

文章编号:1672-058X(2011)01-0026-03

## 管路水击压力的数值模拟\*

吴峰平, 张贤明, 潘诗浪, 张渊博

(重庆工商大学 废油资源化技术与装备教育部工程研究中心, 重庆 400067)

**摘要:**阐述了管道中水击压力波传播的原理,在考虑管壁和流体粘性摩擦的条件下,建立水击 2-方程模型进行数值模拟,并与经典水击模型进行了对比仿真分析。结果表明:水击过程中,两模型的阀门处最大压力增值和周期均相同,分别为 127 m 水柱和 72 s;2-方程模型的管路压力值逐渐衰减,直至消失。

**关键词:**管路水击;2-方程水击模型;数值模拟

**中图分类号:**TE97

**文献标志码:**A

### 1 水击压力波的传播原理

以阀门关闭为例,假定水击波波速为  $a$ ,管长为  $L$ ,流体流速为  $V$ ,管道压强以水头高度  $H$  表示,则水击在管道中的传播过程分为以下 4 个:

第一个过程:时间段为  $0 \sim L/a$ ,在 0 时刻,阀门完全关闭,阀门出口处流速为 0,压力上升,并沿管道像“波”一样以速度  $a$  向上游传播,沿管压力依次为  $H = H_0 + \Delta H$ ,流速依次为 0。

第二个过程:时间段为  $L/a \sim 2L/a$ ,在  $L/a$  时刻,管中压强均为  $H = H_0 + \Delta H$ ,流速为 0,此时管内压强大于管道进口处的恒压  $H_0$ ,因此,管内流体速度由 0 变为  $-V_0$ ,从进口流出管道,压强由  $H_0 + \Delta H$  变为  $H_0$ ,以  $a$  的速度向阀门处传播。

第三个过程:时间段是  $2L/a \sim 3L/a$ , $2L/a$  时刻,全管压力均为  $H_0$ ,流速为  $-V_0$ ,由于流体具有惯性,所以,管内流体仍以  $-V_0$  的速度向管外流出,管内压强由  $H_0$  变为  $H_0 - \Delta H$ 。

第四个过程: $3L/a \sim 4L/a$  时段,在  $3L/a$  时刻,全管压力均为  $H_0 - \Delta H$ ,流速为 0,所以水流以  $V_0$  的速度再次流进管道,之后压力由  $H_0 - \Delta H$  变为  $H_0$ ,到  $3L/a$  时刻,全管压力和流速分别为  $H_0$  和  $V_0$ ,恢复到水击发生前的状态。

水击压力波以 4 个过程为一周期,反复循环。

### 2 2-方程水击模型

经典水击也称为理想水击,完全忽略了管壁与粘性流体间的摩擦作用,而在实际水击过程中,不可避免的存在两者间的相互作用。考虑摩擦作用,能更准确地描述管内压力变化,因此,近年来对摩擦耦合的水击研究较多,建立的模型是由液体运动方程与连续方程组成的方程组,也叫 2-方程模型<sup>[1,2]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{f|Q|}{2A^2D} = 0 \\ \frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q}{A \partial s} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

第一个方程为水击运动方程,第二个为连续方程,式中, $Q$ —管道瞬时流量, $m^3/s$ ;  $s$ —管道长度, $m$ ;  $H$ —管道压强, $m$ ;  $f$ —沿程摩擦系数;  $D$ —管道内径, $m$ 。

#### 2.1 模型的特征线变换

对于 2-方程模型,是双曲非线性偏微分方程组,特征线法是将偏微分方程转换为常微分方程的有效手

收稿日期:2010-07-10;修回日期:2010-09-25.

\* 基金项目:重庆市科技攻关重点项目(CSTC,2009AB3234);重庆市教委科技资助项目(KJZH08212, KJ1100722, KJ090704).

作者简介:吴峰平(1983-),女,广西贵港人,硕士研究生,从事环保关键技术与设备研究.

