

Thermal Analysis of Pressure Vessel in the Core Melt Accident

Xiaoying Zhang, Yuanyuan Huang

South China University of Technology, Guangzhou, China, 510640

Email: zxy1119@scut.edu.cn, hyy062816@126.com

Abstract: Based on the AP1000 reactor, the lower plenum's stratified physical model and mathematical model on core-melt accident were established. And we also have done some computation and analysis about the process of heat transfer in the core melt accident. As a result, the temperature change throughout the lower head was acquired. The analysis showed that because of the stratify phenomenon in the melt core, the thermal boundary condition of the plenum's internal surface change along the axial direction. Near the surface where the metallic contacted plenum's internal surface, the wall temperature decreased since the plenum was hotter than the metallic.

Keywords: lower head; molten core material; radiative heat transfer; natural convection; temperature distribution

熔堆工况下压力容器的热工分析

张小英, 黄圆圆

华南理工大学, 广州, 中国, 510640

Email: zxy1119@scut.edu.cn, hyy062816@126.com

摘要: 以 AP1000 非能动压水堆为研究对象, 建立了堆芯熔融物在压力容器下腔室的分层模型及相应的数学模型, 对其在堆芯融化事故下的传热过程进行计算与分析, 得到了压力容器下封头的温度变化规律。对结果进行分析表明, 沿着压力容器高度从上到下, 其内壁面的换热边界条件随着熔池结构的变化而有所不同, 在与金属熔融层接触的表面附近, 由于其壁面温度高于熔融层温度, 由此壁面温度出现一段下降的过程。

关键词: 下封头; 堆芯熔融物; 辐射换热; 自然对流换热; 温度分布

1 前言

熔堆事故能导致安全壳的早期或晚期失效, 从而造成极为严重的后果。对于核安全来说, 堆芯熔融物的冷却研究是一个关键的课题。关于堆芯熔融物在下腔室的传热过程, 很多国内外学者都进行了研究, 并分别建立了相应模型。而对堆芯熔融物在压力容器内的冷却方案, 国际上提出过很多措施。如美国西屋公司的压力容器内的冷却与保持, EPR 和 VVER-1000 的压力容器外设置堆芯捕集器等。国内也有相关方面的研究, 如将压力容器下封头的形状由半球形改为旋转抛物线, 能缓解集热效应[2]。

目前对于熔堆工况下封头温度分布的研究较少。由此, 本工作在 Theofanous 等人提出的堆芯熔融物在下腔室中的分层模型的基础上, 针对上述课题展开研究, 获得温度分布规律并进行相应分析。

2 堆芯熔化的分层模型^[1]

根据现有分析, 堆芯熔化后跌落至压力容器下腔室出现分层现象。典型的分层结构分为两层, 上层为密度较小的金属熔融层, 下层为密度较大的氧化物熔融池。另外, 氧化物熔融池的四周包围着一层冷凝壳层。简化的堆芯融化模型如图 1 所示:

