

# 大跨越管道油气混输压力 波速及响应特性研究\*

史爽<sup>1,2</sup>, 敬加强<sup>1</sup>, 孔祥伟<sup>3</sup>

- (1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 成都 610500;
2. 中国石油西气东输管道公司, 上海 200122;
3. 长江大学石油工程学院, 武汉 430000)

**摘要:** 基于双流体模型,利用小扰动理论,提出了油气混输大跨越管道压力波速模型,利用计算机编程对其求解,通过大跨越管道油气混输实例,得到了以下结论:压力波速的变化受气相影响较大,即使少量气体也能在较大程度上影响压力波速,随混输气量增大,压力波速减小,压力响应时间延长;混输低点气体所承受的压力较混输高点大,从而低点处气相压缩系数小,混输低点较混输高点压力波速增大,压力响应时间相应缩短;在输运管道低点处,气体受到极大压缩,压力波速的变化不明显,几乎收敛于恒定值,在混输管道高点处压力波速变化剧烈。

**关键词:** 压力波速; 油气混输; 大跨越管道; 压力响应时间; 虚拟质量力

**中图分类号:** O352      **文献标志码:** A

**doi:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2016.03.007

## 引 言

在常规地形条件下,长输油气管道采取管沟开挖埋地敷设方式,在山川、河流、道路等特殊地形条件下,需采取穿越或跨越的敷设方式<sup>[1-2]</sup>。当管道较长,且与水平面倾角较大时,现场工程师常称为大跨越管道输送,本文的研究范围属于山川大跨越输送中的一种。在油品的输送中,出站报警压力、注入管道的油品温度、管道系统中任一点的工作压力、油品停输时的静压力以及阀门操作速度等参数均对油品的输送效率起着较大的影响,在油品输送前,这些参数均需优化,以达到精细化输送的目的,压力波速是计算波动压力的重要参数,关系着介质中压力的变化过程,是衔接波动压力与稳态压力的桥梁。与单相流动中的压力波速不同,油气压力波传播速度与流动过程中油气介质的相互掺混、流动的不稳定性等结构特性有关。油品的输运过程中常伴随着气体的出现,尤其在大跨越管道输送中,由于气体的混入,高点的含气率往往是低点含气率的数十倍,使得压力波速沿管道方向时刻变化。常规做法采用均相流动假设,以恒定波速计算油气混输多相波动压力,这与实际情况存在较大偏差,其求解结果并不准确,难以达到精细化输送的要求<sup>[3-4]</sup>。

\* 收稿日期: 2015-10-13; 修订日期: 2016-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(51274170);中国博士后科学基金(面上项目)(2015M572495)

作者简介: 史爽(1986—),女,博士生(E-mail: 420883448@qq.com);

孔祥伟(1982—),男,博士(通讯作者, E-mail: 13880214723@163.com)。

早在 1947 年, Carstensen 等<sup>[5]</sup>就提出了压力波速求解问题, 用实验方法测量了压力波速, 为压力波速的研究拉开了序幕. Wallis 推导出了关于均质流、分层流的波速公式<sup>[6]</sup>. Nguyen 等 (1981 年)<sup>[7]</sup>、Cheng 等 (1985 年) 针对弹状流, 得出了关于弹状流中波色散的理论<sup>[8-9]</sup>. Levitsky 等 (2000 年)<sup>[10]</sup>利用量纲为 1 的一维近似模型, 经 Laplace 变换, 揭示了在薄弹性管壁内聚合液体的压力波比在类似系统内纯液体压力波的扩散要高得多, 但衰减则相对较小. 国内诸多学者在不同领域, 也展开了压力波速的研究, 并取得了较大的进展<sup>[11-14]</sup>, 为油气、浆体等管道流体压力的研究奠定了一定基础. 尽管前人对气-液两相流、气-固及固-液两相流动中压力波的传播特性研究做了不少工作, 但尚未对油气混输大跨越管道压力波速进行系统研究. 由于油气混输时油气界面分布和相间相互作用规律复杂, 使管道中油气混输的压力波速计算难度陡然增大. 本文考虑了油气混输管道的大跨越、虚拟质量力及气体滑脱等因素, 在前人的基础上, 系统地研究油气混输大跨越管道压力波速及其响应时间.

## 1 模型建立

### 1.1 油气运动模型

图 1 为油气两相混输流动简图, 从低点 A 经过加压向高点 B 流动, 管道与水平面的夹角为  $\theta$ , 在油气混输沿程管道中, 取  $dx$  为油气混输的控制体, 微元段  $dx$  的压力降设定为  $dp$ .

