

# 过热器爆破膜装置温度场计算

乔雪冬,冯预恒,胡文军,侯志峰

(中国原子能科学研究院 快堆工程部,北京 102413)

**摘要:**文章利用流体力学软件 CFD 对反应堆重要压力保护装置——爆破膜装置进行热工分析。分析计算结果可知,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;计算流体力学方法;氩气;辐射换热

**中图分类号:** TL33

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2008)S0-0155-03

## Temperature Field Calculation for Steam Superheater Explosive Membrane

QIAO Xue-dong, FENG Yu-heng, HU Wen-jun, HOU Zhi-feng

(China Institute of Atomic Energy, P. O. 275-95, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The steam superheater explosive membrane is a kind of important reactor protection equipment against overpressure. In the paper, the temperature field was analyzed using the CFD method. The result reviews that the peak point of temperature is not exceed, and the safety of the equipment is proved.

**Key words:** explosive membrane; CFD method; argon; radiation heat transfer

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在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。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,需进行热工分析,以确定该爆破膜在反应堆正常状态下的工作温度不超过设计限值,避免材料疲劳或破损而影响反应堆的正常运行。

### 1 设备简介

过热器爆破膜装置如图 1 所示。爆破片装置是蒸汽发生器保护系统进行事故保护的最后

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,在这其中的任何位置上超过 1.25 倍额定工作压力时,爆破膜装置上的爆破片可在 20 ms 内发生爆破卸压。其中,过热器的爆破膜装置竖直地布置在距离过热器 455 mm 处,底部以  $\phi 219 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  管道与过热器钠侧相连;装置的外侧为氩气套筒,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且底部入口进钠,故不排除内部存在氩气的可能,文章利用 CFD 对存在氩气及不存在氩气两种情况进行计算分析。

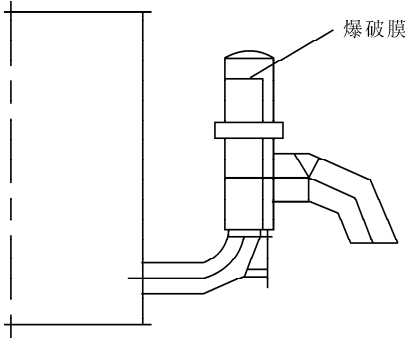


图1 过热器爆破膜装置

Fig.1 Superheater explosive membrane device

## 2 计算方法与模型建立

### 2.1 计算方法

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:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z}) + S_\Phi$$

其中: $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向的速度分量; $\Gamma_\Phi$  为扩散系数, $S_\Phi$  为源项,对于不同的守恒方程, $\Gamma_\Phi, S_\Phi$  的含义不同(表1); $\rho$  为流体钠密度; $\psi$  为耗散函数,有:

$$\psi = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V})^2 + 2\mu\epsilon \cdot \epsilon = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V})^2 +$$

$$\mu \left[ 2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 +$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right]$$

式中: $\lambda$  为导热率; $\mu$  为动力粘性系数; $\mathbf{V}$  为流体速度; $\epsilon$  为节点的湍流耗散率。

表1 变量  $\Phi$ 、扩散系数  $\Gamma_\Phi$  和源项  $S_\Phi$  的表达式Table 1 Expression of  $\Phi$ ,  $\Gamma_\Phi$  and  $S_\Phi$ 

方程	$\Phi$	方向	$\Gamma_\Phi$	$S_\Phi$
连续方程	1	标量	0	0
动量方程(I)	$u$	$x$ 方向	$\mu$	$\rho g_x + \mathbf{V}_x - \frac{\partial p}{\partial x}$
动量方程(II)	$v$	$y$ 方向	$\mu$	$\rho g_y + \mathbf{V}_y - \frac{\partial p}{\partial y}$
动量方程(III)	$w$	$z$ 方向	$\mu$	$\rho g_z + \mathbf{V}_z - \frac{\partial p}{\partial z}$
能量方程	温度 $T$	标量	$\lambda/c_p$	$\frac{dp}{dt} + \frac{dQ}{dt} + \Phi$

表1中, $c_p$  为比定压热容; $Q$  为热量; $g$  为加速度; $\mathbf{V}_x, \mathbf{V}_y, \mathbf{V}_z$  为粘性扩散项中的平衡项(分别代表沿  $x, y, z$  方向除去  $\text{div}(\mu \text{grad}u)$ 、 $\text{div}(\mu \text{grad}v)$ 、 $\text{div}(\mu \text{grad}w)$  之外其它所有的粘性力项),为:

$$\mathbf{V}_x = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) +$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V})$$

$$\mathbf{V}_y = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) +$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V})$$

$$\mathbf{V}_z = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial z}) +$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V})$$

