

文章编号: 1000-4874(2006)01-0107-06

## 基于考虑含气量变化浆体水击模型的 复合管道水击数值计算\*

周云龙<sup>1</sup>, 段晓宁<sup>2</sup>, 陈晓波<sup>1</sup>,  
洪文鹏<sup>1</sup>, 孙斌<sup>1</sup>

(1. 东北电力学院, 吉林 132012;

2. 中国中轻国际工程有限公司, 北京 100026)

**摘要:** 作者在提出了考虑含气量变化的固液两相流浆体水击基本方程的基础上, 建立了考虑含气量变化的浆体水击模型。运用该模型对某电厂除灰系统管道进行了水击数值计算, 根据计算结果提出了合理的建议, 该建议已被采纳和应用。同时将计算结果与原有清水水击模型和浆体水击模型的计算结果进行比较, 结果表明: 该水击计算模型在进行固液两相流水击计算时精度高, 可用于工程计算。

**关键词:** 固液两相流; 水击; 数值计算

**中图分类号:** TB126 **文献标识码:** A

## Numerical calculation of the slurry water hammer in the complex pipe based on considering air capacity change

ZHOU Yun-long<sup>1</sup>, DUAN Xiao-ning<sup>2</sup>, CHEN Xiao-bo<sup>1</sup>,  
Hong Wen-peng<sup>1</sup>, SUN Bin<sup>1</sup>

(1. Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China;

2. China BCEL International Engineering Co., Ltd, Beijing 100026, China)

**Abstract:** Based on the basic equations of slurry water hammer of liquid-solid two-phase flow considering air capacity change proposed by the author, the mathematical model for the pseudo-homogeneous solid-liquid two-phase flow water hammer considering air capacity was developed. Using the improved model the calculation of the slurry water hammer in the complex pipe was done for a steam power plant. On the basis of the calculation results the reasonable advice was put forward. The advice has been adopted and applied. Compared with the results of the past models, the improved model is more precise and can be used in the engineering calculation.

**Key words:** solid-liquid two-phase flow; water hammer; numerical calculation

\* 收稿日期: 2005-06-08(2005-08-05 修改稿)

作者简介: 周云龙(1960~), 男, 吉林省扶余县人, 教授, 博士, 博导。

### 1 引言

浆体水击的冲击力会引起管道系统中的压力脉动,严重时可导致管道破裂,影响管道系统的安全稳定运行<sup>[1-3]</sup>。因此,研究固液两相流水击现象对于保障水力输送管道的安全运行有着重要的意义<sup>[4-7]</sup>。

浆体中的含气量对水击产生重要的影响,两相流管道中由于各种原因会掺入少量的气体,而气体的弹性模量远小于固体和液体,因此气体的量尽管很少,对水击波速的影响却很大。T. S. Kobori 等人研究了清水条件下气体对水击波速的影响,研究表明:即使气体含量很少,仅为千分之一,波速可减少一半。而原有的水击模型不论是清水的还是浆体的都没有考虑气泡的影响<sup>[8-10]</sup>。所以作者在提出了考虑含气量变化的固液两相流浆体水击基本方程的基础上,建立了考虑含气量变化的浆体水击模型。运用该模型对某电厂除灰系统管道进行水击计算,并将计算结果与原有水击模型的计算结果进行比较。

### 2 数学模型

在作者提出考虑含气量变化的浆体水击基本方程的基础上,推导出它的特征方程<sup>[11]</sup>:

运动方程

$$\frac{1}{\rho_{m1}} P_x + \dot{V} - g \sin \alpha + \frac{f_m}{2D} V |V| + \frac{F_s}{V_0} \text{sign}(V) = 0 \quad (1)$$