如图 1 所示, 建立跨越管道的油气混输运动方程为

$$\frac{dp}{dx} = \rho_m g \sin \theta + f \frac{\rho_m v_m^2}{2D} + \rho_m v_m \frac{dv_m}{dx}, \quad (1)$$

式中,  $p$  为油气混输沿程压力, MPa;  $x$  为油气混输沿程距离, m;  $\rho_m$  为油气混输平均密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\theta$  为油气混输管道与水平面倾角;  $D$  为油气混输管道的有效管径, m;  $v_m$  为油气混输平均流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $f$  为摩擦因数.

按 Orkiszewski 流型的划分准则, 可将维数  $L_{\text{slu}}$ ,  $L_{\text{bub}}$ ,  $L_{\text{mix}}$  分别定义如下:

$$L_{\text{slu}} = 50 + (36 N_{\text{vis}} \cdot q_L / q_G), \quad L_{\text{bub}} = 1.071 - (0.727 7 v_m^2 / D),$$

$$L_{\text{mix}} = 75 + 84 (N_{\text{vis}} \cdot q_L / q_G)^{0.75},$$

式中,  $N_{\text{vis}} = v_{\text{sl}} (\rho_L / (g \sigma))^{0.25}$ ;  $q_L$  为油相体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_G$  为气相体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

在一定温度、压力下气体体积流量表示为

$$q_G = q_{\text{ose}} (R_{\text{pro}} - R_{\text{slo}}) B_G, \quad (2)$$

式中,  $R_{\text{pro}}$  为生产气油比,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $R_{\text{slo}}$  为原油溶解气油比,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $B_G$  为天然气体积系数;  $q_{\text{ose}}$  为地面脱气原油体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

泡状流流型的判定准则为:  $q_G / q_m < L_{\text{bub}}$ ;

弹状流流型的判定准则为:  $q_G / q_m > L_{\text{bub}}$ ,  $N_{\text{vis}} < L_{\text{slu}}$ ;

过渡流流型的判定准则为:  $L_{\text{mix}} > N_{\text{vis}} > L_{\text{slu}}$ ;

雾状流流型的判定准则为:  $N_{\text{vis}} > L_{\text{mix}}$ ,

其中,  $q_m$  为油气两相平均体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

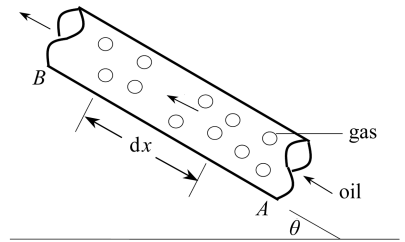


图 1 管道油气两相流动示意图  
Fig. 1 The schematic of oil-gas  
2-phase pipe flow

在泡状流流型、雾状流流型中,油气两相平均混合密度表示为

$$\rho_m = (1 - \phi)\rho_L + \phi\rho_G, \quad (3)$$

式中,  $\rho_L$  为油相密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_G$  为气相密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

在泡状流流型中,气相含气率表示为

$$\phi = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{q_m}{v_{\text{slp}}A} - \sqrt{\left( 1 + \frac{q_m}{v_{\text{slp}}A} \right)^2 - \frac{4q_G}{v_{\text{slp}}A}} \right], \quad (4)$$

式中,  $v_{\text{slp}}$  为气体滑脱速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $A$  为横截面积,  $\text{m}^2$ 。

在弹状流流型中,油气两相平均混合密度表示为

$$\rho_m = (w_m + \rho_L v_{\text{slp}}A) / (q_m + v_{\text{slp}}A) + c_0 \rho_L, \quad (5)$$

式中,  $w_m$  为油气混合物平均质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $c_0$  为油气分配系数。

在弹状流流型中,气体含气率为

$$\phi = q_G / (q_G + q_L). \quad (6)$$

在过渡流流型中,油气两相平均混合密度为

$$\rho_m = \frac{L_{\text{mix}} - N_{\text{vis}}}{L_{\text{mix}} - L_{\text{slu}}} \rho_{\text{ms}} + \frac{N_{\text{vis}} - L_{\text{slu}}}{L_{\text{mix}} - L_{\text{slu}}} \rho_{\text{mm}}, \quad (7)$$

式中,  $\rho_{\text{ms}}$  为弹状流流型中油气平均混合密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_{\text{mm}}$  为油气雾状流流型中油气平均混合密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## 1.2 双流体模型

气相连续守恒方程表示为

$$\frac{\partial(\phi_G \rho_G A)}{\partial t} + \frac{\partial(\phi_G \rho_G v_G A)}{\partial x} = 0; \quad (8)$$

