

重力带压长距离输水系统瞬态分析

何 化 曹 亮 张永红

中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘 要:在地形条件允许的情况下,设计了 1 条长 70 km,最大高差 210 m 的重力带压长距离输水管道,该输水管道起端高于末端,无泵等动力源,系统设计压力为 2.5 MPa。为解决工程中无动力输水系统的可靠性问题,使用 KYPIPE 模拟分析了极端工况,发现整个系统末端节点出现了大幅升压,达 355.34 m 水柱(1 m 水柱=9.8 kPa),而最大负压出现在系统起端,达到了 -10 m 的水汽化压力。在末端设置了水击泄压阀,沿线安装 31 台空气阀来保护系统,实施后系统安全稳定运行。

关键词:长距离输水;瞬态分析;水锤防护

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.05.003

0 前言

石油天然气工程中长距离输水较为普遍,对输水管道进行流体瞬态影响分析多集中在以泵为动力系统的工况,而无人工动力,仅利用高差长距离输水的工况分析较少。流体瞬态影响分析在设计中至关重要,是工程建成后安全稳定运行的重要数据支撑,同时也具有较大的经济价值。

流体瞬态影响分析,以弹性水柱理论、动量及质量守恒定律为理论基础,主要采用特征线法数值模拟对停泵水锤、开关阀水锤及断流弥合水锤进行计算分析^[1-5]。

流体瞬态即水锤发生时,分为正压水锤和负压水锤,是定边界条件下的非稳定流动,具有波动时间短暂,能量转换复杂及危害巨大等特点,正压力超过设计值的 1.5 倍时即设定为爆管警戒压力^[6]。

近年来采用拉格朗日波特征法进行数值计算求解^[7-8],作为 PIPE 2008 水力模拟分析软件的基础计算方法,在工程中已经得到成功应用,并获得美国土木工程师学会的认证。

国内主要采用有限元法对水流变形时的水锤进行升压分析和三维模拟,以及特征线法为基础的 QBasic 水锤数值模拟程序^[9-11]。

水锤的防护主要针对不同原因产生的压力波动,采取抑制或释放措施,主要利用空气阀系统、水力控制阀及压力罐等设备,通过特征线法对拟采取的措施进行复核验证^[12-14],以达到预期效果。

在我国西南地区某石化炼化工程外排水管道项目中,实施了 1 条最大高差 210.3 m,长 70 km,设计压力为 2.5 MPa 的重力带压长距离输水管道。该管线系统无泵等动力源,起端高于末端。基于 PIPE 2008 水力模拟分析软件瞬态计算进行设计,已安全稳定运行 3 年多。

1 系统建模

1.1 建模基础条件

本工程管路瞬态模型建立满足:管道内长期保持满管状态,管路系统无任何动力源,瞬态分析只考虑阀门启闭瞬间失效,阀门动作前系统均处于稳态工况。

1.2 模型建立

1.2.1 模型参数

本工程厂外排水管线起末点高差 210.3 m,利用起末点地势高差产生的势能输送污水,在管线起点和中途均不设加压设施。上游污水处理厂排出的达标污水量正常情况下 431.4 m³/h,最高日平均流量约 2 000 m³/h,稳

收稿日期:2016-05-13

基金项目:中国石油天然气集团公司重点工程资助项目(Z 2009-6 E)

作者简介:何 化(1979-),男,重庆人,工程师,硕士,主要从事水处理、输送及消防等设计研究的工作。

态计算后,以 $1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 作为正常输送工况的运行方式。

由于采用碳钢管内涂层防腐,海曾威廉斯公式管道内壁摩阻系数 C 值取 130。管径为 $\Phi 813\text{ mm} \times 7.1\text{ mm}$, 水锤波速为 $1\,018\text{ m/s}$ 。

1.2.2 主要控制节点

为便于分析,线路中各控制点均设置编号。

AV-1 为上游水池出口保护阀;

AV-2 为下游水库入口调流调压阀;

