

水锤作用下管路系统支撑处位移与 输送速度的关系

胡斌梁¹ 阳宁² 唐达生² 周知进¹

(1 湖南科技大学机电工程学院 411201 湘潭; 2 长沙矿冶研究院有限责任公司深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室 410012 长沙)

摘要: 以深海采矿扬矿垂直输送硬管在水力输送过程中的管道为研究对象, 分析了管道系统在水锤冲击下考虑泊松耦合时流体和结构的瞬态响应; 建立了管道系统在瞬变流情况下的流固耦合模型, 获得了弱约束条件下支撑处管道位移随输送速度的变化关系。结果表明: 随着输送速度的提高, 当管道输送系统发生水击现象时, 压力发生剧烈变化, 导致管道支撑点处 X 、 Y 、 Z 三个方向的位移均大幅增加; X 、 Y 方向位移呈现对称性, 由于 Z 方向与轴向一致, 水击发生时其位移变化较小; 随着时间的延续, Z 方向位移变化愈发明显; 当采用较高输送速度输送矿石浆体时, 管道与两相流浆体相耦合的振幅较大。以上结果可为管道设计中的支撑结构设计提供参考。

关键词: 管路系统; 水锤; 支撑点位移; 不稳定

中图分类号: O353.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11776/cjam.31.02.C025

1 引言

在充满流固介质两相流管道系统中, 由于输送流速发生剧烈变化而引起管道系统运动参数(流速、压力、密度、应力等)不仅随空间位置变化, 而且随时间变化。水锤冲击过程中产生的压力波与管道的轴向应力、弯曲应力、剪切应力、扭转应力发生耦合作用。通过管道壁的径向扩张和收缩, 轴向应力波和流体压力波也发生耦合作用。在结合部(弯头, 即直径变化处), 上面提及的波耦合更加剧烈^[1]。

水锤作用下管道与流体耦合过程中, 流体的作用力施加到管道壁上, 管道壁的变形又反过来影响流体运动参数^[2-5]。流固耦合力学的重要特征是两相介质之间的相互作用: 固体在流体载荷作用下会产

生变形或运动; 固体的变形或运动又反过来影响流场形态, 从而改变流动状态; 流动状态的改变又会影响固体的运动和变形, 这种相互作用均能导致管道剧烈振动。一般而言, 流体域和固体域均不可单独求解, 而且无法显式地消去描述流体运动的独立变量及描述固体现象的独立变量。文献[1]首次将刚性管道中水锤的特征线分析方法扩展到弹性管路, 为管道系统瞬态响应的流固耦合分析提供了有效途径。从总体上来看, 流固耦合问题按其求解的复杂程度可分为以下3类^[6]。

- 1) 流固耦合过程中结构仅发生弹性变形(无大位移和转动, 结构完全是线性系统), 如气动弹性问题和水动弹性问题^[7]。
- 2) 流固耦合过程中结构在流场中发生大变形或者经历显著的运动位移, 例如: 叶片在高速旋转过程

基金项目: 国家自然科学基金(51174037); 机械设备健康维护方法与技术湖南省高校科技创新团队支持计划资助

收稿日期: 2013-05-23

修回日期: 2013-11-20

第一作者简介: 胡斌梁, 男, 1965年生, 博士, 湖南科技大学, 教授; 研究方向——机械系统动力学。 通讯作者: 周知进, E-mail: zjzhou@hnust.edu.cn

中的振动问题、高速列车进入隧道产生的气流噪声模拟等^[8]。

3) 流固耦合过程中不同结构间存在相互作用, 或者存在与其它物理量的耦合, 如模拟水下碰撞问题和流固热三场耦合问题时, 热量在相互影响的固体域和流体域间传递^[9]。

解决上述第一类流固耦合问题只需一个高效的、功能强大的流固耦合求解器来实现迭代耦合(弱耦合)或实现直接耦合(强耦合)即可; 而第二类问题的求解不但要求流固耦合求解器兼顾多功能和高效率的要求, 还要具备流场的动网格划分功能; 第三类问题就更加复杂, 需要实现流固耦合过程中流场的动网格和结构的非线性求解, 以及使热量在流场和结构场之间相互传递的功能^[10-12]。