连续方程

$$\frac{P}{\rho_{m1}} + a_{m1}^2 V_x = 0 \quad (2)$$

其中:  $\rho_{m1} = \rho_s S_s + \rho_g S_g + (1 - S_s - S_g) \rho_l$  为混合流体的密度,  $S_s$  为固体颗粒体积浓度,  $S_g$  为气相体积浓度(含气量);  $\rho_s, \rho_g$  和  $\rho_l$  分别为固相、气相和液相的密度;  $a_{m1}$  为考虑含气量的复合管道浆体水击波速,

$$a_{m1} = \sqrt{\frac{K_l / \rho_{m1}}{1 - S_s - S_g + \frac{K_l}{K_s} S_s + \frac{K_l}{K_g} S_g + \frac{K_l D}{E_p e}}}$$

$K_l$  和  $K_g$  分别为液相和气体的体积弹性模量,  $K_s$  为固体颗粒弹性模量,  $D$  为管径,  $E_p$  为管壁的弹性模量,  $e$  为管壁厚。

$f_m$  为浆体液相阻力系数,在过渡区  $f_m = 0.11 \left( \frac{\Delta}{D} + \frac{68}{Re_m} \right)^{0.25}$  其中  $\Delta$  是管道绝对粗糙度,  $Re_m$  为管道雷诺数,是  $\nu, D$ 、浆体粘滞系数  $\mu_m$  和  $\rho_{m1}$  等的函数。

$F_s = \frac{K S_s (\rho_s g - \rho_{m1} g)}{\rho_{m1}} \omega \mu_s$ ,  $\mu_s$  为颗粒摩擦系数;  $\omega$  为非均匀颗粒群体沉速。

$\text{sign}(\text{变量})$  取变量的符号;  $v_0$  为初始稳定流状态的流速;  $\dot{V}$  和  $\dot{P}$  为  $V$  和  $P$  的全导数。

对式(1)因  $\rho_{m1}$  可视为常量,由图1可知

$$P = \rho_{m1} g (H - Z)$$

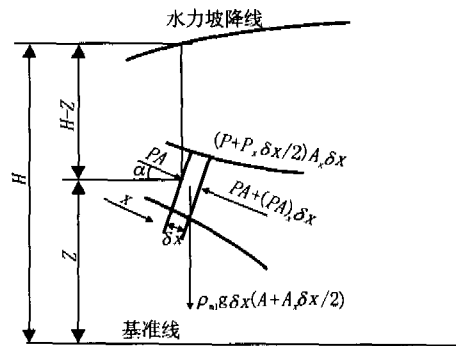


图1 运动方程用图

又因

$$\sin \alpha = - \frac{\partial Z}{\partial x} = - Z_x$$

得到

$$P_x = \rho_{m1} g (H_x - Z_x) = \rho_{m1} g (H_x + \sin \alpha)$$

代入式(1)并化简得:

$$g H_x + \dot{V} + \frac{f_m}{2D} V |V| + \frac{F_s}{V_0} \text{sign}(V) = 0 \quad (3)$$

同理对式(2)

$$P_x = \rho_{ml} g(H_x - Z_x) = \rho_{ml} g(H_x + \sin\alpha)$$

由式(10)可得:

因

$$\dot{P} = VP_x - P_t = V\rho_{ml} g(H_x + \sin\alpha) + \rho_{ml} gH_t$$

$$\lambda = \pm \frac{g}{a_{ml}} \quad (12)$$

代入式(2)并化简得:

式(12)代入式(10)则:

$$\frac{a_{ml}^2}{g} V_x + V(H_x + \sin\alpha) + H_t = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dx}{dt} = \pm a_{ml} + V \quad (13)$$

所以基本方程变为:

$$L_1 = gH_x + \dot{V} + \frac{f_m}{2D} V |V| + \frac{F_s}{V_0} \text{sign}(V) = 0 \quad (5)$$

由于在工程上管道中液体的经济流速为 2~3m/s,而液体中的波速  $a$  约为 1000m/s,所以可认为:

$$L_2 = \frac{a_{ml}^2}{g} V_x + V(H_x + \sin\alpha) + H_t = 0 \quad (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = \pm a_{ml} \quad (14)$$

将这两个方程用一个未知的乘数  $\lambda$  进行线性组合得:

