

文章编号: 1000-8055(2010)04-0754-07

泵间管气液两相流压力波传播速度数值研究

陈二锋¹, 厉彦忠^{1,2}, 应媛媛¹

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049;

2. 西安交通大学 能源与动力工程学院 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 采用 ANSYS CFX 热相变模型数值模拟了泵间管气氧和液氧的混合冷凝过程, 并应用整体平均两流体模型建立了气液两相流压力波的色散方程, 系统研究了泵间管两相压力波的传播速度特性. 计算表明: 泵间管气液两相波速随空泡份额的增加先减小而后在弹状流区域略微增大, 且两相波速随扰动角频率增加而增大. 增加液氧流量或降低进口气氧温度, 气液的冷凝效果增强, 沿管流的空泡份额减小, 气液两相波速增大.

关 键 词: 泵间管; 冷凝; 两相压力波; 色散方程; 传播速度

中图分类号: TK123

文献标识码: A

Numerical investigation on pressure wave propagation speed of gas-liquid two-phase flow in pump pipeline

CHEN Er-feng¹, LI Yan-zhong^{1,2}, YING Yuan-yuan¹

(1. School of Energy and Power Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,
School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the thermal phase change model in computational fluid dynamics code ANSYS CFX, the mixing condensation process of gaseous oxygen and liquid oxygen in pump pipeline was numerically simulated. Moreover, the dispersion equation of two-phase pressure wave propagation was derived via the ensemble average two-fluid model, and was used to predict the pressure wave propagation speed in pump pipeline. The results indicate that, with the increase of void fraction, the two-phase pressure wave propagation speed in pump pipeline first decreases and then slightly increases in slug flow, and the propagation speed increases as angular frequency enlarges. When liquid oxygen mass flow rate increases or inlet gaseous oxygen temperature decreases, the condensation effect of gaseous oxygen in pump pipeline enhances and the average void fraction along the flow direction decreases, thus producing large pressure wave propagation speed.

Key words: pump pipeline; condensation; two-phase pressure wave;
dispersion equation; propagation speed

收稿日期: 2009-03-27; **修订日期:** 2009-05-27

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20060698021)

作者简介: 陈二锋(1980-), 男, 河南漯河人, 博士生, 主要从事低温两相流动及传热研究.

液体运载火箭在飞行期间,火箭结构和火箭发动机及管路系统之间的振动耦合可能引起整个火箭的纵向振动(POGO),这种不稳定振动对火箭本身或有效载荷危害极大,可能造成箭上敏感元件及仪器设备受损或结构超限。对于载人航天,还会使航天员遭受到超出人体承受能力的振动。发动机结构动态特性分析是液体运载火箭研制过程中必不可少的一项内容。作为当今液体火箭发动机技术的领先水平,高压补燃液氧煤油发动机由于具有无毒、无污染、高性能、低成本和使用维护方便等优点,而备受各航天大国关注。在高压补燃液氧煤油发动机系统中,自预压涡轮泵出口处的少量富氧燃气经集合器通过管壁小孔注入泵间管,继而发生气氧在液氧主路中的混合冷凝过程。这是一个典型的低温气液两相流动与传热问题,其泵间管的两相波动特性作为发动机结构动态特性分析的一部分值得深入研究。

压力波是指流场中某一局部区域或某一点处发生的微小扰动传递到其他区域的一个波动传播过程。在气液两相流中,由于气相的可压缩性、气液界面的不断变化、以及两相间质量交换、动量和能量交换等影响的存在,使得气液两相流动中压力波的传播问题十分复杂。在理论研究方面,Wallis^[1]分析了气液两相压力波的传播机理,并采用均质流模型理论推导了分层流和泡状流的两相波速。Nguyen等^[2]应用弹性模型研究了各种流型下两相波速随空泡份额的变化规律,结果与Henry等人^[3]的实验值符合较好,但高空泡份额时两相波速偏差较大。近年来,两流体模型由于能确切描述气液两相间的质量、动量及能量交换,而被广泛应用于模化气液两相流动中的压力波动。Ruggles等^[4],Lee等^[5],黄飞等^[6]均采用两流体模型模化分析了气液两相流中压力波的传播速度及衰减特性,并与实验结果相比取得了较好的一致性。然而,目前的研究主要集中在以水-空气和水-水蒸气为介质的系统中,而在低温气液两相流领域却仍未涉及。

