

# 蒸汽发生器大泄漏钠-水反应引起的 二回路压力波传播

骆 焱, 张建民, 单建强, 朱继洲

(西安交通大学, 陕西 西安 710049)

**摘要:**研究建立了钠冷快堆蒸汽发生器在单管束发生双端断裂情况下钠-水反应中气泡从球形到柱状的变温绝热生长模型, 及采用一维特征线方法建立的压力波在快堆二回路中的传播模型。模型中考虑了爆破膜、管壁弹性变形和气蚀的影响。对在两相汽水混合区发生大泄漏后有、无爆破膜情况下的钠-水反应和二回路压力传播瞬态进行了计算, 定性分析了其影响以及爆破膜在钠-水反应中的安全保护作用。

**关键词:**蒸汽发生器; 钠-水反应; 压力传播; 爆破膜

**中图分类号:** TL425 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2000)05-0391-08

确保快堆蒸汽发生器中钠和水/水蒸气之间边界的完整性和可靠性是蒸汽发生器设计和安全分析的重要内容。我国第1座实验快堆CEFR的热传输系统由两条并联的一次钠、二次钠和水/蒸汽环路构成。每一环路中的二次钠回路系统由1台二次钠泵、2台中间热交换器、1台蒸汽发生器和2个反应产物排放箱组成。在蒸汽发生器的设计和安全分析中, 了解并深入研究钠-水反应是非常重要和必要的。本工作通过建立大泄漏钠-水反应气泡生长模型和压力波在快堆二回路中的传播模型以及瞬态计算, 定性分析发生大泄漏钠-水反应对快堆二回路的影响, 以及爆破膜在此事故中的安全保护作用。

## 1 钠-水反应计算方法<sup>[1,2]</sup>

### 1.1 基本假设

钠-水反应计算的基本假设如下:

1) 单管束瞬时完全断裂; 2) 反应瞬时进行, 钠-水反应化学反应率远高于蒸汽/水流量率, 全部泄漏水参加反应; 3) 反应方程式为  $\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{O} + \text{NaH} + f\text{H}_2 + \text{放热}$ 。其中,  $f$  为产生的氢气与反应水的摩尔比, 这里取最大值,  $f = 0.7$ ; 4) 氢气视作理想气体, 膨胀过程假定为绝热过程, 其热量用于气泡从球形到柱状生长; 5) 气泡的生长用一综合模型进行分析: 反应区附近球形气泡在不可压缩液体中生长, 反应区外气泡在可压缩液体中做一维轴线运动。气泡产生初期呈球形, 包围泄漏点, 长大到一定程度后, 由球形变成柱状, 占据整个蒸汽发

收稿日期: 1999-07-06; 修回日期: 1999-11-08

作者简介: 骆 焱(1974—), 女, 江苏溧水人, 助理工程师, 硕士, 核反应堆工程专业

生器管壳横截面。基本方程式<sup>[2,3]</sup>为

$$d T / d t = [( T_0 - T ) / m ] d m / d t - ( X T / V ) d V / d t \quad (1)$$

$$d p / d t = [( R T_0 / M ) f d m / d t - ( 1 + X ) p d V / d t ] / V \quad (2)$$

其中:  $X = R / ( c_p M_H )$ ; 泄漏率  $d m / d t$  作为计算的输入量, 有关  $d m / d t$  的计算详见文献[4]。

## 1.2 球形气泡增长模型

气泡增长率为

$$d V / d t = 4 r^2 u_r \quad (3)$$

$$u_r = d r / d t \quad (4)$$

根据 Rayleigh's 方程, 有

$$d u_r / d t = ( p - p_R ) / ( r ) - 1.5 u_r^2 / r \quad (5)$$

式(5)中,  $p_R$  是在二回路中传播的压力源。

用特征线方程<sup>[3]</sup>处理可压缩流体响应。气泡左(用 i 表示)、右(用 j 表示)两边沿特征线有

$$u_1 - u_{Ai} + ( p_R - p_{Ai} ) / ( c_{Ai} ) + f_{Ai} u_{Ai} / ( 2 D ) - g \sin \theta \quad t = 0 \quad (6)$$

$$u_2 - u_{Bj} + ( p_R - p_{Bj} ) / ( c_{Bj} ) + f_{Bj} u_{Bj} / ( 2 D ) - g \sin \theta \quad t = 0 \quad (7)$$