液相连续守恒方程表示为

$$\frac{\partial(\phi_L \rho_L A)}{\partial t} + \frac{\partial(\phi_L \rho_L v_L A)}{\partial x} = 0; \quad (9)$$

气相动量守恒方程表示为

$$\frac{\partial(\phi_G \rho_G v_G A)}{\partial t} + \frac{\partial(\phi_G \rho_G v_G^2 A)}{\partial x} + A \phi_G \frac{\partial p}{\partial x} = -\phi_G F_v A; \quad (10)$$

液相动量守恒方程表示为

$$\frac{\partial(\phi_L \rho_L v_L A)}{\partial t} + \frac{\partial(\phi_L \rho_L v_L^2 A)}{\partial x} + A \phi_L \frac{\partial p}{\partial x} = -\phi_G F_v A, \quad (11)$$

式中,  $v_G$  为气相速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $v_L$  为液相速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $F_v$  为虚拟质量力。

虚拟质量力<sup>[12]</sup>可以表示为

$$F_v = C_{\text{vm}} \rho_L \left[ \frac{\partial(v_L - v_G)}{\partial t} + v_G \frac{\partial(v_L - v_G)}{\partial x} \right], \quad (12)$$

式中,  $C_{\text{vm}}$  为虚拟质量力系数。

## 1.3 压力响应时间模型

油气混输过程中的压力响应时间为压力沿油气混输管道传播所需的时间,利用管道长度与压力波速的关系,建立如下压力响应时间模型:

$$t(H_i) = \sum_i \frac{H_i}{c_i}, \quad i \leq n, \quad (13)$$

式中,  $t(H_i)$  为混输管道第  $i$  网格管长的压力响应时间,  $s$ ;  $H_i$  为混输管道第  $i$  网格的长度,  $m$ ;  $c_i$  为混输管道第  $i$  网格管长的压力波速,  $m/s$ 。

## 2 模型求解及验证

### 2.1 油气运动模型求解

对式(1)运动方程的求解可采用 Runge-Kutta(龙格-库塔)方法,整理式(1)可得

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = F(x, p), \\ p(x_0) = p_0. \end{cases} \quad (14)$$

已知起点处的压力  $p_0$  构成初值条件,对管长  $x$  取步长为  $h$ ,由已知的初值  $(x_0, p_0)$  和函数  $F(x, p)$ ,在节点  $x_1 = x_0 + h$  处的压力值可表示为

$$p_1 = p_0 + \Delta p = p_0 + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4). \quad (15)$$

式(15)中  $k_1, k_2, k_3, k_4$  可以表示为

$$\begin{cases} k_1 = F(x_0, p_0), k_2 = F\left(x_0 + \frac{h}{2}, p_0 + \frac{h}{2}k_1\right), \\ k_3 = F\left(x_0 + \frac{h}{2}, p_0 + \frac{h}{2}k_2\right), k_4 = F(x_0 + h, p_0 + hk_3). \end{cases} \quad (16)$$

压力波速求解先划分管道网格,利用 Runge-Kutta 方法求得每个网格的油气混输过程中的持气率、油相含量及压力等参数,将这些参数代入双流体模型,从而求得油气混输过程中的压力波速及响应时间,具体求解流程如图 2 所示。

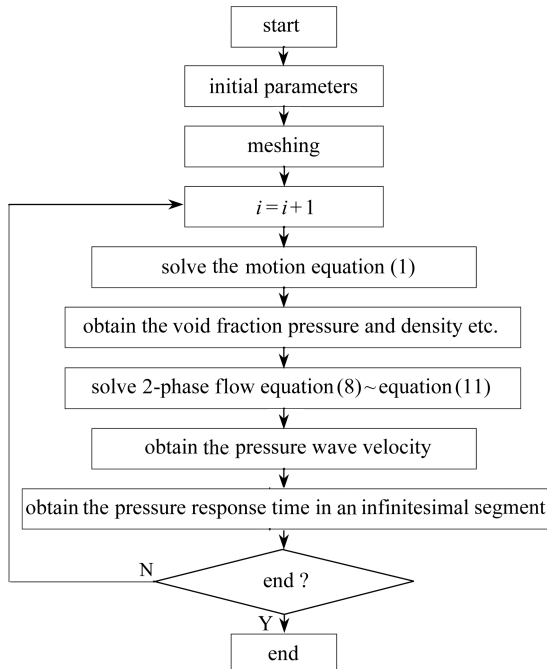


图 2 波速求解流程图

Fig. 2 The solving flowchart for he pressure wave velocity

## 2.2 压力波速模型求解

对式(8)扰动后的气相连续方程为

$$\rho_G(w - Kv_G)\delta\phi_G + \left(\frac{\phi_G}{c_G^2} + \frac{\phi_G \rho_G DC_1}{Ee}\right)(w - Kv_G)\delta p - w\phi_G \rho_G \delta v_G = 0, \quad (17)$$