本文采用ANSYS CFX所特有的热相变模型,数值模拟了泵间管中气氧和液氧的混合冷凝过程,分析了管路中空泡份额、液氧温度和气、液氧流速等流动参数的变化规律;在此基础上,运用相对完善的整体平均两流体模型,依据小扰动原理和一阶线性齐次方程组有解的条件导出气液两相压力波的色散方程,系统研究了泵间管中低温气液两相压力波的传播速度特性。

1 物理模型

高压补燃液氧煤油发动机通常是由高压推力室、高扬程大功率主涡轮泵、高压大流量富氧燃气发生器、预压涡轮泵、阀门、调节器和总装组件等组成。与常规发动机不同,高压补燃液氧煤油发动机采用低温推进剂、补燃循环方式,主泵前设置预压泵,发生器燃气驱动涡轮后进入推力室进行二次燃烧。其中预压涡轮泵和主泵间的管路为泵间管,见图1。自富氧发生器而来的少量富氧燃气通过反力式涡轮驱动预压涡轮泵对泵间管中液氧预增压,确保主泵入口液氧压力较高而不会发生泵的气蚀。同时,涡轮出口处的少量富氧燃气经集合器通过管壁小孔注入泵间管,在此发生气氧在液氧主路中的混合冷凝过程,并保证进入主泵的流体为全液相而不会发生主泵的气蚀。泵间管长1.05 m,内径0.19 m,进口条件:液氧流量291.4 kg/s,温度100.4 K,压力1.26 MPa;气氧流量5.8 kg/s,温度493 K。

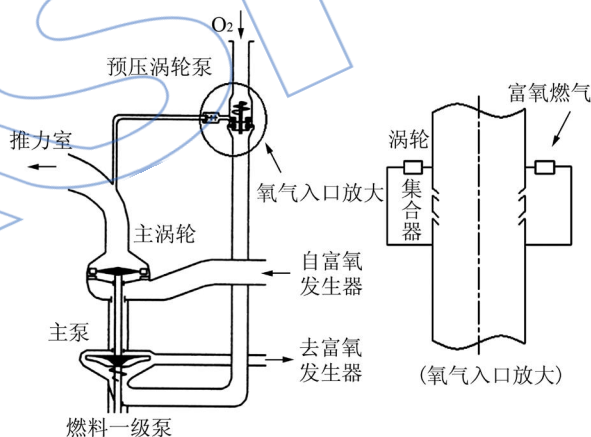


图1 泵间管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the pump pipeline

2 数学模型

2.1 热相变模型

热相变模型是ANSYS CFX所特有的计算气液两相流中冷凝和蒸发的半机理模型,认为气相为弥散相,液相为连续相,两相间存在明显的相界面。当气液两相间存在相变时,通过相界面传递给液相_l、气相_g的总热量分别为

$$Q_l = q_l + \dot{m}_{lg} H_{ls} = h_l (T_s - T_l) + \dot{m}_{lg} H_{ls} \quad (1)$$

$$Q_g = q_g - \dot{m}_{lg} H_{gs} = h_g (T_s - T_g) - \dot{m}_{lg} H_{gs} \quad (2)$$

根据相界面总热量守恒 $Q_l + Q_g = 0$, 即可得到界面质量传递 $\dot{m}_{lg}$ 为

$$\dot{m}_{lg} = \frac{h_g(T_s - T_g) + h_l(T_s - T_l)}{H_{gs} - H_{ls}} \quad (3)$$

从式(3)中可以看出, 两相间的质量传递主要与相界面两侧的传热系数(或热阻)有关. 实际物理过程中, 气相与液相的流速是不同的, 使得液相与相界面间存在相对运动, 是一个强制对流换热, 在此采用颗粒在不可压缩牛顿流体中运动的 Hughmark 换热关系式计算; 而在气侧, 气相和相界面间无相对运动, 仅通过气相导热来传递热量, 且由于气相导热系数较小, 通常认为气侧热阻无穷大, $Nu_g = 0$.