连续方程为

$$u_2 - u_1 = 4 r^2 u_r / R_r^2 \quad (8)$$

以上式中:  $c$  为钠中声速;  $c_p$  为氢气定压比热容;  $m$  为反应水质量;  $M$  为水摩尔质量;  $M_H$  为氢气摩尔质量;  $R$  为摩尔气体常数;  $p$  为气泡压力;  $p_R$  为钠-氢界面处钠压力;  $T$  为气泡温度;  $T_0$  为产生的氢气温度, 本文取其最大值,  $T_0 = 1660$  K;  $r$  为气泡半径;  $t$  为时间;  $V$  为气泡体积;  $u_r$  为钠的径向速度;  $u_1$ 、 $u_2$  分别为气泡左、右两边钠的流速;  $\theta$  为管倾角;  $\rho$  为钠密度;  $R_r$  为蒸发器内径。下角标“ A ”、“ B ”的含义如后文二回路有限差分网格图所示。

上述球形气泡模型包括式(1)~(8)八个方程, 含  $p$ 、 $V$ 、 $T$ 、 $r$ 、 $p_R$ 、 $u_r$ 、 $u_1$ 、 $u_2$  八个变量, 封闭可解。

## 1.3 气泡变形临界

气泡变形临界时的气泡球半径  $r^*$  和柱长度  $h^*$  分别用下式表示:

$$r^* = R_r / \sqrt{2}; \quad h^* = \sqrt{2/3} \cdot R_r \quad (9)$$

## 1.4 柱形气泡生长模型

气泡增长率为

$$d V / d t = R_r^2 u_h \quad (10)$$

$$u_h = d h / d t \quad (11)$$

连续方程为

$$u_2 - u_1 = u_h \quad (12)$$

式中:  $h$  为柱形气泡长度,  $u_h$  为气泡的轴向生长速度。

柱形气泡模型含有  $p$ 、 $V$ 、 $T$ 、 $h$ 、 $u_h$ 、 $u_1$ 、 $u_2$  七个变量, 涉及式(1)、(2)、(6)、(7)、(10)~(12)七个方程, 封闭可解。

气泡变形临界示意图示于图1。

## 2 二回路中的压力波传播

二回路有限差分网格示于图 2。

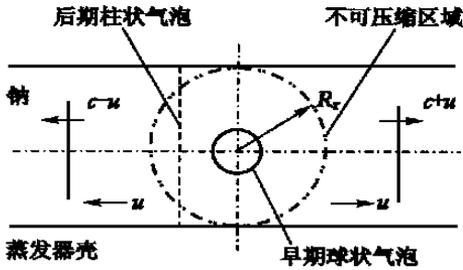


图 1 气泡变形临界示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydrogen bubble critical distortion

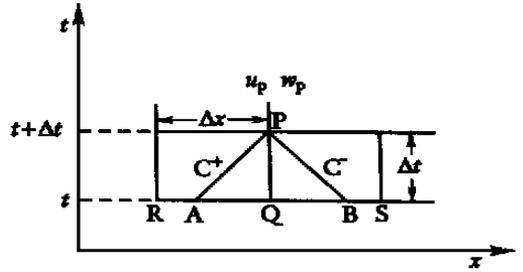


图 2 二回路有限差分网格图

Fig. 2 Finite difference grid diagram of secondary loop

### 2.1 方程组<sup>[3]</sup>

基本假设:1) 忽略液钠密度变化;2) 忽略钠中声速变化;3) 同一截面沿径向压力和速度相等;4) 二回路管道只发生弹性变形,无塑性变形。

连续方程: 
$$\partial / \partial t + \partial ( u ) / \partial x = 0 \tag{13}$$

动量方程: 
$$(\partial u / \partial t + u \partial u / \partial x) + \partial p / \partial x + f | u | / (2D) - g \sin = 0 \tag{14}$$