式中,  $C_1$  为管道支撑方式系数,  $K$  为波数,  $w$  为频率,  $e$  为粗糙度,  $m$ ,  $E$  为管道弹性模量。

对式(9)扰动后的液相连续方程为

$$-\rho_L(w - Kv_L)\delta\phi_G + \phi_L\left(\frac{1}{c_L^2} + \frac{\rho_L DC_1}{Ee}\right)(w - Kv_L)\delta p - K\phi_L \rho_L \delta v_L = 0. \quad (18)$$

对式(10)扰动后的气相动量方程为

$$[(\phi_G \rho_G + \phi_G \rho_L C_{vm})(w - Kv_G)]\delta v_G - K\phi_G \delta p - [\phi_G \rho_L C_{vm}(w - Kv_G)]\delta v_L = 0. \quad (19)$$

对式(11)扰动后的液相动量方程为

$$[(\phi_L \rho_L + \phi_G \rho_L C_{vm})(w - Kv_L)]\delta v_L - K\phi_G \delta p - [\phi_G \rho_L C_{vm}(w - Kv_G)]\delta v_L = 0. \quad (20)$$

借助 Taylor(泰勒)定理,将式(17)~(20)处理为向量形式,可统一表示为

$$F_i(\mathbf{X} + \delta\mathbf{X}) = F_i(\mathbf{X}) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \delta x_j + O(\delta\mathbf{X}^2) \quad (i = 1, 2, 3, 4). \quad (21)$$

令  $J = \sum_{j=1}^N \partial F_i / \partial x_j$ , 式(21)变形为

$$F(\mathbf{X} + \delta\mathbf{X}) = F(\mathbf{X}) + J \cdot \delta\mathbf{X} + O(\delta\mathbf{X}^2), \quad (22)$$

式中,  $\mathbf{X} = X_0 + \delta\mathbf{X} \cdot \exp[i(\omega t - Kx)]$ ,  $K$  为波数。

根据方程组有解的条件,式(17)~(22)可转换为

$$\begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 & M_{24} \\ 0 & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ 0 & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{vmatrix} = 0, \quad (23)$$

式中

$$\begin{cases} M_{11} = \rho_G(w - Kv_G), & M_{21} = -\rho_L(w - Kv_L), \\ M_{12} = \phi_G\left(\frac{1}{c_G^2} + \frac{\rho_G DC_1}{Ee}\right)(w - Kv_G), \\ M_{22} = \phi_L\left(\frac{1}{c_L^2} + \frac{\rho_L DC_1}{Ee}\right)(w - Kv_L), & M_{32} = -K\phi_G, \\ M_{42} = -K\phi_L, & M_{13} = -K\phi_G \rho_G, & M_{33} = \phi_G(\rho_G + \rho_L C_{vm})(w - Kv_G), \\ M_{43} = -\phi_G \rho_L C_{vm}(w - Kv_G), & M_{24} = -K\phi_L \rho_L, \\ M_{34} = -\phi_G \rho_L C_{vm}(w - Kv_G), \\ M_{44} = -\phi_L \rho_L(w - Kv_L) + \phi_G \rho_L C_{vm}(w - Kv_G). \end{cases} \quad (24)$$

将式(23)整理,可得到压力波波速方程为

$$c(p, \phi, w, T) = \frac{|w/R^+(K) - w/R^-(K)|}{2}, \quad (25)$$

式中,  $R^+(K)$  为复系数方程  $K$  波数的实部;  $R^-(K)$  为复系数方程  $K$  波数的虚部;  $K$  为波数;  $c_G$

为气体压力波速, m/s.

泡状流中虚拟质量力系数<sup>[13-14]</sup>表示为

$$C_{vm} = \frac{1 + 2\phi_G}{2\phi_L}. \quad (26)$$

弹状流中虚拟质量力系数<sup>[13-14]</sup>表示为

$$C_{vm} = 3.3 + 1.7 \frac{3L_q - 3R_q}{3L_q - R_q}, \quad (27)$$

式中,  $R_q$  为气泡宽度, m;  $L_q$  为气泡长度, m.