2.1. 金属熔融层

该层主要由 Fe-Zr 液态金属所组成, 是由燃料包壳和堆内构件熔化而来。金属熔融层具有非常大的表面积比 (表面积与它的半径相比非常薄)。

2.2. 氧化物熔融池

氧化物熔融池主要由 $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ 氧化物所组成, 是

堆芯燃料的主要组成物质。与周围其它物体的温度相比，熔池温度最高，它将向周围壁面传递热量。

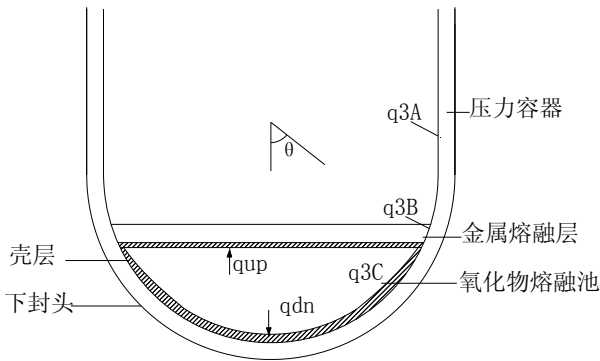


Figure 1. simplified model of core melt and cooling
图 1. 简化的堆芯熔化及冷却模型

2.3. 壳层

由于下封头及金属熔融层的温度相对于氧化熔融物较低，与之接触的那层氧化熔融物被逐渐冷却，形成一壳层，其厚度为几毫米到几十毫米不等。

3. 数学模型

由于压力容器是轴对称的，计算时只需考虑一个剖面。本模型由有限差分法原理求解温度场。

3.1. 控制方程

该模型为常物性无内热源二维稳态导热模型：

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (1)$$

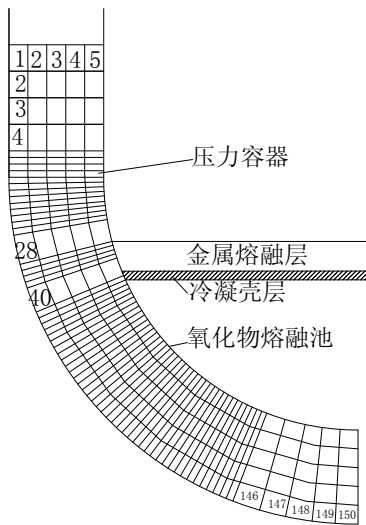


Figure 2. meshing of pressure vessel lower head
图 2. 压力容器下封头网格划分

3.2. 差分方程

在压力容器高度方向的一个剖面上，沿其厚度方向划分 5 个节点，高度方向 150 个节点，如图 2 所示：

$$\frac{t_{i,j+1} - 2t_{i,j} + t_{i,j-1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_{i,j}} \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j-1}}{2\Delta r} + \frac{1}{r_{i,j}^2} \frac{t_{i+1,j} - 2t_{i,j} + t_{i-1,j}}{\Delta \varphi^2} = 0 \quad (2)$$

3.3. 各节点之间的代数方程

根据边界条件不同，计算中划分 11 个区域：

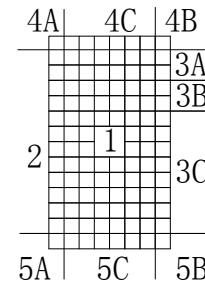


Figure 3. diagrammatic sketch of compute area
图 3. 计算区域示意图

区域 1 中导热方程为：

$$\lambda_1 \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} + \lambda_1 \frac{t_{m+1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} + \lambda_1 \frac{t_{m,n-1} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r + \lambda_1 \frac{t_{m,n+1} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r = 0 \quad (3)$$

区域 2 为对流换热边界。其导热方程为：

$$h_2 \frac{\pi}{300} r_{m,n} (T_{f1} - t_{m,n}) + \lambda_2 \frac{t_{m+1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} + \lambda_2 \frac{t_{m,n-1} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r + \lambda_2 \frac{t_{m,n+1} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r = 0 \quad (4)$$

区域 3A 到区域 3C 具有统一的导热方程形式：

$$\lambda_3 \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} + \lambda_3 \frac{t_{m,n+1} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r + \lambda_3 \frac{t_{m,n-1} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r + q_w \frac{\pi}{300} r_{m,n} = 0 \quad (5)$$

其中根据密度 q_w 的不同又可分为三种情况：

- ①区域 3A 为辐射换热边界，分为两部分：
 - a. 压力容器内壁与金属熔融层表面之间：

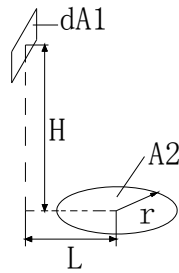


Figure 4. diagrammatic sketch of relative position of plane and disc.

图 4. 微元平面与圆盘相对位置示意图.