等熵关系式: 
$$c^2 = d p / d = (\partial p / \partial )_s \tag{15}$$

根据特征线方法原理,推出特征线方程:

沿  $C^+$  特征线,有

$$d x = ( u + c ) d t \tag{16}$$

相容性方程为

$$d u / d t + ( d p / d t ) / ( c ) + ( f u | u | ) / ( 2 D ) - g \sin = 0 \tag{17}$$

沿  $C^-$  特征线,有

$$d x = ( u - c ) d t \tag{18}$$

相容性方程为

$$d u / d t - ( d p / d t ) / ( c ) + f u | u | / ( 2 D ) - g \sin = 0 \tag{19}$$

引入记号  $\tau = t / x$ , 式(16)、(18)用向后插分格式处理后得:

$$u_A = [ u_Q - c ( u_Q - u_R ) ] / [ 1 + ( u_Q - u_R ) ] \tag{20}$$

$$u_B = [ u_Q + c ( u_S - u_Q ) ] / [ 1 + ( u_S - u_Q ) ] \tag{21}$$

$$p_A = p_Q - ( u_A + c ) ( p_Q - p_R ) \tag{22}$$

$$p_B = p_Q - ( u_B - c ) ( p_S - p_Q ) \tag{23}$$

令  $( u ) = f u | u | / ( 2 D )$ , 式(17)、(19)用向后插分格式处理后得:

$$p_P = \frac{1}{2} [ p_A + p_B + c ( u_A - u_B ) - c \tau ( u_A - u_B ) ] \tag{24}$$

$$u_P = \frac{1}{2} [ u_A + u_B + ( p_A - p_B ) / ( c ) - \tau ( u_A + u_B ) + 2 g \sin \tau ] \tag{25}$$

以上式中:  $f$  为摩擦系数,  $x$  为沿蒸汽发生器轴向长度,  $D$  为蒸汽发生器内直径, 下角标 R、A、

Q、B、S、P 意义如二回路有限差分网格图所示,其他量符号的物理意义同上。

## 2.2 边界条件

快堆回路中通常有以下 10 种边界条件:1) 管截面变化(突扩和突缩);2) 三通(T形接头);3) 封闭端;4) 恒压箱;5) 无穷远端;6) 声阻不连续及虚接头;7) 爆破膜;8) 简单泵;9) 小损失(弯头、阀、孔板等);10) 压力源。有关的计算公式参见文献[3~5]。

## 2.3 爆破膜的保护作用

在二回路中设置了爆破膜。钠-水反应发生时,蒸汽发生器内压力快速上升,升至超过爆破膜所能承受的压力时,爆破膜破裂,钠、钠-水反应产物、氢气等从卸压管线中排出,从而使蒸汽发生器中的压力下降。

分析爆破膜的保护作用时,假设:1) 爆破膜在未破裂前被视为封闭端;2) 当达到爆破膜爆破压力时,爆破膜瞬时破裂;3) 爆破膜破裂后,原爆破膜处以恒压为边界条件,压力为反应产物排放罐中的压力。

## 2.4 弹性变形对声速的影响

二回路管道材料在压力波作用下可能产生变形,导致流道变宽,声速下降。弹性变形管中声速计算公式<sup>[6]</sup>为

$$c^2 = c_0^2 / [1 + c_0^2 D_0 / (H_0 E)] \quad (26)$$

## 2.5 气蚀的影响

二回路压力高于反应产物排放箱压力,爆破膜破裂后,二回路开始卸压。当流体压力低于它的蒸发压力  $p_{\text{vap}}$  时,二回路卸压过程中很可能产生气蚀。本工作采用改进液柱分离模型<sup>[7]</sup>处理气蚀问题。该模型在每个网格点引入左、右两个速度  $u, w$ 。