本文研究了深海采矿扬矿垂直输送硬管在水力输送过程中的管道振动情况, 分析了管道系统在水锤冲击下考虑泊松耦合时流体和结构的瞬态响应。对深海管道输送系统来说, 分析流体-结构耦合作用的不同之处在于: ①管道上端是悬挂支撑, 而下端则是近似自由端, 所以管道上端是小位移, 也没有转动, 而下端情况正相反; ②管道内流体输送的是固液两相流, 流体与结构相互耦合作用必须考虑微小固体相的影响。

2 控制方程

对于管道中的流体扰动, 假设^[13]: ①工作介质为理想、无黏的; ②对于动态过程, 不考虑重力的定常力作用; ③相对于管道流体介质中的声波或管壁中的弹性波, 流体的平均速度均可忽略不计; ④仅研究流体扰动沿轴向的变化, 即一维波动问题; ⑤管道流动和冲击波传播未产生空化现象, 即研究单相流动; ⑥略去方程中的二阶无穷小量。

对于管道结构分析, 假设: ①管道材料为线弹性的, 不发生翘曲; ②管道为薄壁的, 不考虑径向惯性力; ③忽略管道中初始应力影响。

采用将整个区域 Ω 分解成流体域 Ω_f 和结构域 Ω_s 的分区方式。由于结构是动的, 流体域边界也是活动的, 所以所采用的流体求解器是基于任意拉普拉斯-欧拉公式离散化理论, 流体域用Navier-Stokes方程进行描述。流体与管道结构边界随时间变化表示为集成方程, 则有^[14]

$$\int_{S_f} \rho_f (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) \cdot \mathbf{n} dS_f = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_f} \rho_f \mathbf{v} dV_f + \int_{S_f} \rho_f (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS_f \\ = \int_{V_f} \rho_f \mathbf{F}_f dV_f + \int_{S_f} \mathbf{T}_f \cdot \mathbf{n} dS_f \end{aligned} \quad (2)$$

式中: V_f 为表面积为 S_f 的流体域 Ω 的任意体积; $\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}$ 为法向速度; t 为时间; ρ_f 为流体密度; \mathbf{F}_f 为外部体积力; \mathbf{v}_g 为结构壁可能位移考察其体积时的表面速度。

柯西应力张量 \mathbf{T}_f 定义为不可压缩牛顿流体的张量, 表达式为

$$\mathbf{T}_f = \mu_f (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - p \mathbf{I} \quad (3)$$

式中: p 为压力; μ_f 为流体运动黏度; ∇ 为向量梯度; \mathbf{I} 为特征张量。

与有固定边界和面的流体域相比, 边界运动包括了式(1)和式(2)中由于网络运动引进的流体修正项 F^{cort} , 且有

$$F^{cort} = \int_{S_f} \rho_f \mathbf{v}_g \cdot \mathbf{n} dS_f \quad (4)$$

上述流体修正项可由空间守恒定律确定^[5], 则有

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_f} dV_f = \int_{S_f} \mathbf{v}_g \cdot \mathbf{n} dS_f \quad (5)$$

采用拉格朗日坐标描述结构方程, 其中: 空间或欧拉坐标用 \mathbf{x} 表示; 材料或拉格朗日坐标用 \mathbf{X} 表示; 在起始设置中, 材料坐标也看作空间坐标 ($t=0: \mathbf{x} = \mathbf{X}$)。结构材料当前位置 \mathbf{x} 可描述为^[15]

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t) \quad (6)$$

位移 \mathbf{u} 是材料点起始位置与目前位置之间的差, 则有

$$\mathbf{u}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t) - \mathbf{X} \quad (7)$$

其中: $\mathbf{F}_s = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}}$, \mathbf{F}_s 为变形梯度。在允许大位移情况下, 通过第二皮奥拉-基尔霍夫应力 \mathbf{S}_s 推导出动量平衡方程为

$$\nabla \cdot (\mathbf{F}_s \mathbf{S}_s^T) + \rho_s \mathbf{f}_s = \rho_s \ddot{\mathbf{x}} \quad (8)$$