此式为式(11)的适用条件,式(11)具有两个值,将式(12)代入式(11)并与式(14)对应,进行各自分组后,得出两组成对的式子,它们分别用  $C^+$  和  $C^-$  来命名,即为特征方程:

$$L = L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (7)$$

任选两个不同的实数  $\lambda$ ,使式(7)变为与式(5)、式(6)完全相同的两个方程式。

若  $V = V(x, t)$  和  $H = H(x, t)$  是式(5)和式(6)的解,则

$$\frac{dH}{dt} = H_x \frac{dx}{dt} + H_t \quad (8)$$

$$\frac{dV}{dt} = V_x \frac{dx}{dt} + V_t \quad (9)$$

对比式(7)和式(8)、式(9),若:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} + V = \frac{a_{ml}^2}{g} \lambda + V \quad (10)$$

则式(7)变为以下全微分方程:

$$\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + V\lambda \sin\alpha + \frac{f_m}{2D} V |V| + \frac{F_s}{V_0} \text{sign}(V) = 0 \quad (11)$$

$$C^+ \begin{cases} \frac{g}{a_{ml}} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{g}{a_{ml}} V \sin\alpha + \\ \frac{f_m}{2D} V |V| + \frac{F_s}{V_0} \text{sign}(V) = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a_{ml} \end{cases} \quad (15)$$

$$C^- \begin{cases} -\frac{g}{a_{ml}} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} - \frac{g}{a_{ml}} V \sin\alpha + \\ \frac{f_m}{2D} V |V| + \frac{F_s}{V_0} \text{sign}(V) = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a_{ml} \end{cases} \quad (16)$$

在  $C^+$  和  $C^-$  的两组方程中,每组的第一个式子为特征方程,第二个式子为特征线,只有每组的第二个式子得到满足时第一个式子才成立。

### 3 数值计算方法

#### 3.1 特征方程的离散及求解

用一阶差分近似地解特征方程,设点 A 和点 B 的工况  $(V, H, x, t)$  为已知,如图 2 所示。通过 A、B

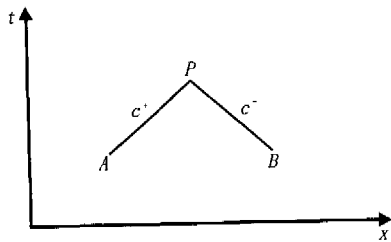


图2 平面上的特征线图

的两条特征线  $C^+$  和  $C^-$  相交于点  $P$ ,  $P$  点的工况未知, 在点  $P$  和  $A$  间利用式(15)线性差分形式, 在点  $P$  和  $B$  间利用式(16)线性差分形式, 可得下列方程式(17)和式(18):

$$\begin{cases} \frac{g}{a_{ml}}(H_P - H_A) + (V_P - V_A) + [\frac{g}{a_{ml}}V_A \sin\alpha + \frac{f_m}{2D}V_A |V_A| + \frac{F_s}{V_0} \text{sign}(V_A)](t_P - t_A) = 0 \\ x_P - x_A = a_{ml}(t_P - t_A) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} -\frac{g}{a_{ml}}(H_P - H_B) + (V_P - V_B) + [-\frac{g}{a_{ml}}V_B \sin\alpha + \frac{f_m}{2D}V_B |V_B| + \frac{F_s}{V_0} \text{sign}(V_B)](t_P - t_B) = 0 \\ x_P - x_B = -a_{ml}(t_P - t_B) \end{cases} \quad (18)$$

$$V_P = 0.5 \{ (V_{i-1} + V_{i+1}) + \frac{g}{a_{ml}} \cdot$$

$$(H_{i-1} - H_{i+1}) - \frac{g\Delta t}{a_{ml}} \sin\alpha (V_{i-1} + V_{i+1}) -$$

$$\frac{f_m \Delta t}{2D} (V_{i-1} |V_{i-1}| + V_{i+1} |V_{i+1}|) -$$

$$\frac{F_s \Delta t}{V_0} \text{sign}(V_{i-1}) - \frac{F_s \Delta t}{V_0} \text{sign}(V_{i+1}) \} \quad (19)$$

$$H_P = 0.5 \{ (H_{i-1} + H_{i+1}) + \frac{g}{a_{ml}} \cdot$$

$$(V_{i-1} - V_{i+1}) - \Delta t \sin\alpha (V_{i-1} + V_{i+1}) -$$

$$\frac{a_{ml} f_m \Delta t}{2gD} (V_{i-1} |V_{i-1}| - V_{i+1} |V_{i+1}|) -$$

$$\frac{a_{ml} F_s \Delta t}{gV_0} \text{sign}(V_{i-1}) + \frac{a_{ml} F_s \Delta t}{gV_0} \text{sign}(V_{i+1}) \} \quad (20)$$