2.2 气液两相压力波传播模型

2.2.1 控制方程

对竖直管路内的气液两相流, 假定气液两相与壁面、气液两相间均处于热力学平衡态; 理想气体, 液相不可压缩. 以 Park 等^[7]提出的整体平均两流体模型为基础, 考虑气液两相间的质量交换, 其一维两流体模型控制方程为

质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_g u_g) = F_g \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1 - \alpha)\rho_l] + \frac{\partial}{\partial x}[(1 - \alpha)\rho_l u_l] = F_l \quad (5)$$

动量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varphi_g u_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_g u_g^2) = & -\frac{\partial}{\partial x}(\alpha p_g) + \\ & u_l F_g + \frac{\partial}{\partial x}[\alpha(\tau_g^r + \tau_g^{re})] + M_{gi} - \\ & 4 \frac{\tau_{lw}}{D} + \varphi_g g \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}[(1 - \alpha)\rho_l u_l] + \frac{\partial}{\partial x}[(1 - \alpha)\rho_l u_l^2] = & \\ & -\frac{\partial}{\partial x}[(1 - \alpha)p_l] + u_l F_l + \\ & \frac{\partial}{\partial x}[(1 - \alpha)(\tau_l^r + \tau_l^{re})] + \\ & M_{li} - 4 \frac{\tau_{lw}}{D} + (1 - \alpha)\rho_l g \end{aligned} \quad (7)$$

式中界面附加动量源项 M_{gi} 和 M_{li} 分别为

$$\begin{aligned} M_{gi} = & -M_{li}^{(nd)} - M_{li}^{(d)} + (\tau_{li}^r + \tau_{li}^{re}) \frac{\partial}{\partial x}(1 - \alpha) + \\ & \frac{\partial}{\partial x}(\alpha \sigma_s) + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha p_{gi}) - \alpha \frac{\partial p_{li}}{\partial x} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} M_{li} = & M_{li}^{(nd)} + M_{li}^{(d)} + p_{li} \frac{\partial}{\partial x}(1 - \alpha) - \\ & (\tau_{li}^r + \tau_{li}^{re}) \frac{\partial}{\partial x}(1 - \alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

2.2.2 封闭条件

1) 应力

忽略气、液各相内部的摩擦剪切应力、液相界面的摩擦剪切应力及气相雷诺应力

$$\tau_g = \tau_l = \tau_{li} = \tau_g^{re} = 0 \quad (10)$$

液相雷诺应力和气-液界面间的雷诺应力分别为

$$\tau_l^{re} = -c_r \rho_l \frac{\alpha}{1 - \alpha} \left| u_r \right| u_r \quad (11)$$

$$\tau_{li}^{re} = -c_r \rho_l u_r^2 \quad (12)$$

忽略气相与壁面间的剪切应力, 液相与壁面之间的剪切应力为

$$\tau_{lw} = \frac{1}{2} f_{lw} \rho_l u_r^2 \quad (13)$$

$$f_{lw} = 0.046 (u_l D / \nu)^{-0.2} \quad (14)$$

平均界面应力源为

$$\alpha_s = -c_a \rho_l u_r^2 \quad (15)$$

式中 $c_r = 0.2$, $c_a = 0.3$.

2) 压力

气相和气液各相界面的压力

$$p_g = p_{gi} = p_{li} = p_l - c_p \rho_l (1 - \alpha) u_r^2 \quad (16)$$

式中 $c_p = 0.25$.

3) 界面附加动量源项

压力波传播是一个瞬态过程, Park 等利用时间平均和空间平均得到非曳力引起的界面动量交换为

$$\begin{aligned} M_{li}^{(nd)} = & c_{vm} \varphi_l \left[\left(\frac{\partial u_{ls}}{\partial t} + u_{ls} \frac{\partial u_{ls}}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] - \\ & c_{m1} \varphi_l u_r \frac{\partial u_r}{\partial x} - c_{m2} \rho_l u_r^2 \frac{\partial \alpha}{\partial x} \end{aligned} \quad (17)$$

气液相间拖曳力引起的界面动量交换为

$$M_{li}^{(d)} = \frac{3}{8} \frac{c_d}{r} \rho_l \alpha \left| u_r \right| u_r \quad (18)$$

式中 $c_{m1} = c_{m2} = 0.1$, 虚拟质量力系数 c_{vm} 和拖曳力系数 c_d 由流型决定.