N-258 为系统最不利点。

2 稳态工况

输水系统正常运行工况为管道直径 DN 800,末端调流调压阀开度 51%,摩阻系数 C 值取 130,流量为 278.57 L/s ,即 $1\,000\text{ m}^3/\text{h}$,流速 0.55 m/s 。

在上游紧急工况流量达到 $2\,000\text{ m}^3/\text{h}$,输水系统流量为 555.62 L/s ,末端调流调压阀开度 83%。

稳态正常工况下,末端阀门开启、关闭,采用防止超压和负压发生的开关阀时间为匀速 60 s 。

在上述条件下,系统可安全稳定运行。

3 极端工况下水锤分析及防护

3.1 末端阀突然失效关闭

当输水系统在最高日平均流量 $2\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 正常运行时,下游阀门 AV-2 突然失效,1 s 内完全关闭,此时在 AV-2 进口端出现压力骤升,AV-2 在 1 s 内关闭系统水击包络线见图 1。

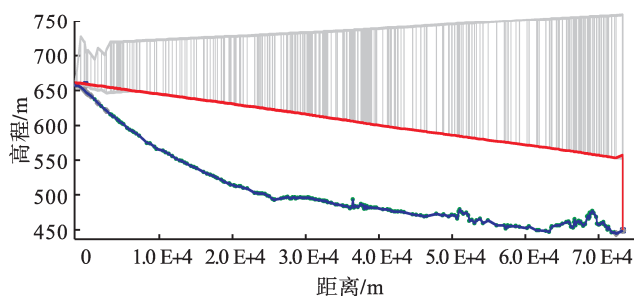


图1 AV-2在1s内关闭系统水击包络线

节点 N-258(里程 70 580.9 m,高程 444.1 m)和阀门 AV-2 进口端压力变化曲线见图 2~3。

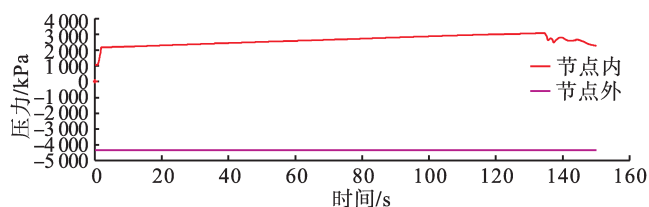


图2 AV-2在1s内关闭节点N-258压力变化曲线

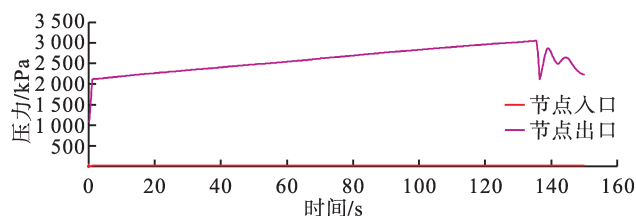


图3 AV-2在1s内关闭进口端压力变化曲线

从图 2~3 可以看到,在整个输水系统末端节点 N-258 和阀门 AV-2 进口端出现了大幅升压,分别达 355.34 m 水柱和 341.51 m 水柱,已经接近输水系统爆管阈值 375 m 水柱。

这对输水系统安全造成很大威胁,所以在节点 N-258 处安装水击泄压阀对系统进行保护,在安装水击泄压阀后,AV-2 再次在 1 s 内关闭时,系统水击包络线见图 4。