### 2.3 模型验证

由于大跨越管道油气混输的压力波速研究较少, 现场油气混输管道的压力波速测量需要改造, 给现场油气混输造成安全隐患. 因此, 本文考虑虚拟质量力计算两相波速与文献[15]的实验结果进行对比, 对比结果如图3所示, 具有一致性.

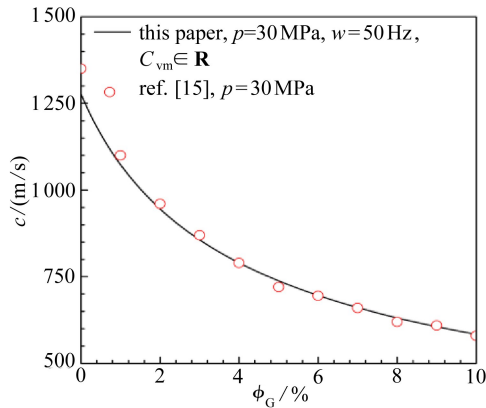


图3 与前人实验结果对比<sup>[15]</sup>

Fig. 3 Comparison between the calculation results and the experimental data<sup>[15]</sup>

## 3 实例分析

以兰成渝成品油输送过程中某段管道的油气混输为例, 分析管道长为 3 000 m, 管径为  $\phi 800$  mm, 管道高点气体排出量为 200 L/s, 管道与水平面的倾角为  $30^\circ$ , 管道的 Poisson(泊松) 比为 0.3, 管道的弹性模量为  $2.07E+11$ , 高点(即图4中 outlet)输出压力为 1.5 MPa, 低点(即图4中 inlet)输入压力为 18.5 MPa, 油品输量为 285 L/s, 油气输送简图如图4所示, 其中压力扰动源为阀门开关产生的瞬变压力.

图5示出了随混气量增大( $q_G = 20, 100, 300, 500$  L/s), 含气率逐渐增大的变化趋势. 沿混输管道从低点(low)至高点(high), 管道含气率逐渐增大. 管道混输低点与混输高点相比, 气相呈现高压状态, 气体体积受到压缩, 含气率较小, 沿管道低点向高点运移的过程中, 气体体积逐渐膨胀, 含气率呈现增大的趋势. 图6示出了随出口压力增大( $p_{out} = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$  MPa), 含气率逐渐减小的变化规律. 沿油气混输管道从低点至高点, 管道含气率逐渐增大. 在长跨越管道中, 近低点处含气率变化不大, 但气体运移至高点处, 气体体积急剧膨胀, 这是由于气体在低点所受的压力急剧减小的缘故.

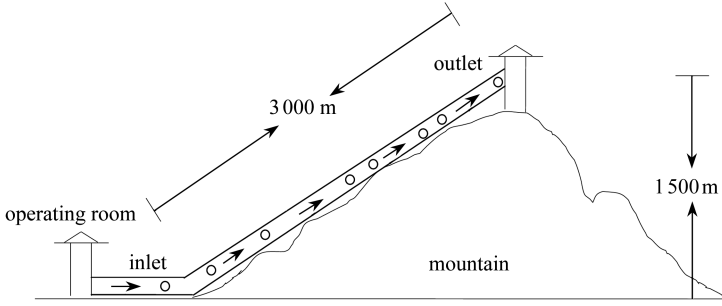


图4 大跨越管道油气混输简图

Fig. 4 The oil-gas mixing transportation in large span pipeline

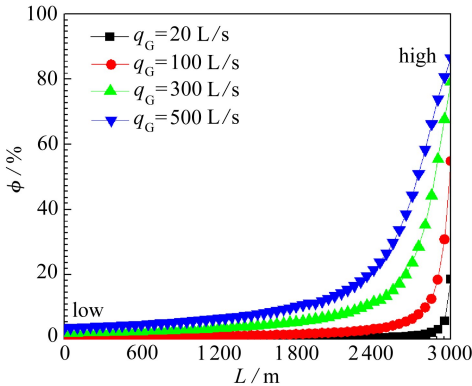


图5 混气量对含气率的影响

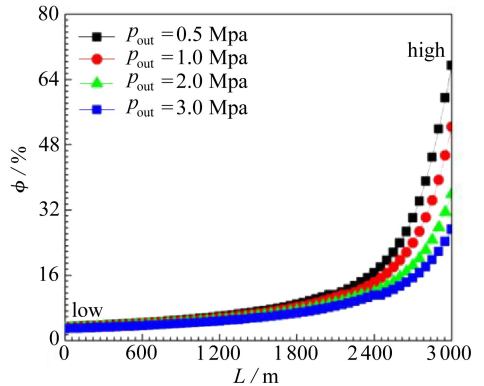
Fig. 5 The effect of mixed gas  $q_G$  on void fraction  $\phi$ 