若无气蚀产生,则

$$u_P = w_P \quad (27)$$

$u_P, p_P$  值由式(24)、(25)给出。

若出现气蚀,即  $p_P < p_{\text{vap}}$   
当

$$p_P = p_{\text{vap}} \quad (28)$$

则有

$$u_P = u_A - (p_{\text{vap}} - p_A) / (c) - (u_A) t + g \sin t \quad (29)$$

$$w_P = u_B + (p_{\text{vap}} - p_B) / (c) - (u_B) t + g \sin t \quad (30)$$

$$\text{气腔一维尺寸 } S_P = S_Q + [(w_P + w_Q) - (u_P + u_Q)] / 2 \quad (31)$$

气蚀消失条件为

$$S_P = 0 \quad (32)$$

气蚀消失后,周围流体高速冲入气腔,在该处形成高压。

## 3 计算结果

大泄漏钠-水反应实验费用昂贵,国际上仅有少数国家的实验室进行过这方面的工作,报道的数据不全,数据背景不甚清楚,这给理论与实验数据的对比带来很大困难。目前,我国尚无条件进行此项实验,无相应实验数据。本工作在所建立的模型基础上,对某快堆蒸汽发

生在两相汽水混合区发生大泄漏钠-水反应及二回路有、无爆破膜两种情况下的压力瞬变进行计算。

所研究的快堆蒸汽发生器为立式、直流流动形式,立式布置,分为蒸发器 EV 和过热器 SH;钠在壳侧、水/蒸汽在管内逆向流动;换热管采用单壁直管,三角形布置。它的主要参数及二回路其它参数详见文献[8]。

二回路系统示意图示于图 3。低温钠由泵排出,经中间热交换器后为高温钠,在过热器下部进入过热器壳侧并自下向上流动,在过热器上部流出,并进入蒸发器。二次钠在蒸发器中自上而下流过壳侧,并被二次钠泵唧入,完成二次系统的钠循环。在二回路中设有 3 个爆破膜。钠膨胀罐旁的爆破膜 3 的设定爆破压力较低,过热器钠入口和蒸发器钠出口处的两个主爆破膜 1 和 2 的设定爆破压力较高。快堆蒸汽发生器中发生的超压大多为升压幅度相对较低的情况。随着二回路中的压力逐渐升高,爆破膜 3 破裂;发生大泄漏钠-水反应时,二回路压力急剧升高,主爆破膜 1 和 2 破裂。爆破膜破裂后,钠、氢气和和其它反应产物等流入钠-水反应产物排放罐,从而限制了二回路中的压力升高。