泡状流

$$c_{vm} = 0.5 \frac{1 + 2\alpha}{1 - \alpha} \quad (19)$$

$$c_d = \frac{4}{3} R_b \sqrt{\frac{g(\rho - \rho_g)}{\sigma}} \left\{ \frac{1 + 17.67[(1 - \alpha)^{1.5}]^{\frac{6}{7}}}{18.67(1 - \alpha)^{1.5}} \right\}^2 \quad (20)$$

弹状流

$$c_{vm} = 3.3 + 1.7 \frac{1 - 2D_b/L_b}{1 - 2D_b/(3L_b)} \quad (21)$$

$$c_d = 9.8(1 - \alpha)^3 \quad (22)$$

式中 D_b 为最长气弹直径, L_b 为最长气弹长度. 根据流动系统的空泡份额, 假定 $\alpha \leq 0.25$ 时为泡状流, $0.25 < \alpha < 0.8$ 则为弹状流^[8].

4) 冷凝速率

冷凝速率由通过液体边界层的导热控制^[8], 其气相冷凝速率为

$$\Gamma_g = -\Gamma_l = -w_q h_{gl}^{-1} \delta p_l \exp[i(\omega t - kx)] \quad (23)$$

式中 $w_q = \omega^{0.5} D_l \lambda^{0.5} \alpha (dT/dp)_{sat} \exp(i\pi/4)$, ω 为扰动角频率, k 为波数, D_l 为热扩散系数.

2.2.3 压力波色散方程

将封闭条件代入控制方程, 利用 $dp_l = \alpha^2 d\rho$ 和 $dp_g = c_g^2 d\rho_g$ 重写控制方程. 小扰动发生后, 对任一变量 $\xi(\alpha, p, u_g, u_l)^T$ 写成

$$\xi = \xi_0 + \delta \xi \cdot \exp[i(\omega t - kx)] \quad (24)$$

将控制方程进行线性化处理, 忽略二阶小量, 得到关于 $(\delta \alpha, \delta p, \delta u_g, \delta u_l)^T$ 的一阶线性齐次方程组. 由齐次方程组有解的条件得到气液两相压力波的色散方程为

$$\begin{vmatrix} A & B & C & D \\ -\rho_l \omega \frac{1-\alpha}{c_l^2} \omega + i \frac{w_q}{h_{gl}} & 0 & -k(1-\alpha)\rho_l & \\ E & F & G & H \\ I & J & H & K \end{vmatrix} = 0 \quad (30)$$

$$\begin{aligned} A &= \left(\rho_g + c_p \varphi_1 \frac{u_c^2}{c_g^2} \right) \omega \\ B &= \frac{\alpha}{c_g^2} \left[1 - c_p (1 - \alpha) \frac{u_c^2}{c_l^2} \right] \omega - i \frac{w_q}{h_{gl}} \\ C &= - \left[\varphi_g k + 2c_p \alpha (1 - \alpha) \rho_l \frac{u_c^2}{c_g^2} \right] \omega \\ D &= 2c_p \alpha (1 - \alpha) \rho_l \frac{u_c^2}{c_g^2} \omega \\ E &= \rho_l u_r^2 k (-\alpha_p + c_r - c_l + c_{m2}) + i \rho_g g \\ F &= -\alpha k \left[1 - (1 - \alpha) \frac{c_p u_c^2}{c_l^2} + c_l \frac{u_c^2}{c_l^2} \right] + i u_r \frac{w_q}{h_{gl}} \end{aligned}$$

$$G = \alpha(\rho_g + c_{vm} \rho_l) \omega - i \frac{3}{4} \frac{c_d}{r} \rho_l a_{lr}$$

$$H = -c_{vm} \varphi_l \omega + i \frac{3}{4} \frac{c_d}{r} \rho_l a_{lr}$$

$$I = \rho_l u_r^2 k [(1 - \alpha) c_p - 2c_r - c_{m2}] - i \rho_l g$$

$$J = -k \left[1 - \alpha + c_r \alpha \frac{u_r^2}{c_l^2} \right]$$

$$K = \rho_l (1 - \alpha + c_{vm} \varphi_l \omega - i \left[\frac{3}{4} \frac{c_d}{r} \rho_l a_{lr} + \frac{4}{D} f_{lw} \rho_l u_l \right])$$

