

CMT 内蒸汽流动特性的数值研究

NUMERICAL RESEARCH ON STEAM FLOW CHARACTERISTIC IN CMT

潘如东 翁明辉 王勇
(上海核工程研究设计院)

摘要：本文以 CMT 内蒸汽凝结为研究对象，通过用 STAR-CCM+ 软件模拟的方式对加装遮流挡板和扩散器时的蒸汽凝结特性进行研究，着重分析了蒸汽射流及流场情况、轴向温度分布、质量流量波动和入口压力四个方面。结果表明，加装遮流挡板和扩散器改变了蒸汽射流的方向，减小了轴向的蒸汽影响范围和温度影响范围，减小了质量流量的波动。其中，加装扩散器比加装遮流挡板在蒸汽影响范围、温度影响范围和质量流量波动上更优，但是会增加蒸汽入射的阻力。

关键词：蒸汽凝结，STAR-CCM+，温度分布，质量流量波动

Abstract: The steam condensation characteristics were numerically studied by using STAR-CCM+ when the plane or diffuser adds to CMT. The jet shape, flow field condition, axial temperature distribution, mass flow fluctuation and pressure of inlet were analyzed. The results show that the plane or diffuser changes the direction of steam moving, decreases the incidence of steam and temperature, and reduces the fluctuation of mass flow. Actually, the diffuser is better than plane on axial temperature distribution and mass flow fluctuation, but worse on pressure of inlet.

Key words: steam condensation, STAR-CCM+, temperature distribution, mass flow fluctuation

1 引言

在 AP1000 电站设计中，当反应堆冷却剂系统处于失水状态时，为确保安全，利用堆芯补水箱（CMT）的重力特性对堆芯进行非能动注水，实现应急堆芯冷却^[1]。但在注水初期，由于高温蒸汽直接进入 CMT，与过冷水接触发生冷凝，引起压力的剧烈波动，可能造成负压，降低注水流量，从而影响反应堆的安全，因此对于 CMT 内蒸汽直接接触式冷凝的特性进行研究具有十分重要的意义。

对于蒸汽直接接触式冷凝现象，很多学者做过研究，Aya 和 Nariai^[2]对蒸汽和冷水直接接触式冷凝的传热系数进行了理论研究，Kim 等人^[3]对蒸汽排放到冷水箱内的凝结特性进行了实验研究，Cho 等人^[4]对多孔筒易鼓泡器设备的蒸汽排放特性进行了实验研究。本文通过用 STAR-CCM+ 软件，对 CMT 入口加装遮流挡板和筒易扩散器时蒸汽在 CMT 内的直接接触式冷凝的瞬态特性进行数值研究，并与无扩散器时的蒸汽冷凝的瞬态特性进行对比，研究结果将支持非能动安全系统的设计和改进。

2 数学模型

2.1 流场几何结构与汽水参数

图 1 为 CMT 几何结构示意图。为了方便模拟，将 CMT 箱体简化，只算上半部分箱体。入口管径为 173.1mm，遮流挡板为圆盘，厚 50mm，圆面直径 500mm，距离入口管口 300mm。扩散器为一个多孔圆筒，内筒径与入口管径一致，筒高 300mm，筒厚 10mm，扩散器共 8 个孔，孔径为 65mm，垂直孔间距为 100mm，圆周孔间偏角为 90°。入口为速度入口，下底面为压力边界出口。