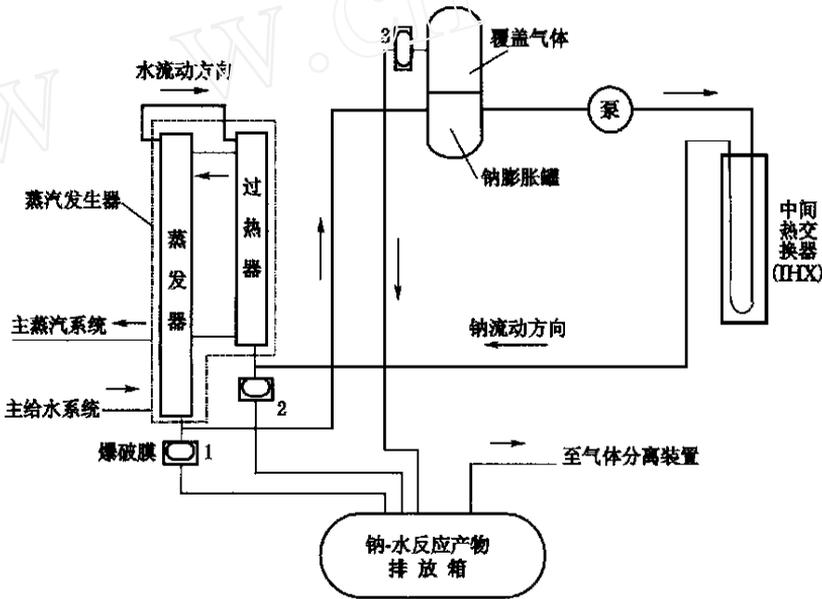


图 3 二回路系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of secondary loop systems

计算中假设:泄漏位置距蒸发器入水口 9 m 处,此处水的初始状态为两相汽水混合物。计算结果示于图 4~7。

### 3.1 无爆破膜

假设此期间二回路各边界保持完整。从图 4~7 可以看出:钠-水反应发生后,蒸汽发生器壳侧和管内的大压差使管内水的流速和流量急剧增加;反应产生的大量氢气包围在传热管断裂处,惯性力阻止了钠柱速度的快速改变,气泡体积增长率小于氢气产生率,泄漏处的压力急剧增加;气泡中的高压又使泄漏的水流量逐渐减小,且高压产生了一较大的力来克服钠柱的惯性,使钠流动加速,气泡体积的增长率渐渐超过氢气产生率,气泡压力开始下降(图 4、5(b))。

产生的高压氢气使与氢气泡接触的那部分钠的压力随之升高,产生压力波(图 6(a));该压力波向气泡以上、以下两个方向传播(分别设为 a、b 两个方向),使沿途二回路各处的压力升高;当遇到诸如突扩管、突缩管、泵等部件时,依部件的特性使压力波相应压力升高或下降;在约 20 ms 时,从 a、b 两个方向传来的压力波在二回路某处第 1 次相遇,压力波的幅值相加,使该处压力值急剧上升;迭加后的压力波继续沿各自的方向传播,分别与来自另一方向的压力波迭加,使沿途各处的压力值均急剧升高,最终使二回路所有部件都受到相当大的压力。从图 5(b)和图 6(a)可以看出:氢气泡压力在约 1 ms 时出现峰值,约为 8.7 MPa,钠-氢边界处的压力随后出现峰值,约为 3.4 MPa;此时,升高的

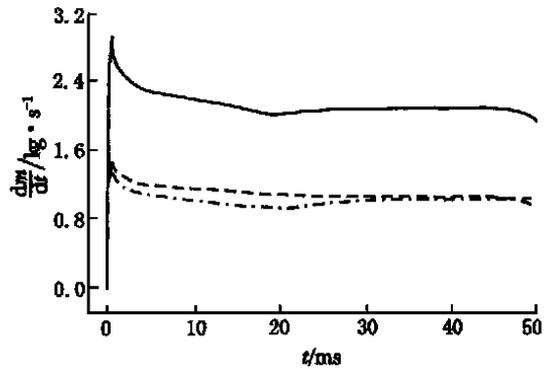


图 4 水的泄漏率

Fig. 4 Water leak rate

实线——总泄漏率;  
虚线——泄漏点以下部分泄漏率;  
点划线——泄漏点以上部分泄漏率

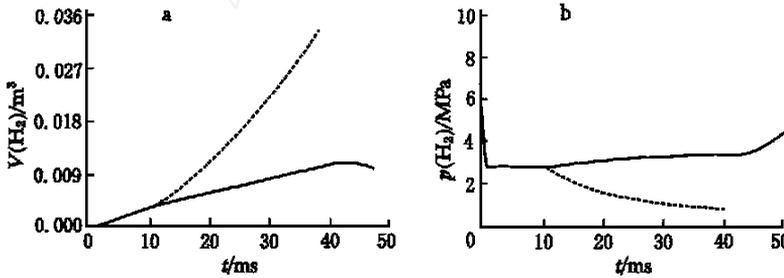


图 5 氢气泡的体积变化(a)和压力变化(b)

