Pa·s
 δ_f : 冷凝液膜厚度, m
 θ : 传热管倾斜角
 Δt : 计算时间步长, s
 Nu : 努赛尔数
 Re : 雷诺数
 Pr : 普朗特数
 Sh : 舍伍德数
 Sc : 施密特数
 a : 关系式常数
 b : 关系式常数
 C : 关系式常数
 d : 关系式常数

下标 :

f : 冷凝液膜
c : 冷凝

v : 蒸汽
tot : 总共
stm : 主流蒸汽
srf : 冷凝表面
in : 入口
out : 出口

参考文献 :

- [1] 张学学, 李桂馥, 史琳, 等. 热工基础[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] Kuhn S Z. Investigation of Heat Transfer from condensing Steam-Gas Mixtures and Turbulent Films Flowing Downward Inside a Vertical Tube[D]. California: University of California, Berkeley, 1995.
- [3] Sandia National Laboratories. MELCOR computer code manuals V1.8.5[R]. 2000.

(责任编辑: 王中强)