段,是由 eray 提出的,为目前计算水击方程组的最常用方法。随着计算机技术的发展,将特征线法与计算机相结合进行求解,所以,将常微分方程组变为差分方程后利用计算机编制程序来计算,可以提高求解的精度。与解析法和图解法相比,特征线法的优点是计算精度高,速度快,边界条件易于处理,收敛较好。将式(1)沿各自的特征线方程进行变换:

$$C^+ \begin{cases} \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{fQ_p | Q |}{2A^2 D} = 0 \\ \frac{ds}{dt} = + a \end{cases} \quad (2)$$

$$C^- \begin{cases} \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{fQ_p | Q |}{2A^2 D} = 0 \\ \frac{ds}{dt} = - a \end{cases} \quad (3)$$

式(2)和式(3)的第一个子方程均在满足第二个子方程的条件下成立,第一个子方程称为“相容方程”,第二个子方程称为特征线方程,代表  $s-t$  平面内相容方程的特征线。式(2)表示发生水击时,水击波(顺波)由上游传至下游的特征关系,式(3)表示水击波(逆波)由下游传至上游的特征关系。对式(2)(3)在时间和空间上都进行均匀的矩形网格离散化,其中  $\Delta s$  为空间步长,  $\Delta t$  为时间步长。如图 1 所示,分别得到沿  $C^+$  和  $C^-$  方向的差分方程及网格图。

$$C^+ \begin{cases} H_p = H_A - \frac{a}{gA}(Q_p - Q_A) - \frac{f\Delta s}{2gDA^2} Q_p | Q_A | \\ s_p - s_A = + a \cdot \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

$$C^- \begin{cases} H_p = H_B + \frac{a}{gA}(Q_p - Q_B) + \frac{f\Delta s}{2gDA^2} Q_p | Q_B | \\ s_p - s_B = - a \cdot \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

所以:

$$\begin{cases} Q_p = (E_p - E_m)/(2B) \\ H_p = (E_p + E_m)/2 \\ E_p = H_A + Q_A(B - R | Q_A |) \\ E_m = H_B - Q_B(B - R | Q_B |) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $B = a/gA$ ,  $R = fa \cdot \Delta t / (2gDA^2)$ 。

### 2.2 边界条件

以流体的进口为管道  $s$  的 0 点,沿 0 点至管道阀门方向为  $s$  的正方向,先求  $s=0$  处的边界条件, $s=0$  处压强即为上游压强  $H_p = H_{p0}$ ,通过  $C^-$ “相容方程”可以求出下一时刻上游的流量,计算公式为:

$$Q_{p0} = \frac{gA}{a}(H_{p0} - H_B) + Q_B \quad (7)$$

至此,乳化液进口处的压强与流量可以逐步算出,同理,乳化液出口(阀门处)的流量与压强可以用  $C^+$ “相容方程”求出。当阀门关闭时,出口乳化液流量为 0,因此阀门处压强为:

$$H_p = H_A + \frac{a}{gA} \cdot Q_A \quad (8)$$

### 2.3 VB 求解模型

为了结合边界条件对方程组(6)利用计算机进行更精确的求解,采用 VB 软件进行编程,程序中采用“自上而下,逐步求解”的方法求解,流程图如图 2 所示,可以求出管路中任意位置任意时刻的压强和流量值。

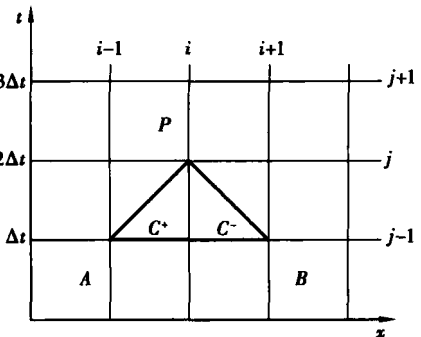


图 1 差分网格图

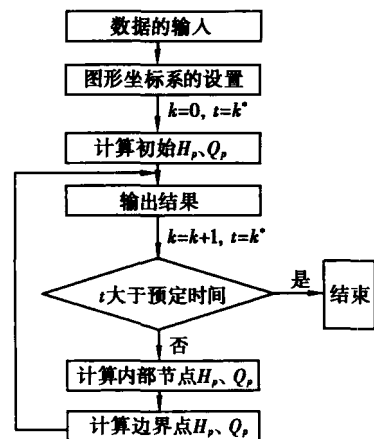


图 2 VB 编程流程图

## 3 算 例

管道的初始压强和流量值为稳定流状态下管内压强和流量,取管长 18 000 m,密度为 1 000 kg/m<sup>3</sup>,水击波波速为 1 000 m/s,液体初始流速 1.32 m/s,管道内径为 0.2 m,2-方程水击模型阀门处的压力变化如图 3 所示。图 4 为 1898 年儒柯夫斯基提出的经典水击计算公式<sup>[3]</sup>:

$$\Delta p = \rho a (V_0 - V) \quad (9)$$

$\Delta p$ —压强增量, N/m<sup>2</sup>;  $\rho$ —流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $V_0$ —流体初速, m/s;  $V$ —水击发生后流体瞬时速度, m/s。