图6 出口压力对含气率的影响

Fig. 6 The effect of outlet pressure  $p_{out}$  on void fraction  $\phi$ 

### 3.1 混输量对压力波速及压力响应时间的影响

图7及图8示出了随混气量增大( $q_G = 20, 100, 300, 500$  L/s),沿管道低点向高点方向,压力波速逐渐减小及压力响应时间逐渐延长的变化趋势.压力波速的变化受混气量的影响较大,即使少量气体也能较大程度上影响压力波速.在输运管道低点处,由于压力高达约16 MPa,气体受到高度压缩,压力波速的变化不明显,几乎收敛于960 m/s,在混输管道高点处,压力波速减小至32 m/s.压力响应时间与压力波速呈现相反趋势,随混气量的增大压力波速呈现减小趋势,而压力响应时间呈现延长的趋势.

### 3.2 混输管道出口压力对压力波速及压力响应时间的影响

图9及图10示出了随出口压力增大( $p_{out} = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$  MPa),沿油气混输管道低点向高点,压力波速逐渐增大及压力响应时间逐渐缩短的变化趋势.随混输管道高点(即出口)压力增大,压力波速呈现增大的趋势,但对混输管道低点的压力波速影响不大.压力波速对油气混相的压力、含气率较敏感,沿管道低点向高点方向,压力逐渐降低,气相含气率逐渐增大,因此压力波速降低,压力响应时间逐渐延长.混输高点压力增大,相当于对整个油气混输管道整体加压,因此压力波速呈现整体增大的趋势,而压力响应时间呈现缩短的趋势.

### 3.3 系统压力对压力波速的影响

图11示出了在一定含气率条件下( $\phi = 0.05, 0.15, 0.35, 0.55$ ),系统压力对压力波速的影响.随系统压力增大,压力波速呈现增大趋势,当系统压力到达一定范围时,压力波速的增加



趋势变缓.系统压力的增大,使得气体的可压缩性减小,因此,油气两相的压力波速增大,当系统压力增大到一定范围时,气体的可压缩性变化幅度较小,因此,压力波速变化趋于平缓。