图中 $L \geq r$, $H = h/L$, $R = r/L$, $Z = 1 + H^2 + R^2$

$$X_{d1-2} = H / 2(Z / \sqrt{Z^2 - 4R^2} - 1) \quad (6)$$

b. 压力容器内壁各微元之间:

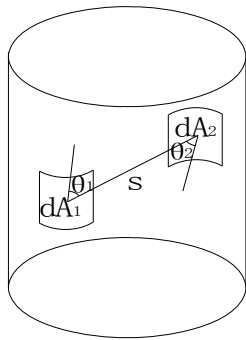


Figure 5. radiant of two differential surfaces

图 5. 两微元表面间的辐射

$$X_{d1-d2} = dA_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 / (\pi s^2) \quad (7)$$

则净辐射热流为:

$$q_{w3A} = q_i = Q_i / A_i = \varepsilon_i / (1 - \varepsilon_i) (E_{bi} - J_i) \quad (8)$$

②区域 3B 为对流换热边界。该热流密度为:

$$q_{w3B} = h_{3B} (T_{f2} - t_{m,n}) \quad (9)$$

③区域 3C 为外部导热边界。导热热流密度为:

$$q_{w3C} = 2\lambda_{3C} (T_{f3} - t_{m,n}) / \Delta r \quad (10)$$

上边界为定壁温条件, 其余三边为对流或导热边界条件。根据各边界条件不同, 可分为三种情况:

①区域 4A, 一边为与安全壳内大气的对流换热, 另两边为内部导热。其导热方程为:

$$\lambda_{4A} \frac{t_{m+1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} + \lambda_{4A} \frac{t_{m,n+1} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r + \quad (11)$$

$$\frac{\pi}{300} r_{m,n} h_{4A} (T_{f1} - t_{m,n}) + 2\lambda_{4A} \frac{T_{f4} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r = 0$$

②区域 4B, 一边为与金属熔融层的辐射换热, 另外两

边为内部导热。其导热方程为:

$$\lambda_{4B} \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} + \lambda_{4B} \frac{t_{m,n+1} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r \quad (12)$$

$$+ q_w \frac{\pi}{300} r_{m,n} + 2\lambda_{4B} \frac{T_{f4} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r = 0$$

③区域 4C, 另外三边均为内部导热。导热方程为:

$$\lambda_{4C} \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} + \lambda_{4C} \frac{t_{m+1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} \quad (13)$$

$$+ \lambda_{4C} \frac{t_{m,n+1} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r + 2\lambda_{4C} \frac{T_{f4} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r = 0$$

下边界为绝热条件, 其余三边为对流或导热边界条件。根据各边界条件不同, 又可分为三种情况:

①区域 5A, 一边为与安全壳大气的对流换热, 另外两边为内部导热。其导热方程为:

$$\lambda_{5A} \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r + \lambda_{5A} \frac{t_{m+1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} \quad (14)$$

$$+ \frac{\pi}{300} r_{m,n} h_{5A} (T_{f1} - t_{m,n}) = 0$$

②区域 5B, 一边为与壳层的导热, 另外两边为内部导热。其导热方程为:

$$\lambda_{5B} \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r + \lambda_{5B} \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} \quad (15)$$

$$+ \lambda_{5B} \frac{T_{f3} - t_{m,n}}{(1/2\Delta r + thick) 300} r_{m,n} = 0$$

③区域 5C, 另外三边为内部导热。其导热方程为:

$$\lambda_{5C} \frac{t_{m,n-1} - t_{m,n}}{\pi / 300 r_{m,n}} \Delta r + \lambda_{5C} \frac{t_{m+1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} \quad (16)$$

$$+ \lambda_{5C} \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\Delta r} \frac{\pi}{300} r_{m,n} = 0$$

以上各式中 λ 为导热系数, 取 $37 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$ 。

h 为对流换热系数。其中 h_2 、 h_{4A} 、 h_{5A} 为压力容器外壁与安全壳内空气的自然对流换热系数, 采用定壁温大空间自然对流准则式^[2]进行计算:

$$Nu^{1/2} = 0.825 + \frac{0.387(Gr Pr)^{1/6}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \quad (17)$$

由此算得 $h_2 = h_{4A} = h_{5A} = 14.32 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$

h_{3B} 为压力容器与金属熔融层的换热系数。假设在极端情况下热流密度 $q = 1.34 \times 10^6 \text{ W} / \text{m}^2$, 取接触面的温差 $\Delta t = 1000 \text{ K}$, 则: $h_{3B} = 1304 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

