

过热器爆破膜装置温度场计算

乔雪冬 冯预恒 侯志峰 薛秀丽

中国原子能研究院

摘 要：本文利用 CFD 方法对反应堆重要压力保护装置—爆破膜装置进行热工分析。得出爆破膜体表面最高温度不超过设计限值，证明了该装置的安全性。

关键词：爆破膜装置 计算流体力学 氦气 辐射换热

1. 引言

蒸汽发生器爆破膜装置是反应堆蒸汽发生器事故保护系统的重要安全保护设备。它起到了防止二回路超压和发生超压的钠水反应事故时向排放罐排放反应产物的重要作用。其中，布置于过热器底部的爆破膜装置由于处在较高的工作温度（过热器二回路侧入口温度为 495℃），需要进行专门的热工分析，以确定该爆破膜在反应堆正常运行状态下的工作温度不超过设计限值，引起材料疲劳或破损，影响反应堆的正常运行。

2. 设备简介

爆破片装置是蒸汽发生器保护系统进行事故保护的最后一道设防，它分别布置在蒸发器、过热器、钠缓冲罐以及二级事故排放罐设备上，任何位置上发生超压 1.25 倍额定工作压力时，爆破片装置上的爆破片可在 20ms 内发生爆破卸压。其中过热器的爆破膜装置竖直的布置在距离过热器 455mm 处，底部以 $\phi 219 \times 10$ 管道与过热器钠侧相连；装置的外侧为氦气套筒，直通一次事故排放罐。在设计上，爆破膜内部应充满二回路钠，但在安装充钠过程中，由于装置为竖直放置、底部入口进钠，所以不排除内部存在氦气的可能，在下面的计算中对两种情况都进行分析。

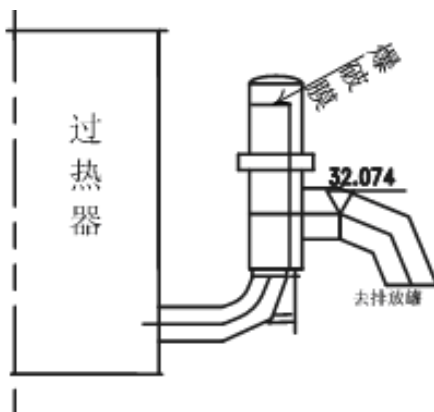


图 1 过热器爆破膜装置

3. 计算方法与模型建立

3.1. 程序介绍

计算采用流体力学程序 STAR-CD V3.15。STAR-CD 流体分析软件包是由 Computational Dynamics 公司开发,为通用的商业 CFD 软件包。其功能主要包括了流固耦合、燃烧与化学反应、湍流模型以及气动声学等方面。可以进行牛顿流体、非牛顿流体;稳态、非稳态;层流、湍流(旋流、周期性流动);可压、不可压流动;拉格朗日多相流、欧拉多相流;燃烧、辐射、传热、传质及化学反应(多相,平衡、非平衡化学反应包括 NO_x 生成)等方面的计算。

3.2. 计算方法和本构方程

在连续介质区域中,粘性流体遵循质量守恒,动量守恒,能量守恒。

质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程在直角坐标系中的一般表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z}\right) + S_\Phi \quad (1)$$

这里, u, v, w 分别是 x, y, z 方向的速度分量。 Γ_Φ 为扩散系数, S_Φ 为源项,对于不同的守恒方程, Γ_Φ, S_Φ 的含义是不同的,详见表 1。

表 1 变量 Φ 、扩散系数 Γ_Φ 和源项 S_Φ 的表达式

方程	(Φ)	方向	(Γ_Φ)	(S_Φ)
连续方程	1	标量	0	0
动量方程 (I)	u	x 方向	μ	$\rho g_x + V_x - \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)$
动量方程 (II)	v	y 方向	μ	$\rho g_y + V_y - \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)$
动量方程 (III)	w	z 方向	μ	$\rho g_z + V_z - \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)$
能量方程	T	标量	λ/c_p	$\frac{dp}{dt} + \dot{Q}_{rb} + \dot{Q} + \phi$