符号的下标表示已知量和未知量的位置。

由四个方程足以求出四个未知量  $t_P, x_P, V_P$  和  $H_P$ , 因而差分方程确切地代表了原微分方程。

在  $x-t$  平面上建立特征网格。把管长  $L$  分成  $N$  等份, 使  $\Delta x = L/N$ , 采用图示均匀网格进行离散, 如果从已知的稳定状态  $t = t_0$ , 开始求解, 特征线交于  $P$  如图3, 它相应于  $C$  断面。按这种考虑, 从式(17)和式(18)中消去  $H_P$  求  $V_P$ , 就得出任意中间断面  $i$  的流速计算公式(19); 消去  $V_P$  求  $H_P$ , 就得任意断面  $i$  的水头计算公式(20)。符号下标的意义如图4。

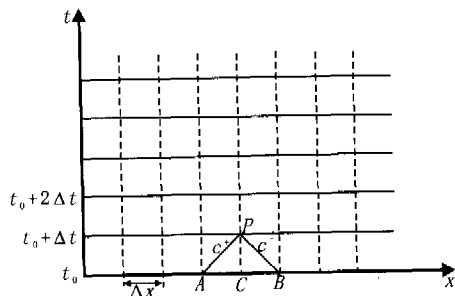


图3  $x-t$  网格划分示意图

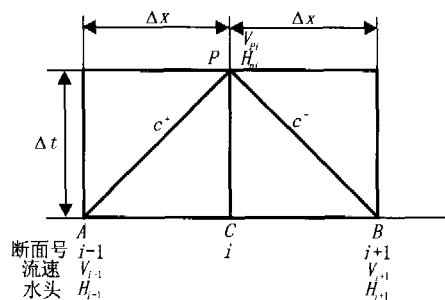


图4 符号下标示意图

### 3.2 边界条件

边界条件的处理类似于清水水击<sup>[5]</sup>, 在此不再叙述。

## 4 工程实例

### 4.1 工程背景

某电厂除灰系统管道布置如图5所示。采用水力输送, 灰水混合浆在  $A$  点于渣浆泵加压后, 通过长 1100m 的平直管道和长 1580m 的爬坡管道爬过一座小山后到达  $D$  点储灰场区。该除灰系统采用的是铸石复合管道, 该铸石复合管由三层材料组成, 外壁为

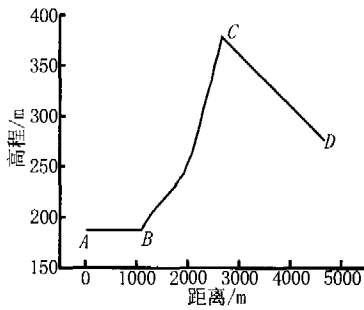


图5 输浆管道布置示意图

钢管,壁厚 0.006m,弹性模量为  $2.12 \times 10^{11}$  Pa;中间为水泥砂浆充填层,充填层厚度为 0.004m,弹性模量为  $2.0 \times 10^{10}$  Pa;内层为铸石管,壁厚 0.02m,弹性模量为  $1.67 \times 10^{11}$  Pa;管内径为 0.4m,铸石层的泊松比为 0.25,充填层的泊松比为 0.1~0.5。对于具有三层复合管道其弹性模量计算公式如下<sup>[12]</sup>:

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{E_1 \ln(D_1/D)}{1 - \mu_1^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{E_2 \ln(D_2/D)}{1 - \mu_2^2} + \frac{E_3 e_3}{D_2} \quad (21)$$

