

蒸汽发生器给水系统中汽泡 的形成与溃灭

叶宏开 王学芳 吴立新 汤荣铭

(清华大学工程力学系, 北京)

文章对蒸汽发生器给水系统中由于蒸汽泡的溃灭而造成水锤现象作了分析。根据实验, 用液面的波动、变质量水柱的加速运动和孤立蒸汽泡的溃灭等三个模型描述了汽泡的形成与溃灭。计算结果和国外某些核电站事故分析中的估算值相当接近。

关键词 核电站, 蒸汽发生器, 汽泡, 水锤。

蒸汽发生器给水管路中产生的水锤是造成核电站破坏事故的主要原因之一。例如1985年美国圣·俄诺费尔核电站发生的事故就是由给水系统的事故而触发的。因此给水系统中水锤的起因、强度以及防治办法就日益成为人们关注的课题。

一、物理过程的描述

当给水系统发生故障时(如事故停泵, 阀门失灵等), 给水量迅速降低, 蒸汽发生器中水位下降, 给水环暴露在蒸汽之中, 这时, 如果辅助给水系统立即供水, 往往就会产生严重的水锤破坏。其过程根据实验大致可以分成如下几个阶段。

(1) 给水环暴露于蒸汽中, 蒸汽倒流入水平供水管(图1 a)。

(2) 供水量增加, 水平管中形成一个具有自由面的流动, 由于蒸汽的继续流入, 水面产生波动。最后, 水平管与给水环相接处被水波封闭, 水平管内形成一个孤立的蒸汽泡(图1 b)。

(3) 由于汽泡内蒸汽的凝结, 以及泡外蒸汽压的作用, 孤立汽泡迅速缩小(图1 c)。

(4) 汽泡溃灭, 产生高压(图1 d)。

汽泡溃灭产生的高压, 将以音速在水管内传播, 当管路中的薄弱环节无法承受这种高压时, 管路破裂, 发生严重的事故。

对于这种现象作解析分析是相当困难的, 甚至有人认为是是不可能的。本文的目的就是要根据上述物理过程对这种事故作一初步的解析分析。认为水锤产生过程可用下列三个模型来描述:

- (1) 水流波浪运动导致孤立蒸汽泡的形成;
- (2) 变质量水柱从给水环侧向上游端加速运动;

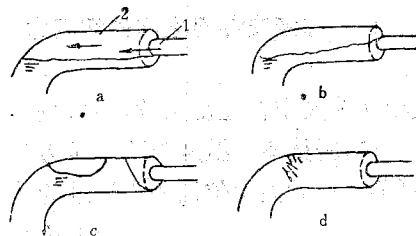


图1 水平管内汽泡的形成和溃灭简图
Fig. 1 Forming and collapsing of the bubble in horizontal pipe
1—给水环; 2—水平供水管。

(3) 孤立蒸汽泡的溃灭。

二、孤立蒸汽泡的形成

1. 基本方程

在讨论蒸汽泡的形成时，假定水面上方蒸汽的参数保持不变。

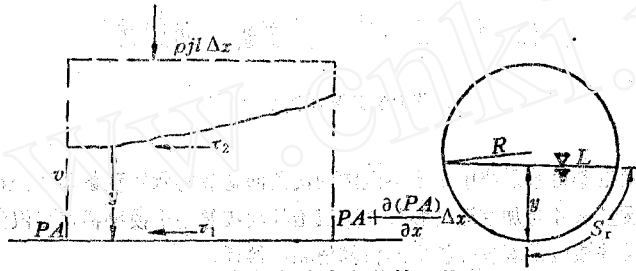


图 2 推导基本方程的控制体
Fig. 2 Control volume for deducing governing equations

(1) 连续方程 水平管中的连续方程为：

$$\bar{V}A_x + A_1 + AV_x = jL \quad (1)$$

其中 j 为单位面积上蒸汽的体积凝结率。

(2) 动量方程

$$(\rho V^2 A)_x \Delta x + (\rho AV \Delta x)_t = (PA)_x \Delta x - \tau_1 S_r \Delta x - \tau_2 \Delta x L \quad (2)$$