在表 1 中, V_x, V_y, V_z 是粘性扩散项中的平衡项(分别代表沿 x, y, z 方向的除去 $\text{div}(\mu \text{grad} u), \text{div}(\mu \text{grad} v), \text{div}(\mu \text{grad} w), \text{div}(\mu \text{grad} w)$ 之外其它所有的粘性力项):

$$V_x = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \nabla \cdot \vec{V}) \quad (2)$$

$$V_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \nabla \cdot \vec{V}) \quad (3)$$

$$V_z = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \nabla \cdot \vec{V}) \quad (4)$$

$\dot{Q}_f$ 是每单位流体体积热源；

ϕ 是耗散函数：

$$\phi = \lambda(\nabla \cdot \vec{V})^2 + 2\mu\epsilon_{i,j}\epsilon_{i,j} = \lambda(\nabla \cdot \vec{V})^2 + \mu \left[2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right] \quad (5)$$

式中：

λ 为热导率，

μ 为动力粘性系数，

C_p 为定压比热容，

g 为重力加速度。

3.3. 计算模型和边界条件

网格的生成过程中，使用了结构化的六面体网格，按照 1：1 的比例真实模拟，局部采用了 O 型网格的处理技术，使得该处流场描述更加详尽。网格数量 2.4 万，经过测试验证，取得了与网格无关的数值解。

计算模型的内部边界为过热器二次侧钠，温度为 495 ；外部边界为一级事故排放罐，正常运行状态下温度为 400 。计算涉及的介质热工参数为：

液态钠密度：

$$\rho = 16.0185 \times [59.566 - 7.9504 \times 10^3 (1.8t + 32) - 0.2872 \times 10^6 \times (1.8t + 32)^2 + 0.0603 \times 10^{-9} (1.8t + 32)^3] \quad (\text{kg} / \text{m}^3)$$

钠导热系数：

$$\lambda = 1.72958 \times [54.306 - 1.878 \times 10^{-2} \times (1.8t + 32) + 2.0914 \times 10^{-6} \times (1.8t + 32)^{-2}] \quad (\text{W} / \text{mK})$$