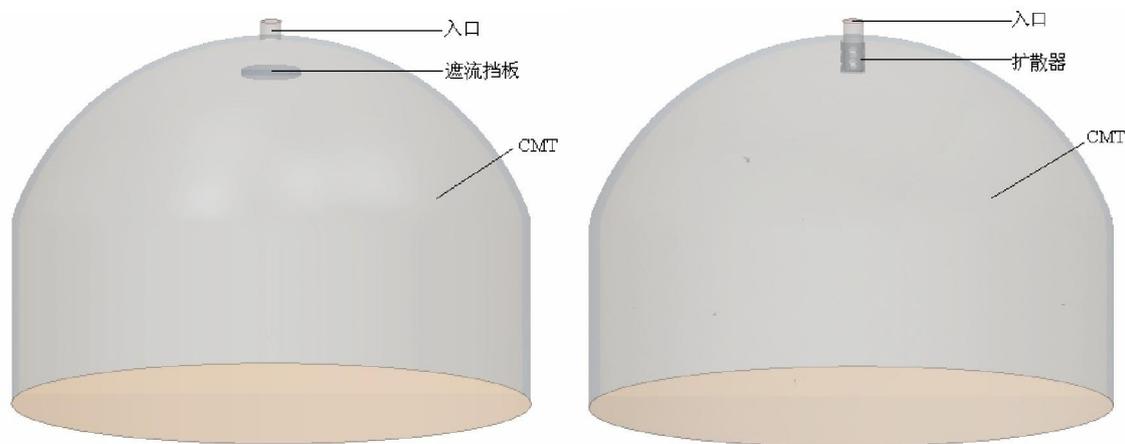


图 1 几何模型

Fig.1 The geometry model

汽水参数设置见表 1，其中的凝结换热系数计算公式见 2.3 节。

表 1 小孔射流模拟参数

Table 1 simulation parameter

算例	蒸汽流速, m/s	蒸汽温度,	水温,	凝结换热系数, MW/m ²	扩散器或挡板
1					无
2	261.71	100	25	0.425	挡板
3					扩散器

2.2 控制方程

本文采用 STAR-CCM+ 软件对上述模型进行建模和计算，采用 VOF 冷凝模型^[5]。

VOF 运动量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

其中， ρ 为密度， $\rho = \sum \alpha_q \rho_q$ ， μ 为动力粘性系数， $\mu = \sum \alpha_q \mu_q$ ， \mathbf{g} 为重力加速度， \mathbf{F} 为除重力外的体积力。

VOF 能量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\mathbf{u}(\rho E + p)) = \nabla(k_{eff} \nabla T) + S_h$$

其中, $E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q}$, $k_{eff} = \frac{\mu}{\sigma_T}$, σ_T 为湍流普朗特数, S_h 为能量源项。

体积分率方程式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q) = S_{\alpha_q}$$

当 $\alpha_q = 0$, 即某个单元体 q 相为 0; $\alpha_q = 1$, 即某个单元体 q 相为 1; $0 < \alpha_q < 1$, 则表示某个单元体内 q 相与其他相有分界面, $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$, 表示分率之和为 1。

因为蒸汽凝结过程中涉及到质量转移和能量转移, 因此还需有质量源项和能量源项:

$$m_{ec} = \frac{h(T_s - T_f)}{(h_s - h_f)}$$

$$S_h = m_{ec}(h_f - h_s)$$

其中 m_{ec} 为质量源项。

2.3 凝结换热系数

平均凝结换热系数可以通过下列关系式得出:

$$Q = GA_a(h_s - h_f) = hA(T_s - T_f) \quad (1)$$

其中 Q : 热量, J ; G : 蒸汽质量流率, $kg/(m^2s)$; A_a : 小孔截面积, m^2 ; h_s : 蒸汽焓值, J/kg ; h_f : 水焓值, J/kg ; h : 平均换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; A : 换热面积, m^2 ; T_s : 蒸汽温度, $^\circ C$; T_f : 水温度, $^\circ C$ 。

虽然关于小孔蒸汽射流凝结的研究早在上世纪六-七十年代就已经开始了, 但是对于凝结换热系数的研究始终是个难点, 首先是凝结换热系数目前只能从试验中进行测量和计算, 关注的点不同, 得出的经验公式也不同, 其次对于凝结换热面积的测量也是比较困难的, 尽管如此, 多种学者还是通过理论、试验等方法对凝结换热系数进行了研究, 得出了在一定关注点内符合试验结果的凝结换热系数。如 Kim 等人得出的平均凝结换热系数经验公式为:

$$h = 1.4453 C_p G_m B^{0.03587} (G/G_m)^{0.13315} \quad (2)$$

其中 C_p : 水比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; G_m : 临界蒸汽质量流率, $kg/(m^2s)$; B : 凝结驱动力, $B = C_p(T_s - T_f)/(h_s - h_f)$ 。