式中 S_r 表示弧长， τ_1, τ_2 分别表示固液界面和汽液界面上的切应力。

(3) 几何关系 由图 2 可知，过水面积 A ，弧长 S_r 与水位 y 有下列简单关系：

当 $y < R$ ： $S_r = R \cdot \arccos(1 - y/R)$

$$A = R \cdot S_r - \frac{1}{2} L (R - y) \quad (3)$$

当 $y > R$ ： $S_r = R[\pi - \arccos(1 - y/R)]$

$$A = R \cdot S_r + \frac{1}{2} L (R - y) \quad (4)$$

(4) 固液交界面之间的切应力 τ_1 本文采用曼宁公式来求取切应力 τ_1 ，即

$$\tau_1 = A \cdot \rho g n^2 v^2 / (c_m R^{4/3} S_r) \quad (5)$$

式中 n 为曼宁粗糙度系数， R 为水力半径， c_m 为经验常数。

(5) 凝结率 温度为 T_g ，压力为 P_g 的纯饱和蒸汽在表面温度为 T_f 的自身液相上的凝结率（即单位时间单位面积上通过的质量）可表示为：

$$J = (M/2 \pi R_g)^{1/2} (P_g/T_g^{1/2} - P_f/T_f^{1/2})$$

式中 M 为分子量， R_g 为通用气体常数。考虑到表面条件并不是静态热力平衡条件，当凝结率不大时可修正如下：

$$J = [2 \sigma / (2 - \sigma)] (M/2 \pi R_g)^{1/2} (P_g/T_g^{1/2} - P_f/T_f^{1/2}) \quad (6)$$

式中 σ 为凝结系数，对于水一般取 0.04。

(6) 汽液交界面处的切应力 τ_2 在求取 τ_2 时，采用了简单的雷诺比拟，即认为边界上

的切应力是由于部分流体因撞到界面上，将部分动量传递给界面后又弹回来的缘故。引入界面摩擦系数 f_i 后有

$$\tau_2 = V(J - \rho_i f_i V) / 2 \quad (7)$$

式中 ρ_i 指的是蒸汽的密度， V 是液体流速。

(7) 基本方程 利用几何关系(3)，(4)可将连续方程(1)和动量方程(2)重新写成：

$$VY_x + Y_t + AV_x/L = j \quad (8)$$

$$V_t + VV_x + gS + gY_x + \tau_2 L / \rho A + jLjA = 0 \quad (9)$$

方程(6—9)构成了管内水流运动的基本方程，其中，

$$S = n^2 V^2 / C_m R^{4/3}$$

2. 边界条件

水平管进口端的流量为：

$$Q = \begin{cases} [Q_1 + (Q_F - Q_1)t/t_F] \zeta & (t < t_F) \\ Q_1 \cdot \zeta & (t \geq t_F) \end{cases}$$

出口端流量为： $Q \approx 0$

式中 Q_1 ， Q_F 分别为时刻 $t=0$ 及 $t=t_F$ 时的流量， ζ 为修正系数，它和给水环的出水孔数目有关。

3. 数值计算

方程(8,9)是一组双曲线型微分方程，可用特征线法求解。这两个方程的特征线以及在特征线上才成立的相容性方程如下所示：

$$C^+ : dx/dt = V + C \quad (10)$$

$$dV/dt + g/c \cdot dY/dt + gS + \tau_2 L / \rho A + jL(V + C) / A = 0 \quad (11)$$

$$C^- : dx/dt = V - C \quad (12)$$

$$dV/dt - g/c \cdot dY/dt + gS + \tau_2 L / \rho A + jL(V - C) / A = 0 \quad (13)$$

式中 $C = (gA/L)^{1/2}$ ，是波在渠流中的传播速度。

方程(10~13)可用规定时间间隔法来求解(示于图3)。从 $n+1$ 时间层中的任一节点 P 可向下作两条特征线 C^+ 和 C^- ，它们交 n 时间层中的 R 及 S 两点，函数在这两点的数值可由线性插值得。沿 C^+ 及 C^- 分别积分(11)及(13)两式得：

$$V_P = C_P - gY_P / C_R \quad (14)$$

$$V_P = C_M + gY_P / C_S \quad (15)$$

由此解得 V_P 及 Y_P 。式中 C_P 及 C_M 分别为：

$$C_P = V_R + gY_R / C_R - gS_R \Delta t - jL_R / A_R (V_R - C_R) \Delta t - \tau_{2R} L_R \Delta t / A_R \quad (16)$$

$$C_M = V_S - gY_S / C_S - gS_S \Delta t - jL_S / A_S (V_S + C_S) \Delta t - \tau_{2S} L_S \Delta t / A_S \quad (17)$$