Fig. 5 Hydrogen bubble volume variation (a) and hydrogen bubble pressure variation (b)

虚线——有爆破膜;实线——无爆破膜

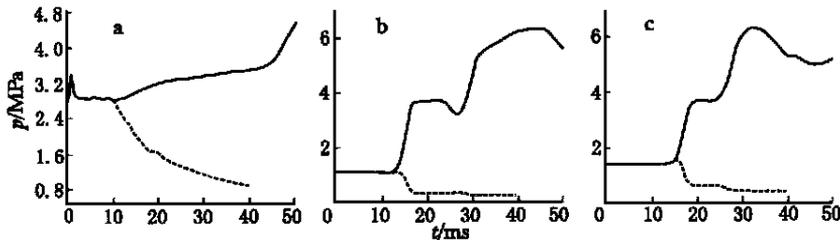


图 6 钠-氢气泡交界处(a)、泵出口处(b)和 IHX 出口处(c)的压力变化

Fig. 6 Pressure variation at sodium-hydrogen bubble boundary (a), outlet of pump (b) and outlet of IHX (c)

虚线——有爆破膜;实线——无爆破膜

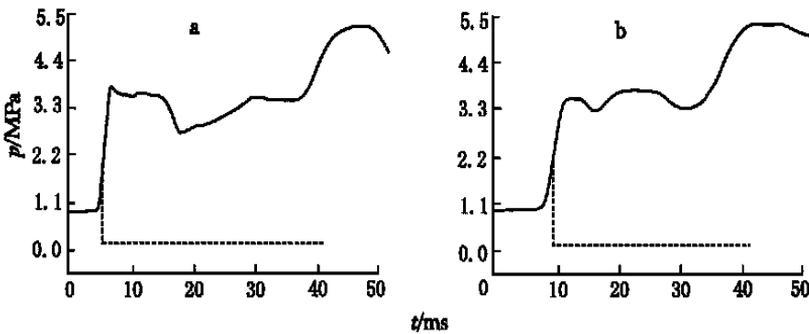


图7 爆破膜1处(a)和爆破膜2处(b)的压力变化

Fig.7 Pressure variation at rupture disk 1 (a) and rupture disk 2 (b)

虚线——有爆破膜;实线——无爆破膜

氢气泡压力超过了管内水的临界压力,水脱离阻塞状态,变为与氢气泡压力有关的流动,流量相应下降(图4)。

在13 ms时,从b向传来的压力波到达钠泵,泵出口压力达3.8 MPa;27 ms时,从a向传来的压力波也到达钠泵,两压力波相遇并迭加,泵出口处压力升到6.5 MPa(图6(b));在15 ms时,从a向传来的压力波到达中间热交换器出口,压力为3.8 MPa;25 ms时,从b向传来的压力波随后到达,两者迭加使它的出口压力增到6.5 MPa(图6(c))。这样高的压力将会造成二回路各部件的结构失效。

45 ms时,从a向传来的压力波到达气泡下部,b向传来的到达气泡上部,两者迭加造成钠-氢边界处的压力升高,高压使气泡体积压缩(图5(a)),造成氢气压力随之升高,并影响钠-氢边界处的压力(图5(b)、6(a)),最终造成二回路压力进一步升高(图6(b)、6(c)、7(a)、7(b))。