### 2.2 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,以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:

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

$$\text{钠导热系数 (W/mk)} \lambda = 1.72958 \times [54.306 - 1.878 \times 10^{-2} \times (1.8t + 32) + 2.0914 \times 10^{-6} \times (1.8t + 32)^2].$$

氩气的比定压热容和导热系数等参数详见参考文献[1]。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 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氩气的两种情况进行了计算。其中不存在氩气的极限情况下,爆破膜处温度为475℃;存在氩气的情况下温度略低,为444℃。计算域温度场结果如图2所示。

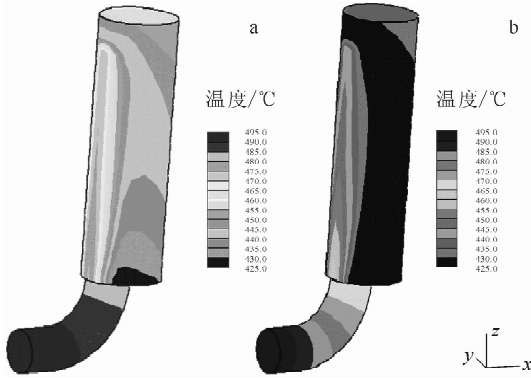


图2 无氩气(a)及有氩气(b)情况下温度场  
Fig. 2 Temperature field at situation without argon (a) and with argon (b)

### 3.2 计算域流场

两种情况下的流动情况有一定差别,在爆破膜残存氩气的情况下,能形成一定规模的气体自然循环流动,同时也导致套筒外部气体流动的加强,最终使得整个套筒外部整体温度分布相当均匀,除窄缝外没有较明显的温度梯度。速度场结果示于图3。

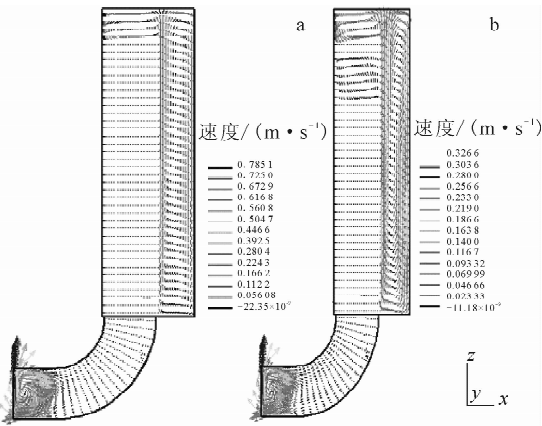


图3 无氩气(a)及有氩气(b)情况下速度场  
Fig. 3 Velocity field at situation without argon (a) and with argon (b)

### 3.3 结果分析

两种情况的计算结果表明,管内无氩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,故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1层氩气,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氩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,温度裕量较大;为了分析的保守性,同时也进行了极限情况的计算,在支管内部无氩气的情况下,爆破膜温度为475 °C,也低于设计温度490 °C。

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,但总体而言,两种情况管道温度随着高度升高逐渐降低,同一高度上,极限情况的温度稍高(图4)。

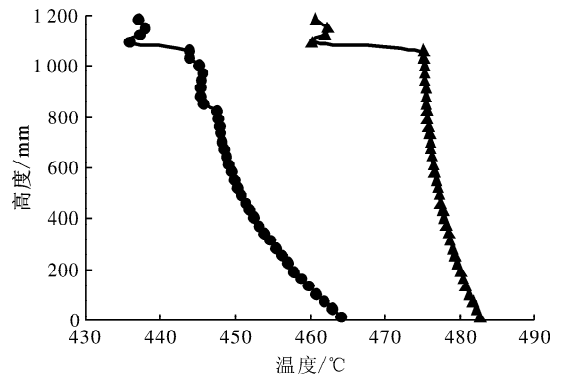


图4 爆破膜温度曲线

Fig. 4 Temperature curves

●——存在氩气;▲——不存在氩气

## 4 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,得出爆破膜温度即使在极限情况下也能达到低于设计温度15 °C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氩气,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氩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,但总体仍保持温度随高度升高逐渐降低的趋势。

### 参考文献:

[1] 居怀明,徐元辉,李怀萱. 载热质热物性计算程序及数据手册[M]. 1版. 北京:原子能出版社,1996.