T_f 为边界温度。其中 T_{f1} 为安全壳内空气的温度，取为 300 K ； T_{f2} 为金属熔融层的温度，即金属熔融物的熔点温度 1600 K ； T_{f3} 为压力容器内壁与壳层接触面的温度； T_{f4} 为计算区域的压力容器上边界的温度，也取为 300 K 。

氧化物熔融池向下的热流密度为 q_{dn} ，其值是随其位置在下封头的角度的变化而变化的，设为 $q_{dn}(\theta)$ ，由傅立叶定律可求得 T_{f3} ：

$$q_{dn}(\theta) = \lambda(t_w - t_{f3}) / \text{thick} \quad (18)$$

t_w 为壳层温度，取 2973 K 。thick 为壳层厚度。假定壳层厚度沿下封头内表面线性变化，即：

$$\text{thick}(\theta) = \text{thick}_{\max} - (\text{thick}_{\max} - \text{thick}_{\min})\theta / \theta_p \quad (19)$$

thick_{\max} 、 thick_{\min} 分别为壳层的最大与最小厚度，取为 20 mm 、 5 mm ； θ 、 θ_p 分别为氧化物熔融池沿下封头变化的倾角、氧化物熔融池在下封头上形成的倾角。热流密度根据 UCLA 和 mini-ACOPO 实验，由 mini-ACOPO 实验公式^[1]拟合获得：

$$\frac{q_{dn}(\theta)}{q_{dn}} = \begin{cases} 0.1 + 1.08\left(\frac{\theta}{\theta_p}\right) - 4.5\left(\frac{\theta}{\theta_p}\right)^2 + 8.6\left(\frac{\theta}{\theta_p}\right)^3 & 0.1 \leq \frac{\theta}{\theta_p} \leq 0.6 \\ 0.41 + 0.35\left(\frac{\theta}{\theta_p}\right) + \left(\frac{\theta}{\theta_p}\right)^2 & 0.6 \leq \frac{\theta}{\theta_p} \leq 1.0 \end{cases} \quad (20)$$

向下热流由氧化物熔融池能量守恒方程计算得出：

$$\dot{Q}V_p = A_{up}q_{up} + A_{dn}q_{dn} \quad (21)$$

式中 \dot{Q} 为堆芯熔融物体积释热率，对 AP1000，取 $2.5\text{ MW} \cdot \text{m}^{-3}$ ； V_p 为氧化物熔融池的体积， 8.6 m^3 ^[2]；

A_{up} 、 A_{dn} 分别为熔池上表面和下表面的面积。目前计算向上热流的公式是由 Kulacki 和 Emara (1975) 以及 Steinberner 和 Reineke (1978) 的试验推导的，本文选用 Steinberner-Reineke 公式^[1]：

$$Nu_{up} = 0.345Ra'^{0.233} 10^7 < Ra' < 3 \cdot 10^{13} \text{ Pr} \sim 7 \quad (22)$$

而向下的热流计算公式是由 Mavinger (1975) 采用 Navier-Stokes 方程及涡流扩散模型导出的：

$$Nu_{dn} = 0.55Ra'^{0.2} 7 \cdot 10^6 < Ra' < 5 \cdot 10^{14} \text{ Pr} \sim 0.5 \quad (23)$$

$$R' = Nu_{up} / Nu_{dn} = 0.63Ra'^{0.033} \quad (24)$$

$$q_{dn} = \dot{Q}V_p \{2\pi R^2 (1 + 0.5R')\}^{-1} \quad (25)$$

式中 R 为氧化物熔融池的半径，本文取为 1.93 m ；氧

化物熔融池的 Ra' 数一般可达到 10^{15} ，这里取中间值 5×10^{15} 。由此计算出 $q_{dn} = 451\text{ KW} / \text{m}^2$ 。

