

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.01.009

含气水锤弯管动态响应影响因素研究

苏文献, 郭佳伟, 施卿海

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:水锤工况下会产生极大的压力波幅值, 不仅干扰管路系统的稳定运行, 还可能损坏管路, 对管路系统的稳定和安全运行产生巨大危害。以某工程实例为研究对象, 借助 CFD 与 CSD 结合的流固耦合方法研究含气水锤作用下弯管的动态响应。采用单一变量法, 研究水中气体体积分数、管道壁厚、水的初始流速、阀门关闭时间对流体压力、管道上应力及管道振幅的影响。研究表明: 初始流速的降低、管道壁厚的增加、阀门关闭时间的延长均会缓解管道的应力状况, 降低振动幅度。

关键词:含气水锤; 弯管; 流固耦合; 计算流体动力学(CFD); 计算结构动力学(CSD)

中图分类号:TQ022.125 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)01-0041-05

Analysis of Influence Factors of Dynamic Response of Water Hammer with Gas Elbow

SU Wenxian, GUO Jiawei, SHI Qinghai

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Under the condition of water hammer, great pressure wave amplitude can be generated, which not only interferes with the stable operation of the pipeline system, but also may damage the pipeline and cause great harm to the stability and safe operation of the pipeline system. Taking a certain engineering example as the subject of the study, the dynamic response of elbow under the influence of water hammer with gas through solid-liquid coupling method combining CFD and CSD was studied. Single variable method was used to study the influence of gas volume fraction, pipe thickness, the initial flow rate of water, valve closing time on water pressure and stress and amplitude of elbow. It shows that: the reduce of the initial flow rate, the increase of the thickness of the pipe and the valve closing time will relieve the stress of the pipe and reduce the amplitude of the vibration.

Keywords: water hammer with gas; elbow; fluid-solid coupling; CFD (Computational Fluid Dynamics); CSD (Computational Structure Dynamics)

管网中阀门的快速开启或关闭将引起管道内流场的急剧变化, 这种不稳定的状态涉及到管内流体动能和势能之间的相互转换, 同时伴随着压强的交替上升和下降; 流体压强作用在管道、阀门或其他管道元器件上好像锤击一样, 将这种有压非恒定流称为水锤现象, 简称“水击”或者“水锤”^[1]。目前, 水中气体对水锤的影响还没有达成统一认识, 对部分管道中的气液两相流瞬变流动情况还需要进一步研究。CFD(计算流体动力学)能够对复杂流场进行准确的数值计算, CSD

(计算结构动力学)能够轻易求解结构动态响应问题, 将两者结合的流固耦合方法, 能够有效地求解多相流作用下管道动态响应问题。流固耦合方法研究方面, 1977年, Walker 和 Phillips^[2]提出时域内的6方程, 将泊松耦合作用、轴向运动和周向运动考虑在内。1990年, Lavoje 和 Tijsseling^[3]采用 MOC 和 MOC-FEM 方法计算时域内14方程。1999年, Tijsseling 和 Heinsbroek^[4]对阀门快速关闭系统进行计算, 用 MOC 法计算流体域, 用有限单元法计算结构域。同年,