该扩散方程是一个关于波数 k 的复系数一元四次方程, 通过求解可得 4 个复系数根. 其中 2 个根所确定的压力波的波长随着频率的增加变得太短而不能满足将流体当作连续相的条件. 剩下的 2 个根中, 一个根的实部为正数, 表示压力波沿下游方向传播; 另一个根的实部为负数, 表示压力波沿上游的方向传播. 根据这两个根, 即可求得两相压力波的波速为

$$c = \frac{\left| \frac{\omega}{\text{Re}(k)} \right| + \left| \frac{\omega}{\text{Re}(k)} \right|}{2} \quad (31)$$

式中 $\text{Re}(k)$ 表示波数 k 的实部.

3 数值分析及讨论

针对上述建立的热相变模型和气液两相压力波传播模型, 分别采用 ANSYS CFX 10 和 MATLAB 7 数值求解. 以下讨论了泡状流和弹状流中两相压力波速的基本传播规律, 分析了泵间管气氧和液氧的混合冷凝特性, 并在此基础上研究了泵间管气液两相流的压力波传播特性.

3.1 气液两相压力波传播基本规律

3.1.1 泡状流

图 2 展示了空泡份额对泡状流两相波速的影响规律. 从图中可以看出, 两相波速随空泡份额的增加而减小并趋于平缓, 并当空泡份额低于 0.05 时, 两相波速会随着空泡份额的递增陡然下降. 特别接近纯液时波速几乎发生突变. 当空泡份额高于 0.05 时, 两相波速随空泡份额的增加逐步趋于平缓. 这是因为当在液氧中加入少量气泡时, 混合相的密度变化不大, 而可压缩性显著增加, 两相波速显著减小; 当空泡份额增加时, 其混合相密度和可压缩性变化不大, 两相波速趋于平缓. 特别地, 随系统压力减小, 液相密度增加、气相密度减小, 两相可压缩性增大, 气液两相波速减小. 当系统压力为 0.1 MPa 时, 纯液氧中的波速约 905 m/s, 气

氧中的波速约 177 m/s,而在空泡份额 20 %的液氧-气氧混合物中波速仅约 22 m/s.

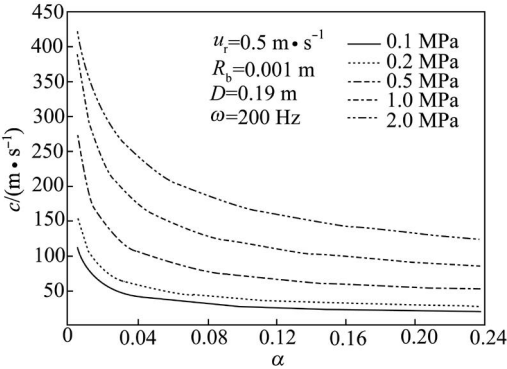


图 2 空泡份额对泡状流两相波速的影响
Fig. 2 Effect of void fraction on pressure wave propagation velocity in bubbly flow

3.1.1.2 弹状流

图 3 展示了扰动角频率为 200 Hz 时空泡份额对弹状流两相波速的影响规律. 从图中可以看出,两相波速随空泡份额增加先略微减小而后逐渐增大,存在两相波速的最小值,并当空泡份额接近 1 时两相波速接近全气相时的波速. 在气液弹状流中,工质流动由气弹和液弹交替组成,随着空泡份额的增加,液弹长度变化不大,但液弹中的空泡份额逐渐增加,导致液弹中波速随空泡份额增加而不断减小;而空泡份额的增加会使气弹长度增长,由于气弹中持液率很低,气弹中的波速几乎维持在声速附近. 因此,在流动方向单位长度内随空泡份额的增加,导致液弹中波速逐渐减小,气弹中波速逐渐增加. 液弹和气弹的这种效应使得两相波速在弹状流区域存在最小值. 特别地,当系统压力增加时,弹状流气液两相波速增加.