式中  $E_1$  为铸石的弹性模量 Pa,  $E_2$  为混凝土的弹性模量 Pa,  $E_3$  为钢管的弹性模量 Pa,  $D$  为管道内径 mm,  $D_1$  为铸石复合管的外径 mm,  $D_2$  为钢管的内径 mm,  $e_3$  为钢管的壁厚 mm,  $\mu_1$  为铸石的泊松比,  $\mu_2$  为混凝土的泊松比。

#### 4.2 计算初始条件和原始数据

恒定流时的初始条件为:流量  $0.328 \text{ m}^3/\text{s}$ ,水泵的扬程 289m。计算的一些原始数据如下:干灰的密度  $650 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,管壁相对粗糙度 0.000425,灰水体积比为 1:10,含气量 0.00035。

#### 4.3 数值计算结果及分析

若管道出口为敞口,我们计算断电时管线上不同截面压力水头随时间的变化曲线如图 6 所示。由图中曲线可以看出各断面在 3.5 秒后都出现了负压,所以当管道出口为敞口时管内短时间内将出现负压,当液体的压力进一步下降到该温度下液体的汽化压力时,局部液体发生沸腾,在管内形成蒸汽穴,在液柱分离重新聚合或气穴溃灭时可能会产生巨大的冲击力,使管道破坏。针对这种情况建议在管道末端安装手动调节阀。

若管道出口安装手动调节阀,通过计算可得到如下压力水头变化曲线如图 7 所示。从图中曲线可以

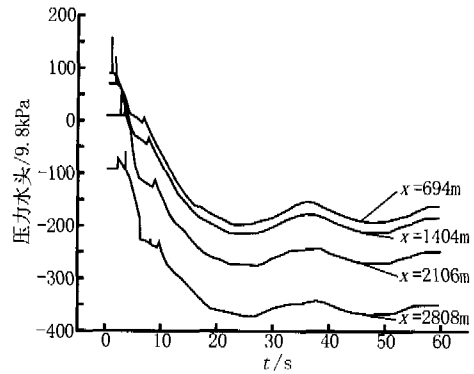


图6 管道出口为敞口时不同截面压力水头随时间的变化曲线

看出,管路沿线的压力水头较敞口时改善了好多,水平管和上升管基本不出现负压了,当然在靠近管线最高点的上升和下降管还会出现一定程度的负压,因此我们建议在最高点设置一个调压井,从而彻底避免管道中负压的出现。此次计算的结果及提出的建议已被某电厂采纳和在实际工程中应用。

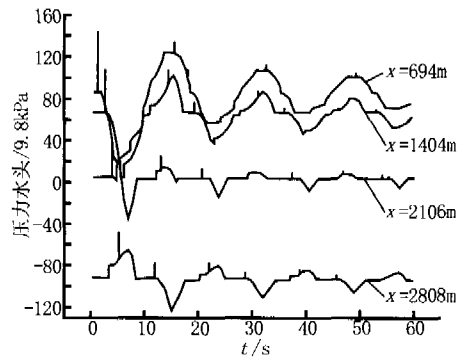


图7 管道出口安装调节阀后不同截面压力水头随时间的变化曲线

同时针对这一工程实例,采用王树人<sup>[1]</sup>清水水击模型和韩文亮<sup>[8]</sup>模型分别进行计算,计算结果分别如图 8 和图 9 所示。

取水击压力波波动强烈的管道断面将三种模型的计算结果进行比较,如图 10 所示。可以看出清水水击模型的压力波振幅最大,其次是两相流,而本文改进后的计算模型,压力波振幅最小。清水模型没有考虑固体物料的掺入对流体弹性模量、容重以及阻力损失的影响,计算结果偏差很大,可以认为清水水击模型基本不能用于两相流的水击计算,原有两相流的模型由于没有考虑对波速影响很大的含气量从而使水头计算值偏大,而改进后的两相流模型较好的考虑了原有模型未考虑的因素,可以用于工程实际计算。