收稿日期:2017-05-10; 修回日期:2017-09-20

第一作者简介:苏文献(1967), 男, 山东栖霞人, 博士, 副教授, 主要从事化工装备结构与强度、数值计算、复合材料方面研究。

E-mail: digestsu@163.com

Shalaby 和 Younan^[5] 使用 ABAQUS 对阀门快关工况下的弯管模型进行数值计算,他将几何非线性和材料非线性考虑在内。在含气水锤研究方面,1989年,龚时宏^[6]分析了水中掺入空气对管道水力特性的影响,并提出防止水中掺入气体的若干方法。1995年,姚朝晖等^[7]采用 VOF 算法对空泡溃灭水锤进行数值计算,得出与试验结果相符的计算结果。2006年,梁兴等^[8]创建变波速条件下的气体均匀流模型,并对其特性进行分析。2000年,张立翔等^[9]在 MOC 方法的基础上,提出一种分析水锤诱发作用下输流管道流固耦合振动的频谱分析法。2004年,曹亮^[10]推导出输流管道系统轴向和横向振动的线性微分方程,用于描述输流管道动态特性的流固耦合现象。2006年, Bergant 等^[11]尝试用不同数学模型对含气水锤的发生过程进行数值计算。2012年,胡跃华等^[12]利用 ANSYS-CFX 双向流固耦合方法对某厂稀甲醇管道进行受力分析,得到管道的变形及受力情况。弯管作为管道系统的重要组成部分,对其在含气水锤作用下的动态响应的数值计算研究,对了解管路系统瞬态特性,提高系统运行稳定性与可靠性,避免水锤工况下产生超常流体压力、管道结构应力以及振动等具有突出的理论及工程意义。同时,对弯管的水锤防护具有理论和实践性指导。

1 研究内容

以某工程实例为研究对象,借助 CFD 与 CSD 结合的流固耦合方法研究含气水锤作用下弯管的动态响应。课题组对基于下面建立的模型进行影响因素研究,研究水中气体体积分数、管道壁厚、水的初始流速及阀门关闭时间对含气水锤作用下弯管的动态响应的影响。弯管上的应力和振幅是造成管道破坏的关键因素,流体中压力对两者有着显著的影响。分析各个影响因素对流体压力、管道应力及管道振幅的影响规律。笔者将下面的计算模型当作参考模型,通过改变该模型中的相应参数建立对照计算模型;再通过对照计算模型与参考模型的对比,研究各个参数对各个响应结果的影响规律。

2 数值计算模型

如图 1 所示,取实际工程管道系统中包含弯头的一截管道,弯管两端通过筒支支撑方式支撑,流体以 3.57 m/s 的流速从左往右流经弯管;重力方向竖直向下。形成稳流后,弯管右端阀门关闭,形成水锤效应。管道厚度为 19 mm,具体结构尺寸见图 1。管道材料为美标 ASTM A1018 Grade60,水的密度为 1 000 kg/m³,水中气体体积分数为 0.36%。

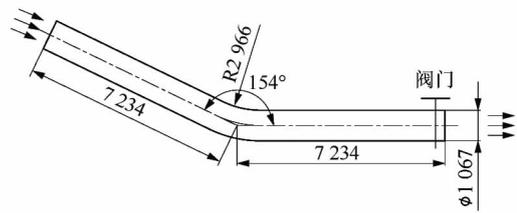


图 1 分析案例示意图

Figure 1 Analysis of case diagram

3 含气水锤作用下弯管动态响应因素影响

3.1 水流中气体体积分数对水锤现象动态响应的影响

水中含有气体时,气体会在压力波动时影响流体的压力场,从而影响管道的动态响应。本节在其它物理模型及参数不变的情况下,根据实际情况设置对比组试验模型的气体体积分数分别为:0.00%,0.36%,0.72%和 1.40%。

3.1.1 气体体积分数对流体域的影响

流体最大压力出现在弯头处,以弯管处流体域中心处作为研究对象,绘制该点处流体压力-时间变化图,如图 2 所示。

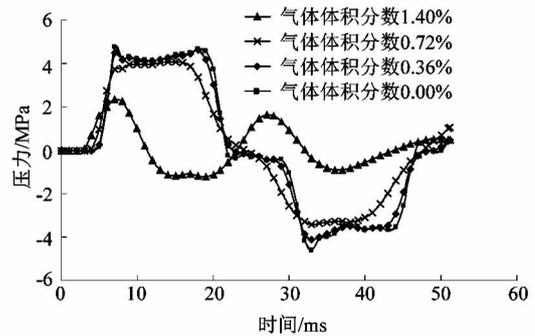


图 2 弯管中心处流体压力-时间变化图

Figure 2 Fluid pressure-time variation at center of elbow

从图 2 可以看出,气体体积分数分别为 0.00% 和 0.36% 时,水中压力的时间变化过程基本相同。气体体积分数为 0.36% 时,水中气体对流体压力场的影响很小。随着气体体积分数的升高,峰值压力逐步降低,压力变化周期也逐步缩短,峰值压力稳定的时间也逐步缩短。