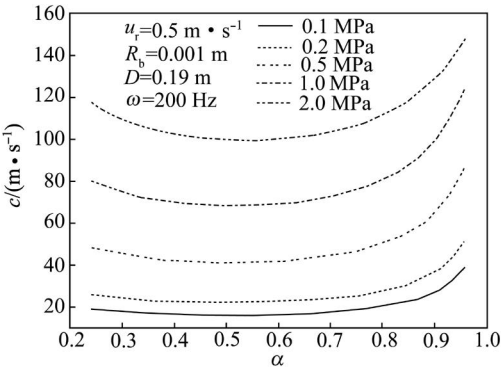


图 3 空泡份额对弹状流两相波速的影响
Fig. 3 Effect of void fraction on pressure wave propagation velocity in slug flow

3.2 泵间管气氧冷凝特性研究

在气液两相流动过程中,弥散相气泡直径的分布是不均匀的,小气泡会发生聚合而形成大的气泡,大气泡也会由于湍流剪切力的作用而发生破碎,具有随机性. 气泡直径是衡量相间接触面积即相间质量、动量和能量交换的重要尺度. 图 4 和图 5 展示了气泡直径为 0.8, 1.0 mm 和 2.0 mm 时,泵间管中截面空泡份额、液氧温度和气、液氧流速等流动参数的分布规律. 从图中可以看出,气泡直径增大时,泵间管在同一高度位置截面的空泡份额增大,液氧温度降低,气氧、液氧速度变大. 当气泡直径为 0.8 mm 和 1.0 mm 时,泵间管出口为全液相,且随气泡直径减小两相长度变短,并在单相区两者流动参数基本相重合;当气泡直径为 2.0 mm 时,泵间管出口为气液两相状态,可能造

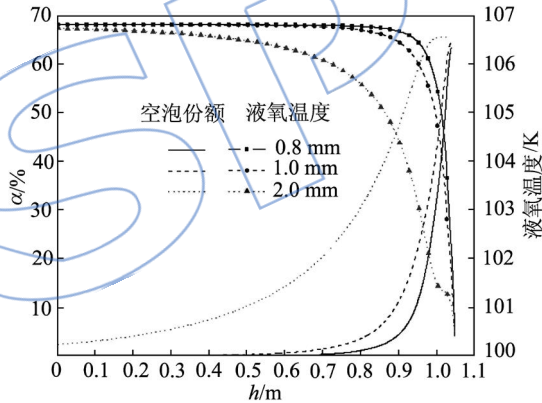


图 4 泵间管空泡份额和液氧温度分布规律
Fig. 4 Axial distribution of void fraction and liquid oxygen temperature in pump pipeline

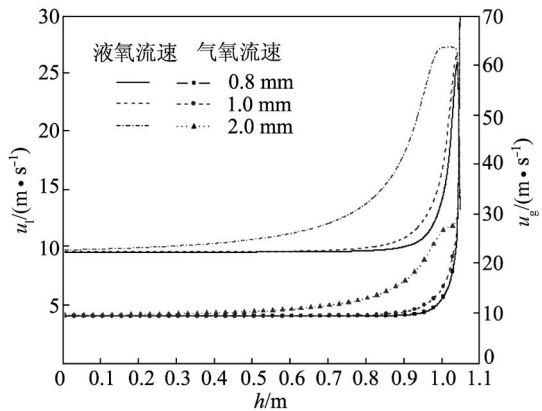


图 5 泵间管气、液氧流速分布规律
Fig. 5 Axial distribution of liquid and gaseous oxygen velocity in pump pipeline

成主泵的气蚀。为了减小两相管流的长度,确保泵间管出口为全液相,在气氧入口管路设计时可采用“多开孔、开小孔”的原则。另一方面,当气氧高速注入液氧时,由于流动阻力很大,气相流速迅速减小,同时气相的动量传递给液氧,使液氧流速迅速增加。而后由于气氧在液氧中的冷凝作用,液氧所占质量份额增加,截面两相平均密度增加,液氧流速减小,而在相间拖曳力作用下,气氧流速也逐渐减小;同时由于气液相间的浮升力作用,稳定时气氧流速略低于液氧流速。