这样，当我们知道 n 时间层各节点上的函数值之后就可求得 $n+1$ 时层上各节点上的数值。边界点上的数值也可按类似方法求得。

为了得到稳定的数值解，网格尺寸应满足

$$\Delta t \leq \Delta X / C [1 - \Delta t / 2 (gS / V + jL / A + \tau_2 L / \rho AV)]^{1/2} \quad (18)$$

图4为计算所得的各个时刻管中的液面曲线。从图中可以看到水波封死接口的情况。

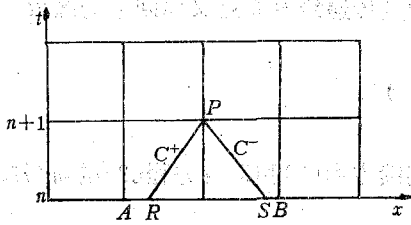


图 3 规定时间间隔法

Fig. 3 Specified-time interval method

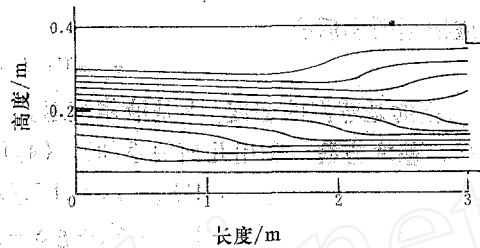


图 4 水平管内液面的变化

Fig. 4 Water surface in horizontal pipe at different time

三、变质量水柱的加速运动

水波一旦封死接口以后，水柱在两边蒸汽压差的作用下作加速运动，在运动过程中，水柱质量不断增加(示于图 5)。若用 P_G 和 P 分别表示蒸汽发生器和汽泡内的蒸汽压，则牛顿运动定律可写为：

$$d(mv)/dt = (P_G - P)A \quad (19)$$

由于汽泡中蒸汽的不断凝结，蒸汽温度逐步降低，对应的饱和蒸汽压也随之下降。假定水温 T_f 不变，蒸汽温度下降满足如下规律：

$$T = T_f + (T_G - T_f)e^{-at} \quad (20)$$

由饱和蒸汽的状态方程

$$R_k = a_1 - a_2 \cdot P^{1.35} / T^{5.85} \quad (21)$$

可得出

$$P = P_G [T_f / P_G + (1 - T_f / P_G) e^{-at}]^{4.13} \quad (22)$$

质量 m 是时间的函数，随时间增加而增加，由图 5 知，它可由下式表示：

$$m(t) = \int_0^t \rho A (V_w - V_1) dt \quad (23)$$

式中的 $V_w - V_1$ 可按如下法求得：取控制体如图 5 中虚线所示，它以 V_w 速度向右运动，写出连续方程和忽略摩擦的动量方程后可求得：

$$V_w - V_1 = [(P_G - P) / \rho (A / A_2 + 1)]^{1/2} \quad (24)$$

代入式(23)得：

$$m(t) = \int_0^t \rho A [(P_G - P) / \rho (A / A_2 + 1)]^{1/2} dt \quad (25)$$

面积 A_2 随着液面的升高而增大，它和下列因素有关：

- (1) 孤立汽泡形成时的平均液面高度；
- (2) 蒸汽的凝结使液面上升；
- (3) 由供水系统继续泵来的水流。

将有关诸式代入到式(19)后可得如下形式的方程：

$$m d^2 X / dt^2 + V dm / dt = F(t) \quad (26)$$

$$d^2 X / dt^2 = G(x, dx / dt, t)$$

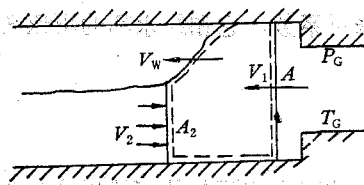


图 5 变质量水柱的加速运动

Fig. 5 Accelerated motion of a water body with a variable mass

初始条件是:

$$t=t_0 \text{ 时, } dx/dt=0, x=0$$

采用龙格-库塔法可求解上述常微分方程。求出 $x(t)$ 之后, 就不难求出汽泡的体积随时间的变化。

当汽泡体积变得较小时, 继续用这种方法进行计算的误差太大。因为这时候物理过程变得很复杂。为了克服这一困难采用孤立球泡模型来代替业已很小的汽泡。

四、蒸汽球泡的溃灭

1. 孤立汽泡的收缩

众所周知: 对于半径为 R 的孤立小汽泡, 若汽泡内外的压差为 ΔP , 则该汽泡边界的运动方程为:

$$Rd^2R/dt^2 + 3/2(dR/dt)^2 = \Delta P/\rho_l \quad (27)$$

设泡内的蒸汽压为 P_g , 泡外的液体压力为 P_l , σ 为表面张力系数, μ 为粘性系数则有:

$$\Delta P = P_l - (P_g - 2\sigma/R) + 4\mu R dR/dt \quad (28)$$

将式(28)代入到(27)中可得

$$Rd^2R/dt^2 + 3/2(dR/dt)^2 = (P_l - P_g + 2\sigma/R)/\rho_l \quad (29)$$

通常认为分界面处于完全的热平衡, P_g 被视为相应于分界面瞬时液温 T_l 对应的蒸汽压力。这种假定是不够准确的。在汽泡收缩过程中, 受到向界面导热的影响, 在极限条件下可获得如下的解:

$$dR/dt = [T_g - T_l](-k_l/i_l P_g)(\pi\alpha_l t/3)^{-1/2} \quad (30)$$

式中 α_l , k_l 分别为液体的导温和导热系数。 i_l 为温度 T_l 下水蒸汽的焓值。

用线性的克劳修斯-克拉珀龙方程把汽泡收缩速度与泡内的蒸汽压力 P_g 相关联有:

$$P_g(R, t) = P_g(R, 0) + \lambda dR/dt \cdot t^{1/2} \quad (31)$$

$$\lambda = (\alpha_l \pi/3)^{1/2} P_g^2(R, 0) i_l^2 M^2 / (k_l R_g^2 T_l^3) \quad (32)$$

其中 R_g 为通用气体常数, M 为摩尔质量。

四个方程(29, 30, 31, 32)可用龙格-库塔法联立求解。

2. 水锤压力计算

当汽泡收缩到某一体积时, 其边界速度达到最大值, 将这个最大值代入著名的僵可夫斯基公式中进行计算, 可求得汽泡溃灭时的水锤压力:

$$\Delta H = a g dR/dt \quad (33)$$

这里 a 为声音在充满液体的管道内的传播速度。

五、计算结果

本文根据下列参数进行了计算: 管长 3 m , 管径 $D=0.4 \text{ m}$, $T_l=200^\circ\text{C}$, $T_g=270^\circ\text{C}$, 进口端流量满足:

$$Q = t/60 \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (t < 60 \text{ s})$$

$$Q=1 \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (t>60 \text{ s})$$

初始水位为 0.05 m, 曼宁系数 $n=0.16$, 音速为 $a=1200 \text{ m/s}$

计算结果表明, 孤立汽泡形成所需的时间约为 4 s; 汽泡缩小至崩溃的时间为 1 s。水锤压力 ΔP 约为 $1.8 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。该结果和有关实验及事故分析的数据在量级上是吻合的。

由分析及计算可知, 缩短水平管道的长度对减少水锤压力是有好处的。为了预防蒸汽汽泡的溃灭水锤, 最根本的办法是避免蒸汽进入水平供水管。例如用装在给水环上方的 J 型小管代替给水环下方的给水孔等办法在一定程度上都是可行的。

参 考 文 献

- [1] Wylie, E.B., Streeter, V.L., 瞬变流, 清华大学流体力学控制教研室译, 北京, 水利电力出版社出版, 1983年, 第三、十六章
- [2] Collier, J.G., 对流传热和凝结, 魏允英等译, 北京, 科学出版社出版, 1982年, 第 349—356 页。
- [3] 潘文全等, 流体力学基础, 北京, 机械工业出版社出版, 1981 年。
- [4] Bornhorst, W., J Hatsopoulos, G.N., *J. Appl. Mech.*, p.847, Dec.1967.

(编辑部收到日期: 1989年 3 月 7 日)

FORMING AND COLLAPSING OF STEAM BUBBLE IN FEED WATER PIPE OF STEAM GENERATOR

YE HONGKAI WANG XUEFANG WU LIXIN TANG RONGMING

(Department of Engineering Mechanics Tsinghua University, Beijing)

ABSTRACT

According to the experiment, the waterhammer caused by steam bubble collapse in feed water pipe of steam generator are analysed.

Three models (wave motion, accelerated motion of a water body with variable mass, dynamics of the single bubble) are used to describe and calculate the form and collapse of the bubble.

The results are coincided with that estimated in accident analysis of some nuclear power plant in abroad.

Key words Nuclear power plant, Steam generator, Steam bubble, Waterhammer.