3 计算结果及分析

3.1 蒸汽射流及流场状况

本文通过对上述三个模型进行计算,得到蒸汽在 CMT 内的影响范围及流场。图 2 为蒸汽射流形状对比图。从图中可以看出,无遮流挡板或扩散器时,蒸汽喷射的方向是垂直向下的,因此对于垂直方向上的喷射影响较大,水平方向上的喷射影响较小,加装遮流挡板或扩散器时,由于蒸汽喷射的方向是水平的,因此垂直方向上的喷射影响较小,水平方向上的喷射影响较大。图 3 为 CMT 内流线图。从流线上可以看出,无遮流挡板或扩散器时的蒸汽主要是垂直向下流动,而加装遮流挡板或扩散器后的蒸汽则主要是沿箱体壁面流动,但是加载遮流挡板后水箱内很大区域内存在上下水层的循环流动。分析认为,无遮流挡板或扩散器时的蒸汽射流直接影响的水层过厚,而加装遮流挡板时,由于上下水层有较大的循环流动,因此蒸汽射流间接影响的水层也较厚,只有加载扩散器后,蒸汽的影响区域较小,且不会造成上下水层的流动,因此影响的水层很薄。对于 CMT 来说,箱体内的冷水主要是用来给堆芯进行降温,如果蒸汽的影响水层过大,势必会影响 CMT 的作用,另一方面,影响水层过大,所需的蒸汽量也较大,会延缓 CMT 注射,因此加装扩散器最有利于 CMT 的及时注射和注射的效果。

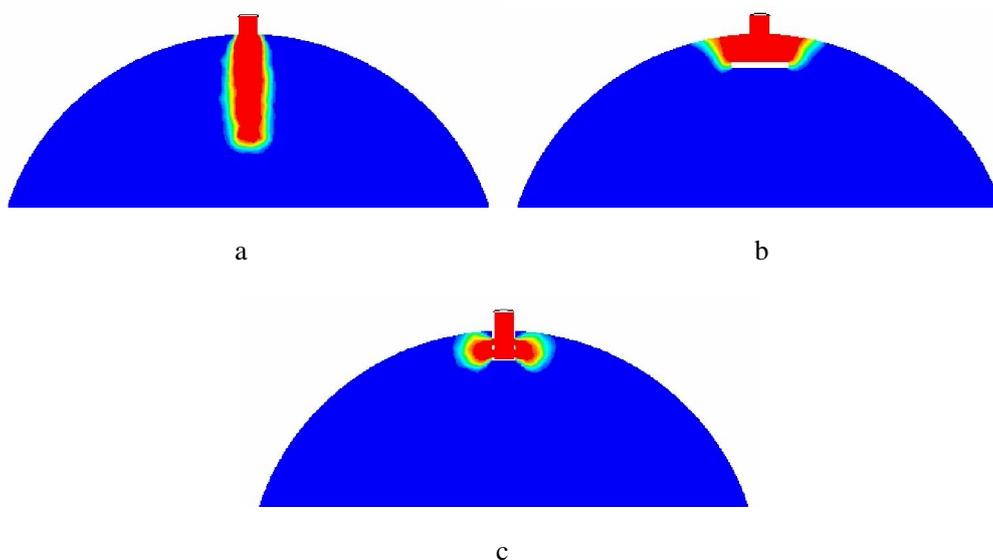
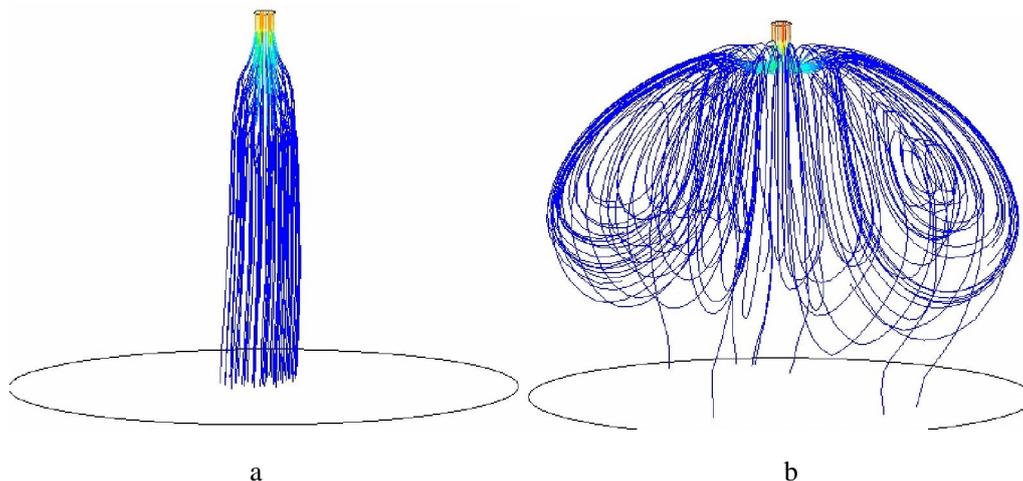


图 2 蒸汽射流形状 (a: 无, b: 遮流挡板, c: 扩散器)

Fig.2 Jet shape (a: nothing, b: plane, c: diffuser)