3.1.2 气体体积分数对管道压力及振幅的影响

各时刻管道系统上最大 Von Mises 应力主要发生弯头底部,弯管振幅最大点主要在弯头顶部。为了便于弯管动态响应规律的对比,本小节仅对弯头顶部应力、弯头底部振幅进行对比分析,2 点位置如图 3 所示。

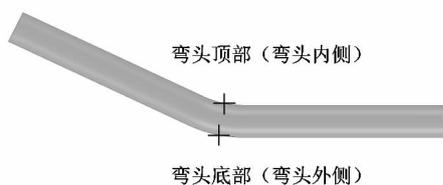


图3 管道弯头处顶部和底部2点位置
Figure 3 Two points at top and bottom of elbow

弯头中心截面底部 Von Mises 应力-时间变化图如图4所示。

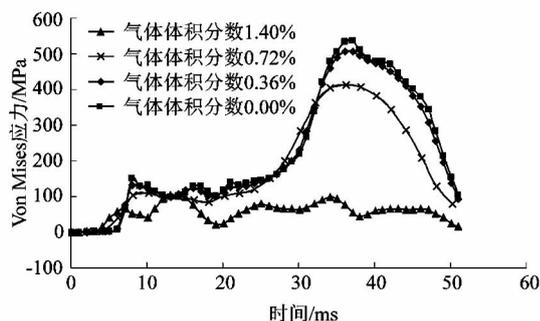


图4 弯头中心截面底部 Von Mises 应力-时间变化图
Figure 4 Von Mises stress-time variation at bottom of elbow center cross section

从图4可以看出,随着气体体积分数的增加,水锤压力降低,管道上 Von Mises 应力也逐步降低, Von Mises 应力的波动周期也随着气体体积分数的增加急剧缩短。

弯头中心截面顶部振幅-时间变化图如图5所示。

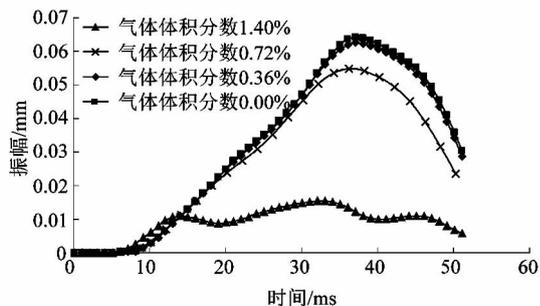


图5 弯头中心截面顶部振幅-时间变化图
Figure 5 Amplitude-time variation of top of elbow center section

从图5可以看出,随着气体体积分数的增加,管道振动幅度降低。

3.2 管道壁厚对水锤现象动态响应的影响

管道壁厚,对管道的刚度具有影响作用。由于含气水锤作用,流体压力场的巨变,引起管道较大的振动

与变形。管道巨大的运动与变形,反过来会对流体流动情况进行影响。本节在其它物理模型及参数不变的情况下,根据实际情况设置对比组试验模型的管道壁厚分别为15,17和19 mm。

3.2.1 不同管道壁厚对流体域的影响

不同管道壁厚的情况下,弯头中心点处流体压力-时间变化图如图6所示。

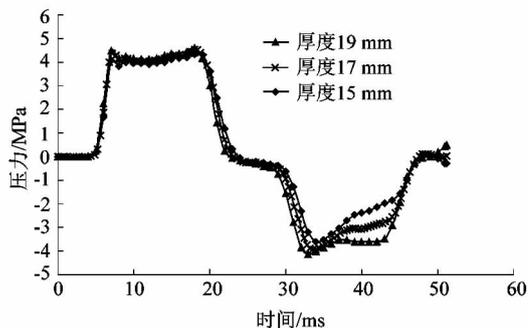


图6 弯头中心点处流体压力-时间变化图
Figure 6 Fluid pressure-time variation at center of elbow

从图6可以看出,管道壁厚变化基本不影响弯头中心点处压力的变化历程。壁厚的不同,影响压力变化峰值。壁厚越厚,峰值压力越大。这是因为:管道刚度越大,承受水锤压力后变形量更小,管道吸收的能量更少,转换为流体的弹性压缩能能量更多,形成的压力峰值就越大。