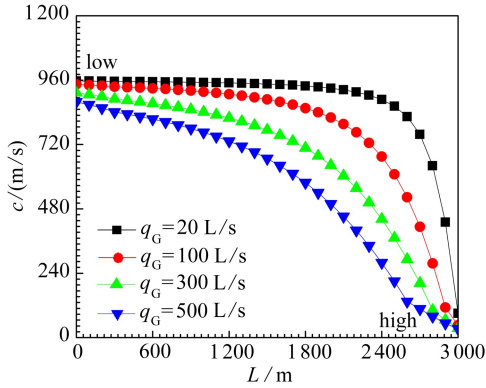


图 7 混气量对压力波速的影响

Fig. 7 The effect of mixed gas  $q_G$   
on wave velocity  $c$

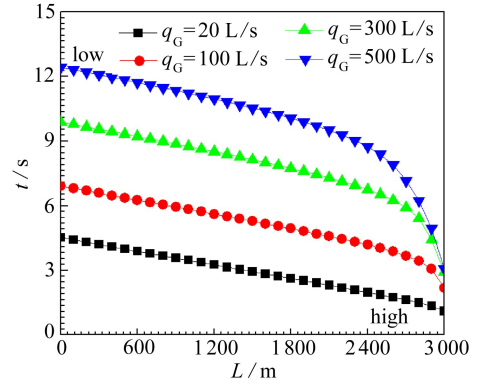


图 8 混气量对压力响应时间的影响

Fig. 8 The effect of mixed gas  $q_G$   
on pressure response time  $t$

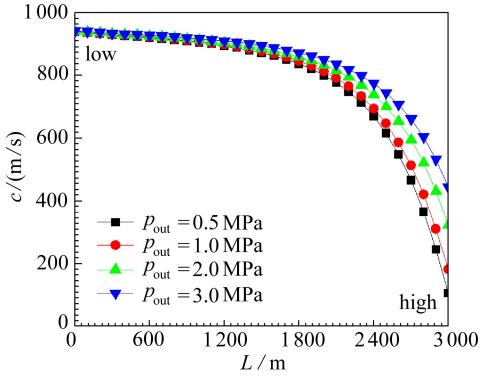


图 9 混输管道出口压力对压力波速的影响

Fig. 9 The effect of outlet pressure  $p_{out}$   
on wave velocity  $c$

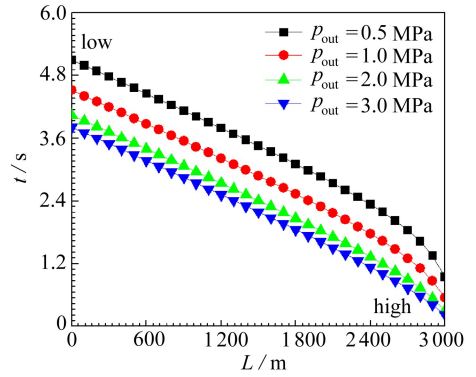


图 10 混输管道出口压力对压力响应时间的影响

Fig. 10 The effect of outlet pressure  $p_{out}$   
on response time  $t$

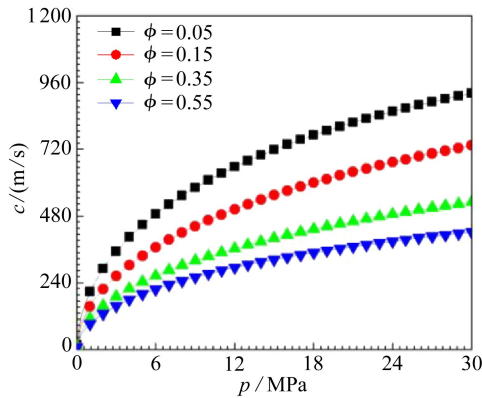


图 11 系统压力对压力波速的影响

Fig. 11 The effect of system pressure  $p$  on wave velocity  $c$



## 4 结 论

基于双流体模型,通过对大跨越混输管道油气压力波速建模,以一个具体工程实例编程计算,主要得到以下结论:

1) 压力波速及压力响应时间受气体的影响较大.混输管道中混入少量的气体后,压力波速呈现显著降低的趋势,压力响应时间呈现显著延长的趋势.随混输管道中含气率增大,压力波速总是呈减小趋势,压力响应时间总是呈现延长趋势.

2) 随油气混输管道所受压力增大,气体不可压缩性增强,压力波速逐渐增大,压力响应时间逐渐缩短,压力波速及其响应时间的变化趋势变得缓慢;对混输管道出口处加压,相当于对混输管道整体加压,压力响应时间缩短,反之,压力响应时间延长.

3) 具体工程实例中,在混输低点处,气体受到的高压达 16 MPa.因此,气体受到高度压缩,压力波速增大,压力响应时间呈现缩短趋势,但变化不明显,几乎收敛于 960 m/s;在混输高点处,压力波速及响应时间变化较为明显.

### 参考文献(References):

- [1] 王聚锋,朱永东,朱凯,贺三.原油海管掺气混输工艺模拟分析[J].管道技术与设备,2010(6):51-54.(WANG Ju-feng, ZHU Yong-dong, ZHU Kai, HE San. Analysis of mixed transportation process simulation of one oil subsea pipeline after injected gas[J]. *Pipeline Technique & Equipment*, 2010(6): 51-54.(in Chinese))
- [2] 吴明,刘松林,安秉威,陈世一,卢涛.油气水混输管路计算模型[J].抚顺石油学院学报,1999,19(1):48-51.(WU Ming, LIU Song-lin, AN Bing-wei, CHEN Shi-yi, LU Tao. The calculation model of oil-gas-water mixed transportation pipeline[J]. *Journal of Fushun Petroleum Institute*, 1999,19(1): 48-51.(in Chinese))
- [3] 解世伟,赵勇.湖南长岭-株洲成品油管道顺序输送混油量的计算与分析[J].石油库与加油站,2014,23(2):18-21.(XIE Shi-wei, ZHAO Yong. Calculation and analysis on mixed oil quantity of batch transportation in Changling-Zhuzhou product oil pipeline[J]. *Oil Depot & Gas Station*, 2014, 23(2): 18-21.(in Chinese))
- [4] 于涛.油品混合输送在西部原油管道的应用[J].油气储运,2013,32(2):162-165.(YU Tao. Application of oil mixed transportation in western crude oil pipeline[J]. *Oil & Gas Storage & Transportation*, 2013, 32(2): 162-165.(in Chinese))
- [5] Carstensen E L, Foldy L L. Propagation of sound through a liquid containing bubbles[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1947, 19(3): 481-501.
- [6] Wallis G B. *One-Dimensional Two-Phase Flow*[M]. New York: McGraw-Hill, 1969: 143-149.
- [7] Nguyen D L, Winter E R F, Greirer M. Sonic velocity in two-phase system[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1981, 7(3): 311-320.
- [8] Cheng L Y, Drew D A, Lahey R T. An analysis of wave propagation in bubbly two component two-phase flow[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1985, 107(2): 400-402.
- [9] Ruggles A E, Lahey R T, Drew D A, Scarton H A. An investigation of the propagation of pressure perturbations in bubbly air/water flows[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1988, 110(2): 494-499.