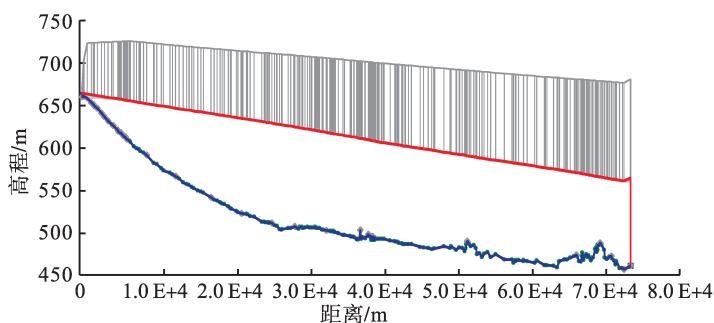


图4 AV-1始终开启安装水击泄压阀后 AV-2 在 1 s 内关闭系统水击包络线

节点 N-258 和阀门 AV-2 进口端压力变化曲线见图 5~6。

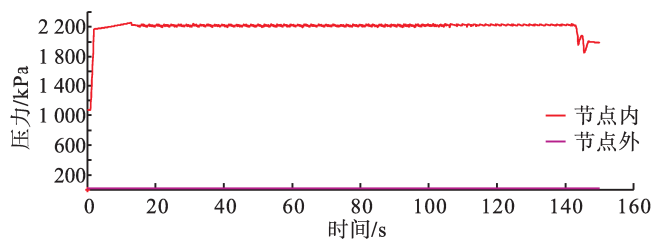


图5 AV-1始终开启安装水击泄压阀后 AV-2 在 1 s 内关闭节点 N-258 压力变化曲线

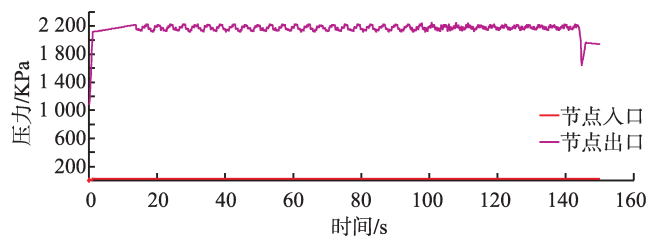


图6 AV-1始终开启安装水击泄压阀后 AV-2 在 1 s 内关闭 AV-2 进口端压力变化曲线

从图 5~6 可以看到,整个输水系统最大压力点为节点 N-258-SDO 和阀门 AV-2 进口端,压力分别为 230.00 m 水柱和 230.02 m 水柱。这仅高于输水系统起点至终点

高差 20 m 水柱,远低于爆管压力,说明安装水击泄压阀后系统在该极端工况下是安全的。

3.2 末端阀突然失效开启

输水系统管路内充满水,上游关闭停运,下游阀门 AV-2 突然失效,1 s 内完全开启,而上游进水阀门 AV-1 仍然关闭,此时在 AV-1 出口及后续共 30 个节点出现负压,其中有 25 个节点负压达到 -10 m 水柱,出现汽化,AV-1 始终关闭 AV-2 在 1 s 内开启系统压力包络线见图 7。

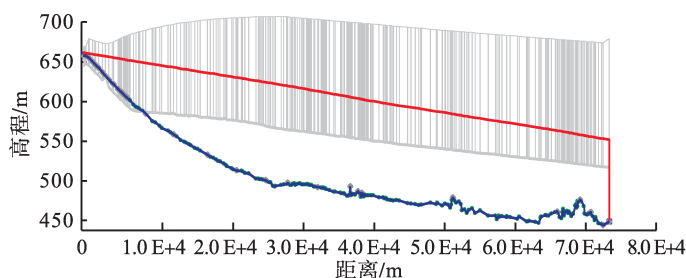


图 7 AV-1 始终关闭 AV-2 在 1 s 内开启系统压力包络线

阀门 AV-1 进口端及典型节点 N-11(里程 3 845.2 m, 高程 622.9 m)、N-15(里程 4 947.3 m, 高程 612.6 m)、N-18(里程 5 512.1 m, 高程 607.7 m) 和 N-23(里程 5 943.8 m, 高程 603.6 m) 压力变化曲线见图 8~9。