3.2.2 不同管道壁厚对管道压力及振幅的影响

不同管道壁厚的情况下,弯头中心截面底部 Von Mises 应力-时间变化图如图7所示。

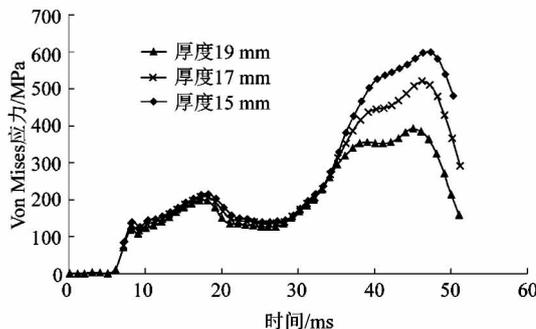


图7 弯头中心截面底部 Von Mises 应力-时间变化图
Figure 7 Von Mises stress-time variation at bottom of elbow center cross section

从图7中可以看出,应力值的变化随弯头中流体的压力波动先波浪上升后下降的趋势,并在每个下半周期达到峰值。最初阶段,不同壁厚的管道上的 Von

Mises 应力相差不大。之后,三者之间的差别逐渐明显。在 $t=0.047\text{ s}$ 附近,各个厚度下的弯管均达到峰值,壁厚越厚刚度越高,峰值应力越低。

弯头中心截面顶部振幅-时间变化图如图 8 所示。

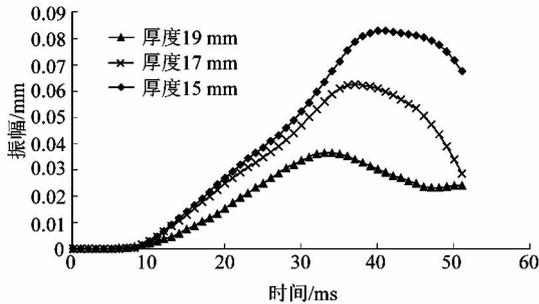


图 8 弯头中心截面顶部振幅-时间变化图
Figure 8 Amplitude-time variation of top of elbow center section