式中: $\ddot{\mathbf{x}} = \frac{\partial^2 \mathbf{x}(\mathbf{X}, t)}{\partial t^2}$ 为加速度; ρ_s 为结构固体的密度; \mathbf{f}_s 为作用在结构固体上的外部体积力。

将圣维南-基尔霍夫材料看作线弹性, 则 \mathbf{S}_s 表示为^[16]

$$\mathbf{S}_s = \lambda_s \text{tr}(\mathbf{E}) \mathbf{I} + 2\mu_s \mathbf{E} \quad (9)$$

而格林-拉格朗日应变张量 \mathbf{E} 为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} (\mathbf{F}_s^T \mathbf{F}_s - \mathbf{I}) \quad (10)$$

根据流固耦合动力学特性, λ_s 和 μ_s 为两个兰姆常数, 可用杨氏模量 E_s 和泊松比 ν_s 表示为

$$E_s = \frac{\mu_s(3\lambda_s + 2\mu_s)}{\lambda_s + \mu_s}, \quad \nu_s = \frac{\lambda_s}{2(\lambda_s + \mu_s)} \quad (11)$$

流固耦合作用(Fluid-Structure Interaction, FSI)问题的关键在于描述合适的边界和界面条件。结构固体边界 Γ_s 和流体边界 Γ_f 的普通条件是作为单个固体和流体来描述。对于流固界面 Γ_i 的速度和应力, 约束条件为

$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v}_b, \quad \mathbf{T}_f \cdot \mathbf{n} = \mathbf{T}_s \cdot \mathbf{n} \quad (12)$$

式中 \mathbf{v}_b 为界面速度。

则柯西应力张量可表示为

$$\mathbf{T}_s = \mathbf{F}_s \mathbf{S}_s \mathbf{F}_s^T / \det \mathbf{F}_s$$

3 三维建模

3.1 管道控制模型的建立

几何模型采用ADINA-native建模, 模型中考虑断层为正断层情况, 将约束加在管道一侧的上端, 断层活动产生的位移荷载加在管道不受约束的另一侧的底面。管道单元采用9节点壳单元, 单元划分采用9节点规则壳单元, 网格密度采用定长值, 设定流固耦合边界, 并可显示荷载、约束、网格划分情况, 管道立体模型及网络划分如图1所示。

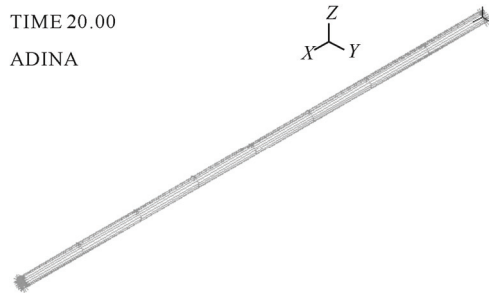


图1 管道模型
Fig.1 Pipe's model

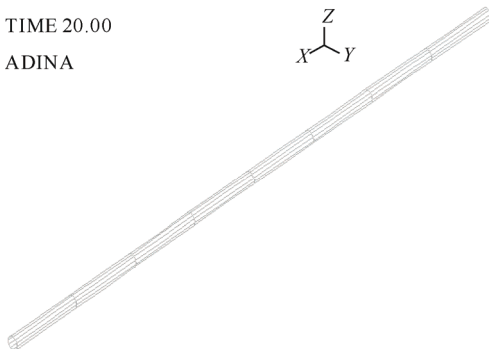


图2 流体模型
Fig.2 Fluid's model

3.2 流体模型的建立

进行特殊流体假定, 将Flow Dimension设定为三维流体, 然后在流体外表面和管道接触面上施加流固耦合边界条件, 如图2所示。流体采用瞬变稍微可压缩流体, 流体单位采用三维流体单元(3D fluid element), 考虑流体以一定变流速流动, 故施加流速荷载。网格密度划分采用在不同方向上设定网格数量, 单元划分采用4节点规则三维流体单元。