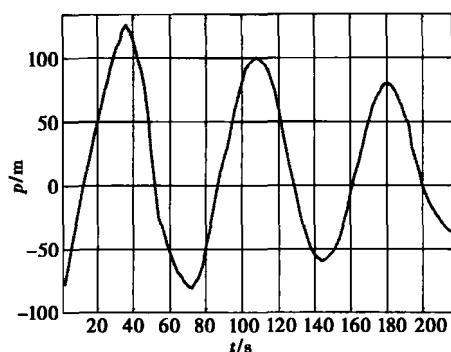


图3 2-方程水击模型阀门处压力变化

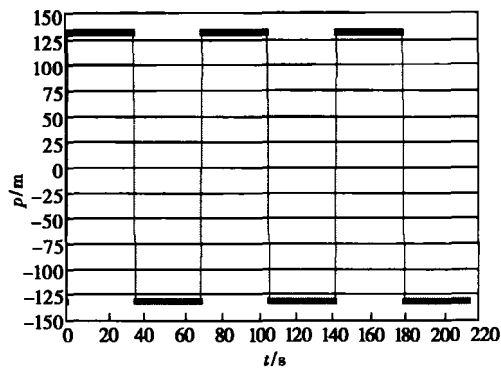


图4 经典水击模型阀门处压力变化

图3和图4均以压强值为0的水平线为稳定流状态下流体进口压头,压强变化的最高值均为127 m水柱。2-方程水击模型阀门处的压强变化呈现出一定的周期性,因为水击波速为1 000 m/s,周期 $T=4L/a$ ,即为72 s,与仿真结果一致。压强的升高与降低比较缓慢,是不断衰减的正弦波,这是由于管道与流体间的摩擦耦合作用,使管内的压力产生损失。由此可以推断:2-方程水击模型阀门处的压力幅值会逐渐减小,压力波直至消失。图4压力波动图为典型的方波循环图,呈现出很强的周期性,与图3一样,周期均是72 s,当阀门关闭时,阀门处压强比稳定流时升高了约127 m,一直持续到第二个过程结束,即36 s的时刻,降压波传至阀门处,压强变为负压,比原来压强增加了约127 m,一直持续到第四个过程结束,即72 s时刻,压力才完成一个周期的传播,不存在压力损失。

## 4 结 论

管路中水击2-方程模型是结合实际工况中存在的摩阻损失建立的,通过计算机的精确求解,并进行了数值模拟,与经典水击模型对比,得出以下结论:

- (1) 经典水击模型阀门处的压力图变为方波类型,存在正压力的突增或负压力的突增,压力波没有衰减。
- (2) 因为2-方程模型考虑了流体与管壁的摩擦耦合作用,所以阀门处的压力升降较缓慢,呈正弦变化,且逐渐衰减,直至消失。
- (3) 在同样的水击波速条件下,经过数值模拟发现,两模型的共同点是:阀门处压力最大峰值数值均为127 m水柱,周期均为72 s。
- (4) 在实际工况中,管路摩擦是存在的,因而导致管路压力损失,所以2-方程模型更符合实际应用。

### 参考文献:

- [1] ASLI K H, NAGHIYEV F B O, HAGHI A K. Some aspects of physical and numerical modeling of water hammer in pipelines [J]. Springer Science & Business Media BV, 2010, 60(4): 677-701
- [2] HAN W L, DONG Z N, CAI H E, et al. Computing equations of water hammer in Pseudo-homogeneous solid-liquid flow and their verification [J]. SCIENCE IN CHINA (Series E), 2000, 43(2): 215-224
- [3] 王玮, 马贵阳, 孙志民. 输油管网系统中水击的研究 [J]. 管道技术与设备, 2010(1): 17-20

## Numerical Simulation for Pressure of Water-Hammer in Pipeline

WU Feng-ping, ZHANG Xian-ming, PAN Shi-lang, ZHANG Yuan-bo

(Engineering Research Center for Waste Oil Recovery Technology and Equipment of Ministry of Education, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** The principle of spread of water-hammer pressure-wave in pipeline is described, and in the condition of viscous friction of wall and fluid, 2-equation model of water-hammer is established and simulated numerically and compared with the classical water-hammer model. The results show that in the process of water hamme, the value of the maximum pressure and period of two models in the valve are the same, which is 127m water column and 72s respectively. And the pressure of 2-equation model is gradually fading until disappearance.

**Key words:** pipeline water hammer; 2- water-hammer equation model; numerical simulation

责任编辑:李翠薇