从图 8 可以看出,管道壁厚对振幅变化趋势没有影响,均呈现不断攀升再降低的趋势。壁厚越薄,刚度越低,振幅就越大。

3.3 初始流速对水锤现象动态响应的影响

根据刚性理论,水锤效应产生的最大水锤压力与初始流速有着直接的关系。

3.3.1 初始流速对流体域的影响

不同初始流速的情况下,弯头中心点处流体压力-时间变化图如图 9 所示。

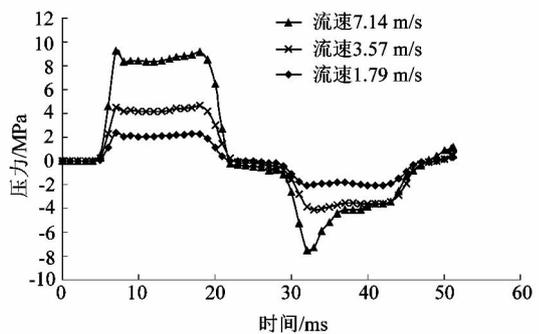


图 9 弯管中心处流体压力-时间变化图
Figure 9 Fluid pressure-time variation at center of elbow

从图 9 中可以看出,流速不影响水锤压力的变化周期及趋势,但会影响水锤压力的大小。流速越大,产生的水锤压力越大。

3.3.2 初始流速对管道压力及振幅的影响

不同初始流速的情况下,绘制弯头中心截面底部 Von Mises 应力-时间变化图如图 10 所示。

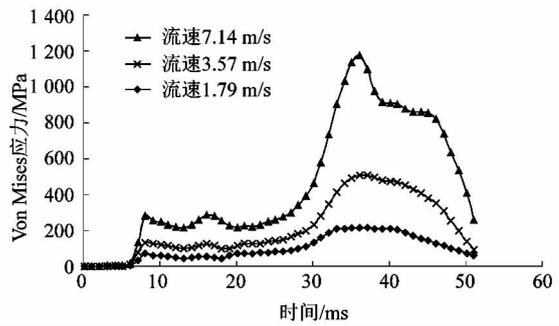


图 10 弯头中心截面底部 Von Mises 应力-时间变化图
Figure 10 Von Mises stress-time variation at bottom of elbow center cross section

从图 10 中可以看出,初始流速越大,系统整体的初始能量越大,阀门关闭后,产生转换为水锤压力的能量越大,进而使管道形成更大的 Von Mises 应力。流速大小不改变应力变化的整体趋势。

弯头中心截面顶部的振幅-时间变化图如图 11 所示。

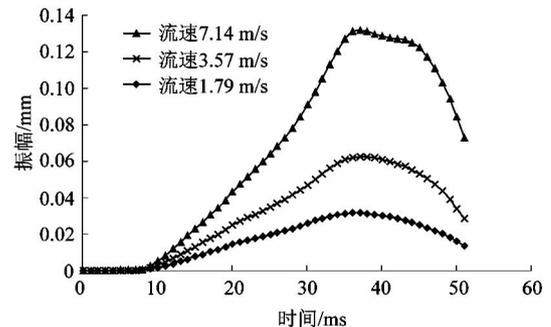


图 11 弯头中心截面顶部振幅-时间变化图
Figure 11 Amplitude-time variation of top of elbow center section

从图 11 中可以看出,流速越大时,引起管束振动的能量越大,振幅也越大。振幅的整体变化趋势均为先增大,再降低。

3.4 阀门关闭时间对水锤现象动态响应的影响

阀门关闭时间的缓急直接影响水锤压力峰值的大小,必定会进一步影响管道动态响应特性。

3.4.1 不同阀门关闭时间对流体域的影响

不同阀门关闭时间的情况下,弯头中心点处流体压力-时间变化图如图 12 所示。

从图 12 中可以看出,随着阀门关闭时间的延长,峰值压力不断降低。随着阀门关闭时间的增加,弯管中心处流体压力波动曲线周期也不断加长。阀门关闭时间越短,峰值压力稳压时间越长。

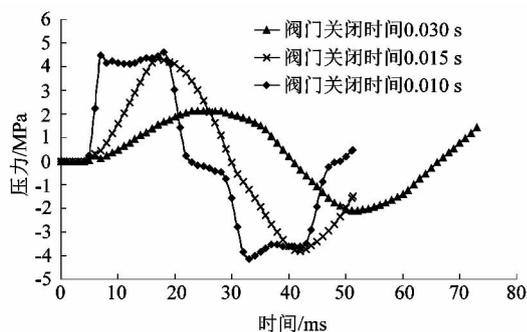


图 12 弯管中心处流体压力-时间变化图

Figure 12 Fluid pressure-time variation at center of elbow

3.4.2 不同阀门关闭时间对管道压力及振幅的影响

不同阀门关闭时间的情况下,弯头中心截面底部 Von Mises 应力-时间变化图如图 13 所示。

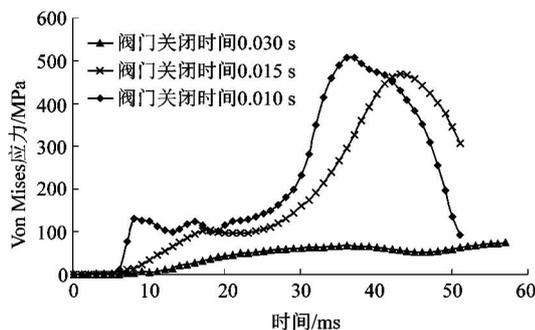


图 13 弯头中心截面底部 Von Mises 应力-时间变化图

Figure 13 Von Mises stress-time variation at bottom of elbow center cross section