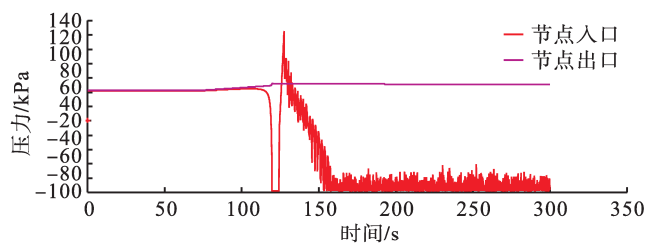


图 8 AV-1 始终关闭 AV-2 在 1 s 内开启 AV-1 压力变化曲线

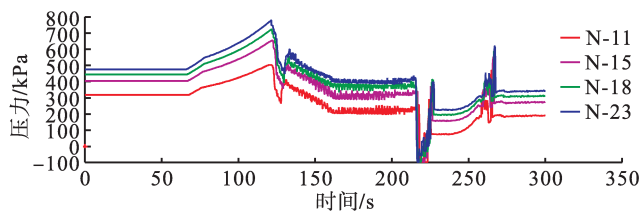


图 9 AV-1 始终关闭 AV-2 在 1 s 内开启节点 N-11、N-15、N-18 和 N-23 压力变化曲线

从图 8~9 可以看到,整个系统在阀门 AV-1 出口端及节点 N-11、N-15、N-18 和 N-23 出现大幅降压,最低降至 -10.0 m 水柱,整个过程压力起伏大,低压时会出现气蚀。这对输水系统安全造成很大威胁,所以在沿线负压节点附近安装空气阀。

各阀门安装后,AV-1 仍然关闭,AV-2 再次在 1 s 内开启时,系统压力包络线见图 10。

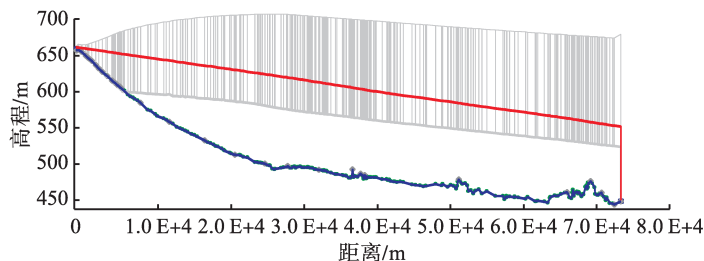


图 10 安装空气阀后 AV-1 始终关闭 AV-2 在 1 s 内开启系统压力包络线

阀门 AV-1 出口端及节点 N-11、N-15、N-18 和 N-23 压力变化曲线见图 11~12。

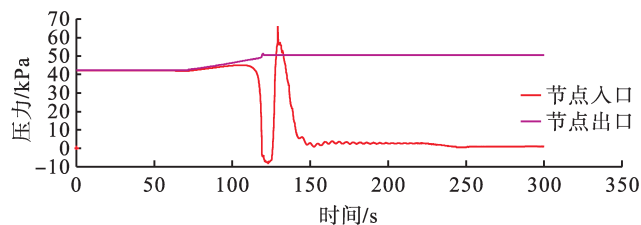


图 11 安装空气阀后 AV-1 始终关闭 AV-2 在 1 s 内开启 AV-1 出口端压力变化曲线

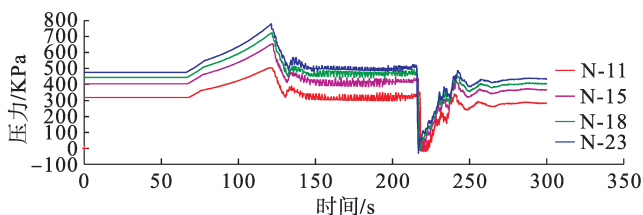


图 12 安装空气阀后 AV-1 始终关闭 AV-2 在 1 s 内开启节点 N-11、N-15、N-18 和 N-23 压力变化曲线

从图 10~11 可以看到,AV-1 出口端最低压力为 -0.87 m 水柱,而节点 N-11、N-15、N-18 和 N-23 最低压力分别为 -2.07 、 -0.83 、 -1.44 、 -2.39 m 水柱,这些负压高于液体汽化压力(-9 m 水柱),不会发生液体气化,说明安装空气阀后输水系统在该极端工况下也是安全的。

3.3 水锤防护措施

为了防止极端工况发生时对输水管路系统造成严重破坏,需要在阀门 AV-1 后各负压节点处设置空气阀共计 31 台,以防止极端工况时出现严重负压;在节点 N-258 处需设置水击泄压阀 1 台,以防止极端工况时,系统出现严重升压,造成爆管。

