

# 压水堆主管道破裂工况下的 非线性动力响应

张锡文, 何枫, 郝鹏飞, 王学芳

(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

**摘要:**在用特征线法和控制体体积积分方法较为精确地计算出压水堆主管道 11 个断点破裂工况下各点的受力和力矩的基础上,对主管道和虚拟支撑进行了简化和特殊处理,采用更新的Lagrange法(ADINA 程序)对破裂管道的非线性动力响应进行了分析研究,获得了较准确的主管道运动位移随时间的变化曲线。这一研究结果为虚拟支撑和管道的设计提供了依据。

**关键词:**动力响应;破裂工况;主管道;压水堆

**中图分类号:** TL353<sup>+</sup>. 11      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2000)05-0385-06

核电站主管道出现双端断裂时,巨大的流体排放力作用(百、千吨量级)使管道发生甩摆振动,甩摆位移将达几百毫米,对周围的仪器仪表、构筑物以及人员将造成严重破坏和损伤。因此,在主管道系统中设置许多虚拟支撑,用以防止管道的过大甩摆位移和吸收管道甩摆动能。管道甩动是一高度非线性问题,表现为以下 3 个方面。1) 几何非线性:甩动时,强烈的横向力将使管道局部区域产生塑性变形,管道截面随之出现椭圆化,椭圆化的进一步发展引起管道出现局部屈曲;椭圆化的结果又使截面面积变小,流动发生阻塞,最终又反映到管道上来。2) 材料非线性:主要表现在管道的局部塑性变形以及显著的应变率效应。3) 边界条件的非线性:主要表现在管道与支撑间的碰撞以及甩动过程中作用于管道上的射流反作用力的方向不断变化。关于管道甩动动力响应方面的研究很多,如 Salmon 等<sup>[1]</sup>建立了甩动问题的刚塑性模型, Prinja 和 Chitkara<sup>[2,3]</sup>讨论了截面椭圆化响应与流动阻塞问题, Kurihara 等<sup>[4]</sup>给出了小规模管道甩动模拟实验的一些结果,考察了管道外伸长度、限制器与管道间间隙等因素。余儒宏<sup>[5]</sup>用 SAPV 程序分析过主系统管道的动力响应,华云龙<sup>[6]</sup>总结了管道甩动问题的一些计算方法,赵国桥<sup>[7]</sup>采用 U. L 格式计算了核设施中的管道系统在 5 种破裂工况下的动力响应。这些研究成果为本工作提供了基础和借鉴,但这些研究工作对流体排放力和流体作用力的处理均是基于某种已知的假设条件,存在不够准确的地方。

本工作在对压水堆主回路在假想双端断裂下的受力和力矩进行了较为准确的计算分析的基础上<sup>[8]</sup>,采用 U. L 格式对破裂管道的非线性动力响应进行研究,以期为主管道系统中的管道及其虚拟支撑的设计提供依据。

收稿日期:1999-07-06;修回日期:1999-09-01

作者简介:张锡文(1970—),男,四川富顺人,讲师,博士,流体力学专业

### 1 计算原理和方法

压水堆主回路结构及 11 个假想断裂点位置示于图 1。

#### 1.1 几何非线性增量有限元法简介

采用几何非线性增量有限元求解方法计算在流体排放力的作用下破裂管道的大位移运动。在笛卡尔坐标系中,假定管道在时间  $0 \sim t$  的所有时间步的运动学和静力学的解答已知,下一步需要解  $t + \Delta t$  时刻的各个力学量,重复使用这一步骤,即可得到管道在所求时间域内的静、动力响应。对于静力问题,  $\Delta t$  表示载荷增量步;对于动力问题,  $\Delta t$  表示时间步长。

应用虚位移原理,在  $t + \Delta t$  时刻位形的平衡方程可写成

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta u_j - \delta u_i = Q \quad (1)$$

式中:  $Q$  为  $t + \Delta t$  时刻位形的外载荷虚功,

$$Q = \int_S \bar{T}_i u_i - \int_V f_i u_i \quad (2)$$

$\delta u_j$  为无穷小应变的变分,即

$$\delta u_{ij} = \frac{1}{2} (\delta u_{i,j} + \delta u_{j,i}) \quad (3)$$

$\sigma_{ij}$  表示  $t + \Delta t$  时刻位形的 Cauchy 应力,  $f_i$  和  $\bar{T}_i$  分别表示  $t + \Delta t$  时刻位形的体力和面力,  $V$ 、 $S$  和  $\rho$  分别表示物体在  $t + \Delta t$  时刻位形的体积、表面积和质量密度。