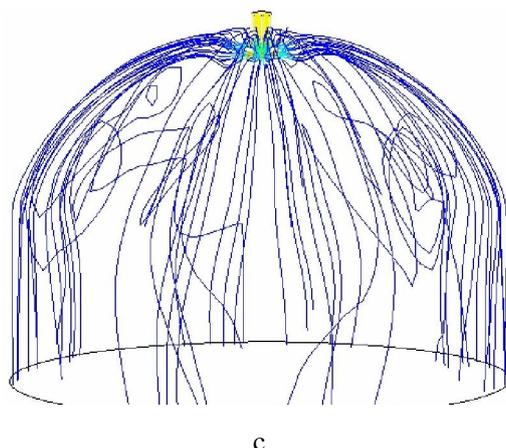


图 3 CMT 内流线图 (a: 无, b: 遮流挡板, c: 扩散器)

Fig.3 stream line in CMT (a: nothing, b: plane, c: diffuser)

3.2 轴向温度分布

图 4 为无扩散器和加装扩散器时的轴向温度分布对比图。从轴向温度分布图上都可以发现, 无遮流挡板或扩散器时的轴向温度影响较大, 影响区域轴向距离超过 1m, 而加载遮流挡板和扩散器时的轴向温度分布重合, 影响的范围都很小, 影响区域轴向距离小于 0.3m。从轴向温度趋势上发现, 三个模型计算得到的轴向温度分布都存在一个急剧下降的点。分析认为, 无遮流挡板和扩散器时, 温度的急剧下降主要是由于蒸汽下冲过程中, 受浮力的影响, 到某一区域时, 动量减小至 0, 因此此区域内的蒸汽大量聚集, 因此温度较高。而加载遮流挡板和扩散器后的温度急剧下降点, 主要是由于设备造成的, 因为在此处, 蒸汽与下层水隔离, 无法传热。

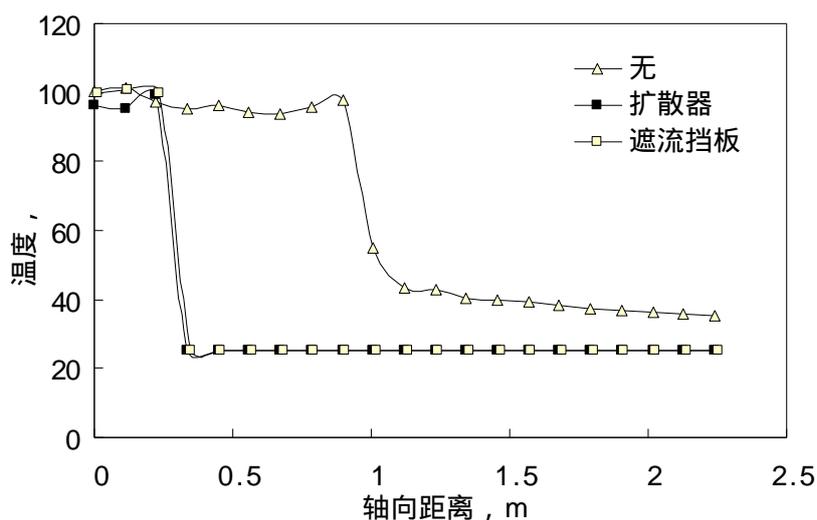


图 4 轴向温度分布

Fig.4 Axial temperature distribution

3.3 出口质量流量

为了消除排放初期, 由于流经遮流挡板和扩散器所造成的质量流量差异, 因此从 2 秒开始算起。图 5 为三个模型计算得到的出口质量流量变化曲线。从图上可以看出, 当无遮流挡板或扩散器时, 蒸汽排放引起的质量流量波动幅值很大, 且波动的频率也较高, 加装遮流挡板后, 质量流量波动的

幅值和频率较前者都有明显的下降，但是总体上波动还是很大，加装扩散器后，质量流量的波动与前两者相比已经非常小，可以忽略。分析认为，在无遮流挡板或扩散器时，高速蒸汽入射引起的凝结振荡是导致质量流量波动的主要原因，加装遮流挡板后，虽然改变了蒸汽射流的方向，但是凝结振荡的影响仍然很大，当加装扩散器时，由于多个小孔将单束的蒸汽分离成多束，从而将蒸汽凝结振荡的振源分解成多个，且是向四周多个方向传递，分散了振荡的能量。因此可以认为加装扩散器，能够有效得消除由于蒸汽凝结造成的质量流量波动。