4 实例

为了模拟扬矿硬管在深海采矿中遇到的水击问题, 在湖南道县深度为 219m、直径为 2.2m(水深 213m)的竖井内, 建立了高度为 224m、提升管道内径为 203mm 的竖井采矿提升试验系统, 以此验证采矿系统工艺设计及管道相关参数选取(如管道振动、支座位移等)的合理性。分析过程中选取每根管道长度为 5m, 管材弹性模量为 210GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 7800kg/m³。管内流体参数选取与管外水相同, 固液两相流密度为 1030kg/m³, 水动力黏性系数为 1.003×10⁻³Pa·s, 重力加速度为 9.81m/s²。当管道系统以不同的输送速度输送矿石过程中, 由于断电或机械故障突然停泵, 导致水锤的产生, 此时需要研究上端支座处管道位移的变化规律。

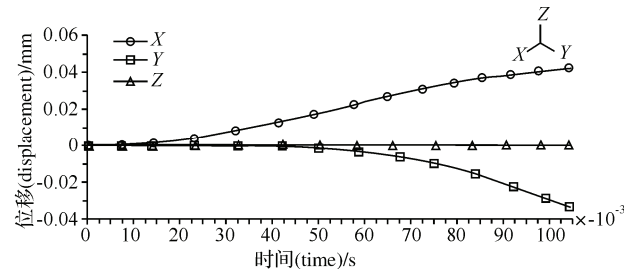


图3 输送速度为 1.5m/s 时 X、Y、Z 方向位移变化
Fig.3 X、Y、Z displacements with 1.5m/s fluid speed transporting

从图 3 可以得出: 以 1.5m/s 输送速度输送两相流时突然停泵发生水击情况, 管道支座处 X、Y、Z 三个方向的位移随着水击波速来回传播, 振动幅度不断加剧, 位移也逐渐增大, 并且振动并不是在原轴线中心位置振动, 而是逐渐偏离原来平衡位移; Z 方向位移值随着时间推移, 几乎没有偏移其平衡位置; Y 方向位移波动在时间上滞后 X 方向位移波动, 开始时轴向 Y、Z 方向位移变化很小, 几乎为零, 到 0.045s 后 Y 方向位移才有微幅波动。

从图 4 可以得出: 以 2.0m/s 输送速度输送两相流时突然停泵发生水击情况, 管道支座处 X、Y、Z

三个方向位移逐渐增大,并且振动并不是在原轴线中心位置振动,而是逐渐偏离原来平衡位移;Y方向最大位移大于X方向位移,且随着时间的推移,两个方向波峰与波谷逐渐同步;开始时轴向Z方向位移变化很小,几乎为零,到1.0s后Z方向位移才有微小起伏。虽然三个方向位移做周期性波动,幅度不断增大,但是周期没有改变,且与水击传播周期一致,均为0.35s。

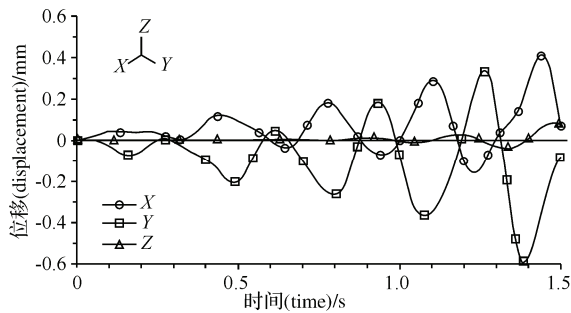


图4 输送速度为2m/s时X、Y、Z方向位移变化
Fig.4 X、Y、Z displacements with 2m/s fluid speed transporting