从图 13 可以看出随着阀门关闭时间的增加,弯管的 Von Mises 应力峰值急剧减小,变化也越来越平滑,峰值压力的达到时间也越长。

弯头中心截面顶部振幅-时间变化图如图 14 所示。

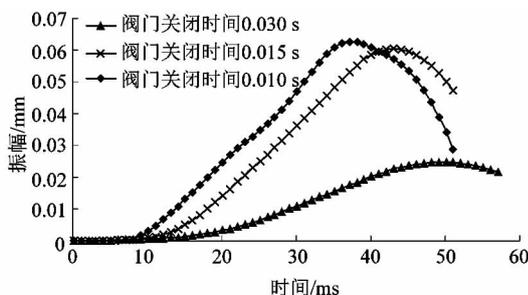


图 14 弯头中心截面顶部振幅-时间变化图

Figure 14 Amplitude-time variation of top of elbow center section

从图 14 可以看出,随阀门关闭时间的增加,振幅峰值降低。同时,阀门关闭时间越大,达到峰值所需时

间越长。

4 结论

课题组对基于建立的模型进行影响因素研究,得出如下结论:

1) 阀门关闭后,管内流体往复流动,压力过程呈类正弦变化。管道上应力最大点应力呈分段上升趋势,在下半个周期内达到最大值。弯管振动最大点的振幅,则呈现逐渐上升再回落的趋势;

2) 气体体积分率在 0.00% ~ 1.40% 内,流体中气体体积分率越高,形成的水锤峰值压力也越低,弯管上 Von Mises 应力也越小,振动幅度也越小;

3) 管道壁厚越大,形成的水锤压力越大,管道上的 Von Mises 应力越小,振动幅度越小;

4) 管道中的初始流速越大,形成的水锤压力越大,管道上的 Von Mises 应力越大,振动幅度越大;

5) 阀门关闭时间越长,形成的水锤压力越小,管道上的 Von Mises 应力越小,振动幅度越小。

参考文献:

- [1] 杨成. 基于 CFX 的输水管道水锤现象的数值研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013: 1.
- [2] WALKER J S, PHILLIPS J W. Pulse propagation in fluid-filled tubes [J]. Journal of applied mechanics, 1977, 44(1): 31-35.
- [3] TIJSELING A S, LAVOOIJ C S W. Waterhammer with fluid-structure interaction[J]. Applied scientific research, 1990, 47(3): 273-285.
- [4] TIJSELING A S, HEINSBROEK A G T J. The influence of bend motion on waterhammer pressures and pipe stresses[C]//Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Conference. San Francisco, California; ASME, 1999: 1-7.
- [5] SHALABY M A, YOUNAN M Y A. Effect of internal pressure on elastic-plastic behavior of pipe elbows under in-plane bending moments[J]. Journal of pressure vessel technology, 1999, 121(4): 400-405.
- [6] 龚时宏. 水中掺气对管道水流水力特性的影响及减轻其危害的措施[J]. 灌溉排水学报, 1989(4): 16-22.
- [7] 姚朝晖, 叶宏开, 王学芳, 等. 空泡溃灭水锤的 VOF 计算方法[J]. 原子能科学技术, 1995, 29(1): 20-23.
- [8] 梁兴, 张进国, 申一洲. 含有空气释出的水锤分析与计算[J]. 水科学与工程技术, 2006(2): 21-22.
- [9] 张立翔, 黄文虎, TIJSELING A S, 等. 水锤诱发弱约束管道流固耦合振动频谱分析[J]. 工程力学, 2000, 17(1): 1-12.
- [10] 曹亮. 输流管道流固耦合振动特性分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004: 14-23.
- [11] BERGANT A, SIMPSON A R, TIJSELING A S. Water hammer with column separation: a historical review[J]. Journal of fluids & structures, 2006, 22(2): 135-171.
- [12] 胡跃华, 蒋诚航, 闫怀磊, 等. 流固耦合作用下固支输液管道有限元分析[J]. 化工机械, 2012, 39(2): 190-193.