3.3 泵间管气液两相流压力波传播规律

3.3.1 扰动角频率

图 6 展示了气泡直径为 1 mm 时不同扰动角频率对泵间管两相波速的影响规律。其中点划线为沿管流的空泡份额分布规律。从图中可以看出,泵间管两相波速随空泡份额的增加先减小而后在弹状流区域略微增大,且两相波速随扰动角频率增加而增大。同时看到,在入口段弹状流区域空泡份额变化非常显著,呈陡峭趋势,而此时两相波速变化相对较为平缓,基本处在波速的最低值。而在 0.8 m 高度以下时,由于空泡份额低于 0.05,其两相波速陡增,相应的两相波速随空泡份额变化的梯度较大。在 0.3 m 高度以下时,为全液相,波速为全液相波速。

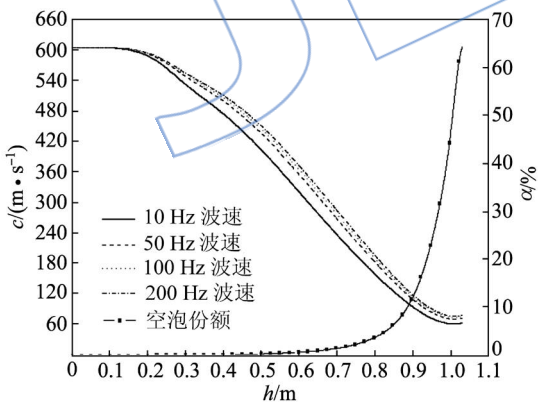


图 6 扰动角频率对泵间管两相波速的影响

Fig. 6 Effect of angle frequency on pressure wave propagation velocity in pump pipeline

3.3.2 气泡直径

图 7 展示了扰动角频率为 200 Hz 时气泡直径(0.8, 1.0, 2.0 mm)对泵间管两相波速的影响规律。从图中可以看出,气泡直径对管流的空泡份额分布、泵间管中的两相波速影响较大。气泡直径增大时,气氧在液氧主路中的冷凝效果减弱,在同

一高度位置截面的空泡份额增大,除进口段外泵间管中两相波速减小。进口段为弹状流,随空泡份额的增加而两相波速增大。

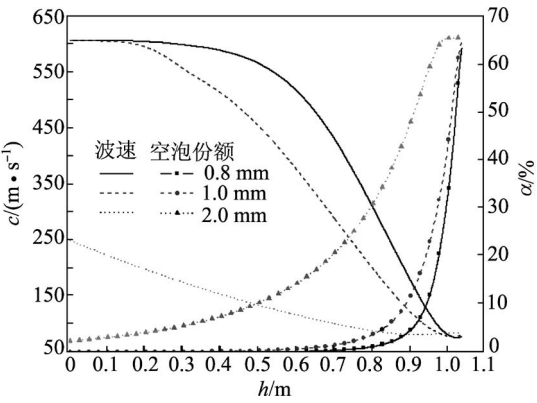


图 7 气泡直径对泵间管两相压力波波速的影响

Fig. 7 Effect of bubble diameter on pressure wave propagation velocity in pump pipeline

3.3.3 气氧流量

图 8 展示了扰动角频率为 200 Hz 时气氧流量对泵间管两相波速的影响规律。气氧、液氧总流量为定值,图中计算工况气氧流量分别为 5.0, 5.8 kg/s 和 6.6 kg/s,相应的液氧流量分别为 292.2, 291.4, 290.6 kg/s。当气氧流量减小时,液氧流量增加,气氧在液氧主路中的冷凝效果增强,在同一高度位置截面的空泡份额减小,两相波速增大。

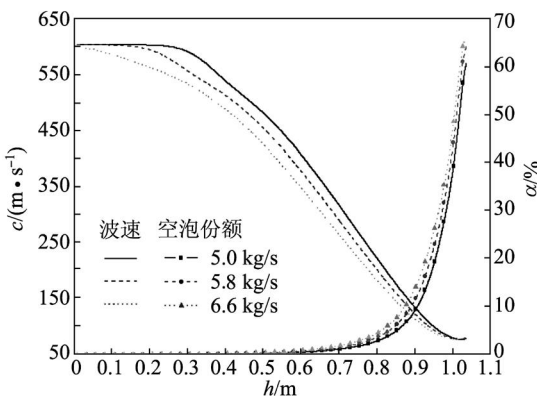


图 8 气氧流量对泵间管压力波波速的影响

Fig. 8 Effect of gaseous oxygen mass flow rate on pressure wave propagation velocity in pump pipeline