### 3.2 有爆破膜

在蒸汽发生器附近设置爆破膜。在5.5 ms时,压力波到达离泄漏点最近的爆破膜1,该爆破膜破裂(图7(a));蒸汽发生器、二回路管道中的钠通过卸压管路流入反应产物排放箱,爆破膜破裂产生的膨胀波到达钠-氢边界时约为12 ms,氢气泡压力及钠-氢边界处的压力开始下降(图5(b)、6(a))。9 ms时,从另一方向传来的压力波到达爆破膜2,该爆破膜破裂(图7(b));钠-水反应产生的高压压力波在传播到爆破膜1和2时已中止,二回路中其它部件基本不受影响(图6(b)、6(c));27 ms时,中间热交换器出口处出现气蚀现象(图6(c));22~25 ms时,钠泵处出现气蚀,28 ms后气蚀再次出现(图6(b));卸压过程中,爆破膜破裂后的低压使蒸汽发生器中钠的流速加快,氢气泡的体积增长速度大于非卸压过程中的体积增长速度(图5(a));水泄漏率在0~40 ms内与无爆破膜的情况差异不大。

## 4 结论

1) 钠-水反应产生的压力波在二回路中传播使二回路各处压力升高,两个相向的压力波相遇并迭加时,压力上升很高,可造成二回路结构失效,进而使二回路钠受到放射性污染。

2) 设置爆破膜后,爆破膜在高压作用下破裂,将蒸汽发生器和二回路中的钠、钠-水反应产物等排入反应产物排放箱,限制了蒸汽发生器和二回路中的压力升高,保护了二回路各部

件,尤其是 IHX 的边界完整。爆破膜压力的整定值由二回路系统和部件的设计压力决定。

3) 气蚀现象不可忽视。回路压力下降到比流体的蒸发压力低时出现气蚀现象,这时须进行气蚀处理。

#### 参考文献:

- [1] Selvaraj P. Large Leak Sodium-water Reaction Analysis of an LMFBR Steam Generator Using a Variable Temperature Spherical Bubble Model[J]. Nucl Eng Des, 1990, 123:87~90.
- [2] Shin YW, Wiedermann AH, Eichler TV, et al. An Analytical Model for Dynamics of a Sodium/ Water Reaction Bubble in an LMFBR Steam Generator and the Coupled Response of the Intermediate Heat Transport System[J]. Nucl Eng Des, 1988, 106:221~230.
- [3] Shin YW, Chen L. Numerical Fluid-hammer Analysis by the Method of Characteristics in Complex Piping Networks[J]. Nucl Eng Des, 1975, 33:357~369.
- [4] 骆 焱. 快堆蒸汽发生器大泄漏钠-水反应研究[D]. 西安:西安交通大学核能与热能工程系,1999.
- [5] 杨 翔. 快堆中间回路钠水反应引起压力波传播的研究[D]. 北京:清华大学热能工程系,1994.
- [6] Youngdahl CK, Kot CA. Effect of Plastic Deformation of Piping on Fluid-transient Propagation[J]. Nucl Eng Des, 1975, 35:315~325.
- [7] Kot CA, Hsieh BJ, Youngdahl CK, et al. Transient Cavitation in Fluid-structure Interactions[J]. J Pressure Vessel Technol, 1981, 103:345~351.
- [8] 赵仁恺,冯运昌,耿战修. 中国快堆技术发展[R]. 北京:“八六三”计划能源领域专家委员会,1996.

## Secondary Loop Pressure Propagation Caused by Large Leak Sodium-water Reaction in Steam Generator of Liquid Metal-cooled Fast Breeder Reactor

LUO Yan, ZHANG Jian-min, SHAN Jian-qiang, ZHU Ji-zhou

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The model of adiabatic spherical-to-columnar hydrogen bubble growth in large leak sodium-water reaction as well as the model of secondary loop pressure propagation with the one-dimensional characteristic method are established under one double-ended-guillotine tube break in the steam generator of liquid metal-cooled fast breeder reactor. Both of the characters of large leak sodium-water reaction and secondary loop pressure propagation transient are calculated and analyzed at the two-phase water large leak with and without rupture disks.

**Key words:** steam generator; sodium-water reaction; pressure propagation; rupture disks