$t + \Delta t$  时刻的位形未知,式(1)不能直接用于求解。为此,应选取一已知的平衡位形作为参考基准。一般有两种选择:全 Lagrange 格式(简称 T.L 格式)和更新 Lagrange 格式(简称 U.L 格式)。

#### 1.2 T.L 格式

该格式中所有变量以  $t = 0$  时刻位形作为参考位形。假定载荷保守,则可写出对应上述两种格式的增量求解方程。

$$\int_{\Omega_0} \sigma_{ij} \delta u_j - \delta u_i = Q \quad (4)$$

$$Q = \int_{S_0} \bar{T}_i u_i - \int_{V_0} f_i u_i \quad (5)$$

引入增量分解

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^t + \sigma_{ij}^0 \quad (6)$$

$$u_j = u_j^t + u_j^0 \quad (7)$$

其中:  $\sigma_{ij}^t$  和  $\sigma_{ij}^0$  分别为  $t$  到  $t + \Delta t$  增量步内的 Kirchhoff 应力增量和 Green 应变增量,并且均参考于初始位形,以左下标“0”标记。左上标“ $t$ ”或“ $t + \Delta t$ ”表示  $t$  或  $t + \Delta t$  时刻的量。进一步

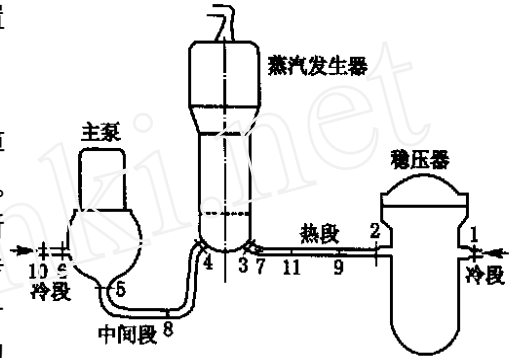


图 1 压水堆主回路结构及 11 个假想断点位置图

Fig. 1 Structure and 11 presamed break points of primary loop of PWR

利用 Green 应变表达式  $e_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j})$ , 可将 Green 应变增量  ${}^0 e_{ij}$  表示成关于位移增量  $u_i$  的线性项和二次项之和, 即

$${}^0 e_{ij} = {}^0 e_{ij} + {}^0 \bar{e}_{ij} \tag{8}$$

式中线性项  ${}^0 e_{ij} = ({}^0 u_{i,j} + {}^0 u_{j,i} + {}^0 u_{k,i} \cdot {}^0 u_{k,j} + {}^0 u_{k,j} \cdot {}^0 u_{k,i})/2$ , 二次项  ${}^0 \bar{e}_{ij} = \frac{1}{2} {}^0 u_{k,i} \cdot {}^0 u_{k,j}$ , 于是, 式(4)可写成以初始位形作参考的增量非线性方程:

$${}^0 {}_0 S_{ij} {}^0 e_{ij} d + {}^0 {}_0 \bar{S}_{ij} {}^0 \bar{e}_{ij} d = {}^{t+} Q - {}^0 {}_0 S_{ij} {}^0 e_{ij} d \tag{9}$$

### 1.3 U.L 格式

该格式所有变量以  $t$  时刻位形作为参考位形。类似的可写出其增量非线性方程:

$${}_t {}_t S_{ij} {}_t e_{ij} d + {}_t {}_t \bar{S}_{ij} {}_t \bar{e}_{ij} d = {}^{t+} Q - {}_t {}_t S_{ij} {}_t e_{ij} d \tag{10}$$

从式(9)和(10)可看出:左端第 1 项将包含位移增量  ${}^0 u_i$  和  ${}_t u_i$  的四次项。实际计算时, 需要进行平衡方程的线性化处理, 并采用迭代求解格式。在动力问题中, 体力项应包括惯性项和阻尼项。

从式(9)或(10)出发, 经线性化处理, 并用有限元离散, 可得出总体坐标下的增量有限元方程。

对 T.L 格式, 有:

$$M {}^{t+} \ddot{u} + C {}^{t+} \dot{u} + ({}^t K_L + {}^0 K_{NL}) u = {}^{t+} R - {}^0 F \tag{11}$$

对 U.L 格式, 有:

$$M {}^{t+} \ddot{u} + C {}^{t+} \dot{u} + ({}^t K_L + {}^t K_{NL}) u = {}^{t+} R - {}^t F \tag{12}$$