3.3.4 进口气氧温度

图 9 展示了扰动角频率为 200 Hz 时进口气

氧温度改变对泵间管两相波速的影响规律,进口气氧温度取 493, 453, 413, 373 K. 其中点划线为沿管流的空泡份额变化规律. 当进口气氧温度减小时,气氧在液氧主路中的冷凝效果增强,在同一高度位置截面的空泡份额减小,两相波速增加.

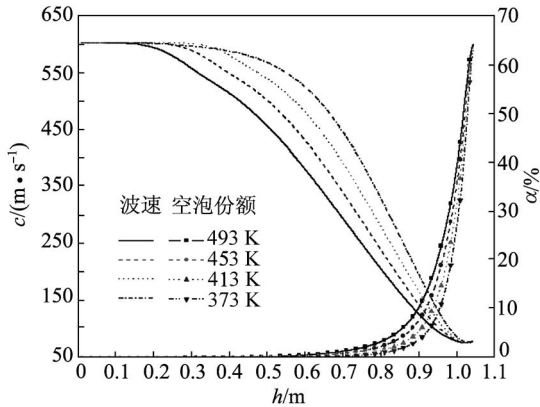


图9 进口气氧温度对泵间管压力波波速的影响

Fig.9 Effect of inlet gaseous oxygen temperature on pressure wave propagation velocity in pump pipeline

4 结 论

本文通过建立热相变模型和气液两相压力波传播模型,分别采用计算软件 ANSYS CFX 10 和 MATLAB 7,数值研究了泵间管中的气液两相压力波传播速度特性,得到了以下结论:

1) 当扰动频率一定时,在泡状流区域气液两相波速随空泡份额的增加而减小并趋于平缓;在弹状流区域气液两相波速随空泡份额的增加先略微减小而后逐渐增大,并在弹状流区域存在两相波速的最小值.

2) 泵间管气液两相波速随空泡份额的增加先减小而后在弹状流区域略微增大,且两相波速随扰动角频率增加而增大. 当气泡直径为 0.8 mm 和 1.0 mm 时,泵间管出口为全液相,而当气泡直

径为 2 mm 时,泵间管出口为两相状态,除进口段外泵间管中两相波速随气泡直径增大而减小. 进口段为弹状流,随空泡份额的增加而两相波速增大.

3) 当气氧流量减小,而液氧流量相应增大时,气氧的冷凝效果增强,沿管流的空泡份额减小,泵间管两相波速增大. 降低进口气氧温度具有相类似的效果.

参考文献:

- [1] Wallis G B. One-dimensional two-phase flow [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1969.
 - [2] Nguyen D L, Winter E R F, Greiner M. Sonic velocity in two phase systems [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1981, 7(3): 311-320.
 - [3] Henry R E, Grolmes M A, Fauske H K. Pressure-pulse propagation in two-phase one- and two-component mixtures [R]. ANL-7792, 1971.
 - [4] Ruggles A E, Scarton H A, Lahey R T. Investigation of the propagation of pressure perturbations in bubbly air/water flows [J]. Journal of Heat Transfer, 1988, 110(2): 494-499.
 - [5] Lee S J, Chang K S, Kim K. Pressure wave speeds from the characteristics of two fluids, two-phase hyperbolic equation system [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1998, 24(5): 855-866.
 - [6] Huang F, Bai B F, Guo L J. A mathematical model and numerical simulation of pressure wave in horizontal gas-liquid bubbly flow [J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(4): 344-349.
 - [7] Park J W, Drew D A, Lahey R T. The analysis of void wave propagation in adiabatic mono-dispersed bubbly two-phase flows using an ensemble averaged two-fluid model [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1998, 24(7): 1205-1244.
 - [8] 徐进良, 陈听宽. 气液两相流中的声速研究 [J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(5): 73-80.
- XU Jinliang, CHEN Tingkuan. Investigation on sound speed in steam-water two-phase mixture [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1994, 28(5): 73-80. (in Chinese)