- [10] Levitsky S, Bergman R, Haddad J. Acoustic waves in thin-walled elastic tube with polymeric solution[J]. *Ultrasonics*, 2000, **38**(1/8): 857-859.
- [11] 孔祥伟, 林元华, 邱伊婕. 控压钻井中三相流体压力波速传播特性[J]. 力学学报, 2014, **6**(6): 887-895.(KONG Xiang-wei, LIN Yuan-hua, QIU Yi-jie. Research on pressure wave propagation characteristics in three-phase flow during managed pressure drilling[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, **6**(6): 887-895.(in Chinese))
- [12] 刘磊, 王跃社, 周芳德. 油气两相流压力波传播速度研究[J]. 应用力学学报, 1999, **16**(3): 22-27.(LIU Lei, WANG Yao-she, ZHOU Fang-de. Propagation speed of pressure wave in gas-liquid two-phase flow[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1999, **16**(3): 22-27.(in Chinese))
- [13] 黄飞, 白博峰, 郭烈锦. 水平管内油气两相泡状流压力波数学模型及其数值模拟[J]. 自然科学进展, 2004, **14**(4): 344-349.(HUANG Fei, BAI Bo-feng, GUO Lie-jin. Mathematical model and numerical modeling of pressure wave in gas and liquid two-phase bubbly flow in horizontal pipe[J]. *Progress in Natural Science*, 2004, **14**(4): 344-349.(in Chinese))
- [14] 白博峰, 黄飞, 郭烈锦, 王先元. 相间作用对泡状流压力波传播特性的影响[J]. 核动力工程, 2003, **24**(6S2): 70-74. (BAI Bo-feng, HUANG Fei, GUO Lie-jin, WANG Xian-yuan. Effect of interphase forces on the propagation of pressure wave in air-liquid bubbly flow[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2003, **24**(6S2): 70-74.(in Chinese))
- [15] LIU Xiu-shan, LI Bo, YUE Yu-quan. Transmission behavior of mud-pressure pulse along well bore[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2007, **19**(2): 236-240.

# Research of Pressure Wave Velocity and Response Time for Oil-Gas Mixing Transportation in Large Span Pipelines

SHI Shuang<sup>1,2</sup>, JING Jia-qiang<sup>1</sup>, KONG Xiang-wei<sup>3</sup>

(1. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Southwest Petroleum University), Chengdu 610500, P.R.China;*

2. *PetroChina West to East Gas Pipeline Company, Shanghai 200122, P.R.China;*

3. *Petroleum Engineering College, Yangtze University, Wuhan 430000, P.R.China)*

**Abstract:** Based on the 2-fluid model and the theory of small perturbation, the pressure wave velocity model was put forward for the oil-gas mixing transportation in large span pipelines, and the computer program to solve this model was built. The conclusions based on a practical engineering example are as follow: in the process of multiphase mixing large span transportation, the change of pressure wave velocity is more influenced by the gas phase, even a small amount of mixed gas can affect the pressure wave velocity dramatically. With the increase of mixed gas, the pressure wave velocity decreases and the pressure response time extends. The pressure at the low point is higher than at the high point, so the gas compressibility factor at the low point is smaller than at the high point and the pressure wave velocity at the low point is bigger, meanwhile, the pressure response time at the low point is shorter. Moreover, at the low point of mixed transportation the mixed gas is compressed tremendously, so the pressure wave velocity there changes little and almost remains at a constant value; in contrast, the pressure wave velocity changes easily at the high point.

**Key words:** pressure wave velocity; oil-gas mixing transportation; large span pipeline; pressure response time; virtual mass force

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(51274170); China Post-doctoral Science Foundation(General Program)(2015M572495)

引用本文/Cite this paper:

史爽, 敬加强, 孔祥伟. 大跨越管道油气混输压力波速及响应特性研究[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(3): 290-300.

SHI Shuang, JING Jia-qiang, KONG Xiang-wei. Research of pressure wave velocity and response time for oil-gas mixing transportation in large span pipelines[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(3): 290-300.