式(1) ~ (12)的推导和各系数矩阵可参见文献[7]、[9]。

## 2 模型简化

### 2.1 破裂管道的假设和简化

在压水堆主管道系统破裂的相应计算中, 采用 ADINA (U.L 格式) 程序。建立计算模型时作如下假设和简化:

1) 计算管道动力响应时, 利用瞬变流和流体力学的知识求出每一计算时步的力<sup>[8]</sup>, 然后求出响应, 时间步可以调整, 因此, 可认为是同步计算;

2) 主环路系统主管道均用空间管单元模拟, 设单元有 2 个结点(另加一辅助结点), 每个结点有 3 个移动和 3 个转动自由度, 单元可传递轴力、剪力、弯矩和扭矩, 并考虑大挠度、大转动和小应变的情况;

3) 省去了与主管道或主设备相连接的波动管、给水管、主蒸汽管以及安注系统等分支管道的影响, 所有弯管的截面均假设与直管相同;

4) 材料模式分别以线弹性和塑性材料进行计算;

5) 假设反应堆压力容器、蒸汽发生器和冷却剂主泵的刚度相当大, 双端断裂管道可简化成悬臂梁受一阶跃载荷的作用(图 2)。



图2 破裂管道简化计算模型

Fig. 2 The computing model of break pipe

## 2.2 虚拟支撑的处理

虚拟支撑与管道间有一定的初始间隙,只有管道撞击它时方起作用,因此,虚拟支撑的边界较难处理。处理这种非线性边界条件的方法通常有以下几种。

1) 弹簧质量块法。将边界看作带集中质量块的弹簧,只有管道甩摆位移大于间隙时,弹簧方起作用,集中质量块和弹簧吸收甩摆的动能,弹簧刚度和各种阻尼及集中质量难以确定,需进行摸索调整,以得出合乎实际的结论。

2) 摩擦间隙单元模拟。将支撑系统用一间隙-摩擦单元来模拟,将其分成2个独立的元件来考虑,元件1用 $z$ 轴方向的一弹性弹簧来模拟,用于支撑管道;元件2用 $x$ - $y$ 平面内的一对非弹性弹簧来模拟,起摩擦作用。

3) 本工作采用ADINA中非线性的材料模式进行模拟,即将主管道按管单元来进行模拟,将支撑边界按杆单元来模拟,在它们的连接点处引进位移约束方程:

$$u_i = u_j; \quad v_i = v_j; \quad w_i = w_j$$

$u_i$ 、 $v_i$ 、 $w_i$ 、 $u_j$ 、 $v_j$ 、 $w_j$  分别代表主管道与支撑边界连接点的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 3个方向的位移,杆单元采用图3所示的非线性材料模式,即当主管道位移未接触到支撑时( $< \delta_1$ ),杆应力 $\sigma_1$ 很小(即弹性模量 $E=0$ );管道位移大于间隙时( $> \delta_1$ ),杆应力很大(即 $E$ 很大)。

## 3 计算结果

利用上述计算方法和原理及边界的处理,对蒸汽发生器入口(热段焊缝点3)、蒸汽发生器出口(中间段焊缝点4)、压力容器入口(冷段焊缝点1)3处破裂工况进行了对比计算。这里仅给出压力容器入口(焊缝点1)处破裂时冷管段自由甩摆的纵向和横向位移的典型图例(图4)。上述3个断点破裂时冷管自由甩摆的纵向和横向最大位移列于表1。