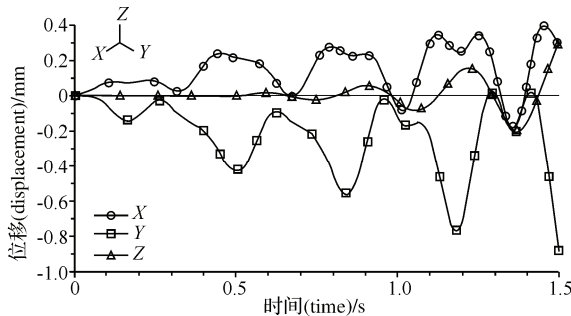


图5 输送速度为2.5 m/s时X、Y、Z方向位移变化
Fig.5 X、Y、Z displacements with 2.5m/s fluid speed transporting

当输送速度分别为2.5m/s和2.0m/s两种工况下发生水击时,从图4和图5可以明显看出:X方向位移仍呈锯齿形波动;X和Y方向位移起伏具有较好地对称性,但是X方向位移波动幅度总是小于Y方向位移波动幅度,这主要是由于泵侧向安装的原因,且水击产生的管道振动远大于泵产生的管道振动,因而泵工作导致的振动可以忽略不计。但是泵的重量会导致X方向振动位移减小,所以泵的自重不能忽略;Z方向位移值与趋势也没有明显变化。

在输送速度为3m/s发生水击时,不但X方向位移出现锯齿形波动,Y方向位移也出现了锯齿形起伏波动,这并不是泵振动引起的,而是由强非线性振动,引起管道系统发生颤振,在振动过程中出现分岔造成的;Z方向位移值幅度变大,幅度波动相位也发生明显改变。

通过比较图7与图3~图6可以看出:随着输送速度的提高,当管道输送系统发生水击现象时,压

力起伏变化剧烈,导致管道支撑点处X、Y、Z三个方向位移均大幅增加,图5中X方向第一个波峰最大位移为0.21mm,图6中X方向第一个波峰最大位移为0.24mm,图7中X方向第一个波峰最大位移为0.72mm;X、Y方向位移呈现对称性,而Z方向由于与轴的方向一致,水击发生时其位移变化较小;随着时间的推移,Z方向位移变化也逐渐增大,波动性愈发明显;当采用较高输送速度输送矿石浆体时,管道与两相流浆体相耦合后振动的振幅较大;此外,X、Y方向位移波动呈现显著不规则性,波峰和波谷越来越不明显,说明管道颤振加剧。

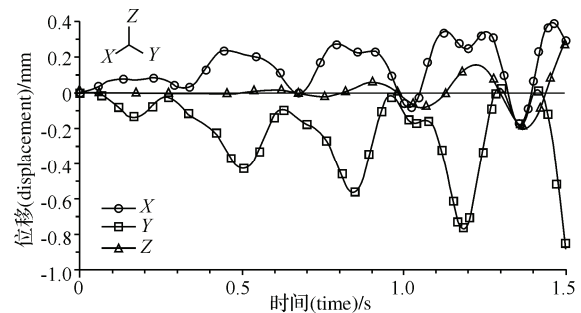


图6 输送速度为3m/s时X、Y、Z方向位移变化
Fig.6 X、Y、Z displacements with 3m/s fluid speed transporting

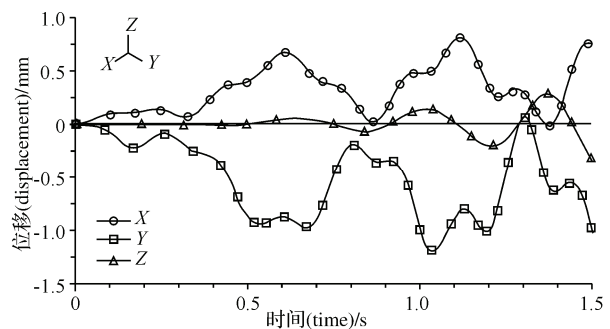


图7 输送速度为3.5m/s时X、Y、Z方向位移变化
Fig.7 X、Y、Z displacements with 3.5m/s fluid speed transporting

5 结论

本文通过数值模拟对垂直管道固液两相流在不同输送速度情况下水击引起的管道振动情况进行了研究,并分析了垂直管道输送系统的稳定性,获得了不同输送速度下发生水击振动时支座处位移波动的时间历程曲线,得到以下结论。