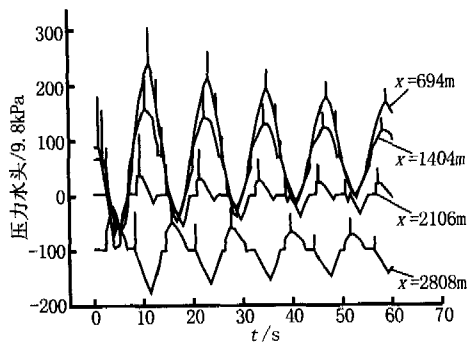


图8 清水水击模型计算结果

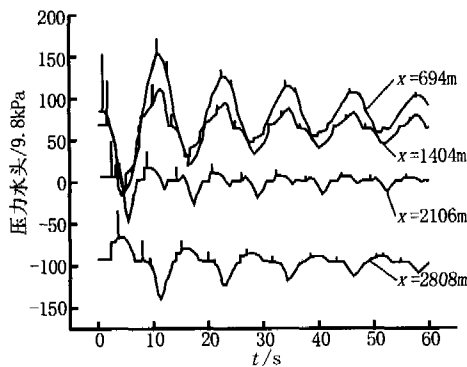


图9 原有浆体水击模型计算结果

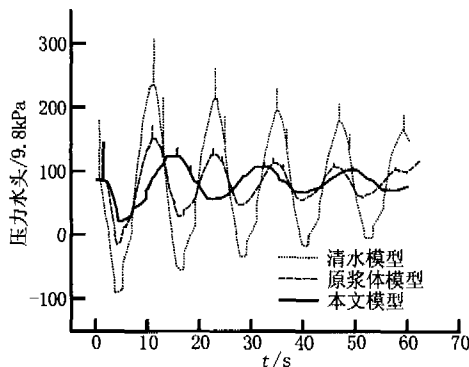


图10 三种水击模型计算结果比较

## 5 结论

(1)利用考虑含气量变化浆体水击模型对某电厂除灰系统的复合管道浆体水击进行了计算,通过计算

提出以下建议:为保证某电厂水力系统的正常运行,应该在管道出口末端设置一个手动调节阀,在山顶最高点设置一个调压井,以防止水泵断电过渡过程管内形成液柱分离,发生液体汽化。该计算结果及工程建议已被某电厂采纳及应用。

(2)通过与其它水击模型进行比较,发现原有清水水击模型和浆体水击模型在用于工程计算时会造成较大的误差,尤其是清水模型误差更大,基本不适合固液两相流的水击计算。采用考虑含气量变化浆体水击模型进行固液两相流水击计算时精度高,可用于工程计算。

## 参 考 文 献:

- [1] 王树人. 水电站建筑物[M]. 北京:清华大学出版社, 1984.
- [2] 金锥. 停泵水水锤及其防护(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
- [3] 王学芳. 工业管道中的水锤[M]. 北京:科学出版社, 1995.
- [4] 周云龙. 发电厂除灰泵水击现象计算与分析[J]. 流体机械, 2001, 29(2): 19-21
- [5] 韩文亮. 含高浓度固体颗粒物料管流中水击规律[J]. 中国科学, 1998, 28(2): 182-192.
- [6] 瓦斯普. 固体物料的管道输送[M]. 北京:水利工业出版社, 1984.
- [7] HAN WEN-LIANG. Water hammer in pipelines with hyper-concentrated slurry flows carrying solid particles [J]. Science in China, 1998, 41(4): 337-347.
- [8] 韩文亮. 伪均质固液两相流水击的数值模拟: I - 理论 [J]. 有色金属, 2000, 52(1): 37-41.
- [9] YANG Jian-dong, WU Rong-qiao. On basic equation of water hammer [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 1996, 8(2): 62-71.
- [10] 韩文亮. 关于浆体水击压力波波速的实验研究 [J]. 水利学报. 1990, (11): 41-47.
- [11] 周云龙. 考虑含气量变化的浆体水击基本方程 [J]. 水动力学研究与进展, A辑, 2005, 20(5): 654-659.
- [12] 周云龙. 复合管道内液-固两相流浆体水击压强计算 [J]. 工程热物理学报. 2004, 25(2): 251-254.