求解上述方程组即可得到压力容器下腔室中各个控制单元的温度分布，如图 7 所示：

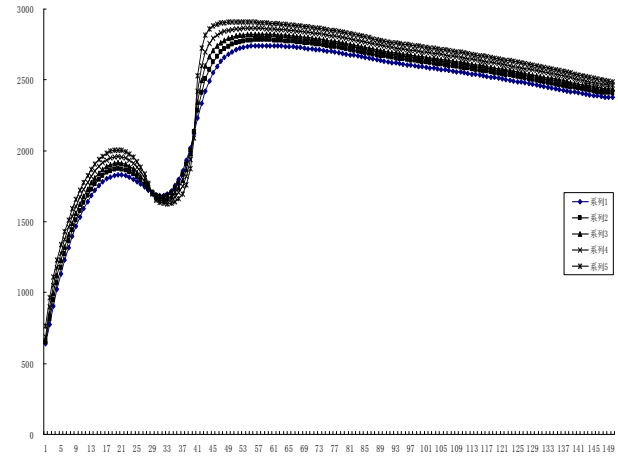


Figure 6. temperature distribution of pressure vessel lower head
图 6. 压力容器下封头的温度分布

4 结果分析

本文以 AP1000 为对象，采用目前熔堆研究中的分层物理模型，建立相关数学模型进行计算，得到压力容器下封头中温度分布，从图中可以看出：

- (1) 这 5 条曲线的走势是相同的，都是出现了两个极大值一个极小值。在整个计算区域上它们并不是相互平行的，而是出现了两次相交。
- (2) 曲线出现相交表明内表面的温度低于外表面，而这个区域正好是金属熔融层的厚度。这种情况是反常的，因为热量是从内到外依次传导的，温度也应该是从内到外依次降低。出现这种情况的原因，就是由于金属熔融层的热流极大（集热效应），相应的温度也非常高，导致压力容器下封头开始熔化吸收了部分热量而使得温度降低。
- (3) 在距金属熔融层表面上方不远处的温度与边界温度相差不大，可以认为在这一区域内已经不再或是很少受到下面辐射换热的影响。

5 结论

- (1) 堆芯熔融物对压力容器内壁的辐射影响并不是在下封头上方的整个区域内。这说明，在不受熔融物影响的区域是安全的，压力容器壁的温度不会超过其熔点而引起熔化。因此在计算时就可以不必计算这个区

域，大大减少了计算量和计算时间。

(2) 金属熔融层很薄，使得其侧面与下封头内表面换热的面积很小而易导致集热效应的发生。一旦集热效应的热流超过下封头的临界热流(CHF)，则会发生沸腾危机，从而使下封头失效。

(3) 下封头在熔化过程中会吸收部分热量使得熔化速率减慢。如果下封头壁足够厚，当熔化到某一厚度时有可能使熔化过程停止而不致被熔穿。这种情况是有利的，只要压力容器不熔穿，就实现了堆芯熔融物在压力容器内滞留(IVR)，而这是缓解核电站严重事故的重要策略之一。

References (参考文献)

[1] T. G. Theofanous, C. Liu, S. Additon, et al. In-vessel Coolability

- and Retention of a Core Melt [J]. Nuclear Engineering & Design, 1977, 169(1-48).
- [2] Guan Zhonghua. Yu. J. Study on Cooling Model for Debris in lower Plenum and Countermeasures for Prevention of Focusing Effect [J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(5). (Ch).
关仲华.余红星.江光明.堆芯熔融物在下腔室内冷却模型研究及缓解集热效应的对策[J].核动力工程, 2008, 29(5).
- [3] Yang Shiming. Tao Wenquan. Heat Transfer Theory [M]. Beijing: Higher Education Press, 1980, P 26-28. (Ch).
杨世铭.陶文铨.传热学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1980, P 26-28.
- [4] Li Lin. Zang Xinian. The Research on Molten Corium Coolability Measures for the PWR Severe Accident [J]. Nuclear Safety, 2007, 4. (Ch).
李琳.臧希年.压水堆核电厂严重事故下堆芯熔融物的冷却研究[J].核安全, 2007(4).