- 1) 管道支撑点处位移波动周期与水击传播周期一致,均为0.35s。
- 2) 在不同输送速度下管道输送系统发生水击振动时随着时间的推移,管道支撑点处位移波动幅度越来越剧烈。
- 3) 当输送速度达到3m/s及以上时,水击引起管道

系统非线性振动加剧, 出现了系统不稳定情况, 说明其强非线性系统的特征值满足: $\text{Re}(\lambda) > 0$; $\text{Im}(\lambda) \neq 0$ 。此时管道系统产生颤振(振幅不断增长的谐振)。

以上结论为深入分析管道输送系统, 特别是弱约束垂直输送的固体-液体两相流系统支撑设计提供技术参考。

参 考 文 献 (References)

- [1] Wiggert D C, Hatfield F J. Analysis of liquid and structure transients in piping by the method of characteristics[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1987, 109(2): 161-165.
- [2] Lavooij C S W, Tijsseling A S. Fluid-structure interaction in compliant piping systems[C]//Proceedings of the 6th BHRA International Conference on Pressure Surges. Cambridge, UK: British Hydromechanics Research Association, 1989: 85-100.
- [3] Degroote J, Bathe K J, Vierendeels J. Performance of a new partitioned procedure versus a monolithic procedure in fluid-structure interaction[J]. *Computers and Structures*, 2009, 87(11/12): 793-801.
- [4] Niklasch C, Herrmann N. Nonlinear fluid-structure interaction calculation of the leakage behaviour of cracked concrete walls[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(9): 1628-1640.
- [5] Paidoussis M P, Li G X. Pipe conveying fluid: A model dynamical problem[J]. *Journal of Fluid and Structures*, 1993, 7(2): 137-204.
- [6] Valencia A, Baeza F. Numerical simulation of fluid-structure interaction in stenotic arteries considering two layer nonlinear anisotropic structural model[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, 36(2): 137-142.
- [7] Yoon K H, Kim J Y, Lee K H, et al. Control rod drop analysis by finite element method using fluid-structure interaction for a pressurized water reactor power plant[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(10): 1857-1861.
- [8] Khanafer K, Berguer R. Fluid-structure interaction analysis of turbulent pulsatile flow within a layered aortic wall as related to aortic dissection[J]. *Journal of Biomechanics*, 2009, 42(16): 2642-2648.
- [9] Zhou Y, Zhang Q L, Liu Z H. Numerical simulation of Fluid-Structure Interaction for wind-induced dynamic response of Jinan Yellow River Cable-Stayed Bridge in cantilever state[C]//Proceedings of the 2009 International Conference on Engineering Computation. Hong Kong, China: ICEC, 2009.
- [10] Chee C Y, Lee H P, Lu C. Using 3D fluid-structure interaction model to analyse the biomechanical properties of erythrocyte[J]. *Physics Letters A*, 2008, 372(9): 1357-1362.
- [11] Bluestein D, Alemu Y, Avrahami I, et al. Influence of micro-calcifications on vulnerable plaque mechanics using FSI modeling[J]. *Journal of Biomechanics*, 2008, 41(5): 1111-1118.
- [12] Cai Y, Zhao Z. Modeling the dynamic process of tsunami earthquake by liquid-solid coupling model[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2008, 21(6): 598-607.
- [13] Tang D, Yang C. Patient-specific MRI-Based 3D FSI RV/LV/Patch models for pulmonary valve replacement surgery and patch optimization[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2008, 130(4): 41-101.
- [14] Bathe K J, Ledezma G A. Benchmark problems for incompressible fluid flows with structural interactions[J]. *Computers and Structures*, 2007, 85(11/12/13/14): 628-644.
- [15] Jin Qiao, Li Xin, Sun Ning, et al. Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platform[J]. *Marine Structures*, 2007, 20(4): 238-254.
- [16] Dailey H L, Ghadiali S N. Fluid-structure analysis of microparticle transport in deformable pulmonary alveoli[J]. *Aerosol Science*, 2007, 38(3): 269-288.