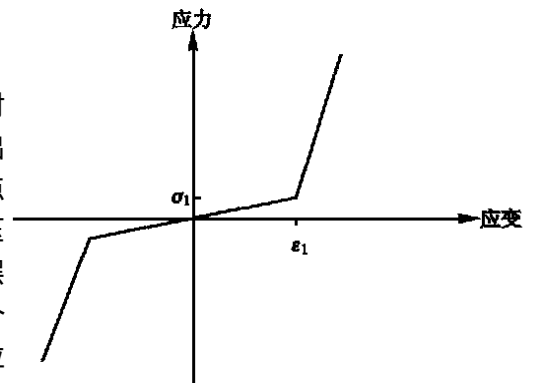


图3 两阶段线性材料模式

Fig. 3 The two stage linear model of materials

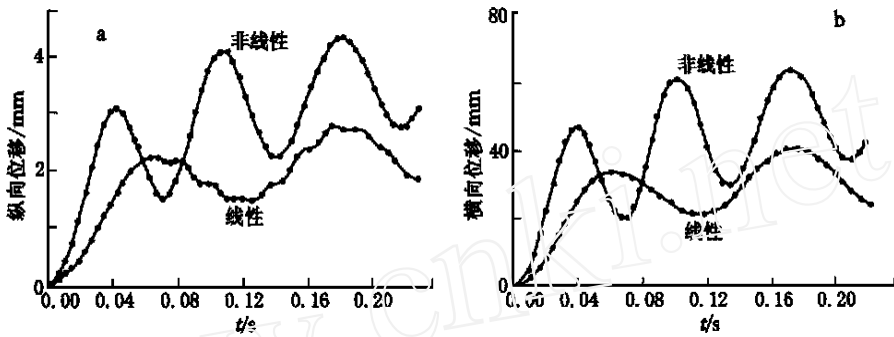


图 4 冷管段自由甩摆的纵向位移(a)和横向位移(b)  
Fig. 4 Axes(a) and transverse(b) displacements of cold pipe

表 1 在不同断点处破裂时管道甩摆的最大位移  
Table 1 Maximum displacement at different break point

断点序号及其部位	位移/mm			
	纵向		横向	
	线性	非线性	线性	非线性
3,蒸汽发生器入口	1.9	2.8	250.0	290.0
4,蒸汽发生器出口	1.3	1.4	2.6	4.0
1,压力容器入口	2.6	4.3	40.0	62.0

#### 4 结论

- 1) 利用 ADINA 软件进行的线性和非线性的对比计算结果表明:线性计算所得结果小于非线性,即线性振荡幅度小于非线性的振荡幅度。
- 2) 管道甩摆的纵向位移比横向位移小,蒸汽发生器和压力容器入口处的纵向位移和横向位移相差 1 个数量级以上,这一结果与理论分析相符合。
- 3) 在某些焊缝点(蒸汽发生器入口)双端断裂后,其甩摆位移远大于虚拟支撑与管道之间的间隙,即管道将碰撞到支撑,支撑的反作用力将是巨大的。
- 4) 对管道甩摆受到支撑的反作用力的运动作了进一步分析和计算。计算结果表明:管道撞到支撑上,能量被支撑吸收,甩摆将逐渐衰减而得到有效控制。

#### 参考文献:

[1] Salmon MA, Verma V. Rigid-plastic Beam Model for Pipe Whip Analysis[J]. J Eng Mech Div, Am Soc Civ Eng, 1976, 102(Em 3):361~372.

[2] Prinja NK, Chitkara NR. Post Collapse Cross-sectional Flattening of Thick Pipes in Plastic Bending[J]. Nucl Eng Des, 1984, 83:113~121.

[3] Prinja NK, Chitkara NR. Large Rotation, Large Strain Analysis of Pipe Whip With Flow Choking[J]. Nucl Eng Des, 1986, 93:69~81.

[4] Kurihara R. Experimental Studies of 4-inch Pipe Whip Test Under BWR LOCA Conditions[J]. Nucl Eng Des, 1983, 76:23~33.

[5] 余儒宏. 反应堆主环路系统抗破裂设计的分析[J]. 核动力工程, 1986, 7(6):49~56.

- [6] 华云龙,余同希.核电站中管道甩动问题的分析计算方法[J].计算结构力学及其应用,1988,(1):105~112.
- [7] 赵国桥.核反应堆管道系统动力响应分析[D].北京:清华大学工程力学系,1992.
- [8] 张锡文,姚朝晖,何枫,等.压水堆主管道双端断裂事故下管路系统的力和力矩分析[J].原子能科学技术,1997,31(4):339~344.
- [9] 王勳成,邵敏.有限单元法的原理与数值方法[M].北京:清华大学出版社,1989.120~150.

## Nonlinear Dynamic Response Analysis in Piping System for a Loss of Coolant Accident in Primary Loop of Pressurized Water Reactor

ZHANG Xi-wen , HE Feng , HAO Peng-fei , WANG Xue-fang

(*Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract** :Based on the elaborate force and moment analysis with characteristics method and control-volume integrating method for the piping system of primary loop under pressurized water reactor ' loss of coolant accident (LOCA) conditions , the nonliner dynamic response of this system is calculated by the updated Lagrangian formulation (ADINA code) . The piping system and virtual underpinning are specially processed , the move displacement of the broken pipe with time is accurately acquired , which is very important and useful for the design of piping system and virtual underpinning.

**Key words** :dynamic response analysis ; loss of coolant accident ; primary loop ; pressurized water reactor