氙气的比容和导热系数等参数为表值，见参考文献 2。

4. 计算结果与分析

计算域温度场

相同边界条件下，对爆破膜套管内部存在和不存在氙气的两种情况都进行了计算。其

中不存在氙气的极限情况下，爆破膜处温度为 475 ；存在氙气的情况下温度略低，为 444 。计算域温度场结果见下图。

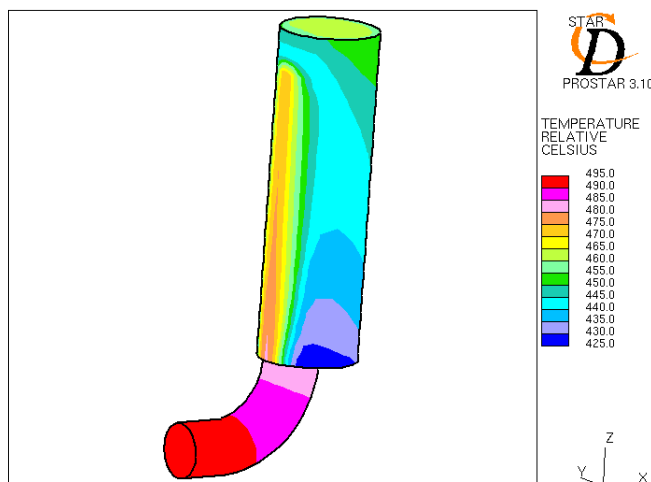


图 2 无氙气情况下温度场

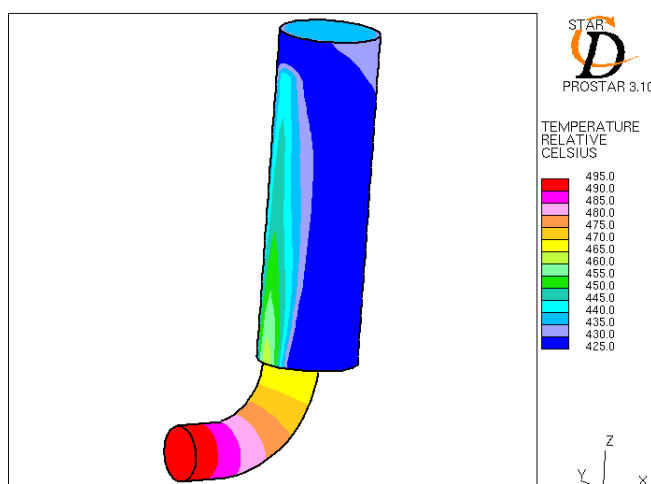


图 3 有氙气情况下温度场

结果分析

通过对两种情况的计算表明，管内无氙气的情况属于保守的极限情况，这种条件下，由于钠导热性能非常好，且工质与爆破膜之间没有任何保温材料相隔，因此爆破膜受二回路主流影响较大、温度较高；在同样的边界条件下，爆破膜与液态钠之间若存在一层氙气，则爆破膜温度较低，受主流影响较小。

爆破膜支管内部灌钠过程中残留的氙气会对爆破膜起到一定的降温作用，使爆破膜温度低于限值较多，温度余量较大；为了分析的保守性，同时也进行了极限情况的计算，在支管内部无氙气的情况下，爆破膜温度为 475 ，也低于涉及温度 490 。

由于爆破膜装置与外部套管为非同心柱状结构，受到套管内事故排放罐中气体对流的影响，整个温度场在各个方向上分布不均匀，但总体上来说，两种情况管道温度随着高度逐渐降低，同一高度上，极限情况的温度稍高（见图 4）。

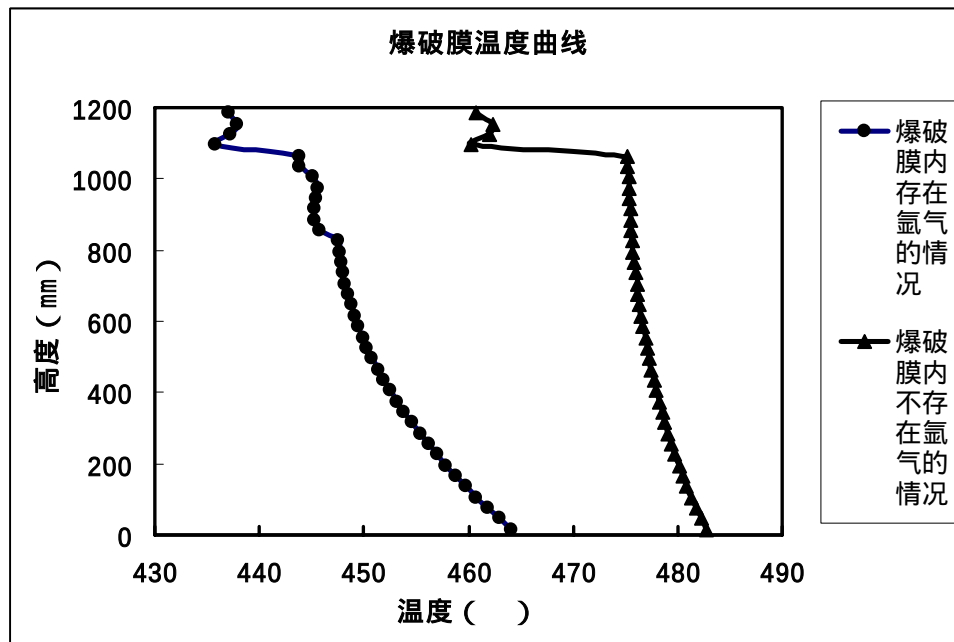


图 4 爆破膜温度曲线

5. 结论

应用热工程序 STARCD 对爆破膜进行计算分析，得出正常情况下的温度场，并对极限情况进行保守评估，得出结论：

爆破膜温度即使在极限情况下也能达到低于设计温度 15 以上的标准，不会在运行过程中发生有温度过高引起的加速老化现象；

爆破膜下部由于灌钠过程残存的氦气，起到一定的保温效果，使爆破膜本身温度偏低，对系统安全是有利的；

事故排放罐套管内的氦气存在一定程度的对流，致使爆破膜支管内呈现温度场分布不对称的现象，但总体仍然保持温度随高度逐渐降低的趋势。

6. 参考文献

- [1] 中国实验快堆施工设计参数总表（CEFRZ02ZTS01）
- [2] 居怀明等 载热质热物性计算程序及数据手册 1996.6 第一版
- [3] USER GUIDE, STAR-CD VERSION 3.10, 1999 Computational Dynamics Limited