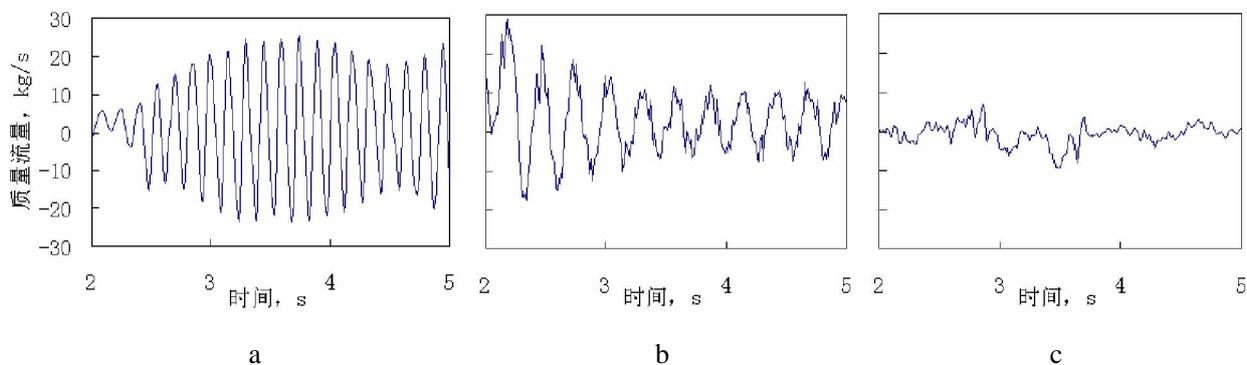


图 5 出口质量流量 (a: 无, b: 遮流挡板, c: 扩散器)

Fig.5 The mass flow of the outlet (a: nothing, b: plane, c: diffuser)

3.4 入口压力

表 2 为 5 秒时三种模型计算得出的入口。从表中可以看出加装遮流挡板时的入口压力最小，而加装扩散器时的入口压力最大。从模型设置中可知，出口设置的是压力边界，因此在出口处三个模型计算的基准是一样的，入口的压力值越高，表明蒸汽在经过入口到达 CMT 内的阻力越大。

分析认为，加装扩散器时的阻力值最大的原因是形阻，蒸汽从扩散器内流经小孔到扩散器外时的阻力较大。总体上趋势可以判断，遮流挡板就是将扩散器无限开孔，因此认为增加孔数会减小扩散器的阻力。

表 2 入口压力

Table 2 Inlet pressure

5 秒	无	遮流挡板	扩散器
压力, Pa	8223	4547	35529

4 小结

本文通过用 STAR-CCM+ 软件对 CMT 内的蒸汽凝结的现象进行了模拟，着重分析了遮流挡板和扩散器对于蒸汽射流及流场情况、轴向温度分布、质量流量波动和入口压力四个方面的影响。得到的主要结论如下：

- 1) 加装遮流挡板和扩散器时的蒸汽影响范围比无遮流挡板和扩散器时的要小，而加装遮流挡板时流场内的流动情况比加装扩散器时的要强；
- 2) 加装遮流挡板和扩散器时的轴向温度影响范围比无遮流挡板和扩散器时的要小；

3) 加装扩散器时的质量流量波动最小；

4) 加装遮流挡板时的蒸汽入射阻力最小，加装扩散器的蒸汽入射阻力最大，根据趋势判断，增加孔数可以减小蒸汽入射阻力。

通过以上分析和结论可得，加装扩散器比无遮流挡板或扩散器和加装遮流挡板时的效果要好，但是会增加蒸汽入射的阻力，分析可得通过增加孔数可以减小入射阻力，后续工作中将优化扩散器，支持 CMT 的研究和设计。

5 参考文献

- [1] 孙汉虹等，第三代核电技术 AP1000，北京：中国电力出版社，P242-258，2010.9.
- [2] Aya I, Nariai H. Evaluation of heat transfer coefficient at direct condensation of cold water and steam. Nuclear Engineering and design. 1991; 31:17-24.
- [3] KimHY, Bea YY, SongCH. Experimental study on stable steam condensation in a quenching tank. International Journal of Energy Research. 2001; 25:239-252.
- [4] Cho S, Chun SY, BeakWP. Effect of Multiple Holes on the Performance of Sparger During Direct Contact Condensation of Steam. Experimental Thermal and Fluid Science. 2004; 28:629-638.
- [5] CD-adapco Methodology Chapter 15 Liquid Films. P244-246, 2009.