4 结论

在长距离输水工程设计中,根据地形特点通过调整系统静设备的设置位置和形式,采用无动力长距离重力带压输送方式,分别对最佳运行工况、上游最不利工况和极端工况进行模拟分析,分别找出最合理的运行条件,通过瞬态模拟,得到长距离输水系统合理设置水锤

防护措施后,长距离输水系统可以考虑采用无动力输送方式,从而可大量节省工程的一次性投资费用。

参考文献:

- [1] Bergant A, Simpson A R, Tijsseling A S. Water Hammer with Column Separation: A Historical Review [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, 22 (2): 135 - 171.
- [2] Tian X W, Sua G H., Wang G P, et al. Numerical Simulation and Optimization on Valve Induced Water Hammer Characteristics for Parallel Pump Feed Water System [J]. *Annals of Nuclear energy*, 2008, 35 (12): 2280 - 2287.
- [3] Afshara M H, Rohani M. Water Hammer Simulation by Implicit Method of Characteristic [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85 (12): 851 - 859.
- [4] 蒋 劲,李继珊,翁晓红,等. 小浪底电站技术供水回水系统水锤防护研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(4): 81 - 83.
Jiang Jing, Li Jishan, Weng Xiaohong, et al. Water Hammer Protection for Technical Water Supply and Backwater System at Xiaolangdi Hydropower Station [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2002, 30 (4): 81 - 83.
- [5] 谢水波,张浩江,汪兴华,等. 停泵水锤电算中的几个问题[J]. *给水排水*, 2000, 26(2): 64 - 66.
Xie Shuibao, Zhang Haojiang, Wang Xinghua, et al. Problems in Computing for Water Hammer Caused by Pump Failure [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2000, 26 (2): 64 - 66.
- [6] 金 锥,姜乃昌,汪兴华,等. 停泵水锤及其防护[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
Jin Zhui, Jiang Naichang, Wang Xinghua, et al. Analysis and Preventing Measures of Pump Stop Water Hammer [M], Beijing: China Building Industry Press, 2004.
- [7] Wood D J. Water Hammer Analysis Essential and Easy (and Efficient) [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131 (8): 1123 - 1131.
- [8] Jung B S, Boulos P F, Wood D J. A Lagrangian Wave Characteristic Method for Simulating Transient Water Column Separation [J]. *Journal-American Water Works Association*, 2009, 101 (6): 64 - 73.
- [9] 谢水波,邱长军,张浩江,等. 取水泵站停泵水锤电算技术研究[J]. *给水排水*, 2000, 26(6): 69 - 71.
Xie Shuibao, Qiu Changjun, Zhang Haojiang, et al. Computer Based Calculation of Water Hammer in Water Intake Station [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2000, 26 (6): 69 - 71.
- [10] 杨远东,邓志光. 停泵水锤计算及其防护措施[J]. *中国给水排水*, 2000, 16(5): 29 - 32.
Yang Yuandong, Deng Zhiguang. Calculation of Water Hammer Caused by Pump Stop and Related Prevention Measures [J]. *China Water & Wastewater*, 2000, 16 (5): 29 - 32.
- [11] 顾 赞,曹 源,金先龙. 青草沙原水输水工程关阀水锤仿真研究与规律分析[J]. *给水排水*, 2009, 35(5): 53 - 56.
Gu Yun, Cao Yuan, Jin Xianlong. Simulation Research and Regularity Analysis of Valve Shutoff Water Hammer in Shanghai Qingcaosha Drinking Water Source Transportation Engineering [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35 (5): 53 - 56.
- [12] Ramalingam D, Lingireddy S, Wood D J. Using the WCM for Transient Modeling of Water Distribution Networks [J]. *Journal-American Water Works Association*, 2009, 101 (2): 75 - 89.
- [13] Lingireddy S, Wood D J, Zloczower N. Pressure Surges in Pipeline Systems Resulting from Air Release [J]. *Journal-American Water Works Association*, 2004, 96 (7): 88 - 94.
- [14] Tijsseling A S. Water Hammer with Fluid-Structure Interaction in Thick-Walled Pipes [J]. *Computers and Structures* 2007, 85 (11 - 14): 844 - 851.